



Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2011 – 2012

Het effect van elektrische stimulatie op de groei van  
jonge tomaatplanten bij verschillende  
nutriëntenconcentraties van de voedingsoplossing

**Stijn OLYSLAEGERS**

Promotoren: Prof. dr. ir. Kathy STEPPE en Prof. dr. ir. Korneel RABAEY

Tutor: MSc. Jan ARENDS

Masterproef voorgedragen tot het behalen van de graad van  
Master in de bio-ingenieurswetenschappen: MILIEUTECHNOLOGIE





## Woord vooraf

Na vier jaren op de schoolbanken voornamelijk te hebben moeten luisteren, was de tijd gekomen om zelf aan de slag te gaan in het lang gevreesde thesisjaar. Als jonge onderzoeker verliep dit uiteraard met vallen en opstaan. De waarheid gebied mij te zeggen dat ook de aanloop van dit thesisjaar niet van een leien dakje verlopen is. Ik wil hierbij zeker Lieven bedanken voor zijn begrip toen ik vaststelde dat mijn oorspronkelijke onderwerp me uiteindelijk niet zo goed lag. Ik ben dan ook tevreden dat deze masterscriptie door jou zal gelezen en beoordeeld worden.

Uiteraard verdienen mijn promotoren een bijzonder woord van appreciatie. Prof. Steppe (“zeg maar Kathy”) zou ik eerst en vooral willen bedanken voor het alsnog te willen bijsturen van mijn onderwerp. Ook tijdens het jaar was het steeds weer een plezier om met u een babbeltje te slaan op één van je beroemde ‘get-together parties’ door je steeds goedlachse en spontane manier van omgaan. Ook op wetenschappelijk vlak wist u steeds weer nieuwe denk pistes aan te boren en gegevens te koppelen waar niemand anders zou zijn opgekomen. Het was steeds weer even stressen om met de resultaten naar uw bureau te gaan, maar hoe vaak kwamen we niet buiten met honderden nieuwe ideeën en verse energie om er tegenaan te gaan. Bedankt prof. Rabaey om mij alsnog laattijdig aan boord te hijsen en mij te laten genieten van je kennis inzake alles wat elektrochemie betreft. Het was voor mij ontzettend boeiend om de interactie tussen de ‘levensloze’ elektrochemie en de plantenwereld te onderzoeken.

Een thesis schrijven aan twee verschillende vakgroepen blijkt toch een unieke ervaring te zijn geweest. Uiteraard brengt dit verplichtingen met zich mee bij beide vakgroepen. Deze vallen echter in het niets vergeleken met de talrijke voordelen die dit met zich meegebracht heeft: verschillende visies, de complementaire apparatuur, een grote kennissenkring enz. maakten dit het zeker waard! Mijn dank gaat dan ook uit naar alle mensen op het labo van plantecologie en LabMET. Zonder de technische vaardigheden van Geert, Philip en Erik zou het opzetten van deze proef een zware klus zijn geweest. Ik wil ook alle andere doctoraatsstudenten willen bedanken voor hun bereidheid om steeds een handje te willen helpen waar nodig. Zeker Tom, voor mijn planten water te geven tijdens de blok en Veerle, voor haar onuitputbare hulpverlening, verdienen een speciale vermelding. Ook voor de mensen van de secretariaten van beide vakgroepen een welgemeende merci voor de vele tientallen enveloppen die ik heb mogen ‘lenen’ en voor de welgemeende interesse.

Ik ben uiteraard niet de enige persoon die dit jaar zijn thesis heeft geschreven. Ik wil al mijn vrienden bedanken die mij bij deze thesis gesteund hebben en dan in het bijzonder mijn vrienden Laura, Lies, Jarinda en Annelies. De vaak hilarische, maar soms toch ook serieuze momenten met jullie in het ‘thesiskot’ op’t derde zal ik zeker missen.

Een speciale plaats in dit dankwoord is weggelegd voor mijn tutor Jan. Bedankt Jan voor al de kennis en inzichten die je met mij hebt gedeeld en voor je Nederlandse kordaatheid die je steeds weer aan de dag legde. Bedankt ook voor je geduld en begrip wanneer het soms wat minder vlot liep dan verwacht.

Gent, juni 2012

Stijn Olyslaegers

## Samenvatting

Planten worden continu blootgesteld aan natuurlijke elektrische velden en stromen. Elektrocultuur omvat praktijken die deze abiotische factoren trachten te wijzigen met het oog op het verbeteren van plantengroei, -ontwikkeling, en/of -opbrengst. Niettegenstaande de gedachte om planten elektrisch te stimuleren reeds eeuwenoud is, blijkt consistentie in de reeds gevonden resultaten ver te zoeken. Positieve effecten op plantengroei t.g.v elektrocultuur konden evenmin éénduidig verklaard worden.

In het kader van deze scriptie werd onderzocht of tomaatplanten (*Solanum Lycopersicum* L. cv 'Dirk') elektrisch gestimuleerd konden worden op een manier die praktisch toepasbaar zou zijn in commerciële serres. Naast het proberen aantonen van het 'proof of principle' en onderzoek naar de mogelijke oorzaken hiervan, werd ook aandacht besteed aan de mogelijkheden die deze techniek zou kunnen bieden met het oog op het terugdringen van het nutriëntengebruik in de intensieve serreteelten.

Tomaatzaailingen werden gedurende 7 weken geteeld op rotswol waarbij enkel vegetatieve groei beoogd werd. De planten werden in de verschillende groepen behandeld met verschillende nutriëntenconcentraties van de voedingsoplossing (0, 25, 50 en 100%). Het opgelegde elektrische veld over het wortelstelsel bedroeg in alle gevallen  $0,18 \text{ V.cm}^{-1}$ , wat een gemiddelde stroomdichtheid gaf van  $\pm 1 \text{ }\mu\text{A.cm}^{-2}$ . Koolstofvilt, aangebracht boven- en onderaan het rotswolsubstraat, deed daarbij dienst als elektrode. Ter controle werd onderzocht of het al dan niet aanbrengen van dit vilt of een omkering in polariteit van het opgelegde veld van invloed waren op de resultaten. In een laatste experiment werd van een substraatteelt overgeschakeld op een zuivere hydroponische teelt waarbij het opgelegde veld  $0,10 \text{ V.cm}^{-1}$  bedroeg.

Enkel in de najaarsuitvoering van het eerste experiment konden significant positieve effecten worden waargenomen voor het opgelegde elektrische veld. De 50%-testplanten scoorden bovendien voor wat betreft de droge bovengrondse biomassa even goed als de 100%-controleplanten ( $5,1\pm 0,4$  t.o.v.  $5,4\pm 0,2$  g) en vertoonden zelfs een significant lagere specifieke bladoppervlakte ( $387\pm 9$  t.o.v.  $512\pm 33 \text{ g.cm}^{-2}$ ), interessant voor telers in de praktijk. Noch de polariteit van het opgelegde veld, noch het vilt op zich bleken van invloed te zijn op de plantengroei. In de zuiver hydroponische proef produceerden de testplanten significant minder droge biomassa dan de controleplanten ( $0,74\pm 0,43$  t.o.v.  $1,87\pm 0,39$  g), vermoedelijk door de hogere stroomdichtheid (tot  $\pm 8 \text{ }\mu\text{A.cm}^{-2}$ ). De testplanten vertoonden daarbij symptomen die gelijkaardig waren als deze bij een magnesiumdeficiëntie. Visueel konden echter geen schadeverschijnselen aan het wortelstelsel worden waargenomen.

Een wijziging in de actieve ionenopname, waarbij de opname van  $\text{Mg}^{2+}$  in toenemende mate wordt bemoeilijkt door de belangrijkste antagonist K<sup>+</sup> en  $\text{Ca}^{2+}$ , werd voorgesteld als plantgebonden reactie op een elektrische behandeling. Bij de substraatteelten konden echter de opgebouwde ionen- en pH-gradiënten o.i.v. het elektrische veld, niet worden uitgesloten als externe groeibevorderende factor.

De sterke verschillen in het serremicroklimaat tussen voor- en najaar werden aangeduid als de voornaamste reden waarom test- en controleplanten bij de experimenten uitgevoerd met rotswol in het voorjaar niet significant verschilden.

Een praktische implementatie van de gehanteerde techniek blijkt echter niet door de elektriciteitskost (0,018  $\text{€}\cdot\text{are}^{-1}$ ), maar wel door de voorlopig hoge elektrodekost (125  $\text{€}\cdot\text{are}^{-1}$ ) nog niet economisch interessant te zijn. Bij een halvering van de standaard toegediende nutriëntenhoeveelheid aan de elektrisch gestimuleerde planten, waarbij de opbrengst in deze thesis onveranderd bleef, kan immers slechts 88,5  $\text{€}\cdot\text{are}^{-1}$  uitgespaard worden. Verder onderzoek moet uitwijzen of door middel van elektrische stimulatie hogere gewasopbrengsten mogelijk zijn bij toediening van de huidige nutriëntenoplossingen. Indien dit zo is, kan elektrocultuur op korte termijn wél financieel rendabel zijn voor commerciële telers.

## Abstract

Plants are continuously exposed to naturally occurring electrical fields and currents. Elektroculture encloses practices and techniques which focus on the alteration of these abiotic factors, in an attempt to improve plant growth, development and/or yield. Although the idea of electrical stimulation of plants already exists a few centuries, the lack of consistency in the results is remarkable. Moreover, up till now, positive effects on plant growth as a result of the application of elektrocultural techniques could not be explained unambiguously.

The research in this thesis focused on the question whether tomato plants (*Solanum Lycopersicum* L. cv 'Dirk') could be electrically stimulated in a manner that would be practically feasible in commercial greenhouses. Besides the attempt to demonstrate the 'proof of principle' and investigate possible mechanisms, attention was paid to the possibilities of this technique with regard to a decrease of the nutrient usage in intensive greenhouse cultivations.

Tomato seedlings were grown on rockwool slabs during 7 weeks, so only vegetative growth was examined. The plants, divided in subgroups, were treated with different concentrations of a nutrient solution (0, 25, 50 and 100%). In all cases, the imposed electrical field on the root system was 0,18 V.cm<sup>-1</sup>, resulting in an average electrical current density of  $\pm 1 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Carbon felt, covering the upper and lower part of the rockwool slabs, was used as electrode. It was examined whether or not applying this felt or an inversed polarity of the applied field, would have a noticeable effect on the results. In a final experiment, seedlings were grown pure hydroponically without rockwool substrate. The strength of the applied electrical field in this experiment was 0,10 V.cm<sup>-1</sup>.

Only the autumn grown plants in the first experiment showed significant positive effects of the imposed electrical field. In this experiment, the 50% electrified plants were as successful as the 100% control plants, with regard to the dry shoot biomass (5,1 $\pm$ 0,4 vs 5,4 $\pm$ 0,2 g). Moreover, they showed a significantly lower specific leaf surface (387 $\pm$ 9 vs 512 $\pm$ 33 g.cm<sup>-2</sup>), an interesting result for breeders with respect to practical applications. Neither the inversed polarity of the field, nor the felt itself seemed to be of influence on the growth of the tomato seedlings. In the hydroponic experiment, electrically treated plants produced significantly less dry biomass than the control plants (0,74 $\pm$ 0,43 vs 1,87 $\pm$ 0,39 g). This was probably due to the higher current density (up to  $\pm 8 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ). The test plants showed hereby symptoms which were similar to those of a magnesium deficiency. Nevertheless, no root injury could be visually observed.

An alteration in active ion uptake, in which the uptake of Mg<sup>2+</sup> is hindered to an increasing extent by its main antagonists K<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup>, was proposed as a plant related response to an electrical treatment. The build-up of ion and pH gradients in the rockwool slabs, however, could not be excluded as an growth promoting abiotic factor either.



The strong difference in microclimate between the spring and autumn experiments, was designated as the main reason of the lack of significant differences between rockwool grown test and control plants in the spring experiments.

Not the electricity cost (0,018 €.acre<sup>-1</sup>), but the electrode installation cost (125 €.acre<sup>-1</sup>), is nowadays a limiting factor for the practical implementation of the investigated elektroculture technique. By halving the standard amount of nutrients supplied to the electrically treated plants, which did not reveal a yield loss in this thesis, only 88,5 €.acre<sup>-1</sup> can be saved. Further research needs to reveal whether or not it would be possible to achieve higher crop yields at standard nutrient concentrations by means of electrical stimulation. If so, elektroculture can soon become financially profitable for breeders.

## Lijst met afkortingen

AC	Alternating current, wisselstroom
$\alpha_c$	Kwantum efficiëntie van de fotosynthese [ $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{ PAR}$ ]
ATP	Adenosinetriphosfaat
Cn°	Controlebehandeling, controleplant
cv	Cultivar
$C_x$	Concentratie van een ion [M] of partiële druk van een gas [atm]
DAB	Donker geadapteerd blad
DC	Direct current, gelijkstroom
DOY	Day of the year
E	Elektrische veldsterke [ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
$E^\circ$	Standaard celpotential (T=298 K, concentratie reactieproducten = 1M of 1 atm, pH =0)
$E^{\circ\prime}$	Standaard celpotential bij een pH = 7
EC	Electrical conductivity, elektrische geleidbaarheid [ $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ]
$E_{el}$	Elektrische energie [J]
EMV	Elektromagnetisch veld
F	Constante van Faraday [ $96.485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ e}^-$ ]
$F_{el}$	Elektrische kracht [N]
$\Phi_{\text{PSII},(\text{max})}$	(Maximale) fotochemische efficiëntie van fotosysteem PS II [%]
$\Delta G$	Gibbsvrije energie
I	Elektrische stroomsterkte [A]
$I_c$	Lichtcompensatiepunt [ $\mu\text{mol PAR} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
J	Elektrische stroomdichtheid [ $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
L	Lege blokjes zonder plant
LAB	Licht geadapteerd blad
MBC	Microbiële brandstofcel
MEC	Microbiële elektrolytische cel
$\mu$	Elektroforetische mobiliteit [ $\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ]
n	Hoeveelheid stof [mol]
NADP	Nicotinamide adenine dinucleotidofosfaat
NUE	Nutrient use efficiency, efficiëntie van het nutriëntengebruik
P	Elektrisch vermogen [W]
p	Partiële druk [atm]
PAR	Photosynthetic active radiation, Fotosynthetisch actieve straling [ $\mu\text{mol fotonen} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
PEF	Pulsed electrical field, pulserende elektrisch veld
$P_{n, (\text{max})}$	(Maximale) netto fotosynthesesnelheid [ $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
PS II	Fotosysteem II van de fotosynthetische lichtreacties
q	Elektrische lading [C]
$R_{el}$	Universele gasconstante [ $8,14 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
R	(Reële) elektrische weerstand [ $\Omega$ ]
$R_d$	Donkerrespiratie [ $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

RH	Relatieve luchtvochtigheid [%]
RVS	Roestvast staal of roestvrij staal
SLA	Specific leaf area, specifieke bladoppervlakte [ $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ]
T	Temperatuur [ $^{\circ}\text{C}$ of K]
Tn°	Elektrische behandeling, testplant
v	Snelheid [ $\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ]
$\Delta V$	Elektrisch potentiaalverschil [V]
w	Arbeid [J]
z	Valentie van een ion

# Inhoudsopgave

Auteursrechten .....	
Woord vooraf .....	
Samenvatting .....	
Abstract .....	
Lijst met afkortingen .....	
I. Literatuurstudie .....	1
ELEKTRICITEIT ALS FYSISCH VERSCHIJNSEL .....	3
1. Belangrijke elektrische grootheden .....	3
2. Elektrochemische cellen.....	4
3. Elektrostatistische interacties.....	5
3.1. Elektro-osmose.....	6
3.2. Elektroforese .....	6
ELEKTRISCHE STIMULATIE VAN PLANTEN .....	7
1. Inleiding.....	7
2. Elektrische mechanismen in planten .....	7
3. Elektrocultuur, een historisch overzicht .....	8
3.1. Enkele wapenfeiten uit de 18de, 19de en de eerste helft van de 20ste eeuw.....	8
3.2. Belangrijkste wapenfeiten tweede helft 20ste eeuw en begin 21ste eeuw.....	10
3.2.1. Elektrische stimulatie van plantzaden.....	10
3.2.2. Elektrocultuur toegepast op zaailingen en jonge planten .....	10
3.2.3. Elektrocultuur toegepast op secundaire plantcomponenten.....	12
3.2.4. Effecten van elektrocultuur op de ondergrondse biomassa .....	12
3.2.5. Nieuwe toepassingen en neveneffecten van elektrische velden.....	13
TOMAAT ( <i>SOLANUM LYCOPERSICUM L.</i> ) .....	14
1. Taxonomie en oorsprong van tomaat.....	14
2. Tomatenteelt in Vlaanderen, Europa en op wereldschaal.....	14
2.1. Belang van tomatenteelt op wereldschaal .....	15
2.2. Belang van de Vlaamse en Europese tomatenteelt .....	15
2.3. Kenmerken van de Belgische tomatenteelt .....	16
NUTRIËTENGEBRUIK IN BODEMLOZE TEELTEN .....	17

1.	Inleiding .....	17
2.	Invloed van verschillende EC-regimes op de groei van tomaat .....	17
3.	Nutriënten: consumptie, kosten en prijsevolutie.....	18
4.	Problematiek gerelateerd aan (overmatig) nutriëntengebruik.....	19
II.	Onderzoeksvragen.....	23
III.	Materiaal & methoden.....	27
	ALGEMENE KARAKTERISTIEKEN .....	29
1.	Locatie .....	29
2.	Plantmateriaal en groeisubstraat .....	29
3.	Voedingsoplossingen.....	30
3.1.	Verzadigingsoplossing .....	30
3.2.	Vegetatieve voedingsoplossing .....	31
4.	Het opleggen van spanning .....	32
5.	Oogst van de planten.....	33
	PROEFOPZETTEN .....	34
1.	Gedetailleerde beschrijving proef 1 .....	34
1.1.	Begin van de proef.....	34
1.2.	Opstelling.....	34
1.3.	Belichting .....	35
1.4.	Einde van de proef.....	35
2.	Gedetailleerde beschrijving proef 2 .....	36
2.1.	Begin van de proef.....	36
2.2.	Opstelling.....	36
2.3.	Einde van de proef.....	36
3.	Gedetailleerde beschrijving proef 3 .....	36
3.1.	Begin van de proef.....	37
3.2.	Opstelling en verloop .....	37
3.3.	Einde van de proef.....	37
	DATAVERZAMELING EN MEETAPPARATUUR .....	38
1.	Data-acquisitie.....	38
2.	Dataverwerking en statistische analyse .....	38
3.	Bepaling van zuurtegraad (pH) en geleidbaarheid (EC).....	38
4.	Bepaling van de bladoppervlakte .....	38
5.	LICOR-metingen.....	39

---

5.1. Fotosynthesemetingen.....	39
5.2. (Chlorofyl-a)fluorescentiemetingen.....	40
6. Vloeistofstaalname, anionen (IC)- en magnesiumbepaling (AAS) .....	41
7. Impedantiemeting.....	42
IV. Resultaten .....	43
RESULTATEN PROEF 1 .....	45
1. Plantgerelateerde karakteristieken.....	45
1.1. Plantlengte .....	45
1.2. Biomassa .....	46
1.3. Blad- en fotosynthesekarakteristieken .....	47
2. Verschillen in microklimaat tussen najaar- en voorjaarsuitvoering.....	51
3. Substraatgebonden karakteristieken.....	51
3.1. Stroombichtheden in het rotswolsubstraat.....	51
3.2. Anionenverdeling en pH-verschillen onder invloed van het elektrisch veld.....	52
3.3. Verband tussen de substraatweerstand en de droge wortelmasse .....	53
RESULTATEN PROEF 2 .....	54
1. Plantgerelateerde karakteristieken.....	54
1.1. Plantlengte .....	54
1.2. Biomassa en droge stofgehalten.....	54
1.3. Bladkarakteristieken.....	55
2. Onderlinge interactie tussen microklimaat en koolstofvilt.....	57
RESULTATEN PROEF 3 .....	58
1. Plantgerelateerde karakteristieken.....	58
1.1. Plantlengte .....	58
1.2. Biomassa, biomassaverdeling en droge stofgehalten.....	58
1.3. Bladkarakteristieken.....	60
2. Variabelen gerelateerd aan het microklimaat en de voedingsoplossing.....	62
V. Discussie .....	65
INTERACTIES TUSSEN DE NUTRIËNTENCONCENTRATIES, ELEKTRISCHE STIMULATIE EN HET MICROKLIMAAT.....	67
1. Effect van verschillende nutriëntenconcentraties op plantengroei .....	67
2. Effect van elektrische stimulatie van tomaatplanten op rotswol.....	68
3. Verschillen in serremicroklimaat tussen najaar en voorjaar.....	69
4. Koolstofvilt: meer dan een elektrode alleen?.....	71

---

MOGELIJK EFFECT VAN ELEKTROCULTUUR OP DE ACTIEVE IONENOPNAME BIJ HYDROTEELTEN? .	73
ELEKTROCHEMISCHE ASPECTEN.....	75
1. Ionen- en EC-gradiënten in het rotswolsubstraat .....	75
2. pH-gradiënten in het rotswolsubstraat .....	76
3. Stroomfluctuaties gerelateerd aan de wet van Nernst .....	77
4. Het effect van EC- en pH-gradiënten op plantengroei .....	78
5. Elektrische impedantie spectroscopie voor niet-destructieve wortelgroei-evaluatie .....	80
TOEKOMSTPERSPECTIEVEN.....	81
1. Economische haalbaarheid.....	81
2. Verder onderzoek.....	82
VI. Algemeen besluit .....	85
VII. Referenties .....	89
VIII. Bijlagen.....	99

---

# **I. Literatuurstudie**

---





Deze thesis behandelt een onderzoek dat geplaatst kan worden in vele disciplines, zoals misschien uit de titel al kan worden afgeleid. In het eerste inleidende hoofdstuk wordt ingegaan op de fysicochemische kenmerken van elektriciteit. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van het belang van deze elektrische verschijnselen in planten en resultaten van eerder onderzoek inzake elektrische stimulatie van planten. Het derde hoofdstuk verdedigt de keuze van tomaatplant als proefplant in deze scriptie. Tot slot zal het nutriëntengebruik en de problematiek hieromtrent in de hedendaagse substraatteelten besproken worden.

## HOOFDSTUK 1

### ELEKTRICITEIT ALS FYSISCH VERSCHIJNSEL

#### 1. Belangrijke elektrische grootheden

Elektriciteit is het gevolg van het bestaan van zowel positieve als negatieve ladingen ( $q$ ), met de Coulomb [C] als eenheid. De lading van een elektron wordt de elementaire lading ( $e$ ) genoemd en bedraagt  $1,602 \times 10^{-19}$  C. Elektrische lading is dus gekwantificeerd. Wanneer elektrische lading zich verplaatst volgens een potentiaalgradiënt ( $\Delta V$ ) – d.i. het verschil in elektrische potentiële energie per eenheidslading, uitgedrukt in  $J.C^{-1}$  of de Volt [V] – is er sprake van elektrische stroom. De elektrische stroomsterkte ( $I$ ) geeft de hoeveelheid lading weer die per tijdseenheid een bepaald punt passeert (Vergelijking I-1). Deze grootheid wordt uitgedrukt in Ampère [A] waarbij  $1 A = 1 C.s^{-1}$ .

$$I = \frac{dq}{dt} \quad \text{Vergelijking I-1}$$

Indien de stroomsterkte door een medium recht evenredig is met het opgelegde potentiaalverschil, dan is de evenredigheidsconstante de weerstand ( $R$ ) van het medium (Vergelijking I-2). Dit wordt de wet van Ohm genoemd. Media die voldoen aan deze wet worden Ohmse geleiders genoemd. Elektrische weerstand wordt uitgedrukt in Ohm [ $\Omega$ ] met  $1 \Omega = 1V.A^{-1}$ .

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Vergelijking I-2}$$

Dat elektrische energie in de praktijk zo bruikbaar is, komt doordat elektrische energie zich gemakkelijk in andere energievormen laat omzetten (Giancoli, 2005). Het vermogen ( $P$ ) is de snelheid waarmee deze energieomzetting plaatsvindt en wordt uitgedrukt in Watt [W] waarbij  $1 W = J.s^{-1}$  of  $1V.A$ . Deze energie wordt vrijgesteld wanneer elektrische ladingen zich spontaan volgens een potentiaalgradiënt bewegen (Vergelijking I-3).

$$P = \frac{dq}{dt} \times \Delta V = I \times \Delta V = I^2 \times R = \frac{\Delta V^2}{R} \quad \text{Vergelijking I-3}$$

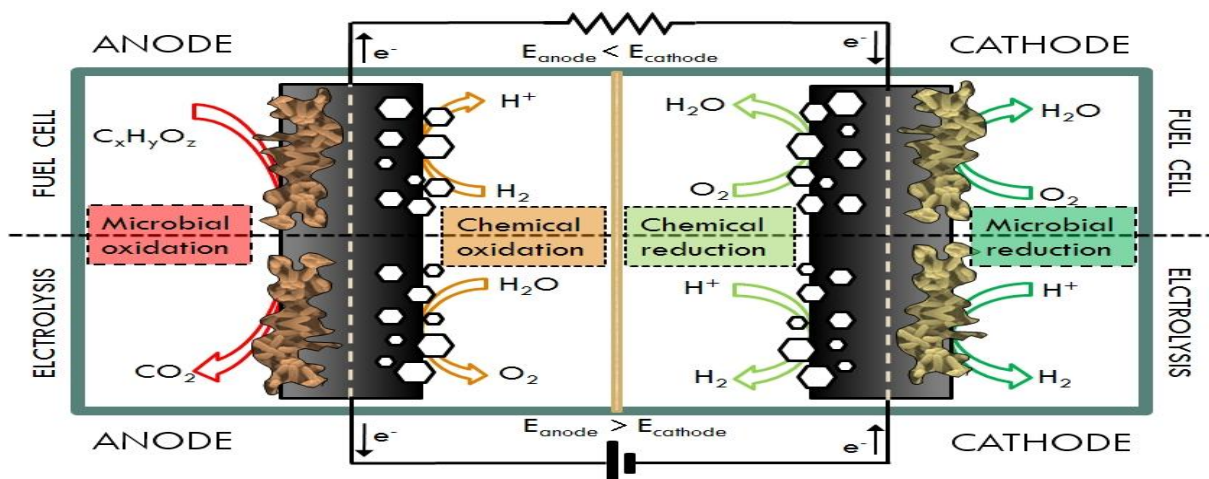
De hoeveelheid omgezette elektrische energie ( $E_{el}$ ) bekomt men vervolgens door het vermogen te vermenigvuldigen met de tijdsduur ( $t$ ), uitgedrukt in seconden [s] (Vergelijking I-4). Hoewel de SI-eenheid voor energie de Joule [J] is, opteren elektriciteitsmaatschappijen vaak voor een grotere eenheid, de kilowattuur [kWh]. Hierbij is  $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$  (Giancoli, 2005).

$$E_{el} = P \times t$$

**Vergelijking I-4**

## 2. Elektrochemische cellen

Een elektrochemische cel is een reactor waarin redoxreacties plaatsgrijpen en bestaat standaard uit een kathode (waar de reductie plaatsgrijpt), een anode (waar de oxidatie plaatsgrijpt) en een elektrolytoplossing die zouten bevat. Vaak worden de elektrodecompartimenten fysisch gescheiden zodat reactieproducten niet onderling kunnen reageren. Deze compartimenten zijn dan echter in elektrisch contact via een zoutbrug of membraan die zorgt voor de elektrische neutraliteit van de hele cel. Er bestaan twee soorten elektrochemische cellen: galvanische of brandstofcellen en elektrolytische cellen (figuur I-1) (Du Laing & Tack, 2010).



**Figuur I-1:** Schema van een galvanische of brandstofcel (boven) en een elektrolytische cel (onder). Wanneer micro-organismen de redoxreacties katalyseren spreekt men van microbiële brandstofcellen (MBC) of microbiële elektrolytische cellen (MEC) (Clauwaert et al., 2008).

In een galvanische cel zorgt een spontane redoxreactie voor de productie van elektrische energie. In een elektrolytische cel wordt stroomdoorgang opgelegd zodat niet-spontane redoxreacties doorgaan. De spontaniteit van een (redox)reactie wordt bepaald door de verandering in zijn Gibbs vrije energie ( $G$ ). Indien  $\Delta G < 0$ , verloopt de reactie spontaan en geeft dan de maximaal bruikbare arbeid weer die verricht kan worden door het systeem. Deze arbeid wordt geleverd indien ladingen zich spontaan volgens een potentiaalgradiënt bewegen (Vergelijking I-5). De zich verplaatsende ladingen kunnen via de constante van Faraday ( $F$ ) [ $96.485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} e^-$ ] omgezet worden in molhoeveelheden elektronen ( $n$ ), met  $z$  de valentie van het ion. Wanneer het een elektronenstroom betreft, is deze waarde gelijk aan 1.

$$\Delta G = -\Delta w = -\Delta q \times \Delta V = -n \times z \times F \times \Delta V$$

**Vergelijking I-5**

Indien er zich naast elektrische potentiaalverschillen tussen beide compartimenten ook concentratiegradiënten voordoen, wordt vergelijking I-5 uitgebreid met een extra term.

$$\Delta G = -n \times z \times F \times \Delta V - 2,3 \times n \times R \times T \times \log \frac{C_2}{C_1} \quad \text{Vergelijking I-6}$$

Hierin is R de universele gasconstante ( $8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), T de absolute temperatuur [K] en C de concentratie van één bepaald geladen deeltje [M] of de partiëledruk van een gas [atm]. Vergelijking I-6 is de meest algemene vorm van de Nernstvergelijking. Bij chemisch evenwicht geldt dat  $\Delta G = 0$  en kan vergelijking I-6 herschreven worden als:

$$\Delta V = \frac{-2,3 \times R \times T}{z \times F} \times \log \frac{C_2}{C_1} \quad \text{Vergelijking I-7}$$

Deze vorm van de Nernstvergelijking stelt dat bij evenwicht het verschil in concentratie van een ion tussen twee compartimenten gebalanceerd is door het elektrische potentiaalverschil (Taiz & Zeiger, 2002). Dezelfde vergelijking wordt ook gebruikt om reductie- of celpotentialen te bepalen wanneer deze niet voldoen aan de standaardomstandigheden ( $T = 298 \text{ K}$ ,  $C_1$  en  $C_2 = 1 \text{ M}$ ). Dan is  $\Delta V = E - E^\circ$ , met E de celpotentiala bij reële omstandigheden en  $E^\circ$  bij standaardomstandigheden (Zumdahl, 2005).

### 3. Elektrostatiche interacties

Veel natuurlijke materialen (o.a. kleideeltjes) in contact met een waterige oplossing dragen een negatieve lading (Wall, 2010). Deze lading kan veroorzaakt zijn door ionisatie van poly-elektrolyten, kristalroostersubstitutie, ionenadsorptie of ionendissolutie uit het kristalrooster. Nabij geladen oppervlakken ontstaat een elektrisch veld E [ $\text{V.m}^{-1}$ ]. De grootte van dit veld is afhankelijk van de afstand tot het geladen oppervlak. De kracht uitgeoefend op een puntlading q [C] volgt uit vergelijking I-8 (Van Der Meeren, 2011). Vaak worden elektriciteit en magnetisme samen behandeld omdat een elektrisch veld een magnetisch veld opwekt en vice versa. Men spreekt daarom over elektromagnetische velden (EMV) (Giancoli, 2005).

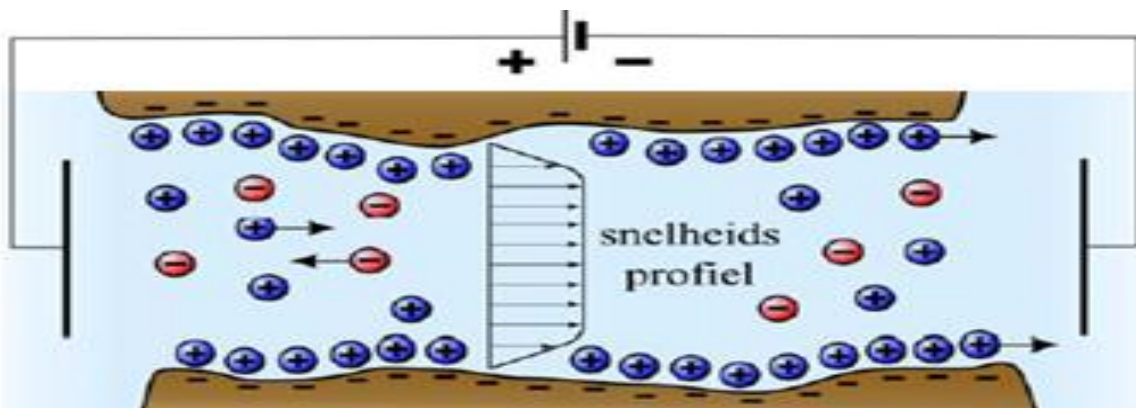
$$F_{el} = q \times E \quad \text{Vergelijking I-8}$$

Oppervlakladingen beïnvloeden de ionendistributie aanwezig in het polaire solvent. De ladingsverdeling nabij een geladen oppervlak wordt aangeduid als de dubbellaag: de eerste laag bestaat uit de gefixeerde oppervlakladingen, terwijl de tweede laag bestaat uit een neutraliserende overmaat aan tegenionen. De dispersie moet immers elektrisch neutraal zijn. Hierdoor is het effectieve veld waaraan de geladen deeltjes in de bulkoplossing worden blootgesteld kleiner dan zou verwacht worden. Dit verschijnsel wordt ‘shielding’ genoemd. De tegenionen zijn echter niet enkel onderworpen aan elektrostatiche attractie, maar ook aan diffusie, die de ionen in de oplossing

homogeen tracht te verdelen. De theorie van de elektrische dubbellaag (EDL) heeft betrekking op deze evenwichtsverdeling en op de omvang van de elektrische potentiaal in de buurt van het grensvlak. Verschillende modellen werden voorgesteld door Helmholtz, Gouy-Chapman en Stern. De EDL-theorie vormt de grondslag voor het verklaren van de stabiliteit van geladen colloïdale systemen en enkele elektrokinetische fenomenen: bij opgelegde potentiaalverschillen spreekt men over elektro-osmose als de vaste fase stationair is en elektroforese, als deze fase mobiel is (Van Der Meeren, 2011).

### 3.1. Elektro-osmose

Negatieve ladingen op de vaste fase worden, omwille van de neutraliteit van het geheel, gecompenseerd door een wolk van voornamelijk positieve ionen. Bij het aanleggen van een elektrisch veld over poriën, capillairen of membranen, zullen de elektrische polen de tegengestelde ladingen aantrekken. De ladingen op de stationaire vaste fase blijven min of meer op dezelfde positie. De kationen bevinden zich echter in het water, en kunnen dus vrij bewegen in de richting van de negatieve pool. Bij deze beweging sleuren de ionen het omringende water mee, en uiteindelijk zal al het water in de poriën meegesleurd worden richting de negatieve elektrode (Figuur I-2) (Curvers, 2005).



**Figuur I-2:** De elektro-osmotische verplaatsing van water in een porie. Het snelheidsprofiel is een gevolg van het samenspel tussen osmotische krachten en frictiekrachten (Curvers, 2005).

### 3.2. Elektroforese

Bij dit elektrokinetisch verschijnsel beweegt de mobiele fase (geladen deeltjes) zich in een opgelegd elektrisch veld. Deze grootte wordt de elektroforetische mobiliteit ( $\mu$ ) genoemd, met als SI-eenheid [ $\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]; en geeft de snelheid van de deeltjes  $v$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] weer per eenheid van elektrische veldsterkte  $E$  [ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ] (Van Der Meeren, 2011).

$$\mu = \frac{v}{E}$$

**Vergelijking I-9**

Elektroforese is een krachtige en veel gebruikte techniek die gebruikt wordt bij de scheiding van proteïnen en DNA. De stationaire fase is hierbij meestal een gel waardoor vaak gesproken wordt van gelelektroforese (Wall, 2010).

## HOOFDSTUK 2

# ELEKTRISCHE STIMULATIE VAN PLANTEN

### 1. Inleiding

Planten worden tijdens hun leven blootgesteld aan zowel biotische als abiotische factoren. De fysiologische effecten van abiotische factoren zoals lichtintensiteit, temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en CO<sub>2</sub>-gehalte op plantengroei (respons) zijn uitgebreid onderzocht en gedocumenteerd in de literatuur. Echter, over een andere omgevingsfactor, de elektrische veldsterkte is minder geweten. Nochtans is er steeds overal ter wereld een natuurlijk elektrisch veld aanwezig (Murr, 1963). Alle organismen zijn sinds het ontstaan van het leven blootgesteld aan dit natuurlijke Aardse EMV en hebben er zich evolutief aan aangepast (Wawrecki & Zagórska-Marek, 2007). De natuurlijke elektrische veldsterkten liggen in de range 0 - 3 x 10<sup>6</sup> V.m<sup>-1</sup> waarbij de laatste waarde overeenkomt met de potentiaal tijdens een bliksemontlading. De “normale” atmosferische elektrische veldsterkte bedraagt gemiddeld 130 V.m<sup>-1</sup> en de atmosferische stroomdichtheid 3 pA.m<sup>-2</sup>. Het normaal negatief geladen aardoppervlak, heeft een ladingsdichtheid van ± 1 nC.m<sup>-2</sup> (Gorgolewski, 1996).

### 2. Elektrische mechanismen in planten

Het elektrisch verschijnsel speelt een vitale rol in het overbrengen van signalen in de zenuwen bij mens en dier. Planten beschikken echter niet over dergelijk zenuwstelsel. Toch zijn er steeds vermoedens geweest over het bestaan van gelijkaardige elektrische fenomenen bij planten, hoewel die vaak door veel botanisten genegeerd werden (Simons, 1979).

De bewegende vallen van de vleesetende planten *Dionaea* en *Drosera* blijken elektrisch dicht te klappen wanneer een prooi fysisch contact maakt. De bladbewegingen van *Mimosa* bij aanraking of het actief bewegen van bloeddelen ter bevordering van bestuiving – waargenomen bij verschillende plantenfamilies – blijken eveneens elektrisch geactiveerd te worden. Een algemeen mechanisme werd voorgesteld: een receptorpotentiaal ontvangt een fysieke stimulus (b.v. druk door een prooi) die, wanneer deze groot genoeg is, een actiepotentiaal doet ontstaan. Deze actiepotentiaal gaat samen met een hogere membraanpermeabiliteit voor K<sup>+</sup> en Cl<sup>-</sup> van de bewegende (motor)cellen waardoor water osmotisch de cel in- of uitstroomt. De hierdoor ontstane verandering in turgor maakt de beweging van de motorcel mogelijk (Simons, 1981). Met micro-elektroden zijn bij plantencellen membraanpotentialen gemeten tussen -60 en -240 mV. Deze waarden wijken af van wat verwacht zou worden met de wet van Nernst op basis van passief transport (diffusie). Om dit te verklaren heeft men het bestaan van elektrogene ionenpompen ingeroepen die ionen actief transporteren tegen de elektrochemische potentiaalgradiënt in. De benodigde energie hiervoor kan komen van

(foto)chemische reacties. Via de opbouw van dergelijke elektrochemische potentiaalgradiënten kan energie afkomstig van ondermeer het zonlicht tijdelijk worden gestockeerd (Taiz & Zeiger, 2002).

De opening van de stomata is eveneens gebaseerd op de actieve opname (ATP-verbruik) van  $K^+$ -ionen in de sluitcellen wat leidt tot toenemende turgor in de cellen. Voor het behoud van ladingsneutraliteit dient er een parallelle import te zijn van anionen, voornamelijk  $Cl^-$  en malaat of een export van protonen. Elektrogene ionenpompen in het plasmalemma van deze cellen spelen hierin een belangrijke rol (Hsiao, 1976; Raschke, 1976). Prikkel van endogene effectoren zoals groeiregulators (o.a. abscisinezuur) of lichtgevoelige pigmenten zouden dit ionentransport aansturen (Steppe, 2011).

In de biologie van de vaatplanten werd recent door Clegg & Mackean (2006) het optreden van elektroosmose voorgesteld als alternatieve theorie voor het transport van polaire vloeistoffen in het floëem. Zusterzellen zouden daarbij cyclisch kaliumionen onttrekken aan en injecteren in de naburige zeefvaten waardoor deze gepolariseerd worden waardoor vloeistofstroming mogelijk wordt.

### 3. Elektrocultuur, een historisch overzicht

Het voorgaande in acht nemend, is het een interessante hypothese om te stellen dat planten elektrisch gestimuleerd kunnen worden. Deze denkplaatje is zeker niet nieuw. Ze werd ruim 250 jaar geleden voor het eerst bewandeld (Edwards, 1975). Het onderwerp werd door de eeuwen heen echter niet steeds met gelijke interesse behandeld. Periodes van intensief onderzoek wisselden af met jaren waarin er slechts weinig aandacht aan werd besteed.

Lemström (1904) definieerde voor de eerste keer de term elektrocultuur als “Praktijken met de intentie om plantengroei en –ontwikkeling te beïnvloeden door modificatie van de atmosferische elektrische omgeving, met uitsluiting van de procedures die afhankelijk zijn van het gebruik van bodemstroom”. Recenter werd elektrocultuur door Nelson (2000) omschreven als “De toepassing van elektriciteit, magnetisme, licht, radiofrequenties en geluid, met het oog op het versnellen van de plantengroei, de verhoging van de opbrengsten en de verbetering van de gewaskwaliteit. Elektrocultuur kan planten beschermen tegen ziekten, insecten en vorst en kan ook de behoefte aan meststoffen en pesticiden verlagen. De focus van elektrocultuur kan gericht zijn op de zaden, de planten, de bodem of de voedingsoplossing.”

#### 3.1. Enkele wapenfeiten uit de 18de, 19de en de eerste helft van de 20ste eeuw

Jaar	Beschrijving van de opzet, bevindingen, resultaten en/of gebeurtenissen
1746	Vroegst beschreven experiment. Elektrificatie van <u>myrthe</u> door Dr. Maimbray: “Kleine twijgen groeien sneller en snellere bloemontluiting” (Solly, 1845).

±1750	Fysicus Nollet: “Meer vloeistofstroming door geëlektrificeerde cappilairen. Gelijkaardige resultaten mogelijk bij sapstroming door planten?” (Solly, 1845)
1780 - 1781	Bertholon (1783) legt verband tussen plantengroei en atmosferische elektrische condities: “Goede oogsten worden behaald bij een hoge onweersfrequentie en vice versa. Ook de nabijheid van bliksemafleiders heeft een positieve invloed op plantengroei”. Voorstelling van praktische toepassingen voor verhogen natuurlijk elektrisch aanbod waaronder de ‘elektro-vegeto-meter’.
1785	Ingenhousz en Schwankhardt (1785) zijn sceptisch over reeds geboekte successen: “Zijn andere ongelijke omgevingsfactoren (o.a. licht) niet de echte oorzaak voor resultaten?” Hun eigen experimenten gaven hierover geen uitsluitsel.
Einde 18 <sup>de</sup> eeuw	Interesse voor het onderwerp bij naturalisten neemt af: de politiek onrustige situatie in Europa en de schade aan de theorie berokkend door ontkrachtende experimenten van wetenschapsfilosofen met aanzien zijn hier debet aan (Solly, 1845).
Begin 19 <sup>de</sup> eeuw	Ontdekking van een nieuwe manier voor de opwekking van elektriciteit: galvanische elektriciteit (daarvoor wrijvingselektriciteit). Interesse van wetenschappers werd nieuw leven ingeblazen en nieuwe proefopzetten werden mogelijk (Solly, 1845).
1806	Davy (1807): “De ontkieming van zaden in zuiver water in contact met een galvanisch circuit, gebeurt sneller naarmate ze zich dichterbij de positieve elektrode bevinden. Een effect van zuurstofverzadiging van het water aan de anode of toch een elektrische invloed?”
1844	Ross brengt een 60 m lang galvanisch circuit aan in de bodem. Tussen de elektrisch met elkaar verbonden koperen en de zinken plaaielektrode, bevinden zich <u>aardappelplanten</u> . Deze worden 5 keer groter dan deze van een naburige onbehandelde rij (Solly, 1845).
1885	Lemström tracht met atmosferische elektriciteit de productie van landbouwgewassen te verbeteren en gebruikt daarbij zijn kunstmatige ‘overhead discharge’-techniek. Hij bemerkt ondermeer een snellere vruchtrijping bij <u>aardbeien</u> (Sidaway, 1975)
Begin 20 <sup>ste</sup> eeuw	Interesse in landbouwkringen groeit met een toenemende focus op het economisch aspect van elektrocultuur bij landbouwgewassen: Grote Britse veldexperimenten op <u>haver (Avena sativa L.)</u> : consistent 50% verhoging van de opbrengst (Sidaway, 1975).
1918	Oprichting van het “Electro-Culture Committee on the Board of Agriculture and Fisheries”. In de schoot hiervan worden enkele goede resultaten geboekt: 20-50% toename in drooggewicht bij enkele voedergewassen en zelfs hogere waarden voor de opbrengst van graangewassen. Elektrische stimulatie blijkt bovendien effectiever wanneer toegepast gedurende de eerste weken van de groeiperiode (Sidaway, 1975).
Jaren 1930	Afnemende interesse in het onderwerp door variabele en inconsistente resultaten en door de niet-publicatie van goede resultaten van het comité. Verder zijn er veel problemen bij de technische uitvoering in de praktijk (Sidaway, 1975).



### 3.2. Belangrijkste wapenfeiten tweede helft 20ste eeuw en begin 21ste eeuw

In deze paragraaf zal worden getracht een overzicht te geven van het belangrijkste werk van de voorbije 50 jaar. Voor het overzicht te bewaren werd ervoor gekozen een onderverdeling te maken naargelang het plantstadium of plantcompartiment waarop de experimenten werden uitgevoerd.

#### 3.2.1. Elektrische stimulatie van plantzaden

Moon en Chung (2000) trachtten de ontkieming van tomatenzaad te versnellen door ze bloot te stellen aan AC elektrische velden met verschillende intensiteiten ( $4-12 \text{ kV.cm}^{-1}$ ) en dit gedurende verschillende blootstellingsduren (15-60 s). Ze concludeerden dat de volledige zaadontkieming meer dan een dag sneller kon worden bereikt dan bij onbehandelde zaden. De germinatiesnelheid lag, naargelang de intensiteit van het opgelegde elektrische veld, 1,1 tot 2,8 keer hoger dan bij de controlezaden. Pas bij blootstellingsduren langer dan 60 s en elektrische velden groter dan  $12 \text{ kV.cm}^{-1}$  werd inhibitie van de ontkieming opgetekend.

Dymek et al. (2012) onderzochten de metabolische respons van ontkiemende gerstezaden behandeld met pulserende elektrische velden (pulsed electric fields, PEF) met nominale sterkten in de range  $0-1200 \text{ V.cm}^{-1}$ . Deze PEF worden geacht een reversibele elektropermeabilisatie van het celmembraan mogelijk te maken waardoor influx en efflux van polaire moleculen tijdelijk kunnen plaatsvinden. Hoewel de metabolische activiteiten globaal niet significant verschilden, was er toch een negatieve invloed waarneembaar op de strekking van het kiemworteltje. Deze waarneming werd gekoppeld aan de verminderde opstapeling van  $\alpha$ -amylase in de met PEF behandelde zaden. Hierdoor konden minder suikers worden vrijgesteld uit de zetmeelvoorraden van het endosperm.

#### 3.2.2. Elektrocultuur toegepast op zaailingen en jonge planten

Murr (1963) probeerde door het opleggen van krachtige elektrische gelijkspanningsvelden ( $10-80 \text{ kV.m}^{-1}$ ) de groei van graszaailingen (*Dactylis glomerata* L.) te beïnvloeden. De geproduceerde droge biomassa nam snel af ten opzichte van de controleplanten naarmate de intensiteit van het veld sterker werd. Bovendien vertoonden de bladuiteinden langzaam uitbreidende schadeverschijnselen. In deze beschadigde bladzone werden geen epidermiscellen gevonden en was de celstructuur grondig verstoord. De schijnbaar onbeschadigde bladzone vertoonde microscopisch echter ook een aantasting van de epidermislaag. Murr verklaarde dit aan de hand van het ionisatiefenomeen: ionen opgelost in het cytosol van de protoplast migreren onder invloed van het elektrische veld naar de epidermiscellen waardoor, door de dalende osmotische potentiaal van deze cellen, water uit naburige cellen wordt aangezogen en osmotisch de cel binnentreedt. Wanneer door een overmatige wateropname de

elasticiteit van de celwanden wordt overschreden, barst de cel waarna volledige dehydratatie en desintegratie van de celstructuur volgt.

De waarneming van Murr (1963) dat de behandelde planten donkerder groen kleurden dan de controleplanten, werd deels verklaard door Krueger et al. (1963) die stelden dat ionen aanwezig in de lucht het chlorofylmetabolisme beïnvloeden. Krueger et al. (1965) concludeerde dat door afwezigheid of afname van deze ionen de plantengroei en –ontwikkeling sterk worden onderdrukt. De resultaten van Krueger et al. (1965) werden bijgestaan door de resultaten van Hicks' (1957) eenvoudige experimenten waarin planten geplaatst werden in geladen en ongeladen metalen kooien. Hij nam vegetatieve groei waar bij geraniums, rododendrons, bonen en hulst. Deze vegetatieve groei was het grootst wanneer de kooien positief geladen waren. Planten geplaatst in negatief geladen kooien gaven betere resultaten dan de controleplanten zonder kooien. De slechtste resultaten vond hij voor gearde kooien (kooi van Faraday), waarin elektrische velden afwezig zijn.

Pohl & Todd (1981) meldden een betere groei bij bonen en een vervroegde bloei en een versnelde groei bij Perzische viooltjes alsook bij geraniumzaailingen, wanneer deze behandeld werden met een zwakke stroom ( $4 \text{ pA.cm}^{-2}$ ) van anionen aanwezig in de lucht.

De hierboven aangehaalde auteurs maakten gebruik van statische elektriciteit en elektromagnetische velden als eventuele stimulans voor plantengroei en –ontwikkeling. Black et al. (1971) voerden verschillende experimenten uit met elektrische stroom op 5 weken oude tomaatplanten waarbij een eerste zilverelektrode aangebracht werd in de grond rond de wortel en een tweede in de stengel. Verschillende stroomsterkten ( $3 \mu\text{A}$ ,  $7 \mu\text{A}$ ,  $15 \mu\text{A}$  en  $30 \mu\text{A}$ ) en duurtijden van de opgelegde stroom (24, 12 en 4,5 uur per dag) werden gecombineerd. Ze besloten dat lineaire plantengroei en de ionenopname sterker gestimuleerd werden bij de lagere stroomsterkten en enkel wanneer de plantelektrode negatief was ten opzichte van de bodemelektrode. Bij een omgekeerde polariteit volgde snel schade aan het plantenweefsel.

Black et al. (1971) schreven hun resultaten toe aan enerzijds de stimulatie van de actieve ionenopname door middel van ionenpompen aanwezig op de wortelapidermis en anderzijds door een herverdeling van de in het levende plantenweefsel aanwezige groeiregulerende hormonen onder invloed van het elektrische veld.

Een gelijkaardig experiment werd uitgevoerd door Šoch en Čermák (1981). De Tsjechische wetenschappers plaatsten een elektrode onder en boven het wortelsysteem van twee jaar oude sparrenboompjes (*Picea abies* L.). Over deze elektroden werd een gelijkspanning aangebracht variërend tussen 60 en 120 mV waarbij de positieve pool boven het wortelsysteem lag net onder het aardoppervlak. De resultaten toonden een stijging in de relatieve lengtegroei tussen 40 en 200% ten

opzichte van de controleplanten. De stimulatie bleek bovendien het meest effectief te zijn gedurende de eerste groeistadia.

Recent vond Costanzo (2008) dat de lengte van sojaboonzaailingen (*Glycine max* L.) ongevoelig was voor een DC elektrostatisch veld van  $3600 \text{ V.m}^{-1}$  wanneer de volledige planten volgens hun lengtes tussen beide koperplaat elektroden werden geplaatst. Een elektrisch AC veld met dezelfde nominale sterkte maar met een zeer lage frequentie (50 Hz) kon de plantengroei wél statistisch significant versnellen. De auteur concludeerde dat vanuit biologisch perspectief de effecten afhangen van de frequentie. Bij een lagere veldsterkte ( $1800 \text{ V.m}^{-1}$ ) maar zelfde frequentie, werd immers nog steeds de zaailinglengte, hetzij in mindere mate, positief beïnvloed. Dit was niet het geval bij het DC veld.

### **3.2.3. Elektrocultuur toegepast op secundaire plantcomponenten**

De effecten van elektrische stimulatie zijn niet enkel onderzocht geweest op de vegetatieve groeistadia van planten, maar ook op generatieve plantcomponenten en op de vruchtrijping.

Boe en Salunkhe (1963) bemerkten een snellere vruchtrijping bij tomaten (*Solanum lycopersicum* L. cv V.R. Moscow) wanneer deze geplaatst werden tussen de polen van permanente magneten. Bovendien rijpten de vruchten het dichtst bij de zuidelijke pool sneller. Drie mechanismen werden voorgesteld om het verschijnsel te verklaren. Een eerste mogelijkheid is dat het EMV het mechanisme achter de auxine-activiteit beïnvloedt. De andere twee denkpijlers focussen op de verhoging van de respiratiesnelheid van de vrucht door enerzijds de activatie en/of versnelling van het enzymensysteem en anderzijds de toename van radicaalvorming door het EMV.

Dannehl et al. (2011) deden zeer recent onderzoek naar de mogelijkheid om via een elektrische gelijkstroombehandeling (100-500 mA) van geogste tomaatvruchten het gehalte aan gezondheidsbevorderende fytochemicaliën (o.a. antioxidanten en pigmenten) te verhogen. Ze plaatsten hierbij de tomaatvruchten tussen twee elektroden in een recipiënt gevuld met kraantjeswater. De synthese van al de onderzochte secundaire plantmetabolieten werd inderdaad bevorderd. Dit resulteerde in de accumulatie van verschillende carotenoïden en fenolische componenten en een verhoogde antioxidantenactiviteit in de behandelde geogste tomaten.

### **3.2.4. Effecten van elektrocultuur op de ondergrondse biomassa**

Hoewel de bovengrondse biomassa in de meeste gevallen de grootste economische waarde heeft, werd reeds meerdere keren het effect van een zwak gelijkspanningsveld op de architectuur van het wortelmeristeem van maïszaailingen (*Zea mays* L.) onderzocht (Stenz & Weisenseel, 1993; Wawrecki & Zagórska-Marek, 2007).

Stenz en Weisenseel (1993) vonden dat zwakke gelijkspanningsvelden ( $0,5-1,0 \text{ V.cm}^{-1}$ ) intacte, gezonde wortels deden krommen in de richting van de kathode zonder beschadiging. Beschadigde wortels door een voorafgaande verwijdering van het wortelkapje of door een te sterk elektrisch gelijkspanningsveld ( $8,0 \text{ V.cm}^{-1}$ ) groeiden steeds in de richting van de anode.

Ook Wawrecki en Zagórska-Marek (2007) bemerkten dat wortels onderworpen aan een zwak gelijkspanningsveld ( $1-1,5 \text{ V.cm}^{-1}$ ) richting de kathode groeiden. De behandeling wijzigde echter grondig het celdelingspatroon van het wortelweefsel, wat de opbouw van het wortelapicaalmeristeem sterk beïnvloedde. Twee mogelijke verklaringen werden naar voor geschoven: enerzijds zou schade aan de gevoelige initiële wortelkapcellen van invloed kunnen zijn, of, anderzijds werd vermoed dat het polaire auxinetransport door het elektrische veld werd gewijzigd.

### 3.2.5. Nieuwe toepassingen en neveneffecten van elektrische velden

Onderzoek naar electrocultuur kan ook gericht zijn op andere doeleinden waarbij er weliswaar gestreefd wordt naar een verhoogde plantbiomassa, doch dat deze niet direct van economisch belang is. Een voorbeeld hiervan is elektro-fytoremediatie: een extractie van zware metalen uit verontreinigde bodems door middel van plantenwortels onder invloed van elektrische velden (AC en DC). Bi et al. (2011) testten dit voor koolzaad (*Brassica napus* L.) en tabak (*Nicotiana tabacum* L.). Ze vonden dat de verhoging van de biomassa-productie en de bodemionenflux naar de wortel, alsook de stimulatie van metabolische activiteiten van de plant minder significant waren dan verwacht. Nochtans kon de opname van zware metalen (Cd, Cu, Zn en Pb) door koolzaad worden verbeterd door toepassing van een wisselspanningsveld. Echter, het aanleggen van een gelijkspanningsveld had een negatief effect op de biomassa-productie bij de tabaksplant en geen invloed bij koolzaad.

De toepassingen van electrocultuur worden ook onderzocht in het kader van de plantenkweek in internationale ruimtestations (MIR en ISS). In deze microgravitaire omgeving verliezen planten(wortels) hun oriëntatievermogen volgens het gravitatieveld, beter bekend als gravitropisme. Wat overblijft is fototropisme, een groeirespons in de richting van geschikte lichtintensiteiten (Gorgolewski, 1996). Deze auteur verklaart in zijn werk bewijzen gevonden te hebben voor het bestaan van “elektrotropisme” bij bepaalde planten, een groeiorientatie volgens een elektrisch veld. De vraag blijft echter of een elektrisch veld het gravitaire veld kan substitueren wanneer deze laatste ontbreekt. Gorgolewski en Rozej (2001) bemerkten alvast voor sla een neerwaartse groei wanneer een sterk elektrisch veld werd aangelegd met een richting tegenovergesteld aan deze van het gravitatieveld.

## HOOFDSTUK 3

### TOMAAT (*SOLANUM LYCOPERSICUM* L.)

Uit de voorhanden zijnde literatuur blijkt dat experimenten uitgevoerd in het kader van elektrocultuur toegepast werden op een uiteenlopende reeks van plantensoorten. Desalniettemin komt van de gewassen geschikt voor menselijke consumptie tomaat het meest naar voren als gekozen testplant (zie Boe & Salunkhe (1963); Black et al. (1971); Moon & Chung (2000); Dannehl et al. (2011)). In deze scriptie zal er dan ook geopteerd worden om tomaat te kiezen als onderzoeksplant. Naast de kennis die voortspuit uit de hierboven beschreven experimenten met tomaat zal blijken dat tomaat eveneens een centrale rol speelt in de (glas)groenteteelt zowel op Vlaams, Europees als op globaal niveau.

#### 1. Taxonomie en oorsprong van tomaat

Het oorspronggebied van tomaat bevindt zich in de westelijke kustregio van noordelijk Zuid-Amerika met inbegrip van de Galapagoseilanden. Vanaf de evenaar in Ecuador over Peru tot een zuiderbreedte van 25-30° in Chili zijn de natuurlijke habitats zeer divers. Ze omvatten ondermeer de aride Pacifische kustvlakten, smalle vruchtbare valleien, alsook de hoogplateaus aan de westkant van de Andes. Wilde tomatenpopulaties groeien op sterk verschillende hoogtes. De aanpassing aan al deze uiteenlopende microklimaten in de sterk ecologisch en geografisch verschillende habitats, heeft bijgedragen tot de brede variëteit aan soorten binnen de wilde tomaat (Warnock, 1988).

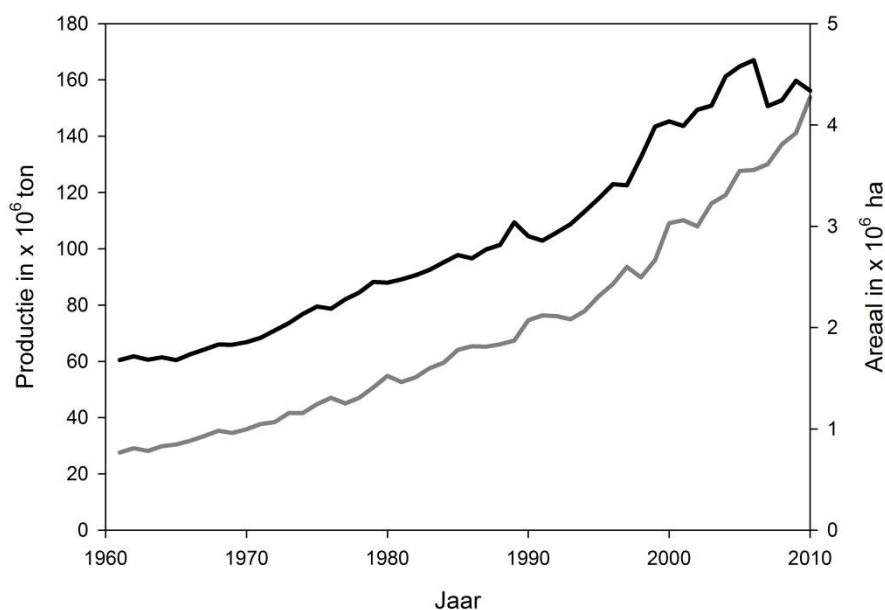
Tomaat behoort tot de nachtschadefamilie (*Solanaceae*), waartoe ook enkele andere belangrijke cultuurgewassen behoren (paprika, tabak, aardappel en aubergine). De familie omvat een tachtigtal genera (Warnock, 1988). De cultuurtomaat (*Solanum lycopersicum* var. *esculentum*) komt niet in het wild voor, maar is vermoedelijk in Mexico gedomesticeerd uit de wilde variëteit *cerasiforme*. De wilde soorten dragen nog steeds bij tot de veredeling van de cultuurtomaat. Ze bezitten resistentiegenen voor verschillende ziekten en plagen, alsook genen die bijdragen tot een betere vruchtkwaliteit, gemakkelijkere oogstechnieken en stresstolerantie. Pas aan het einde van de negentiende eeuw werd tomaat in Europa algemeen voor consumptie geaccepteerd, hoewel ze daarvoor al langer bekend was als een sierplant en afrodisiacum (Van Labeke, 2011).

#### 2. Tomatenteelt in Vlaanderen, Europa en op wereldschaal

Tomaat is een zeer populaire groente en wordt in alle continenten gebruikt in de voeding. De tomatenproductie wordt gebruikt voor verse consumptie of verwerkt in de conservenindustrie, in o.a. geconcentreerde poeders, in pastasauzen, en soepen (Van Labeke, 2011).

## 2.1. Belang van tomatenteelt op wereldschaal

In 2010 bedroeg de wereldwijde tomatenproductie ruim 145 miljoen ton (Figuur I-3). China (29%), de VS (9%) en India (8%) zijn wereldwijd de drie belangrijkste tomaatproducenten. Het wereldwijde areaal is sinds 2006 gedaald, terwijl de productie nog licht steeg. Vooral in de geïndustrialiseerde wereld neemt de omvang van het tomatenareaal af. Deze afname wordt echter gecompenseerd door een verhoogde productie door het gebruik van intensievere teeltmethoden (FAO, 2012).



**Figuur I-3: Evolutie van de wereldwijde tomatenproductie (grijs) en het tomatenareaal (zwart) over de periode 1961-2010 (FAO, 2012).**

## 2.2. Belang van de Vlaamse en Europese tomatenteelt

In de Europese Unie is tomaat met een totaal geraamde productie van 14,0 miljoen ton in 2008 de meest geproduceerde groente. Zowat 75% van de Europese tomatenproductie tussen 2005 en 2008 kwam uit de Zuid-Europese landen Griekenland, Spanje en Italië. Naast de belangrijkste productiegroente is tomaat ook de meest geconsumeerde groente (exclusief aardappel). In 2007 consumeerde de gemiddelde Europeaan 32,7 kg tomaten per persoon (Platteau, 2010).

In 2000 produceerde België 216.000 ton tomaten, waarmee het qua productie ruimschoots de belangrijkste glasgroente is. Een groot aandeel van deze productie is bestemd voor export naar andere E.U.-landen. België bekleedt zowel qua hoeveelheden als qua exportwaarde de derde plaats in Europa en moet hierbij enkel Spanje en Nederland laten voorgaan. De belangrijkste Europese tomatenimporteur is Duitsland (Georges et al., 2003).

De volledige Vlaamse groenteproductie werd in 2008 geraamd op 1,36 miljoen ton, goed voor 85% van de nationale groenteproductie. De Belgische glasgroenteteelt is eveneens voornamelijk een

Vlaamse aangelegenheid: 99% van de Belgische glasteeltoppervlakte bevindt zich in Vlaanderen waarvan bijna 60% gelegen is in de provincie Antwerpen. In Vlaanderen besloeg de groenteteelt in 2009 een oppervlakte van 27.637 ha, waarvan slechts 4% of 1.025 ha van dit groenteareaal bestemd was voor glasgroenten. Hierin neemt tomaat met 441 ha het grootste areaal voor haar rekening (Bernaerts & Demuyne, 2010). Ondanks de beperkte oppervlakte is de (glas)tuinbouw een belangrijke sector binnen de Vlaamse landbouw. Het gunstige klimaat, goede bodemkarakteristieken, de centrale ligging in een markt van ruim 300 miljoen potentiële klanten, alsook de aanwezige technische kennis maken van Vlaanderen een ideale regio om aan (glas)tuinbouw te doen (Franco et al., 2007).

Ondanks het kleine areaal, vertegenwoordigt de glasgroenteteelt 48% van de totale waarde van de Vlaamse groenteteelt, goed voor bijna 280 miljoen € in 2009. Bovendien is de tomaat in België de meest geëxporteerde en ingevoerde groente (Bernaerts & Demuyne, 2010). Vlaanderen was in 2005 wereldwijd de zevende exporteur van tomaten (Franco et al., 2007).

Naast het economische belang, speelt de glasteeltsector in Vlaanderen ook een belangrijke rol in tewerkstelling van onder meer laaggeschoolden. Naargelang de teelt en specialisatie worden per ha glas 3-5 volwaardige arbeidskrachten tewerkgesteld. De hele Vlaamse glastuinbouwsector stelt rechtstreeks 8.000 tot 9.000 personen te werk (Franco et al., 2007).

### **2.3. Kenmerken van de Belgische tomatenteelt**

De in België geteelde tomaat is van het doorgroeïende (indeterminate) type met meerkoppige vruchten. Zowel losse tomaten als trostomaten worden geteeld. De teelt gebeurt voornamelijk op substraat met de doorteelt als belangrijkste teeltvorm. Bij een doorteelt worden in december of januari jonge tomaatplanten van een zestal weken overgeplant van een gespecialiseerd zaaibedrijf naar de eigenlijke productieserres. De volledige teelt duurt elf tot twaalf maanden, waardoor er slechts één teelt per jaar is. De tomaatplanten, die tot 10 meter lang kunnen worden, moeten hierbij voortdurend in hun groei begeleid worden. Per stengel kunnen er gedurende de volledige teelt 32 á 35 trossen geoogst worden (Van Labeke, 2011).

In 2010 bedroeg volgens FAO-statistieken, de gemiddelde opbrengst in België ongeveer 525 ton.ha<sup>-1</sup> tegenover een wereldgemiddelde van ongeveer 34 ton.ha<sup>-1</sup>. Er mag op basis van deze cijfers gesteld worden dat de Belgische teelten zeer intensief zijn.

## HOOFDSTUK 4

# NUTRIËTENGEBRUIK IN BODEMLOZE TEELTEN

### 1. Inleiding

Als een alternatief voor de dure en milieubelastende chemische bodemontsmettingsmiddelen tegen pathogenen en plantziekten werd in de jaren tachtig van vorige eeuw door telers geleidelijk overgeschakeld op bodemloze culturen. Vooral de teelt op substraat, zowel biodegradeerbare als inerte, won snel aan belang. Eén van de belangrijkste chemisch inerte substraten, vandaag gebruikt in de bodemloze teelt, is rots- of steenwol, een erg poreus en vezelig medium (De Rijck & Schrevens, 1998). Het procentuele aandeel van substraatteelten onder verwarmd glas binnen het volledige Belgische tomatenareaal evolueerde van 55,5% in 1990 naar 83,3% in 2006 (Van Labeke, 2011).

Een ander belangrijk voordeel van de teelt op substraat is dat bepalende omgevingsfactoren voor plantengroei, met name de water- en nutriëntenvereisten, vrij accuraat gecontroleerd kunnen worden. Naast het bieden van mechanische steun aan de planten, doen de substraatmedia voornamelijk dienst als buffer voor nutriënten en water (Bougoul et al., 2005). Deze buffercapaciteit in substraatbodems is echter sterk gereduceerd ten opzichte van natuurlijke bodems, wat de handhaving van ideale omstandigheden in het wortelmilieu sterk bemoeilijkt. Een voordeel is wel dat de heersende omstandigheden in het wortelmilieu snel gewijzigd kunnen worden wanneer dit nodig geacht wordt (Van Noordwijk, 1990).

### 2. Invloed van verschillende EC-regimes op de groei van tomaat

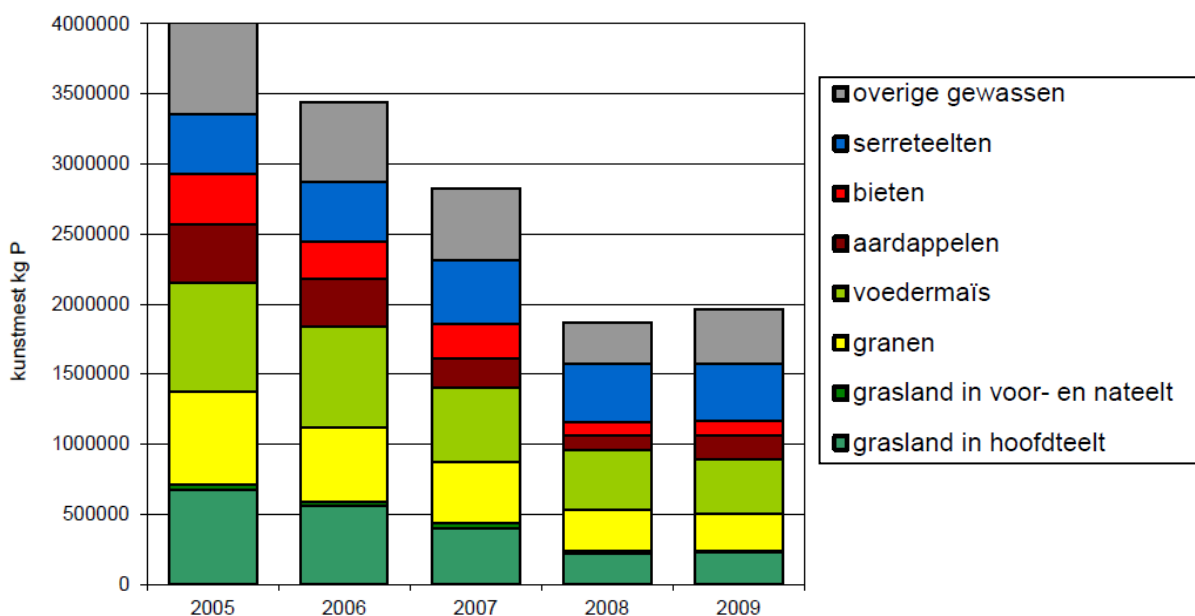
Bij substraatteelten is een toediening van exact gekende nutriëntenconcentraties mogelijk. Een manier om het zoutgehalte van een oplossing in één maatgetal weer te geven gebeurt door middel van de elektrische geleidbaarheid ('Electrical conductivity', EC). Er wordt gesteld dat hoge EC-waarden in de wortelzone meer generatieve planten induceren die sneller het productiestadium bereiken. Bovendien blijken de geproduceerde vruchten van een hogere kwaliteit te zijn en is er meer droge stof productie (Sonneveld & Welles, 1988). De betere kwaliteit van de vruchten gekweekt bij hogere EC-waarden komt ondermeer tot uiting in de hogere gehalten aan reducerende suikers en titreerbare zuren, welke de smaak van de tomaat sterk beïnvloeden (Auerswald et al., 1999). In recent onderzoek bemerkten Van Meulebroek et al. (2012) dat een EC-toename van 2,4 naar 8,0 mS.cm<sup>-1</sup> een positief effect had op de concentraties van gezondheidsbevorderende antioxidanten in rijpe tomaten, hoewel deze trend niet significant kon bevestigd worden. Bij de hoogste EC-waarden (4,0 mS.cm<sup>-1</sup> en 8,0 mS.cm<sup>-1</sup>) deed er zich echter een significante opbrengstvermindering van vermarktbaar vruchten voor. Sonneveld en Welles (1988) zagen dat bij EC-waarden hoger dan 2,5 dS.m<sup>-1</sup> bij 25°C, de opbrengst daalde met 5 tot



7% per extra  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , al bleek dit onder arme lichtomstandigheden minder het geval te zijn. Li et al. (2001) schreven de opbrengstvermindering toe aan de verminderde waterstroom naar de vrucht wat resulteerde in een significante afname van de verse biomassa van de tomaatvruchten. In tegenstelling tot Sonneveld en Welles (1988) vonden ze dat het drooggewicht van de vrucht niet beïnvloed werd door de concentratie van de voedingsoplossing in de wortelzone.

### 3. Nutriënten: consumptie, kosten en prijsevolutie

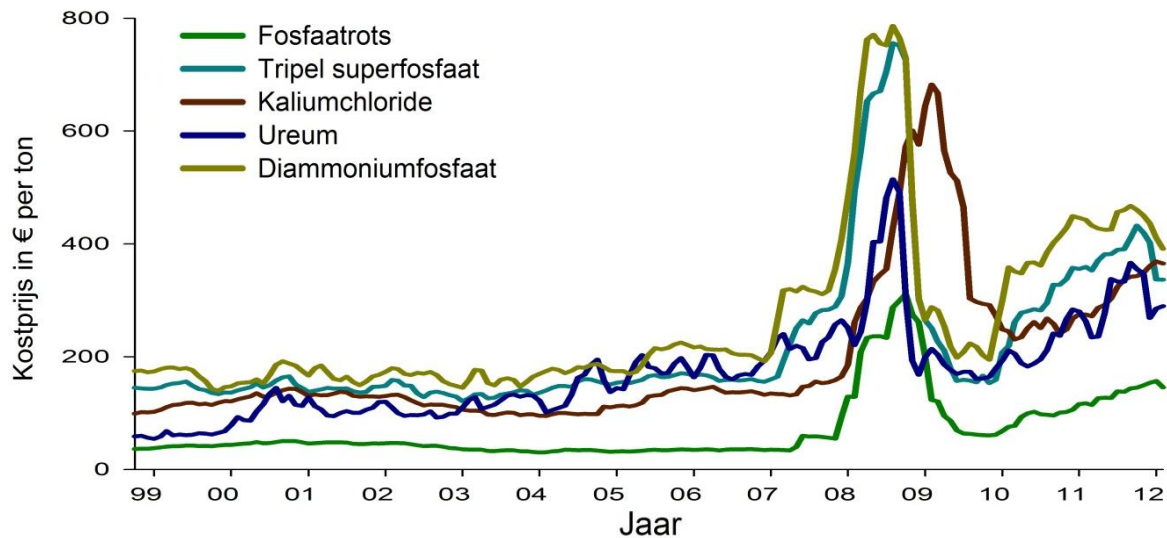
Meststoffen vormen een essentiële input bij de agroproductie, aangezien zij belangrijke nutriënten leveren die planten nodig hebben voor hun groei. Naast dierlijke mest gebruiken heel wat bedrijven ook minerale meststoffen. In 2008 bedroeg het gemiddelde gebruik in de Europese Unie  $104 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  cultuurgrond. In dat jaar bedroeg de Belgische consumptie  $199 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , waarmee ze koploper was binnen de E.U. (Platteau, 2010). In 2009 bedroeg de hoeveelheid stikstofhoudende kunstmest gebruikt in de Vlaamse serreteelten, 2.134 ton: slechts 3% van het totaalgebruik in de gehele Vlaamse landbouwsector. Voor fosforhoudend kunstmest ligt de situatie geheel anders (Figuur I-4). Met een verbruik van 408 ton in 2009, was de serreteelt de belangrijkste consument binnen de Vlaamse landbouwsector. De totale consumptie van fosforhoudend kunstmest halveerde tussen 2005 en 2009 van 4.000 naar 2.000 ton. Het gebruik ervan in de serreteelten kon in deze vijf jaar slechts met 5% worden teruggedrongen (Vlaams departement Landbouw en Visserij, 2010).



**Figuur I-4: Gebruik van kunstmest (fosfor) door de Vlaamse landbouw per gewasgroep in de periode 2005-2009 (Vlaams departement Landbouw en Visserij, 2010)**

In 2009 bedroeg de gemiddelde opbrengst van een gespecialiseerd tomatenbedrijf  $€ 3.223 \text{ €}\cdot\text{are}^{-1}$ , tegenover een variabele kost van  $1.770 \text{ €}\cdot\text{are}^{-1}$ . Meststoffen vertegenwoordigden hierin 10 %, wat neerkomt op  $177 \text{ €}\cdot\text{are}^{-1}$  (Oeyen & Tacquenier, 2011). Figuur I-5 laat zien dat de prijzen van de

minerale meststoffen vooral de laatste 5 jaar aan een belangrijke stijging bezig zijn. Deze prijsstijging hangt samen met de wereldwijde bevolkingstoename en economische groei (veranderende voedingsgewoonten), wat resulteert in een stijging van de wereldwijde voedselvraag die het nutriëntengebruik wereldwijd fors omhoog drijft (FAO, 2008).



Figuur I-5: Prijsevolutie van 5 belangrijke minerale meststoffen tussen eind 1998-2011. De prijsdaling eind 2008 hangt samen met het begin van de economische crisis (Index mundi, 2012).

#### 4. Problematiek gerelateerd aan (overmatig) nutriëntengebruik

Bodemloze teelten worden standaard voorzien van hoge concentraties aan anorganische meststoffen. Deze hoge nutriëntenconcentraties zorgen weliswaar voor een ongelimiteerde plantengroei (geen mineraaldeficiënties), maar dragen anderzijds wel bij tot een verhoging van de lozing van nutriënten in het milieu door het inefficiënte nutriëntengebruik (Le Bot et al., 2001). De efficiëntie van het nutriëntengebruik (“Nutrient use efficiency”, NUE) is vaak laag: gemiddeld spoelt 40-80% van de nutriënten toegediend aan tomaat gegroeid op rotswol uit de wortelzone uit. Tot één ton aan stikstof kan zo uitloggen per hectare en per groeiseizoen (Van Noordwijk, 1990). De drainpercentages bij tomaat liggen hiermee beduidend hoger voor nutriënten dan voor water (25-35%). Op een piekdag is er bij tomaat tot bijna 5,0 L.m<sup>-2</sup> drain mogelijk wat een jaarlijkse drainhoeveelheid geeft van 250 tot 455 L.m<sup>-2</sup> (Blindeman et al., 2006). Het gros van de opname van nutriënten gebeurt via jonge wortels en dan voornamelijk in de wortelhaarzone. Deze wortels zijn echter ook het meest gevoelig voor pathogenen en (te) hoge nutriëntenconcentraties in de voedingsoplossing (Schwarz & Grosch, 2003).

De laatste twintig jaar is men actief op zoek gegaan naar methoden die een alternatief kunnen bieden voor het tot dan toe vrij algemeen toegepaste drainage-to-waste-systeem. Eén van de eerste ingrepen voor een verbeterde NUE was de betere synchronisatie tussen het nutriëntenaanbod en de –vraag door planten, zoals voorgesteld door Van Noordwijk (1990). Voorstellen voor een continue recirculatie van de uitgeloopte nutriëntenoplossing waren toen in de praktijk nog niet uitvoerbaar door het gebrek aan

goedkope en betrouwbare sterilisatiemethoden. Le Bot et al. (2001) vonden dat het gebruik van stikstofvrije voedingsoplossingen voorafgaand aan het beëindigen van een tomaatcultuur het nitraatverlies naar de omgeving kon beperken. Via een herverdeling van de interne stikstofreserves van de plant en deze opgestapeld in het substraat kon het vruchtverlies beperkt worden. Door het toegankelijker worden van ontsmettingssystemen de laatste jaren, zijn recirculatiesystemen (Figuur I-6) in de Vlaamse substraatteelt voor vruchtgroenten tegenwoordig goed ingeburgerd. De meest gangbare ontsmettingssystemen onder glas zijn UV-ontsmetting en langzame zandfiltratie (Blindeman et al., 2006). Verhitting van drainwater voor het afdoden van pathogenen wordt ook toegepast (Nechelput, 2007).



**Figuur I-6: Algemeen schema van een recirculatiesysteem met aanduiding van de verschillende waterstromen. Ontsmetting en bemesting zijn de moeilijkste stappen (Blindeman et al., 2006).**

Hoewel drainwaterrecirculatie in eerste instantie het watergebruik sterk terugdringt, betekent deze waterbesparing op tomaatbedrijven ook een besparing aan meststoffen omdat deze efficiënter kunnen worden ingezet. Afhankelijk van het bedrijf bespaart men  $\pm$  € 0,5 aan water en  $\pm$  € 1,5 aan meststoffen per kubieke meter hergebruikt drainwater (Nechelput, 2007).

Hoewel recirculatiesystemen het mogelijk maken lozing tot een minimum te beperken, is het onvermijdelijk dat na verloop van tijd een hoeveelheid restwater overblijft dat niet in aanmerking komt voor hergebruik o.a. door opstapeling van bepaalde nutriënten in het drainwater of te hoge concentraties aan pathogenen. Spuien blijft zodanig noodzakelijk. Restwater omvat ook het doorspoelwater dat geproduceerd wordt wanneer bepaalde elementen accumuleren in het substraat waardoor de voedingsoplossing uit balans geraakt. In deze gevallen moet er doorspoeld worden. Dit doorspoelwater kan niet meer opnieuw gebruikt worden en moet behandeld worden voor men het

opnieuw in het systeem kan brengen of lozen (Vandenberghe et al., 2007). Het drainwater, dat naast hoge nutriëntenconcentraties ook grote hoeveelheden pathogenen kan bevatten, mag niet zomaar in het oppervlaktewater terecht komen. Wanneer er geen aansluiting is voorzien op de collectieve rioolwaterzuiveringsinstallatie (bv door de afgelegen locatie) moet het tuinbouwbedrijf zelf instaan voor een milieuvriendelijke verwijdering van het spuiwater. Verschillende denkpistes, waaronder een biologische zuivering met vloerrietvelden en lavafilters of het gebruik van de restdrain als beregeningswater op landbouwgrond worden onderzocht op hun doeltreffendheid (Nechelput, 2007).

In praktijk blijken de modernst uitgeruste tuinbouwbedrijven vandaag in staat te zijn om het drainwater continu te recyclen en aldus het spuiwater per teelt tot bijna nul te herleiden, wat leidt tot dalende kosten voor zowel het water- als nutriëntengebruik (Lefevre, persoonlijke communicatie, 2012).



---

## **II. Onderzoeksvragen**

---



Het onderzoek naar de mogelijkheid tot elektrische stimulatie van planten, en in het bijzonder voedingsgewassen, is niet nieuw. Veel experimenten gedaan in het verleden gaven echter tegenstrijdige resultaten, ook bij testen uitgevoerd op dezelfde gewassen. Bovendien waren de resultaten vaak van een lage statistische betrouwbaarheid en zijn de werkingsmethodes slecht beschreven of moeilijk reproduceerbaar (Costanzo, 2008). Desalniettemin zijn er veel resultaten bekend die aangeven dat verschillende vormen van elektrocultuur wel degelijk een positieve invloed kunnen hebben op plantengroei, -ontwikkeling en opbrengst. In tijden van globaal stijgende voedselprijzen lijkt het zeker de moeite waard deze denkpiste verder te onderzoeken in het licht van de nieuwe beschikbare technologieën.

In deze scriptie zal daarom getracht worden een eerste onderzoeksvraag te beantwoorden: “Kan het aanleggen van een spanningsverschil van één Volt over rotswolmatten, het belangrijkste teeltsubstraat voor tomaat in Vlaanderen, een verbeterde plantengroei induceren?”. Er zal gekeken worden hoe de verschillende vegetatieve plantendelen van een jonge plant (bladeren, wortels en stengel) reageren op deze aangelegde spanning zonder daarbij een generatieve ontwikkeling (vruchtproductie) te beogen. De bijkomende subvragen: “Hoe ontstaat de eventuele invloed van het elektrische veld en de elektrische stroom?”, “Kan elektrocultuur ook hydroponisch toegepast worden?” en “Is er een effect van de richting van het opgelegde elektrische veld?” zullen getracht van antwoord voorzien te worden. Hierbij zullen de plantengroei en de plantengroeirespons enkel macroscopisch onderzocht worden.

Naast de stijgende voedselprijzen, baart ook de snelle prijsstijging van de belangrijkste macronutriënten (stikstof, kalium en fosfor) zorgen voor de rentabiliteit van de glastuinbouwteelt. Hieruit volgt een tweede onderzoeksvraag: “Is de concentratie van de toegediende nutriëntenoplossing van invloed op de effecten van elektrocultuur?”. Mogelijke verschillen in de eventuele effecten van het elektrische veld tussen planten behandeld met verschillende voedingsoplossingen zullen hierbij verklaard proberen te worden.





---

## **III. Materiaal & methoden**

---



## HOOFDSTUK 1

### ALGEMENE KARAKTERISTIEKEN

Dit hoofdstuk handelt over de algemene karakteristieken en gemeenschappelijke handelingen van de verschillende proeven. In het volgende hoofdstuk zullen deze proeven elk op zich meer in detail besproken worden.

#### 1. Locatie

Alle proefopzetten werden uitgevoerd in een naar het zuidwesten gericht serrecompartiment van 2 m op 2,5 m op 4 m in het Laboratorium voor Plantecologie op de faculteit Bio-ingenieurswetenschappen aan de universiteit Gent (51°03' NB, 03° 42' OL).

#### 2. Plantmateriaal en groeisubstraat

Tomaat (*Solanum lycopersicum* L. cv Dirk) werd gekozen als testplant. Deze plant groeit relatief snel onder serrecondities en bovendien heeft het Laboratorium voor Plantecologie veel ervaring met het opkweken van tomaatplanten, waardoor veel extra informatie beschikbaar is. Zaden werden in petrischaaltjes tot ontkieming gebracht op met kraantjeswater bevochtigde katoenen watten. In tabel III-1 wordt een overzicht gegeven van enkele gegevens betreffende de tomaatzaailingen die werden gebruikt in de verschillende proeven.

**Tabel III-1: Zaailinggegevens voor de verschillende proeven. De rechtse kolom geeft weer hoeveel zaailingen er effectief gebruikt werden ten opzichte van het aantal gezaaide zaden.**

Experiment	Zaaidatum	Datum overplanting	Groei stadium	Aantallen
Proef 1a	8-11-2011	17-11-2011	kiembladeren	24/80
Proef 1b	3-2-2012	27-2-2012	kiembladeren	24/50
Proef 2	26-2-2012	22-3-2012	2-bladig	12/40
Proef 3	26-2-2012	19-3-2012	kiembladeren	6/40

In elke proef werden de gebruikte zaailingen ingedeeld in groepen van telkens 3 planten. De planten werden zodanig geselecteerd dat de gemiddelde plantlengte van de verschillende groepen binnen dezelfde proef ongeveer gelijk was. De 3 planten in één groep werden vervolgens gelabeld met de concentratie van de toegediend te krijgen voedingsoplossing (0%, 25%, 50% of 100%, zie verder) en een cijfer van 1 tot 3. Testplanten kregen voor het plantnummer een 'T' geplaatst. De controleplanten, die niet elektrisch behandeld werden, een 'C'. Zo is de plant met aanduiding '25%-C3' de derde controleplant van de groep tomaatplanten behandeld met een 25%-voedingsoplossing en plant 50%-T1 de eerste elektrisch behandelde testplant van de tomaatplanten behandeld met een 50%-oplossing.

De zaailingen werden na deze indeling overgeplant naar het eigenlijke groeisubstraat. Als teeltsubstraat werden voor proeven 1 en 2 rotswolblokjes (Grodan® Delta) gebruikt met een afmeting van 7 cm x 7 cm x 5,5 cm. De zaagtandstructuur, aanwezig aan de onderkant van elk rotswolblokje, werd hierbij verwijderd om het elektrisch contact met de elektroden te verhogen (zie verder).

### 3. Voedingsoplossingen

In de proefopzet van deze scriptie werd er slechts gewerkt met twee nutriëntenoplossingen: een verzadigingsoplossing en een vegetatieve voedingsoplossing. Omdat geen vruchtontwikkeling beoogd werd, werd niet overgeschakeld op een generatieve voedingsoplossing.

#### 3.1. Verzadigingsoplossing

Alvorens de zaailingen in proeven 1 en 2 werden overgeplant op het rotswolsubstraat, werd dit gedurende twee dagen ondergedompeld in een verzadigingsoplossing. De aangewezen concentraties en de werkelijk afgewogen hoeveelheden aan macronutriënten voor 30 L verzadigingsoplossing worden weergegeven in tabel III-2, deze voor micronutriënten in tabel III-3.

**Tabel III-2: Aangewezen concentratie en reëel afgewogen hoeveelheden aan macronutriënten in 30 L verzadigingsoplossing (najaarsproef (1a)/voorjaarsproeven(1b, 2)).**

Macronutriënt		Concentratie	Afgewogen
Naam	Formule	(g.L <sup>-1</sup> )	hoeveelheid (g)
calciumnitraat	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	1,630	48,970/48,902
kaliumnitraat	KNO <sub>3</sub>	0,220	6,610/6,603
ijzerchelaat	Fe(DTPA,6%)	0,043	1,292/1,289
kaliumdiwaterstoffosfaat	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0,140	4,249/4,200
magnesiumsulfaat	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,840	25,204/25,198
kaliumsulfaat	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,215	6,449/6,453

**Tabel III-3: Aangewezen concentratie en reëel afgewogen hoeveelheden aan micronutriënten in 30L verzadigingsoplossing (najaarsproef (1a)/voorjaarsproeven(1b, 2)).**

Micronutriënt		Concentratie	Afgewogen
Naam	Formule	(mg.L <sup>-1</sup> )	hoeveelheid (mg)
mangaansulfaat	MnSO <sub>4</sub> . H <sub>2</sub> O	1,700	51/51
zinksulfaat	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	1,450	44/43
natriumtetraboraat	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	3,850	116/117
kopersulfaat	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	0,190	6/6
natriummolybdaat	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	0,120	4/6

### 3.2. Vegetatieve voedingsoplossing

De tomaatplanten in de verschillende proeven werden behandeld met één van de vier vegetatieve voedingsoplossingen. Deze voedingsoplossingen werden benoemd als volgt: 100%-, 50%-, 25%- en 0%-voedingsoplossing. De 100%-voedingsoplossing is de vegetatieve nutriëntenoplossing die gebruikt wordt in het Laboratorium voor Plantecologie voor de bewatering van tomaat in normale omstandigheden.

De pH- en de EC-waarden van een voedingsoplossing blijven niet constant in de tijd. Daarom werd gekozen om de vier verschillende voedingsoplossingen telkens opnieuw te bereiden vanuit twee geconcentreerde stockoplossingen: stockoplossing A (tabel III-4) en stockoplossing B (tabel III-5). Toch kon de EC-waarde van de verschillende oplossingen per gietbeurt verschillen. Dit was voornamelijk te wijten aan de variërende EC-waarden van het gebruikte stadswater, welke in samenstelling niet volledig constant is. De verhoudingen tussen de EC-waarden van de voedingsoplossingen bleef daarbij wel constant. De gemiddelde EC-waarde van de voedingsoplossingen bedroegen in oplopende concentratie (van 0% naar 100%) 0, 60mS.cm<sup>-1</sup>, 1,10 mS.cm<sup>-1</sup>, 1,60 mS.cm<sup>-1</sup> en 2,65 mS.cm<sup>-1</sup>.

**Tabel III-4: Stockoplossing A: Aangewezen concentratie en reëel afgewogen hoeveelheden aan macronutriënten (najaarsproef (1a)/voorjaarsproeven(1b, 2 en 3)).**

Macronutriënt		Concentratie	Afgewogen
Naam	Formule	(g.L <sup>-1</sup> )	hoeveelheid (g)
calciumnitraat	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	140,000	140,007/140,002
ammoniumnitraat	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	9,500	9,497/9,501
kaliumnitraat	KNO <sub>3</sub>	40,500	40,502/40,500
ijzerchelaat	Fe(DTPA,6%)	4,300	4,305/4,302

**Tabel III-5: Stockoplossing B: Aangewezen concentratie en reëel afgewogen hoeveelheden aan macronutriënten (najaarsproef (1a)/voorjaarsproeven(1b, 2 en 3)).**

Macronutriënt		Concentratie	Afgewogen
Naam	Formule	(g.L <sup>-1</sup> )	hoeveelheid (g)
kaliumdiwaterstoffosfaat	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	20,500	20,503/20,500
magnesiumsulfaat	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	71,500	71,505/71,500
kaliumsulfaat	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	26,000	25,996/26,001

In alle experimenten werden de essentiële micronutriënten toegevoegd aan stockoplossing B. Enerzijds kunnen de aangewezen hoeveelheden hierdoor beter worden afgewogen (grotere hoeveelheden) en anderzijds kunnen ook de micronutriënten op een correcte en eenvoudige manier

verdund worden. In tabel III-6 worden de aangewezen concentraties aan micronutriënten weergegeven alsook de reëel afgewogen hoeveelheden voor 125 L 100%-voedingsoplossing.

**Tabel III-6: Stockoplossing B: Aangewezen concentratie en reële afgewogen hoeveelheid aan micronutriënten (najaarsproef (1a)/voorjaarsproeven(1b, 2 en 3)).**

Micronutriënt		Concentratie	Hoeveelheid
Naam	Formule	(mg.L <sup>-1</sup> )	(mg)
mangaansulfaat	MnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	1,700	213/212
zinksulfaat	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	1,450	181/181
natriumtetraboraat	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	3,850	481/481
kopersulfaat	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	0,190	24/24
natriummolybdaat	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	0,120	15/15

Om 1L 100%-voedingsoplossing te bereiden, dient van beide stockoplossingen 8 mL afgemeten te worden en te worden aangelengd met kraantjeswater tot één liter. Uit één liter stockoplossing A en B kan aldus 125 L 100%-voedingsoplossing bereid worden. De 50%-voedingsoplossing werd bereid door de 100%-voedingsoplossing eenmaal te verdunnen met kraantjeswater. Analoog werd de 25%-voedingsoplossing bereid uit de 50%-voedingsoplossing. De 0%-voedingsoplossing is zuiver kraantjeswater.

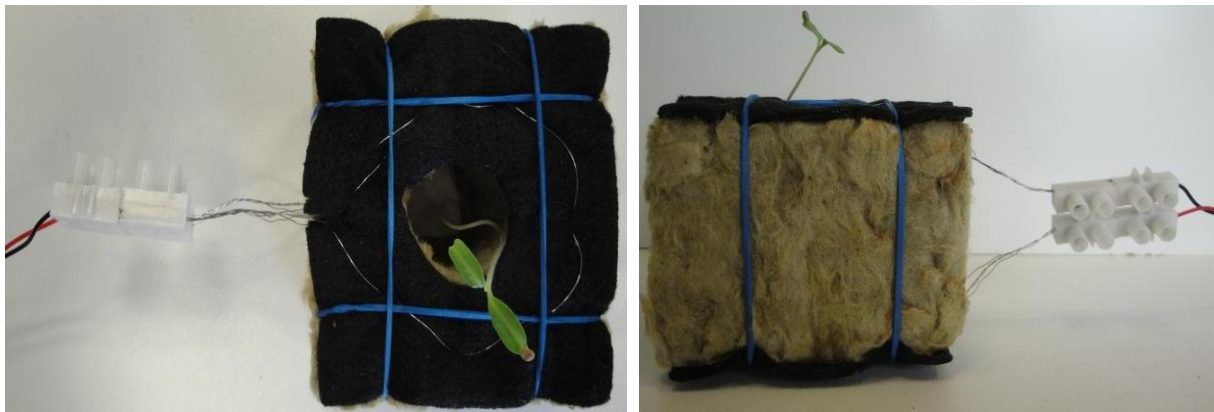
De beschikbaarheid van voedingsnutriënten voor plantenwortels is afhankelijk van de zuurtegraad (pH) van het voedingsmedium. De belangrijkste nutriënten zijn beschikbaar in de pH-range 5,5-6,5 (Lucas & Davis, 1961). De vier voedingsoplossingen werden daarom vlak na de hierboven beschreven bereiding met zwavelzuur (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1M) aangezuurd tot binnen een nauwe pH-range (5.90-6.05). Naast de zuurtegraad werd ook de elektrische geleidbaarheid (EC) bepaald. Alle planten alsook de lege blokjes (zie verder) kregen drie keer per week (maandag, woensdag en vrijdag) water toegediend tot drainage duidelijk zichtbaar was in het afvoerkanaltje onderaan het rotswolblokje. Bij elke watergift werd het volledige bovenoppervlak van het rotswolblokje gelijkmatig bewaterd.

#### 4. Het opleggen van spanning

Gelijkaardig als in de proefopzet van Šoch en Čermák (1981) werd gekozen om het spanningsveld enkel op te leggen over het wortelsysteem. Deze manier van werken vereist geen professionele micro-elektroden die moeten worden aangebracht in de planten zelf (cfr. Black et al., 1971) en maakt het gebruik van lage voltages (1V) mogelijk. De kathode werd in de eerste proef onderaan aangebracht omdat volgens Stenz en Weisenseel (1993) en Wawrecki en Zagórska-Marek (2007) bij lage spanningsvelden wortelgroei zich naar de kathode richt. Hierbij wordt de natuurlijke neerwaartse groei van de wortel volgens het gravitatieveld niet gehinderd (Konings, 1995). In de tweede proef werden

bij één van de twee testgroepen de anode en kathode omgewisseld om de eventuele effecten hiervan te onderzoeken (zie verder).

Grafietmatten (Alfa Aesar, Karlsruhe, Duitsland) werden gebruikt als elektroden welke werden bijgesneden tot lapjes van 7 cm op 7 cm (oppervlakte boven- en ondervlak van een rotswolblokje). In de bovenste elektrode werd een groeiopening voorzien welke overeenstemt met deze in het rotswolblokje. Met RVS-draad werden beide elektroden doorweven (centrale cirkel met een diameter van vijf cm). De staaldraaduiteinden werden getorst en bevestigd aan een lusterklem. Beide elektroden werden stevig bevestigd op het rotswolsubstraat om elektrisch contact te verzekeren (figuur III-1). De lusterklemmen werden via elektrische bedrading verbonden met een spanningsbron van 1V.



**Figuur III-1: Bovenaanzicht (links) en vooraanzicht (rechts) van het substraat met elektroden. Om de structuur van de rotswol duidelijk weer te geven, werd het plasticen omhulsel tijdelijk verwijderd. De kathode (negatieve pool, zwarte draad) is op de foto aan de bovenkant bevestigd.**

## 5. Oogst van de planten

Na afloop van de verschillende proeven, werd de spanningsbron uitgeschakeld en werden de planten geoogst. Stengel en wortel werden daarbij gescheiden. Zowel de verse stengel- als bladbiomassa (samen de shootbiomassa genoemd) werden zo snel mogelijk afzonderlijk bepaald. Het bleek onmogelijk te zijn de verse biomassa van het wortelsysteem te bepalen wanneer deze groeide in het rotswolsubstraat. In de voorjaarsopzet van de eerste proef en de tweede proef werd daarom gewerkt met een substractiemethode ter bepaling van de droge wortelmasa. De nieuwe rotswolblokjes werden vooraf gedroogd in een droogstoof ( $\pm 80^{\circ}\text{C}$ ) en vervolgens gewogen. Na de oogst werden de blokjes met wortelstelsel alsook de andere plantendelen voor een week te drogen gelegd en vervolgens gewogen. Het verschil in massa tussen een blokje na de proefperiode en de massa voor de proefperiode werd beschouwd als de droge wortelbiomassa. Van de bladeren werd de totale oppervlakte bepaald alvorens deze te drogen werden gelegd.



## Hoofdstuk 2

### PROEFOPZETTEN

In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste proeven van deze masterscriptie meer in detail worden beschreven. De punten aangehaald in vorig hoofdstuk zijn van toepassing op dit hoofdstuk. In tabel III-7 worden de voornaamste eigenschappen van de drie plantenproeven kort samengevat.

**Tabel III-7: Samenvatting van de voornaamste proefgegevens uitgevoerd in deze masterscriptie.**

Experiment	Proefperiode	Voedingsoplossing	Teeltmethode	Aantal planten*
Proef 1a	22.11.11 – 11.01.12	0, 25, 50 en 100%	rotswol	4 x 2 x 3 = 24
Proef 1b	28.02.12 – 12.04.12	0, 25, 50 en 100%	rotswol	4 x 2 x 3 = 24
Proef 2	22.03.12 – 01.05.12	50%	rotswol	1 x 4 x 3 = 12
Proef 3	20.03.12 – 17.04.12	50%	hydrocultuur	1 x 2 x 3 = 6

\*X x Y x Z: X = aantal voedingsoplossingen, Y = aantal groepen per voedingsoplossing en Z = aantal planten per groep

#### 1. Gedetailleerde beschrijving proef 1

De proef werd zowel opgezet in het late najaar van 2011 als in het voorjaar van 2012. De proef onderging hierbij wel een paar wijzingen, welke duidelijk zullen worden beschreven.

##### 1.1. Begin van de proef

De 24 geselecteerde tomaatplantjes (Tabel III-1) werden ingedeeld in 8 groepen van 3 planten (4 testgroepen en 4 controlegroepen). Er werd telkens één testgroep en één controlegroep bewaterd met de 0%, 25%, 50% of 100%-voedingsoplossing (zie Deel III, p.31). De groeiopening in het rotswolblokje werd in de najaarsproef opgevuld met vermiculiet ter ondersteuning van de stengel. Die bleek achteraf echter moeilijk te verwijderen waardoor besloten werd om tijdens de voorjaarsproef gebruik te maken van katoenwatten. De najaarsopzet van deze proef werd gestart op 22 november 2011, en de voorjaarsopzet op 28 februari 2012 met het aanschakelen van de spanningsbron (1V).

##### 1.2. Opstelling

De planten werden geplaatst op een draagtafel van 1,2 m op 1 m op 10 cm met plastieken bodemplaat voorzien van een drainageafvoersysteem zoals weergegeven in figuur III-2. Naast de 24 planten werden voor elke voedingsoplossing ook 2 lege blokjes geplaatst, een testblokje en een controleblokje, eveneens voorzien van vermiculiet respectievelijk extra watten tijdens de herhaling. Deze blokjes werden gelabeld met de letter 'L' van leeg in plaats van een cijfer tussen 1 en 3, bijvoorbeeld '100%-

CL'. In de najaarsopzet werden enkel de testblokjes van koolstofvilt voorzien. In de voorjaarsopzet waren ook de controleblokjes met het vilt bedekt. De elektroden van de testblokjes in beide proeven werden aangesloten op de spanningsbron. De positieve pool (de anode) lag daarbij bovenaan en de negatieve pool (kathode) onderaan.



**Figuur III-2: Reëel (links) en schematisch (rechts) bovenaanzicht van de najaarsopstelling.**

### 1.3. Belichting

Omdat de eerste proef pas startte op 22 november 2011, werd in het serrecompartiment bijverlicht. Dit gebeurde met een natrium-hogedruklamp (HS2000 600W/400V/50Hz, Hortilux Schröder B.V., Monster, Nederland) met een lichtintensiteit van  $200 \mu\text{mol PAR-fotonen m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . De lamp werd aangeschakeld tussen 7.00 u 's morgens en 19.00 u 's avonds. De lamp bevond zich boven de middengang van het serrecompartiment. Om het verschil in ontvangen lichtintensiteit tussen de planten te minimaliseren – sommige planten stonden dicht bij de middengang dan andere – werd een doorschuifstelsel ingevoerd: net voor het water geven werden de planten binnen elke concentratiereeks een plaats doorgeschoven (zie ook Deel V Discussie p.69-70).

Tijdens de voorjaarsopzet werd niet kunstmatig bijverlicht aangezien de natuurlijke lichtintensiteit de kunstmatige al gauw ruimschoots overtrof tijdens de daglichtperiode. De draagtafel werd daarom georiënteerd naar het raam (in plaats van naar de kunstmatige lichtbron in de eerste proef). Om ook hier het mogelijke effect van een lichtintensiteitsgradiënt op de plantengroei binnen een bepaalde concentratiereeks te elimineren, werd gekozen voor een doorschuifstelsel analoog aan deze tijdens de eerste proef (zie ook Deel V Discussie p.69-71).

### 1.4. Einde van de proef

Op 12 januari 2012 (najaarsproef) en 10 april 2012 (voorjaarsproef) werd de spanningsbron uitgeschakeld en de testplanten losgekoppeld. Vervolgens werden de planten één voor één geoogst zoals beschreven in Hoofdstuk 1, paragraaf 5 “Oogst van de planten”, p. 33.

## **2. Gedetailleerde beschrijving proef 2**

Deze proef is gelijkaardig aan de voorgaande proef met rotswolblokjes als groeisubstraat.

### **2.1. Begin van de proef**

De 12 geselecteerde tomaatplantjes (Tabel III-1) werden ingedeeld in 4 groepen van 3 planten (2 testgroepen en 2 controlegroepen). Alle groepen kregen de 50%-voedingsoplossing toegediend. De groeiopeningen in de rotswolblokjes werden deze keer niet opgevuld. De proef werd gestart op 22 maart 2012 met het aanschakelen van de spanningsbron.

### **2.2. Opstelling**

De rotswolblokjes van de eerste controlegroep werden niet bedekt met koolstofvilt (cfr. de najaarsopzet van proef 1), waar dat bij de tweede controlegroep wel het geval was (cfr. de voorjaarsopzet van proef 1). De opstelling voor deze plantengroep was identiek aan deze van de twee testgroepen, zij het dat de elektrische klemmen niet aangesloten werden op de spanningsbron. In de eerste testgroep situeerde de positieve pool (de anode) zich bovenaan, bij de tweede testgroep was de polariteit omgekeerd met de negatieve pool (kathode) aan de bovenzijde en de positieve pool (anode) onderaan het blokje. Door het verschil in polariteit van de onderste elektroden in deze opzet, werden, om het optreden van kortsluiting te vermijden, alle rotswolblokjes op een blokje van piepschuim geplaatst. Een gelijkaardig doorschuifstelsel als in de voorjaarsopzet van proef 1 werd toegepast om de invloed van de natuurlijke lichtintensiteitsschommelingen te minimaliseren.

### **2.3. Einde van de proef**

Na 6 weken werd op 1 mei 2012 de spanningsbron uitgeschakeld. Vervolgens werden de planten één voor één geogst zoals beschreven in Hoofdstuk 1, paragraaf 5 “Oogst van de planten”, p. 33.

## **3. Gedetailleerde beschrijving proef 3**

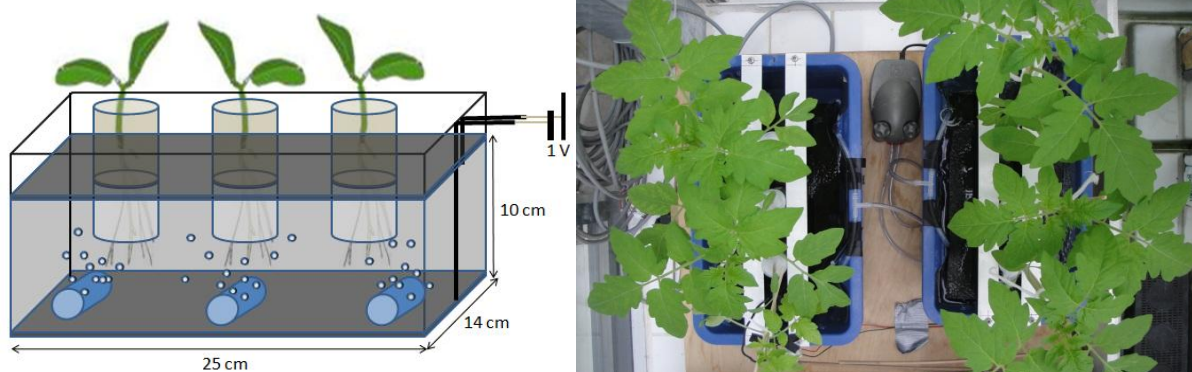
In deze proef werden tomaatplanten volledig hydroponisch geteeld in plaats van op rotswol. De wortels van de planten bevonden zich daarbij vrij in de voedingsoplossing, waardoor de planten mechanisch moesten ondersteund worden.

### 3.1. Begin van de proef

De 6 geselecteerde tomaatplantjes (Tabel III-1) werden ingedeeld in 2 groepen van 3 planten (een testgroep en een controlegroep). Beide groepen werden behandeld met de 50%-voedingsoplossing. De zaailingen werden overgeplant op een laagje filterwol van 5 cm in 50 mL buizen met verwijderde onderkant om wortelgroei mogelijk te maken. De proef startte op 20 maart.

### 3.2. Opstelling en verloop

De zaailingen op de filterwol in de 50 mL buizen werden per groep in een plastieken recipiënt geplaatst (Figuur III-3). Op de bodem werd grafietmat aangebracht, evenals  $\pm 10$  cm hierboven. In de bovenste grafietmat werden op gelijke afstand drie cirkelvormige uitsparingen gemaakt waarin de 50 mL buizen geplaatst werden. Deze werden op hun plaats gehouden door metalen staven aangebracht op het recipiënt. De grafietmatten werden elektrisch verbonden met RVS-draad die met krimpkous geïsoleerd werden en vervolgens aangesloten op de spanningsbron van 1V. Hierbij lag de positieve pool (anode) opnieuw bovenaan en de negatieve pool (kathode) onderaan. De controleopstelling was identiek, zij het dat er geen aansluiting was met de spanningsbron. Op de bodem van beide recipiënten bevonden zich drie beluchtungsstenen die via een plastieken leidingsysteem verbonden waren met een luchtpomp (NewAir 33, Laeggia, Italië). Het recipiënt werd met 50%-voedingsoplossing gevuld tot aan de filterwol, aanwezig in de 50 mL buizen. Op dit niveau ( $\pm 10$  cm) werd ook de bovenste grafietmat (anode) gehandhaafd waardoor deze steeds in contact was met de voedingsoplossing. Net hierboven werd een opening geboord in het recipiënt, waardoor overmatig water kon afvloeien. Elke week werd aan beide recipiënten twee liter verse 50%-voedingsoplossing toegevoegd.



Figuur III-3: Vereenvoudigde schematische weergave (links) en reële weergave (rechts).

### 3.3. Einde van de proef

Op 17 april 2012 werd de spanningsbron uitgeschakeld. Vervolgens werden de planten één voor één geoogst zoals beschreven in Hoofdstuk 1, paragraaf 5 “Oogst van de planten”, p. 33.. De verse en droge wortelmasse konden in deze opstelling wél eenvoudig bepaald worden.

## HOOFDSTUK 3

# DATAVERZAMELING EN MEETAPPARATUUR

### 1. Data-acquisitie

Verschillende variabelen van het serremicroklimaat werden met sensoren gemeten (Tabel III-8). De outputsignalen hiervan werden geregistreerd met een data-aquisitie-eenheid (CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) met bijbehorende software (LoggerNet, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA). Deze datalogger met interne spanningsmeter registreerde ook het door de batterij opgelegde voltage en was bovendien in staat om via een interne weerstand in serie de stroomsterkte te berekenen. Om de 20 seconden werd een datapunt gegenereerd waarbij om de vijf minuten een gemiddelde werd berekend en weggeschreven. Vijf minuten gemiddelden zijn ideaal om de dynamiek van de variabelen uit te zetten, zonder dat een overmaat aan data moet worden verwerkt.

**Tabel III-8: Gemeten variabelen van het microklimaat met aanduiding van de gebruikte sensor.**

Variabele	Sensor
Relatieve luchtvochtigheid (% RH)	Capacitieve luchtvochtigheidsensor (type EE08, E+E Elektronik, Engerwitzdorf, Oostenrijk)
Luchttemperatuur (T)	Thermokoppel (type T: Cu-Co, Omega Engineering, Inc., Manchester, Verenigd Koninkrijk)
Fotosynthetisch actieve straling (PAR)	PAR-quantum sensor (type QS, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, Verenigd Koninkrijk)

### 2. Dataverwerking en statistische analyse

Zowel de manueel gemeten data als de dataloggergegevens werden bewerkt en statistisch onderzocht met computersoftware (SigmaPlot™ 11.0, Systat Software, Inc., CA, USA).

### 3. Bepaling van de zuurtegraad (pH) en geleidbaarheid (EC)

De pH-bepalingen van o.a. de verschillende nutriëntenoplossingen en vloeistofstalen werden uitgevoerd met behulp van een pH-meter (HI 9024, Hanna Instruments Inc., Woonsocket, RI, USA). De geleidbaarheid van de verschillende nutriëntenoplossingen werden gemeten met een EC-meter (HI9033, Hanna Instruments Inc., Woonsocket, RI, USA).

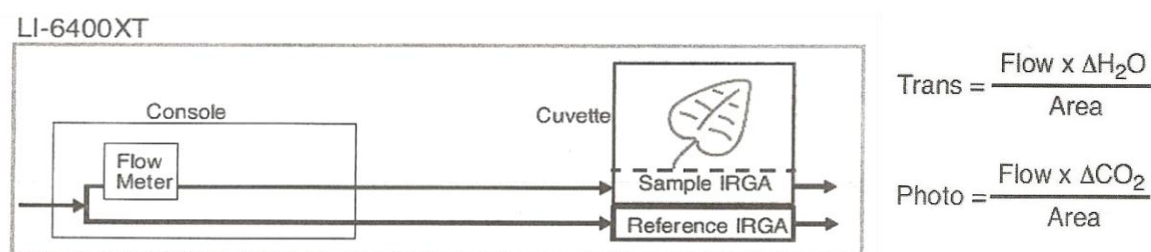
### 4. Bepaling van de bladoppervlakte

Voor het bepalen van de totale bladoppervlakte werden de bladeren per plant ingescand bij een resolutie van 150 dpi (dots per inch). Nadien werden de scans in het grafische computerprogramma

'Image J' omgezet naar binaire code waardoor, na ijking, de totale oppervlakte gemakkelijk kon bepaald worden door het tellen van het aantal zwarte pixels.

## 5. LICOR-metingen

De LI-COR (types LI-6400 (XT), LI-COR Biosciences, Inc., Nebraska, USA) is een draagbaar fotosyntheseapparaat dat gebruik maakt van een gemodificeerd open meetsysteem (Figuur III-4): fotosynthese- en transpiratiemetingen zijn gebaseerd op de verschillen in CO<sub>2</sub>- en H<sub>2</sub>O<sub>(g)</sub>-concentraties tussen een ingestelde referentiewaarde en het geanalyseerde staal. Bovendien zijn de gasanalyzers in het sensorhoofd gesitueerd, waardoor tijdsvertragingen geëlimineerd worden en er een snelle reactie is op veranderingen in de bladeren.



**Figuur III-4: Schematische voorstelling van een open differentieel gasuitwisselingssysteem met bijhorende formules voor het berekenen van de transpiratie- en fotosynthesesnelheden.**

In tabel III-9 worden de voornaamste waarden vermeld die werden ingesteld voor de fotosynthese- en fluorescentiemetingen. Figuur III-5 geeft een reële weergave van het toestel en een meting weer.

**Tabel III-9: Ingestelde waarden van enkele parameters bij de LICOR-metingen.**

Parameter	Ingestelde waarde
Algemene instellingen	
Oppervlak bladcuvette	2 cm <sup>2</sup>
Stomatale ratio	0,5 (stomata zitten bovenaan en onderaan het blad)
CO <sub>2</sub> -omgeving	400 ppm
Luchtdebiet	300 μmol.s <sup>-1</sup> aangevoerde verse lucht
Bloktemperatuur	20°C (najaarproef) en 25°C (voorjaarsproeven)
Fotosynthesemeting	
PAR-intensiteit	1500, 1250, 1000, (750), 500, 250, 100, (50) en 0 μmol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
Fluorescentiemeting	
PAR-intensiteit	0, 400 en 1000 μmol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>

### 5.1. Fotosynthesemetingen

Het sensorhoofd met meetcuvette werd telkens op het derde blad geplaatst zodanig dat zo weinig mogelijk nerven, die de fotosynthesemetingen zouden kunnen vertekenen, werden omsloten. Het blad werd minstens drie minuten blootgesteld aan de lichtintensiteit alvorens een datapunt gegenereerd



werd. De verschillende lichtintensiteiten werden in afnemende volgorde opgelegd omdat de huidmondjes (sluiten) minder snel reageren dan de fotosynthetische centra. Zo wordt licht de bepalende factor en niet de CO<sub>2</sub>-aanvoer naar de stomatale opening (Steppe, 2011).



**Figuur III-5: Het LI-6400 systeem met de bijhorende fluorescentiekop (links) en een fotosynthese- en/of fluorescentiemeting op een tomaatplant met de LICOR (rechts).**

In een lichtresponsiecurve- of kromme wordt de netto fotosynthesesnelheid ( $P_n$ ) uitgezet in functie van de PAR-intensiteit ( $I$ ), uitgedrukt in  $\mu\text{mol PAR m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . De  $P_n$  geeft het verschil weer tussen de bruto fotosynthesesnelheid en de respiratiesnelheid, beiden uitgedrukt in  $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . De respiratiesnelheid gemeten tijdens volledige duisternis ( $0 \mu\text{mol PAR m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) wordt donkerrespiratie ( $R_d$ ) genoemd en kan als maat beschouwd worden voor de metabolische (niet-fotosynthese) activiteit van de plant. Het opstellen van lichtresponsiecurven gebeurt hoofdzakelijk door datapuntfitting aan een rechthoekige hyperboolfunctie zoals weergegeven in vergelijking III-1 (Steppe, 2011).

$$P_n = \frac{\alpha_c \times (I - I_c) \times P_{n,\max}}{P_{n,\max} + \alpha_c \times (I - I_c)} \quad \text{Vergelijking III-1}$$

Hierin staan de parameters  $I_c$  voor het lichtcompensatiepunt d.i. is de lichtsterkte waarbij  $P_n$  nul wordt en  $P_{n,\max}$  voor de maximale fotosynthesesnelheid die biofysisch mogelijk is. De laatste parameter,  $\alpha_c$ , is de kwantumefficiëntie bij het lichtcompensatiepunt ( $I_c$ ). Dit is de helling van de raaklijn aan de curve die door dit punt gaat en wordt uitgedrukt in  $\mu\text{mol CO}_2\cdot\mu\text{mol}^{-1} \text{ PAR}$ .

## 5.2. (Chlorofyl-a)fluorescentiemetingen

Wanneer een foton geabsorbeerd wordt door een chlorofyl-a molecule geraakt een valentie-elektron in een aangeslagen toestand. Bij het terugkeren naar de grondtoestand kan de geabsorbeerde energie worden vrijgesteld op drie manieren: via chlorofylfluorescentie ( $F$ ), als warmte ( $H$ ) of via de elektronentransportketen geassocieerd met de fotosyntheselichtreacties ( $P$ ). Wanneer  $F$ ,  $H$  en  $P$  worden uitgedrukt als een fractie van de totale hoeveelheid geabsorbeerde lichtfotonen geldt:

$$F + H + P = 1$$

**Vergelijking III-2**

Veel fluorescentie wijst op een groot energieverlies voor de plant, wat nadelig is voor de groei. Fluorescentiemetingen werden dan ook aangewend om de fotosynthese kwalitatief te beoordelen en dus om na te gaan of de plant onderworpen is aan stress door de spanningsoplegging. Voor een gezond blad is de fractie aan energie gedissipeerd als fluorescent licht klein: 0,6 tot 3-5% (Steppe, 2011). Enkele belangrijke basisvariabelen van de fluorescentiemeting worden weergegeven in tabel III-10. Deze variabelen worden bepaald bij ofwel donker (DAB) ofwel licht (LAB) geadapteerde bladeren.

**Tabel III-10: Basisvariabelen van de fluorescentiemetingen**

Variabele	Omschrijving
$F_o$	Minimale fluorescentie bij volledige duisternis voor een DAB
$F_o'$	Minimale fluorescentie bij een donkerpuls voor een LAB
$F_m$	Maximale fluorescentie bij verzadigende lichtcondities voor een DAB
$F_m'$	Maximale fluorescentie gedurende een verzadigingsflash voor een LAB
$F_s$	“Steady-state”-fluorescentiewaarde bij een niet-verzadigend licht waaraan een blad is geadapteerd
$F_v$	Verschil tussen $F_m$ en $F_o$ (voor DAB)
$\Delta F$	Verschil tussen $F_m'$ en $F_s$ (voor LAB)

Met de fluorescentievariabelen uit tabel III-10 kunnen enkele belangrijke kwalitatieve karakteristieken van de fotosynthese bij plantenbladeren berekend worden. Deze kunnen op hun beurt in verband gebracht worden met het al dan niet optreden van stress (Vergelijking III-3 en III-4).

$$\Phi_{PSII, max} = \frac{F_m - F_o}{F_m} = \frac{F_v}{F_m} \quad \text{Vergelijking III-3}$$

$$\Phi_{PSII} = \frac{F_m' - F_s}{F_m} = \frac{\Delta F}{F_m} \quad \text{Vergelijking III-4}$$

De maximale fotochemische efficiëntie van PS II,  $\Phi_{PSII, max}$ , geeft de fractie aan geabsorbeerde PAR-fotonen weer die gebruikt worden in de lichtreacties bij een DAB (Vergelijking III-3). De effectieve fotochemische efficiëntie van PS II,  $\Phi_{PSII}$ , geeft deze fractie weer voor een LAB (Vergelijking III-4).

## 6. Vloeistofstaalname, anionen (IC)- en magnesiumbepaling (AAS)

Vloeistofstaalname werd uitgevoerd met injectiespuiten waarbij 2 mL vloeistofstaal werd onttrokken aan de rotswolblokjes op één centimeter van zowel boven als onderzijde of in proef 3 op één centimeter boven de kathode en één centimeter onder de anode in de bulkvloeistof. De staalname bij beide uitvoeringen van proef 1 kon enkel worden uitgevoerd op de lege blokjes doordat de plantenwortels op het moment van staalname, d.i. net voor de oogst, de voedingsoplossing in de bovenzijde reeds volledig hadden opgenomen. Aangezien in de tweede proef met rotswol geen lege rotswolblokjes gebruikt werden, kon hier geen staalname gedaan worden. Met een



anionenchromatograaf (761 Compact IC, Metrohm AG, Zwitserland) werden sulfaat ( $\text{SO}_4^{2-}$ )-, nitraat ( $\text{NO}_3^-$ )-, chloride ( $\text{Cl}^-$ )- en fosfaat ( $\text{PO}_4^{3-}$ )-concentraties bepaald in deze vloeistofstalen. Het vloeistofstaal werd daarbij tien keer verdund met milliQ-water. Van de vloeistofstalen, genomen in de derde proef, werd de magnesiumconcentratie bepaald door middel van atomaire absorptiespectrometrie (AAS) (Perkin elmer AAS 3110, Connecticut, USA). De bepaling van het magnesiumgehalte in bladstalen van de derde proef werd uitgevoerd door het Laboratorium voor Analytische Chemie en Toegepaste Ecochemie, universiteit Gent.

## 7. Impedantiemeting

Impedantiemetingen werden uitgevoerd op de 0%- en 25%- rotswolblokjes na afloop van de voorjaarsopzet van de eerste proef. Net voor de meting werden de blokjes grondig uitgespoeld, ter verwijdering van de mogelijk opgehoopte nutriënten, en verzadigd met stadswater. Met deze meting kon de reële weerstand ( $R$ ) van het substraat bepaald worden. Door het aanleggen van een extern potentiaalverschil vormt zich immers een elektrische dubbellaag aan beide elektroden (zie Deel I p. 5-6) die zorgt voor een gedeeltelijke afscherming ('shielding') van het aangelegde elektrische veld. Geladen deeltjes die nog in de voedingsoplossing aanwezig zijn, zullen dus onderworpen worden aan een kleinere elektrische spanningsgradiënt dan af te lezen valt op de datalogger. Hierdoor geldt de wet van Ohm niet langer en moet de reële weerstand anders bepaald worden, in dit geval via impedantiemetingen ( $Z$ ). Deze metingen werden uitgevoerd met een potentiostaat (Bio-Logic, Science Instruments, Frankrijk). De kathode deed dienst als werkelektrode en de anode als referentie-elektrode. Met de potentiostaat werden onderstaande technieken achtereenvolgens aan de rotswolsubstraatcel opgelegd. Tussen beiden technieken werd niet overgeschakeld op een open circuit.

- **Techniek 1:** Chronoampèrometrie (CA): Gedurende 15 minuten werd een constant voltage opgelegd van 1 V ten opzichte van de referentie-elektrode. De stroomsterkte ( $I$ ) werd daarbij gelogd in functie van de tijd.
- **Techniek 2:** Potentio-elektrochemische Impedantie Spectroscopie (PEIS): Hierbij wordt een voltage opgelegd van 1 V ten opzichte van de referentie-elektrode waarbij de impedantie ( $Z$ ) gemeten wordt in de frequentierange 1-100 MHz.

De reële weerstand van het systeem is onafhankelijk van de frequentie van de impedantiemeting. Daardoor kan uit een Nyquistdiagram (geplot in techniek 2), dat de impedantiewaarden bij verschillende frequenties weergeeft, het reële deel van de weerstand afgeleid worden. De impedantie wordt immers ontleed weergegeven in een reële ( $R$ ) en imaginaire ( $-Im$ ) weerstand. Voor de waarde op de curve waar de imaginaire weerstand nul is ( $-Im(Z)=0$ ), kan de waarde van de reële weerstand bijgevolg worden afgelezen.

---

## **IV. Resultaten**

---



In dit deel zullen de resultaten die gevonden werden tijdens alle experimenten gerapporteerd worden. Allereerst wordt proef 1 (rotswolproef met de 0%-, 25%-, 50%- en 100%-voedingsoplossing) besproken, direct gevolgd door proef 2 (rotswolproef met de 50%-voedingsoplossing). Tot slot worden de resultaten van proef 3 (volledig hydroponisch met de 50%-voedingsoplossing) aangehaald. Er zal een onderscheid gemaakt worden tussen resultaten die gerelateerd zijn aan de tomaatplanten op zich en deze die verband houden met het microklimaat en de (elektro)fysicochemische aspecten van het groeisubstraat (rotswol of volledig hydroponisch). In de plantgerelateerde grafieken en tabellen is het gemiddelde weergegeven van de planten binnen elke groep (n=3) met standaardafwijking, indien niet anders vermeld. Significante verschillen (student t-test, significantieniveau  $\alpha = 0,05$ ) tussen test- en controlegroep binnen elke concentratiereeks werden weergegeven met een asterisk (\*).

## HOOFDSTUK 1

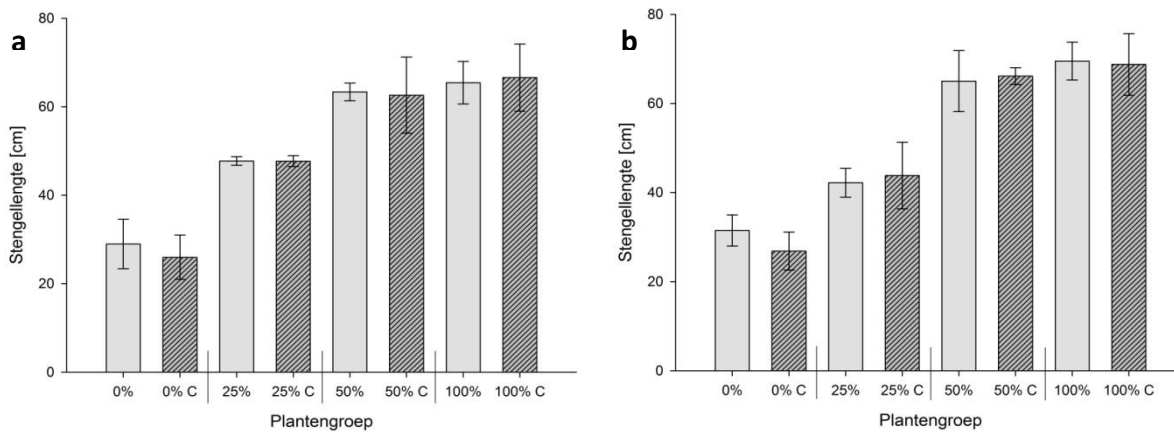
### RESULTATEN PROEF 1

In dit hoofdstuk worden de resultaten besproken die werden bekomen bij het hoofdexperiment dat zowel in het late najaar (najaarsuitvoering, van 22 november 2011 tot 11 januari 2012) als in het voorjaar (voorjaarsuitvoering, van 28 februari 2012 tot 14 april 2012) werd uitgevoerd. De voorjaarsproef vertoont enkele modificaties ten opzichte van de najaarsproef. Deze werden besproken in Deel III p. 34-35. Beide proeven zullen parallel besproken worden. Het doel van deze proef was om na te gaan of het opleggen van een voltageverschil (1V) over het rotswolsubstraat een wezenlijk effect kan teweegbrengen in de groei. Er werd bovendien gekeken of de nutriëntenconcentratie van de toegediende voedingsoplossing van invloed was op de eventuele effecten van de elektrische stimulatie.

#### 1. Plantgerelateerde karakteristieken

##### 1.1. Plantlengte

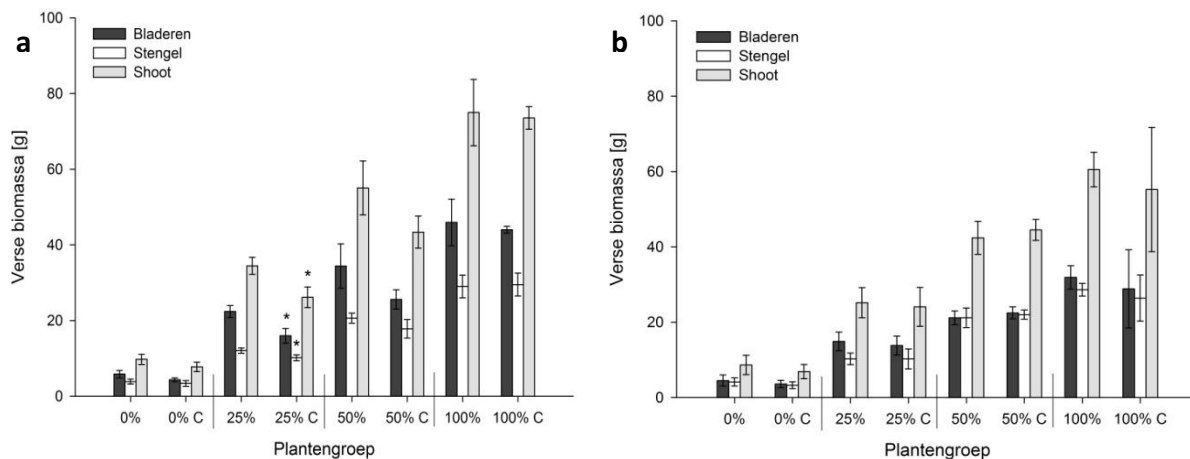
Na de oogst werd de stengellengte bepaald (Figuur IV-1). Visuele waarnemingen voorafgaand aan deze meting lieten reeds vermoeden dat de verschillen in plantlengte tussen test- en controleplanten niet groot waren, wat ook tot uiting kwam in de resultaten. Planten opgegroeid met een lagere concentratie aan nutriënten in de voedingsoplossing werden duidelijk minder groot. Alle 50%-planten presteerden echter net zo goed als deze opgekweekt met de standaardvoedingsoplossing (100%). De plantlengte bij de najaars- en voorjaarsuitvoering waren gelijkaardig voor de overeenstemmende groepen.



**Figuur IV-1: Stengellengte bij oogst voor de a) najaarsopzet en b) voorjaarsopzet. De abscis geeft de concentratie weer waarmee test- en controle(C)planten werden behandeld.**

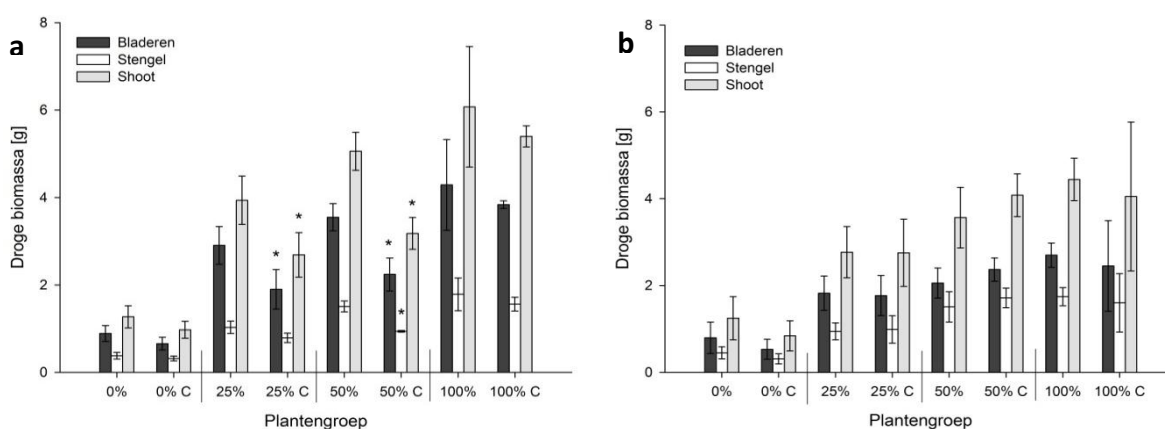
## 1.2. Biomassa

In tegenstelling tot de stengellengte was er in de najaarsproef wel een duidelijk verschil in bovengrondse biomassa (shoot) tussen de controle- en testplanten van de 0%-, 25%- en 50%-concentratierreeks. De testplanten produceerden hierbij meer biomassa dan de controleplanten. Er werden significante verschillen gevonden in verse biomassa (Figuur IV-2a) bij de 25%-planten voor zowel de bladeren ( $22,4 \pm 1,6$  t.o.v.  $16,0 \pm 1,9$  g,  $p=0,011$ ), stengel ( $12,1 \pm 0,7$  t.o.v.  $10,2 \pm 0,8$  g,  $p=0,035$ ) als volledige shoot ( $34,5 \pm 2,3$  t.o.v.  $26,2 \pm 2,7$  g,  $p=0,015$ ). De droge biomassa (Figuur IV-3a) verschilde significant bij zowel de 25%- als de 50%-planten. Bij de 25%-planten waren deze beperkt tot de bladeren ( $2,9 \pm 0,4$  t.o.v.  $1,9 \pm 0,5$  g,  $p=0,049$ ) en de volledige shoot ( $3,9 \pm 0,6$  t.o.v.  $2,7 \pm 0,5$  g,  $p=0,045$ ). Bij de 50%-planten waren de verschillen significant voor zowel de bladeren ( $3,5 \pm 0,3$  t.o.v.  $2,2 \pm 0,4$  g,  $p=0,010$ ), de stengel ( $1,5 \pm 0,1$  t.o.v.  $0,9 \pm 0,0$  g,  $p=0,001$ ) als de volledige shoot ( $5,1 \pm 0,4$  t.o.v.  $3,2 \pm 0,4$  g). De voorjaarsuitvoering liet dergelijk patroon niet zien (Figuren IV-2b en 3b). De test- en controleplanten binnen dezelfde concentratierreeks vertoonden geen noemenswaardige verschillen in verse of droge biomassa. De grote standaardafwijking bij de 100% C-planten in de voorjaarsopzet is voornamelijk te wijten aan plant 100%-C2 die beschadiging vertoonde aan het jongste blad.



**Figuur IV-2: Verse biomassa bij oogst voor de a) najaarsopzet en b) voorjaarsopzet.**

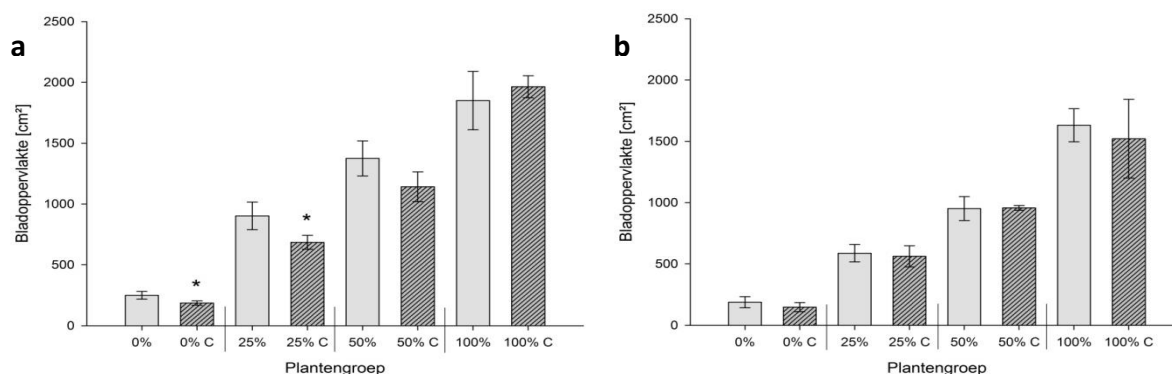
De planten opgekweekt met de 100%-voedingsoplossing hadden in beide proeven zoals verwacht de grootste verse shootbiomassa. In de najaarsuitvoering was er echter geen significant verschil in droge shootbiomassa tussen de 50%-testplanten en de 100%-controleplanten ( $5,1 \pm 0,4$  t.o.v.  $5,4 \pm 0,2$ g). Dit was echter wel het geval tussen de controleplanten van de 50%- en 100%-concentratierreeks ( $3,2 \pm 0,4$  t.o.v.  $5,4 \pm 0,2$ g,  $p < 0,001$ ). In het najaar waren voor wat de droge shootbiomassa betreft, de 25%-testplanten zelfs succesvoller dan de 50%-controleplanten ( $3,9 \pm 0,6$  t.o.v.  $3,2 \pm 0,4$ g,  $p = 0,118$ ) al konden geen significante verschillen worden vastgesteld. In het voorjaar werden geen dergelijke verschillen tussen de test- en controleplanten gevonden. Hoewel verschillen in biomassa tussen de controleplanten van najaar en voorjaar over het algemeen klein waren (100%-C voorjaar uitgezonderd, zie boven), produceerden de testplanten in het voorjaar belangrijk minder biomassa vergeleken met het najaar.



Figuur IV-3: Droge biomassa bij oogst voor de a) najaarsopzet en b) voorjaarsopzet.

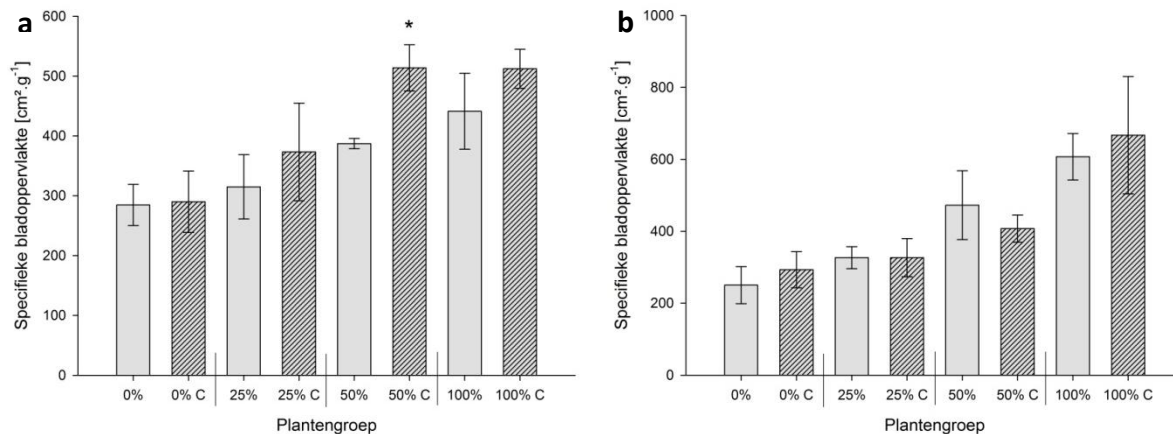
### 1.3. Blad- en fotosynthesekarakteristieken

De 0%-, 25%-, en 50%-planten hadden in het najaar niet enkel een grotere bladbiomassa (Figuur IV-2a en 3a), maar beschikten ook over een groter bladoppervlakte, hoewel dit verschil slechts significant was bij de 0%- ( $250 \pm 32$  t.o.v.  $186 \pm 17$  cm<sup>2</sup>,  $p = 0,038$ ) en 25%- ( $903 \pm 114$  t.o.v.  $685 \pm 57$  cm<sup>2</sup>,  $p = 0,042$ ) concentratierreeks. Voor de 100%-planten uit de najaarsproef ging deze theorie echter niet op: de gemiddelde grotere bladbiomassa was niet te wijten aan een hogere gemiddelde bladoppervlakte. Plant 100%-3 die, duidelijk achterbleef in bladoppervlakte, trok dit gemiddelde echter sterk omlaag.



Figuur IV-4: Absolute bladoppervlakte bij oogst voor de a) najaarsopzet en b) voorjaarsopzet.

Bij de voorjaarsopzet waren er geen noemenswaardige verschillen waar te nemen tussen de test- en controleplanten behandeld met dezelfde nutriëntenoplossing. De bladoppervlakten van de voorjaarsplanten, deze keer ook bij de controles, bleven daarbij achter ten opzichte van deze in het najaar. Een zeven dagen kortere proefperiode, maar ook de intensere lichtinval in het voorjaar, zouden hier debet aan kunnen zijn. Een veel gebruikte plantkarakteristiek, die figuren IV-3 en IV-4 samenvat, is de specifieke bladoppervlakte (Specific Leaf Area, SLA) waarbij de bladoppervlakte genormeerd wordt ten opzichte van de droge bladmassa (Figuur IV-5).

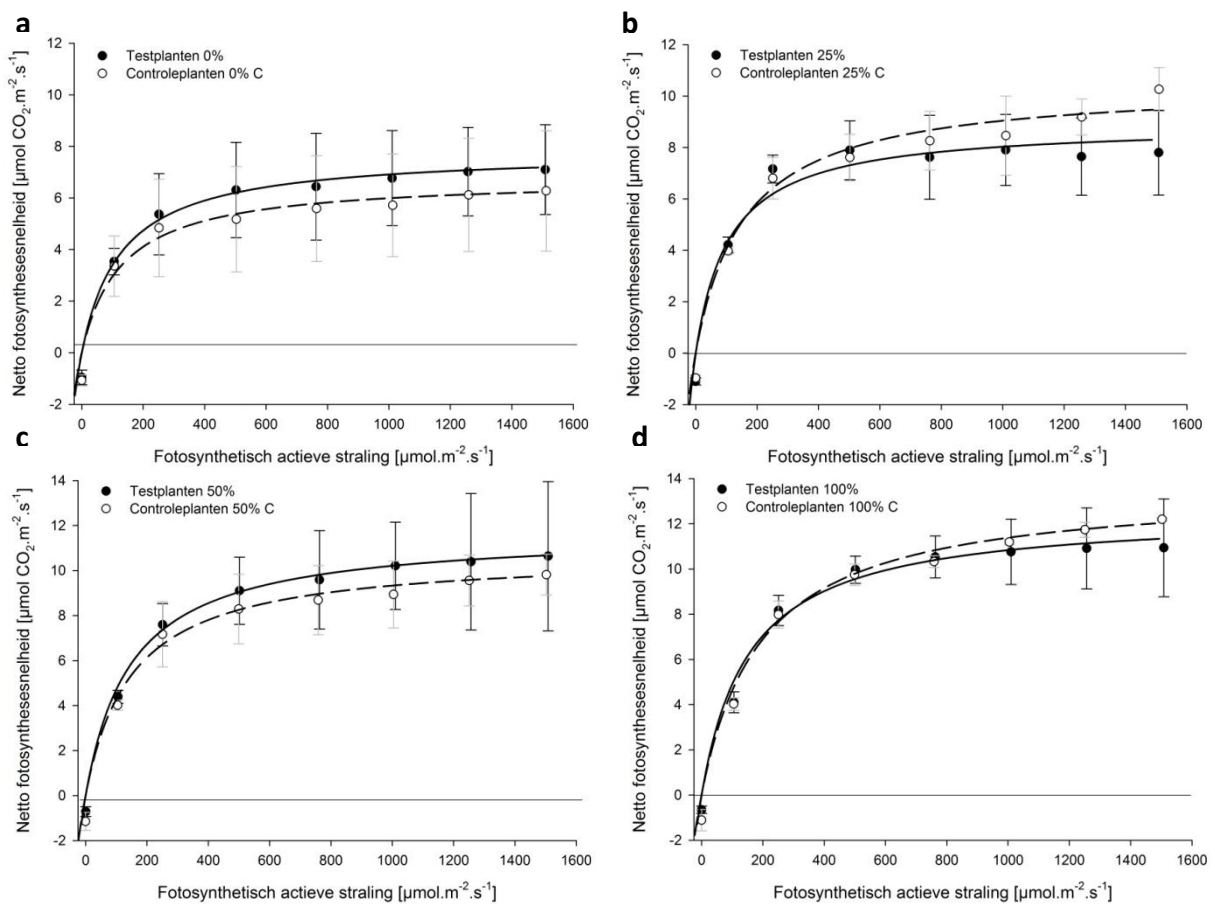


**Figuur IV-5: Specifieke bladoppervlakte (SLA) voor de a) najaarsopzet en b) voorjaarsopzet.**

Naarmate de planten meer nutriënten kregen toegediend, steeg de SLA geleidelijk. Bij de najaarsopzet is er bij de 25%, 50% en 100%-planten een trend waarneembaar dat de controleplanten een hogere SLA-waarde vertonen dan de testplanten (Figuur IV-5a). Voor de 50%-planten is de SLA zelfs significant verschillend ( $387 \pm 9$  t.o.v.  $514 \pm 39$   $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $p=0,005$ ). De testplanten van deze concentratiereksen investeren dus meer in dikkere bladeren die bovendien ook nog eens in oppervlakte omvangrijker zijn (Figuur IV-4a). De bladeren van de 0%-planten vertonen in de najaarsuitvoering een zelfde SLA-waarde. Er is dus een lineair verband tussen de bladoppervlakte en de droge bladmassa bij deze reeks planten. Figuur IV-5b, die de SLA toont van de planten gekweekt in het voorjaar, laten opnieuw geen opmerkelijke en consequente verschillen of trends zien tussen test- en controleplanten binnen dezelfde concentratiereeks. De verschillen tussen de concentratiereksen waren in het voorjaar groter dan in het najaar, dit vooral door de gevoelig hogere SLA van de 100%-planten.

De lagere SLA-waarde van de testplanten in het najaar was reeds een eerste aanwijzing om te veronderstellen dat de fotosynthese bij deze planten sneller en efficiënter verloopt dan bij hun controles. Dikkere bladeren kunnen immers meer chloroplasten, waar de fotosynthesereacties plaatsgrijpen, per eenheid van bladoppervlakte bevatten. Via LICOR-metingen konden de lichtresponsiecurven van de test- en controlegroepen opgesteld en vergeleken worden. Figuur IV-6 geeft deze grafisch weer voor de planten van de najaarsuitvoering. Tot een PAR-intensiteit van  $\pm 500$

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  lag de gemeten netto fotosynthesesnelheid ( $P_n$ ) in het najaar bij de testplanten van alle nutriëntenbehandelingen lichtjes hoger dan bij de controleplanten. Bij hogere PAR-intensiteiten was er weinig consistentie waar te nemen: de controleplanten van de 25%- en 100%-concentratierreeks scoorden hier beter dan de testplanten. Nergens werden echter significante verschillen vastgesteld in de gemeten  $P_n$ -waarden tussen test- en controleplanten van dezelfde concentratierreeks binnen de opgelegde range van PAR-intensiteiten (0-1500  $\mu\text{mol PAR}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Het opgemeten lichtregime (Bijlage I) laat zien dat in het najaar de PAR-straling echter nooit hogere intensiteiten bereikte dan 450  $\mu\text{mol PAR}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . De eerste vier datapunten van de curve zijn dan ook de belangrijkste in de praktijk.



**Figuur IV-6: Lichtresponsiekrommen van de plantengroepen van de a) 0%-concentratierreeks, b) 25%-concentratierreeks, c) 50%-concentratierreeks en d) 100%-concentratierreeks met weergave van de rechthoekige hyperbool curvefitting.**

In tabel IV-1 worden de parameters van de lichtresponsiecurves weergegeven voor de planten van zowel de najaars- als voorjaarsopzet. De kwantumefficiëntie  $\alpha_c$  lag in het najaar consequent, maar niet significant hoger voor de planten met de elektrische behandeling. Dit betekent dat per toename in de PAR-intensiteit meer  $\text{CO}_2$  wordt opgenomen en dit voor het lineaire deel van de lichtresponsiecurves, d.i. tot  $\pm 200 \mu\text{mol PAR}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (Figuur IV-6). Uitgezonderd bij de 25%-planten, lag in het najaar bij de controleplanten het lichtcompensatiepunt  $I_c$  bij duidelijk hogere PAR-intensiteiten, zonder daarbij echter significant te zijn. Dit betekent dat de controleplanten in het najaar meer licht moesten



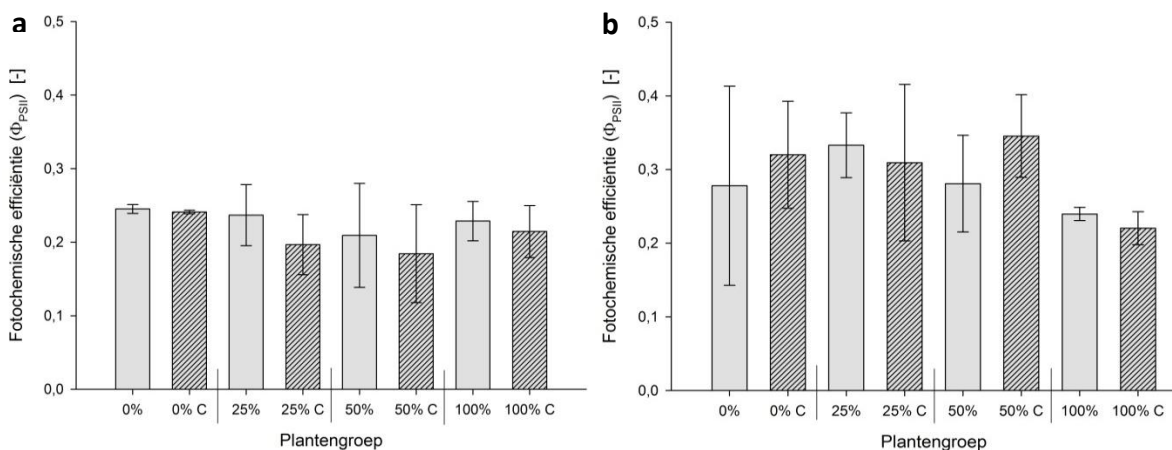
percipiëren vooraleer de respiratie door de fotosynthese werd gecompenseerd en er netto biomassa-accumulatie kon zijn. In het voorjaar lagen de  $I_c$  eveneens hoger bij de controleplanten (uitgezonderd bij de 100%-C). Bij de waarden van  $\alpha_c$  en  $P_{n,max}$  was er weinig consistentie waar te nemen. De 0%- en 100%-testplanten scoorden voor beide parameters slechter dan hun controleplanten. Bij de 25%- en 50%-concentratierreeks was dit omgekeerd. Nergens waren er echter significante verschillen zichtbaar.

**Tabel IV-1: Parameters van de fotosynthese lichtcurve (fitting aan rechthoekige hyperbool). Het eerste getal is de waarde tijdens het najaar, het tweede getal tijdens het voorjaar.**

	$I_c$ $\mu\text{mol PAR}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$		$\alpha_c^*$ $\mu\text{mol CO}_2\cdot\mu\text{mol}^{-1}\text{ PAR}$		$P_{n,max}^*$ $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	
	Najaar	Voorjaar	Najaar	Voorjaar	Najaar	Voorjaar
0%	22,6±6,2	20,1±2,2	0,060±0,010	0,068±0,007	7,8±0,3	11,4±0,3
0% C	27,1±9,2	23,9±3,2	0,052±0,011	0,074±0,008	6,8±0,4	13,3±0,3
25%	21,7±2,1	19,0±2,2	0,081±0,020	0,075±0,008	8,9±0,5	15,6±0,4
25% C	20,5±1,2	20,6±2,2	0,066±0,013	0,071±0,010	10,5±0,5	15,3±0,5
50%	14,9±3,6	18,9±2,3	0,079±0,008	0,081±0,008	11,7±0,3	14,4±0,3
50% C	22,9±5,7	19,5±6,2	0,072±0,011	0,066±0,011	10,7±0,4	14,0±0,6
100%	14,5±2,7	20,1±5,6	0,081±0,013	0,048±0,012	12,5±0,4	12,5±0,8
100% C	22,2±6,9	18,9±5,2	0,070±0,009	0,063±0,007	13,6±0,4	12,8±0,3

\* hiervoor is de standaardfout op de volledige curvefitting weergegeven i.p.v. de standaardafwijking.

Een variabele die kwalitatief de prestaties van het fotosyntheseapparaat van een plant beoordeelt, is de fotochemische efficiëntie  $\Phi_{PSII}$  (Figuur IV-7). Deze geeft de fractie van de door de invallende PAR-fotonen aangeslagen elektronen weer die effectief de fotochemische elektrontransportketen doorlopen om zo bij te dragen tot het vastleggen van atmosferische  $\text{CO}_2$  (zie ook Deel III p. 40-41). Aangezien in het najaar enkel op licht geadapteerde bladeren werd gemeten, wordt voor beide proefuitvoeringen  $\Phi_{PSII}$  getoond bij een PAR-intensiteit van  $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , ongeveer de maximale lichtintensiteit gemeten in het najaar. De planten die in het najaar een elektrische behandeling kregen, gingen gemiddeld efficiënter om met de beschikbare elektronen (Figuur IV-7a). De grote variatie op de metingen liet echter niet toe deze trend significant te bevestigen. De fotochemische efficiënties van de voorjaarsplanten vertoonden geen consequente trend (Figuur IV-7b). De waarden lagen echter, uitgezonderd bij de 100%-planten, belangrijk hoger in het voorjaar in vergelijking met het najaar.



**Figuur IV-7: Fotochemische efficiëntie bij een PAR-intensiteit van  $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  voor de planten van a) de najaarsopzet en b) de voorjaarsopzet.**

## 2. Verschillen in microklimaat tussen najaar- en voorjaarsuitvoering

Het serremicroklimaat werd in het voorjaar gekenmerkt door extremere condities van de temperatuur (warmer) en de relatieve luchtvochtigheid (lager). Hoewel de gemiddelde dagelijkse PAR-straling lager lag in het voorjaar, werden wel veel hogere intensiteiten gemeten over de middag (Tabel IV-2).

**Tabel IV-2: Variabelen (vijfminuten gemiddelden) betreffende het microklimaat tijdens de najaarsopzet (1<sup>ste</sup> waarde) en voorjaarsopzet (2<sup>de</sup> waarde).**

	Temperatuur °C		PAR-straling $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$		RH %	
	24u-gemiddelde	17,6	20,4	127	86	64,6
Nachtgemiddelde	16,2	17,1	n.v.t.	n.v.t.	65,6	63,1
Dag*gemiddelde	19,1	23,7	255	173	63,6	49,8
Maximaal	24,2	44,5	473	1206	84,4	76,4
Minimaal	12,7	12,1	n.v.t.	n.v.t.	38,6	16,0

\*Voor een grafisch overzicht van deze variabelen wordt verwezen naar Bijlagen I en II.

\*N.v.t.: niet van toepassing; PAR-straling in de nachtperiode schommelt steeds rond  $0 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

\*De dagperiode wordt gedefinieerd als de periode waarin de PAR-intensiteit groter was dan vijf  $\mu\text{mol PAR.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

## 3. Substraatgebonden karakteristieken

In deze paragraaf worden de resultaten beschreven die te maken hebben met de fysicochemische eigenschappen van het rotswolsubstraat waarop de tomaatplanten gekweekt werden.

### 3.1. Stroomdichtheden in het rotswolsubstraat

De stroomsterkte werd gelogd voor de drie planten van elke testgroep (parallelschakeling). Deze waarden werden genormaliseerd door te delen door het totale kathodeoppervlak (3 keer  $49 \text{ cm}^2$ ), waardoor de stroomdichtheid J, uitgedrukt in  $\mu\text{A.cm}^{-2}$ , bekomen werd. De stroomdichtheden in de planten- en lege blokjes namen in het najaar af van lage naar hoge concentraties van de toegediende voedingsoplossing, waar dit voor de plantenblokjes niet het geval was in het voorjaar (Tabel IV-3).

**Tabel IV-3: Stroomdichtheden, in  $\mu\text{A.cm}^{-2}$ , voor de planten- en lege blokjes van de vier verschillende voedingsoplossingen. De 1<sup>ste</sup> waarde is deze voor het najaar, de 2<sup>de</sup> waarde voor het voorjaar.**

		0%		25%		50%		100%	
Plant	24u-gemiddelde	1,56	0,82	1,26	1,08	1,02	1,15	0,64	0,82
	Nachtgemiddelde	1,46	0,66	1,19	0,86	0,97	0,90	0,59	0,65
	Daggemiddelde	1,66	0,99	1,33	1,32	1,08	1,43	0,70	0,99
	Nacht/Dag	0,88	0,67	0,89	0,65	0,90	0,63	0,84	0,66
Leeg	24u-gemiddelde	1,88	N.G.	1,13	N.G.	0,72	N.G.	0,72	N.G.
	Nachtgemiddelde	1,79	N.G.	1,05	N.G.	0,66	N.G.	0,66	N.G.
	Daggemiddelde	1,98	N.G.	1,22	N.G.	0,79	N.G.	0,78	N.G.
	Nacht/Dag	0,90		0,86		0,84		0,85	

\*N.G.: Niet gemeten door een beperkte capaciteit van de datalogger.

De relatieve verschillen tussen de dag- en nachtgemiddelden van de stroomdichtheid lagen hoger in het voorjaar. Hoewel de gemiddelde stroomdichtheden binnen dezelfde uitvoering grondig verschilden tussen de verschillende concentratiereeksen (b.v.  $1,56 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  (0%) en  $0,64 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  (100%)), najaar), vertoonde de dag/nacht verhouding binnen dezelfde proefperiode weinig variatie ( $0,87\pm 0,3$  in het najaar en  $0,65\pm 0,3$  in het voorjaar).

### 3.2. Anionenverdeling en pH-verschillen onder invloed van het elektrisch veld

Onder invloed van het elektrisch veld leek zich een (beperkte) anionenmigratie voor te doen van de onder- naar de bovenzijde van de lege rotswolblokjes, resulterend in meer negatieve ionen aan de anode dan aan de kathode (Tabel IV-4, resultaten  $\text{Cl}^-$  en  $\text{SO}_4^{2-}$  niet weergegeven). Vooral fosfaat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) bleek gevoelig te zijn voor deze migratie. De concentratieverschillen tussen boven- en onderzijde namen over het algemeen af bij toenemende concentraties van de voedingsoplossing. Bij de lege controleblokjes leek de anionenverdeling en de daarmee samenhangende anionensom van toevallige factoren af te hangen en waren de verschillen kleiner (tot maximaal -33% voor  $\text{NO}_3^-$ , blokje 0% CL, voorjaar). De totale anionensom (som van boven- en onderzijde) was voornamelijk bij de 0%-reeks groter bij de lege testblokjes vergeleken met de lege controleblokjes, wat zou kunnen wijzen op een retentie van ionen in de substraatoplossing onder invloed van het elektrische veld. De pH-verschillen tussen boven- en onderzijde bij de controleblokjes bleven beperkt tot maximaal 0,7 pH-eenheden (25%-CL, najaar). Grote pH-verschillen, tot maximaal 4,6 pH-eenheden (0%-L, najaar), traden op tussen boven en onderzijde in de blokjes met opgelegd voltage. De pH was - op blokje 100%-L (voorjaar) na - aan de bovenzijde (anode) steeds lager en aan de onderzijde (kathode) - op blokjes 0%-L na - steeds hoger bij de testblokjes in vergelijking met de controleblokjes (Tabel IV-4).

**Tabel IV-4: Anion-, anionensom- en pH-verdeling in het substraat\* in het najaar (links) en in het voorjaar (rechts). Het %-concentratieverschil\*\* tussen boven- en onderzijde is weergegeven voor  $\text{NO}_3^-$  en  $\text{PO}_4^{3-}$ . De 1<sup>ste</sup> waarde voor de anionensom\*\*\* en pH werden gemeten aan de bovenzijde, de 2<sup>de</sup> aan de onderzijde. De 3<sup>de</sup> waarde voor de anionensom is de som van boven- en onderzijde. Staalname gebeurde net voor oogst.**

	$\text{NO}_3^-$ $\text{PO}_4^{3-}$		anionensom			pH		$\text{NO}_3^-$ $\text{PO}_4^{3-}$		anionensom			pH	
0% L	39%	N.D.	8,9	6,5	15,3	4,0	8,6	58%	N.D.	6,5	4,3	10,8	4,0	7,9
0% CL	-3%	N.D.	4,8	5,1	9,9	8,7	8,9	-33%	N.D.	4,4	4,3	8,7	7,8	8,0
25% L	8%	161%	12,5	11,5	24,1	6,4	8,6	6%	291%	10,4	9,1	19,5	4,9	8,1
25% CL	3%	29%	10,0	9,7	19,7	7,9	8,6	7%	-10%	9,7	9,2	18,9	7,3	7,2
50% L	1%	1%	17,8	16,3	34,1	6,6	7,2	1%	257%	16,0	15,0	31,0	5,3	8,4
50% CL	0%	-0%	16,4	16,4	32,7	7,0	7,1	-1%	-17%	15,0	15,1	30,0	6,5	6,7
100% L	6%	35%	30,6	29,4	60,0	5,6	6,7	5%	27%	27,4	25,6	53,0	6,1	6,6
100% CL	-5%	3%	27,8	29,4	57,2	6,2	6,2	0%	2%	26,4	26,4	52,7	5,8	5,6

\* Staalname kon enkel gebeuren bij lege blokjes omdat planten de voedingsoplossing in grote mate reeds hadden opgenomen.

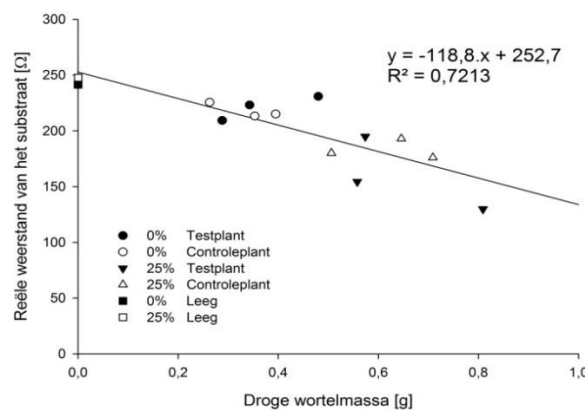
\*\* Een 0%-waarde wijst op geen concentratieverschillen. Positieve waarden wijzen op een hogere concentratie bovenaan het blokje, negatieve waarden onderaan. Er werd verondersteld dat de waterinhoud op moment van staalname in alle blokjes gelijk was waardoor een vergelijking tussen boven- en onderzijde en tussen de verschillende concentraties mogelijk was.

\*\*\*berekend als volgt:  $[\text{Cl}^-] + [\text{NO}_3^-] + [\text{PO}_4^{3-}] + [\text{SO}_4^{2-}]$ . Resultaat uitgedrukt in mM.

N.D. De waarden waarmee gerekend werd lagen onder de detectielimiet voor fosfaten.

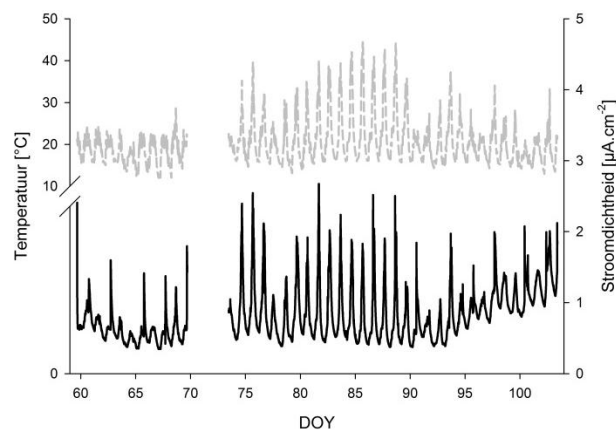
### 3.3. Verband tussen de substraatweerstand en de droge wortelmasa

In de voorjaarsuitvoering werd de droge wortelmasa bepaald met de substractiemethode (Deel III, p. 33). Doordat wortelmasa zich ontwikkelde in het rotswolsubstraat, was het aannemelijk dat enkele fysische eigenschappen (o.a. porositeit, dichtheid, poriëndiameter en weerstand) van dit substraat veranderde. De reële weerstand van de rotswolblokjes werd voor de 0%- en 25%- behandeling bepaald via impedantiemetingen (Deel III, p. 42) Hieruit bleek dat bij toenemende (droge) wortelmasa de reële substraatweerstand afnam ( $R^2 = 0,72$ ) (Figuur IV-9). De gemiddelde %-afwijking tussen de berekende weerstand, via de regressievergelijking, en de gemeten weerstand bedroeg 7,3%.



**Figuur IV-9: De reële substraatweerstand in functie van de droge wortelmasa van de 0%- en 25%-voorjaarsplanten met bijbehorende regressierechte.**

De temperatuur en de stroomdichtheid bij de 0%-testplanten in de voorjaarsuitvoering lieten een sterke overeenkomst zien in het dagelijkse verloop: grotere stroomdichtheden hingen samen met hogere temperaturen en vice versa (Figuur IV-10). Vooral tot DOY 70 is de watergift goed te zien als piekmaximum in de stroomdichtheid. De stijgende trend vanaf DOY 90 is waarschijnlijk te wijten aan de afnemende substraatweerstand door de snel toenemende wortelbiomassa in combinatie met een mogelijke ophoping van bepaalde zouten. Gelijkaardige patronen werden waargenomen bij andere nutriëntenconcentraties, alsook in het najaar (resultaten niet weergegeven).



**Figuur IV-10: Verloop van de stroomdichtheid en de temperatuur bij de 0%-testplanten in de voorjaarsuitvoering. Tussen DOY 71-76 waren geen data beschikbaar.**

## HOOFDSTUK 2

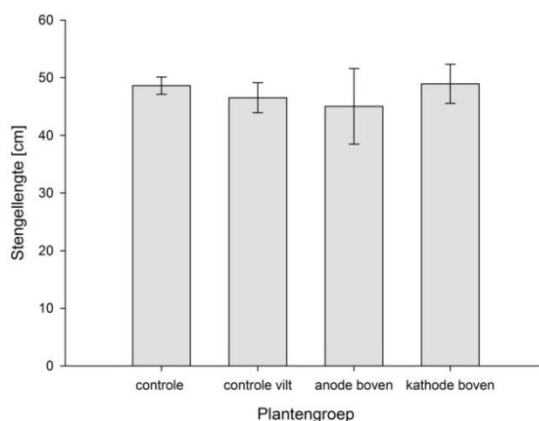
### RESULTATEN PROEF 2

Het doel van deze proef was om na te gaan of het al dan niet aanbrengen van koolstofvilt op de rotswolblokjes bij controleplanten een invloed had op de plantengroei. Bovendien werd nagegaan of de polariteit van het opgelegde voltage (1 V,  $E = 0,18 \text{ V.cm}^{-1}$ ) een invloed kon hebben op de mogelijke effecten van de eventuele plantengroei. Er werd enkel gewerkt met de 50%-voedingsoplossing omdat bij deze oplossing in de najaarsuitvoering van proef 1 de grootste verschillen werden gevonden tussen controle- en testplanten.

#### 1. Plantgerelateerde karakteristieken

##### 1.1. Plantlengte

Voorafgaande visuele waarnemingen lieten geen merkwaardige verschillen zien in stengellengte tussen de verschillende behandelingen. Eén plant die elektrisch behandeld werd en waarbij de anode bovenaan geplaatst was, vertoonde wel een duidelijke groeiachterstand. Dit zou deels verklaard kunnen worden door een slecht ontwikkeld tweede en derde blad. Zodoende bleef het gemiddelde van deze groep een weinig achter t.o.v. de andere behandelingen (Figuur IV-11). Er werden echter nergens significante verschillen vastgesteld. De controle zonder vilt scoorde een weinig beter dan de controlebehandeling met vilt. De elektrische behandeling met de kathode bovenaan bracht gemiddeld over alle behandelingen de grootste planten voort.

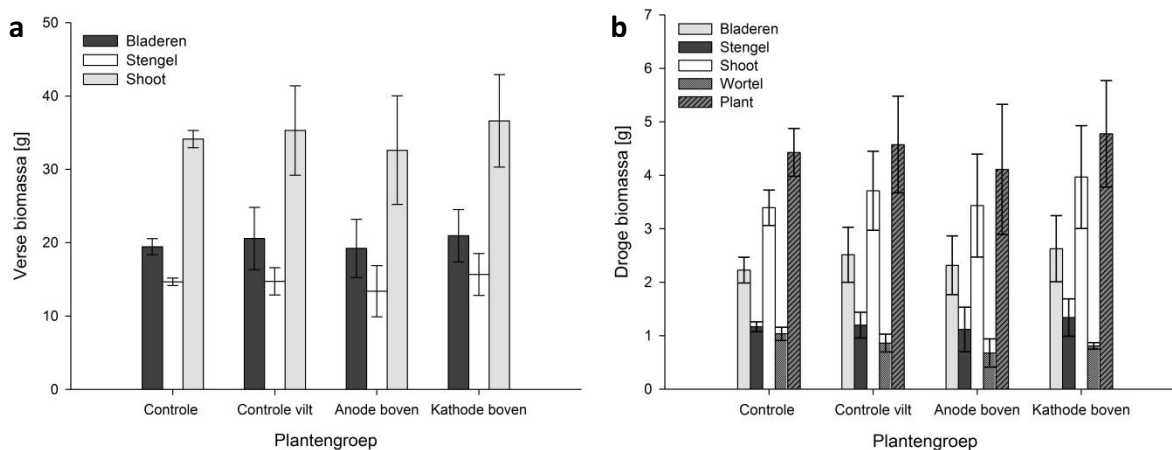


Figuur IV-11: Stengellengte bij oogst.

##### 1.2. Biomassa en droge stofgehalten

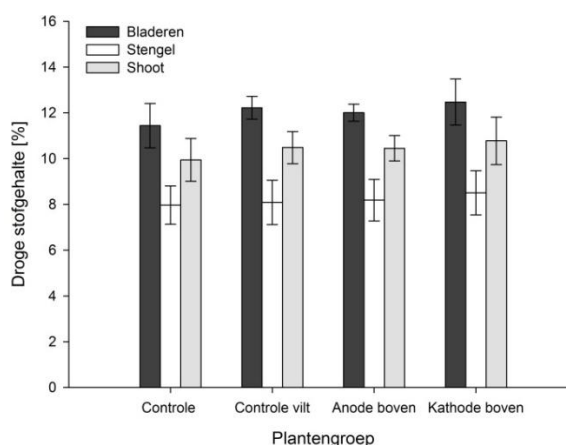
In deze proef leidden de minieme verschillen in stengellengte niet tot significante verschillen in de verse of droge biomassa van de planten van de verschillende behandelingen (Figuur IV-12). Opnieuw gaven de planten van de elektrische behandeling met de kathode bovenaan gesitueerd, de beste

resultaten en deze met de anode bovenaan, de slechtste. Van de controlebehandelingen bleek deze met het vilt het meest effectief te zijn om biomassa-accumulatie te bevorderen. Nochtans lag van alle droge wortelmassa's deze van de controlegroep zonder vilt het hoogst. Bij de substractiemethode ter bepaling van deze massa (Deel III, p. 33) moesten bij de andere behandelingen de koolstofviltlapjes, waarvan zeker de onderste beperkt met wortels doorgroeid waren, verwijderd worden. Niet alle wortelmassa hiervan kon gerecupereerd worden. Dit probleem stelde zich niet bij de viltloze controles.



**Figuur IV-12: a) Verse biomassa en b) droge biomassa voor verschillende plantendelen bij oogst.**

De gehalten aan droge stof konden alleen maar bepaald worden voor de delen van de shoot aangezien geen verse wortelbiomassa kon bepaald worden (Figuur IV-13). De planten die elektrisch behandeld werden met de kathode bovenaan het rotswolblokje, hadden voor zowel de bladeren, de stengel als de volledige shoot de hoogste droge stofgehalten. De verschillen met de andere behandelingen waren echter miniem. De controlegroep zonder vilt scoorde wat deze plantkarakteristiek betreft, het slechtst.

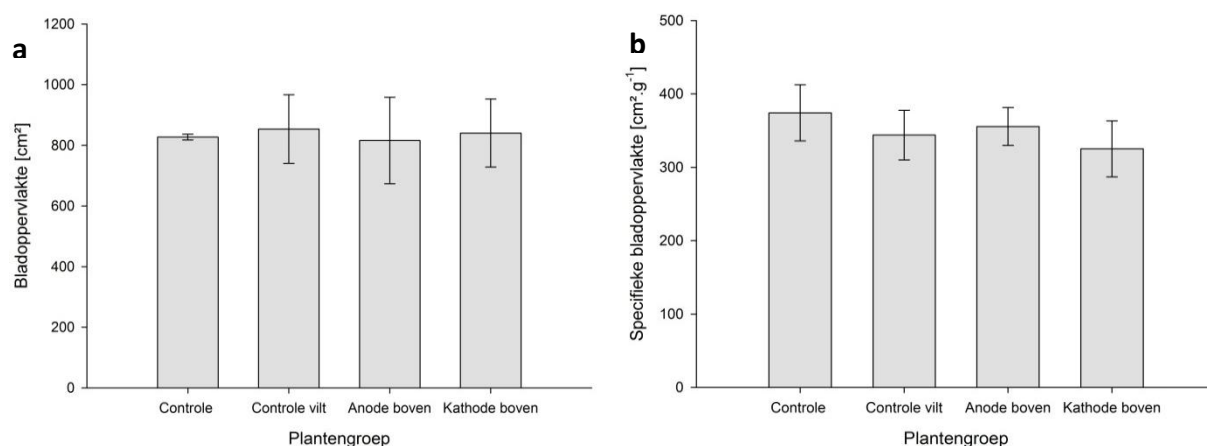


**Figuur IV-13: Droge stofgehalten voor de verschillende bovengrondse plantendelen.**

### 1.3. Bladkarakteristieken

De planten van de controlebehandeling zonder vilt vertoonden zeer weinig onderlinge verschillen in de absolute bladoppervlakte. De grootste absolute bladoppervlakten werden gevonden bij de

controleplanten met vilt, onmiddellijk gevolgd door de testplanten met de kathode bovenaan. (Figuur IV-14a). De SLA lag gevoelig lager bij de testplanten met de kathode bovenaan in vergelijking met de controleplanten zonder vilt, die het hoogst scoorden. (Figuur IV-14b). De testplanten met de anode bovenaan scoorden hoger dan de controleplanten met vilt en dit voornamelijk door het verschil in droge bladbiomassa (Figuur IV-12b) en minder door het verschil in bladoppervlakte (Figuur IV-14a).



**Figuur IV-14: a) Absolute bladoppervlakte bij oogst en b) specifieke bladoppervlakte.**

De bescheiden verschillen in de hierboven besproken plantkarakteristieken werden opnieuw bevestigd door de verwaarloosbare verschillen in de fotochemische efficiënties en parameters van de lichtresponsiekrommen van de planten met verschillende behandelingen (Tabel IV-5). De planten met de anode bovenaan vertoonden wel de laagste waarden voor wat betreft  $I_c$ , de donkerrespiratie  $R_d$  en  $P_{n,max}$ , wat wijst op een zwakker metabolisme. Opnieuw zou hier de slechte prestatie van de plant met de beschadigde bladeren een reden kunnen zijn. Er waren echter geen redenen om aan te nemen dat deze beschadigingen optraden door oplegging van het elektrische veld. De  $P_{n,max}$  lag echter bij beide controlegroepen bescheiden hoger dan bij de testgroepen.

**Tabel IV-5: Fotochemische efficiënties en parameters van de lichtresponsiecurven. Voor  $P_{n,max}$  en  $\alpha_c$  is de standaardfout op de volledige curvefitting weergegeven, voor de andere waarden de standaardafwijking.**

		Controle	Controle vilt	Anode boven	Kathode boven
$\Phi_{max, PSII}$ (-)		0,76±0,01	0,76±0,01	0,76±0,01	0,77±0,01
$\Phi_{PSII}$ (-)					
PAR	0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	0,76±0,01	0,76±0,01	0,76±0,01	0,77±0,01
	400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	0,26±0,02	0,24±0,02	0,23±0,03	0,23±0,02
	1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	0,10±0,01	0,09±0,01	0,09±0,01	0,10±0,01
$I_c$ ( $\mu\text{mol PAR}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )		26,9±3,3	27,8±3,9	26,4±3,8	29,1±6,9
$R_d$ ( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )		1,57±0,03	1,73±0,18	1,50±0,14	1,65±0,40
$P_{n,max}$ ( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )		14,5±0,4	14,8±0,5	13,5±0,4	13,8±0,5
$\alpha_c$ ( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\mu\text{mol}^{-1}\text{ PAR}$ )		0,078±0,009	0,073±0,11	0,075±0,010	0,079±0,012

## 2. Onderlinge interactie tussen microklimaat en koolstofvilt

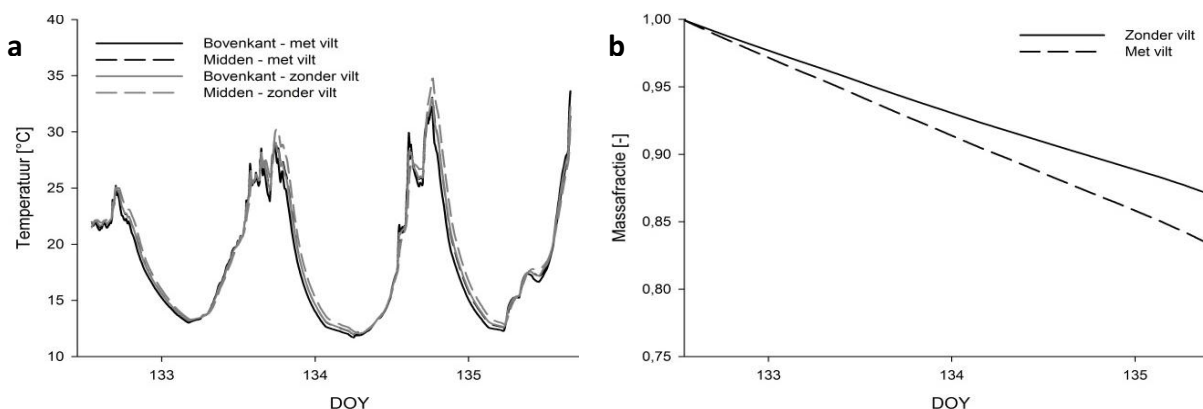
Tabel IV-6 geeft de gemiddelde waarden weer van het gemeten serremicroklimaat alsook deze van de stroomdichtheden voor beide testgroepen. De stroomdichtheid lag hoger voor de testgroep met de anode bovenaan. Kathodekatalyse verloopt altijd moeizamer vergeleken met anodekatalyse. Wanneer de kathode bovendien werd blootgesteld aan de drogende atmosfeer, waardoor het elektrisch contact met de cel afnam, zal dit vermoedelijk een extra negatieve impact gehad hebben op de stroomsterkte.

**Tabel IV-6: Variabelen betreffende het microklimaat en de gemiddelde stroomdichtheid (1<sup>ste</sup> waarde anode boven, 2<sup>de</sup> waarde kathode boven) opgemeten tijdens de proefopzet tussen 22 maart 2012 (DOY 82) en 1 mei 2012 (DOY 122) .**

	Temperatuur °C	PAR-straling $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	RH %	Stroomdichtheid $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	
Gemiddelde	20,6	95	56,4	0,95	0,80
Nachtgemiddelde	17,1	n.v.t	62,4	0,79	0,69
Daggemiddelde	23,5	173	51,3	1,08	0,89
Maximaal	44,5	1171	73,4	5,14	5,12
Minimaal	15,6	n.v.t.	16,4	0,09	0,03

\*Voor een grafisch overzicht van deze variabelen wordt verwezen naar Bijlage II.

Het al dan niet aanbrengen van koolstofvilt, een zwart medium, op lege substraatblokjes bracht geen opmerkelijke veranderingen mee in de substraattemperatuur, gemeten op twee plaatsen (centraal op 1 cm –bovenkant– en 2,5 cm –midden– van de bovenzijde) in de blokjes (Figuur IV-15a). Het verlies van substraatvocht gedurende een periode van drie opeenvolgende dagen, d.i. de langste perioden tussen twee watergiftten, lag hoger voor een met vilt bedekt blokje (Figuur IV-15b). Het verschil in vochtverlies over deze periode bedroeg echter slechts 3,8 %. Beide blokjes werden daarbij niet blootgesteld aan rechtstreekse instraling en hadden dezelfde substraattemperatuur. Waarschijnlijk speelt hier capillaire opstijging van water een rol, aangezien het vilt gedurende gans de periode vochtig bleef, waar dit niet het geval was bij de bovenzijde van een niet bedekt blokje.



**Figuur IV-15: a) Temperatuurverloop op twee plaatsen in een rotswolblokje bedekt met vilt en een blokje zonder vilt gedurende drie zonnige dagen. b) Vochtmassaverlies voor een blokje met vilt en een blokje zonder vilt over een periode van drie dagen.**



## HOOFDSTUK 3

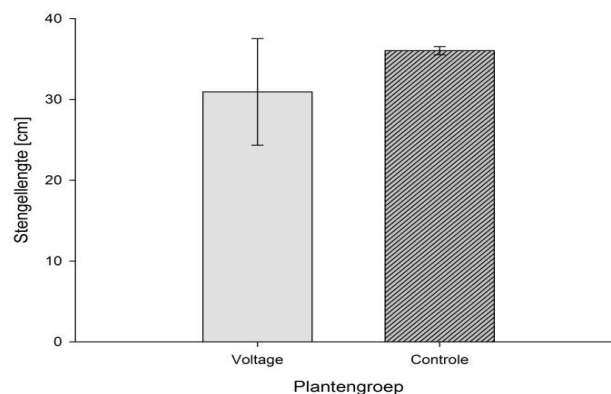
### RESULTATEN PROEF 3

Het doel van deze proef was om na te gaan of planten elektrisch gestimuleerd kunnen worden wanneer ze volledig hydroponisch, d.i. zonder substraat, worden opgekweekt. Door het gebruik van een beluchtingssysteem werd een sterke menging van de nutriëntenoplossing beoogd om de opbouw van ionen- en pH-gradiënten te minimaliseren. Opnieuw werd gekozen voor de 50%-nutriëntenoplossing als voedingsmedium omdat hiermee in de najaarsuitvoering van het eerste experiment de beste resultaten werden bereikt. De anode bevond zich opnieuw bovenaan op ongeveer tien centimeter van de kathode. Het opgelegde voltage (1 V) veroorzaakte aldus een elektrisch veld van  $0,10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ .

#### 1. Plantgerelateerde karakteristieken

##### 1.1. Plantlengte

Niettegenstaande de duidelijke verschillen in de gemiddelde stengellengte waren deze niet significant (Figuur IV-16). Dit was te wijten aan de tweede testplant die duidelijk kleiner bleef dan de andere twee testplanten. De verschillen tussen de controleplanten bleken betrekkelijk klein.

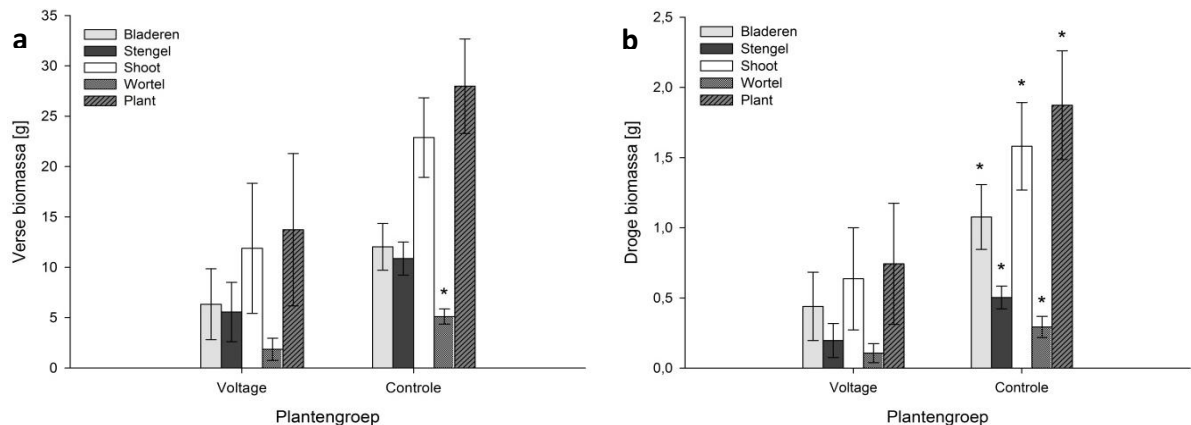


Figuur IV-16: Stengellengte bij oogst.

##### 1.2. Biomassa, biomassaverdeling en droge stofgehalten

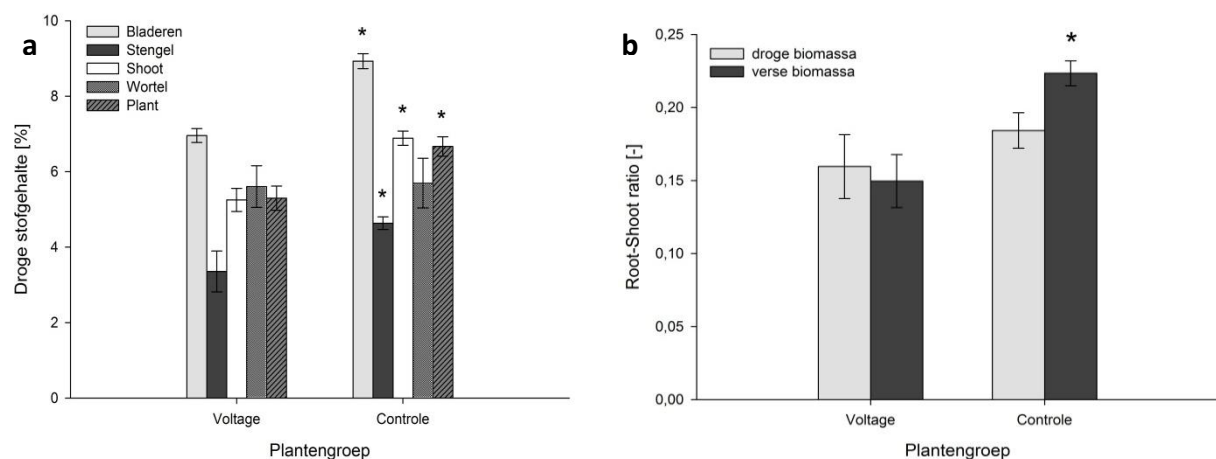
Hoewel de verschillen in stengellengte niet significant verschillend waren, kon reeds visueel vermoed worden dat de testplanten minder biomassa hadden aangemaakt. Dit komt ook tot uiting in figuur IV-17 die zowel de verse als droge biomassa weergeeft. Doordat de planten volledig hydroponisch werden opgekweekt en de wortels dus vrij in de nutriëntenoplossing konden groeien, werd een exacte bepaling van de verse en droge wortelmassa mogelijk. De plantenmassa kon zodanig volledig bepaald worden. De verse biomassa was, hoewel duidelijk lager voor alle plantdelen van de testplanten, enkel significant lager voor de wortelmassa ( $1,85 \pm 1,10$  t.o.v.  $5,10 \pm 0,76$  g,  $p=0,014$ ). De droge biomassa van de bladeren, de stengel en de wortel waren echter allen significant kleiner bij de planten

die elektrisch behandeld werden. De gemiddelde droge biomassa van heel de plant (bladeren, stengel en wortel) was dan ook significant kleiner bij de testplanten ( $0,74 \pm 0,43$  t.o.v.  $1,87 \pm 0,387$  g,  $p=0,028$ ).



**Figuur IV-17: a) Verse biomassa en b) droge biomassa voor de bladeren, de stengel (samen de shoot) en de wortel. Shoot en wortel samen vormen de volledige biomassa van de plant.**

De controleplanten produceerden niet enkel meer biomassa, maar ook het droge stofgehalte van deze biomassa was significant hoger voor alle plantendelen, uitgezonderd de wortels (Figuur IV-18a). De controleplanten investeerden relatief meer in wortelmassa dan in shootbiomassa. De karakteristiek die dit weergeeft, wordt de root-shoot ratio genoemd en is de verhouding tussen de biomassa van de wortels en deze van de shoot (Figuur IV-18b). De root-shoot ratio van de droge biomassa was groter bij de controleplanten. Voor de verse biomassa ( $0,15 \pm 0,02$  t.o.v.  $0,22 \pm 0,09$ ,  $p=0,003$ ) was dit verschil zelfs significant. De testplanten slagen er dus slechter in dan de controleplanten om vocht vast te houden in hun wortelstelsel.

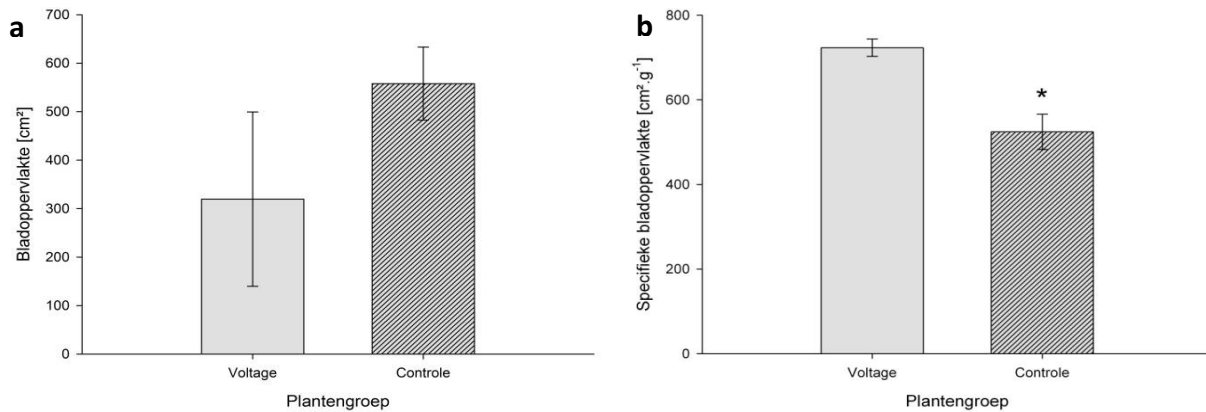


**Figuur IV-18: a) Droge stofgehalte van de verschillende plantendelen en b) root-shoot ratio bepaald aan de hand van zowel de droge als verse biomassa.**

Bij de controleplanten was de root-shoot ratio voor de droge biomassa significant lager dan deze voor de verse biomassa ( $0,18 \pm 0,01$  t.o.v.  $0,22 \pm 0,01$ ,  $p=0,010$ ), waar dit bij de testplanten omgekeerd was. De controleplanten konden dus relatief meer water vasthouden in hun wortels dan in hun shoot. De wortels van de testplanten konden in verhouding dan weer minder water bevatten dan de shoot.

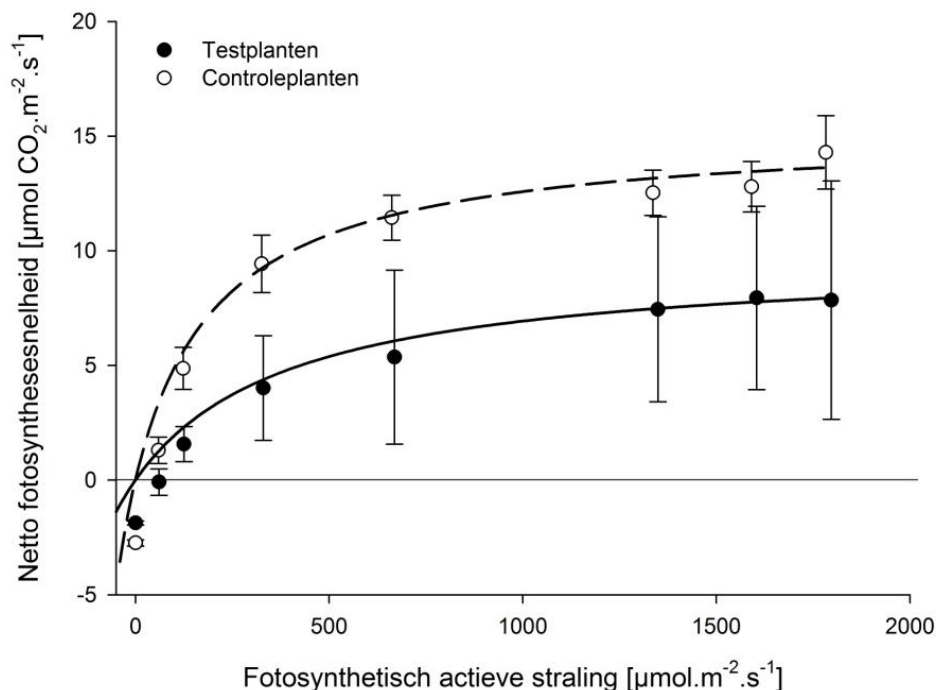
### 1.3. Bladkarakteristieken

De grotere bladmassa van de controleplanten (Figuur IV-17) werd ook weerspiegeld in de totale bladoppervlakte, hoewel deze niet significant verschilden (Figuur IV-19a). De SLA lag voor de controleplanten echter wel significant lager dan voor de geteste planten ( $723 \pm 21$  t.o.v.  $524 \pm 42$   $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $p=0,002$ ) (Figuur IV-19b). De controleplanten beschikten dus niet alleen over dikkere bladeren (lagere SLA), maar deze bestreken ook een groter oppervlak.



**Figuur IV-19: a) Absolute bladoppervlakte bij oogst en (b) de specifieke bladoppervlakte (SLA).**

Met behulp van LICOR-metingen, uitgevoerd een dag voor de oogst, konden de lichtresponsiecurven (fitting aan vergelijking III-1, Figuur IV-20 en tabel IV-7), fotochemische efficiënties (Figuur IV-21a) en transpiratiesnelheden (Figuur IV-21b) van beide plantgroepen vergeleken worden.



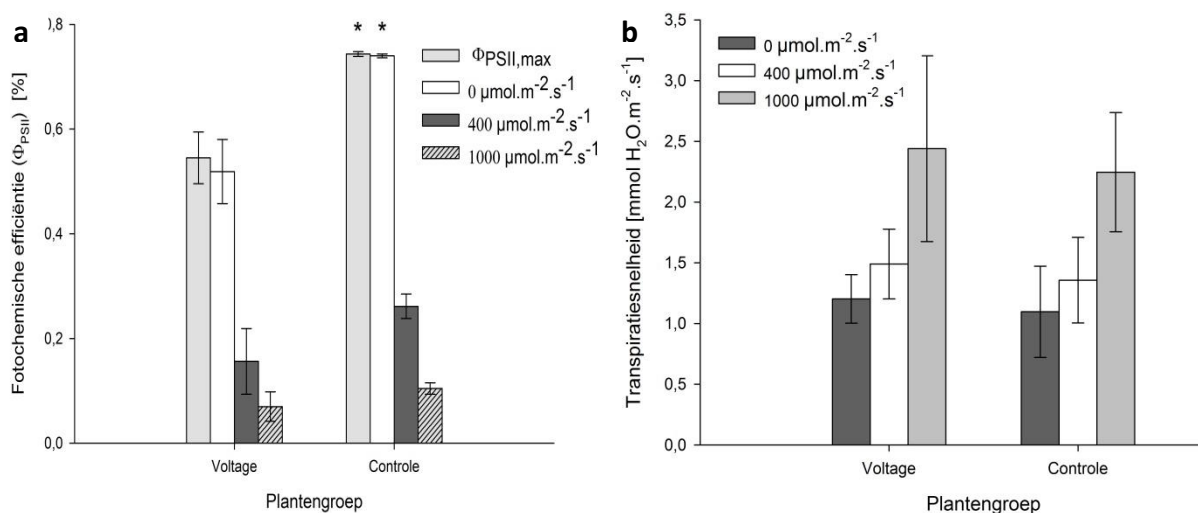
**Figuur IV-20: Gemeten netto fotosynthesesnelheden bij verschillende intensiteiten van de PAR-straling met bijbehorende gefitte lichtresponsiekrommen.**

Zoals verwacht uit de SLA-waarden gingen de controleplanten efficiënter met PAR-straling om. Het  $I_c$  lag veel lager bij de controleplanten, waardoor ze reeds bij lagere lichtintensiteiten aan netto fotosynthese konden doen. De controleplanten deden echter significant meer aan donkerrespiratie dan de testplanten ( $p < 0,001$ ). De testplanten bleken inderdaad minder metabolisch actief te zijn, wat ook tot uiting kwam in de lagere  $P_n$ -waarden gedurende de daglichtperiode (Figuur IV-20).  $P_{n,max}$  ( $p = 0,004$ ) en  $\alpha_c$  ( $p = 0,004$ ) lagen eveneens significant lager bij de testplanten. De testplanten waren dus niet enkel biofysisch (lagere lichtperceptie), maar ook biochemisch (minder assimilatiemogelijkheden) beperkt in hun fotosyntheseactiviteiten.

**Tabel IV-7: Fotosyntheseparameters van de fitting aan de lichtresponsiekromme.**

	$I_c$ $\mu\text{mol PAR}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\alpha_c$ $\mu\text{mol CO}_2\cdot\mu\text{mol}^{-1}\text{ PAR}$	$P_{n,max}$ $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$R_d$ $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
Voltage	$67,1 \pm 24,3$	$0,024 \pm 0,008$	$9,7 \pm 0,3$	$1,87 \pm 0,08$
Controle	$43,5 \pm 5,2$	$0,072 \pm 0,028^*$	$15,3 \pm 0,6^*$	$2,76 \pm 0,14^*$

Zoals verwacht lag de fotochemische efficiëntie hoger bij de controleplanten (Figuur IV-21a). De verschillen tussen test- en controleplanten namen echter af naarmate de bladeren werden blootgesteld aan hogere lichtintensiteiten. Er waren significante verschillen bij zowel de maximale fotochemische efficiëntie  $\Phi_{PSII, max}$  ( $54,5 \pm 5,0$  t.o.v.  $74,3 \pm 0,4$  %,  $p = 0,002$ ) als de fotochemische efficiëntie van een licht geadapted blad gedurende een donkerpuls ( $51,9 \pm 6,1$  t.o.v.  $74,0 \pm 0,5$  %,  $p = 0,003$ ). Hogere transpiratiesnelheden traden zoals verwacht op wanneer het blad werd blootgesteld aan hogere PAR-intensiteiten (Figuur IV-21b). Er waren echter geen noemenswaardige verschillen tussen de transpiratiesnelheden van beide plantengroepen. Een normale werking van de stomata van de testplanten mag dan ook verondersteld worden. Langs deze weg verlaat immers de meeste waterdamp de plant.



**Figuur IV-21: a) (Maximale) fotochemische efficiënties ( $\Phi_{(max),PSII}$ ) en b) transpiratiesnelheden bij drie verschillende PAR-intensiteiten (0, 400 en 1000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).**

## 2. Variabelen gerelateerd aan het microklimaat en de voedingsoplossing

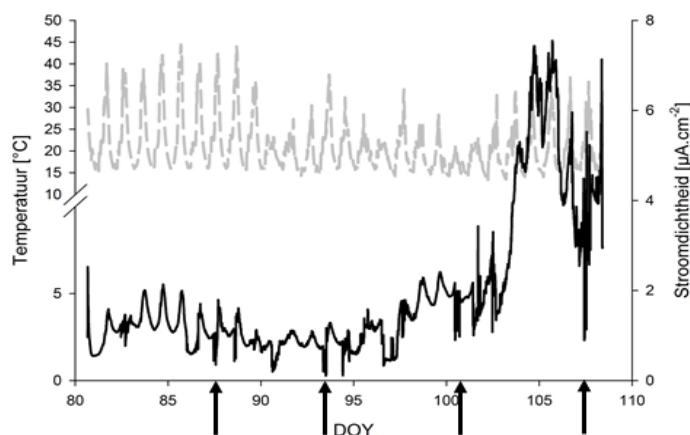
In tabel IV-8 worden de belangrijkste variabelen van het microklimaat (vijfminuten gemiddelden) in de serre weergegeven, alsook de opgemeten stroomdichtheid. Analoog aan voorgaande proeven werd daarbij de stroomsterkte genormeerd met het kathodeoppervlak, welke in deze proef 350 cm<sup>2</sup> bedroeg.

**Tabel IV-8: Variabelen betreffende het microklimaat en de gemiddelde stroomdichtheid opgemeten tijdens de proefopzet tussen 20 maart 2012 (DOY 80) en 17 april 2012 (DOY 108) .**

	Temperatuur °C	PAR-straling μmol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	RH %	Stroomdichtheid μA.cm <sup>-2</sup>
Gemiddelde	21,2	103	54,9	1,88
Nachtgemiddelde	17,3	n.v.t.	61,6	1,79
Daggemiddelde	24,6	195	48,7	1,98
Maximaal	44,5	1454	76,4	7,55
Minimaal	13,0	n.v.t.	16,0	0,11

\*Voor een grafisch overzicht van deze variabelen wordt verwezen naar Bijlage II.

De stroomdichtheid vertoont de eerste 22 dagen een normaal golvend patroon en laat dan een sterke toename zien die niet meer verdwijnt voor het einde van de proef (Figuur IV-22). De wekelijkse toevoeging van verse 50%-nutriëntenoplossing (weergegeven met verticale pijl) had steeds een instantane, maar korte daling van de stroomdichtheid tot gevolg.



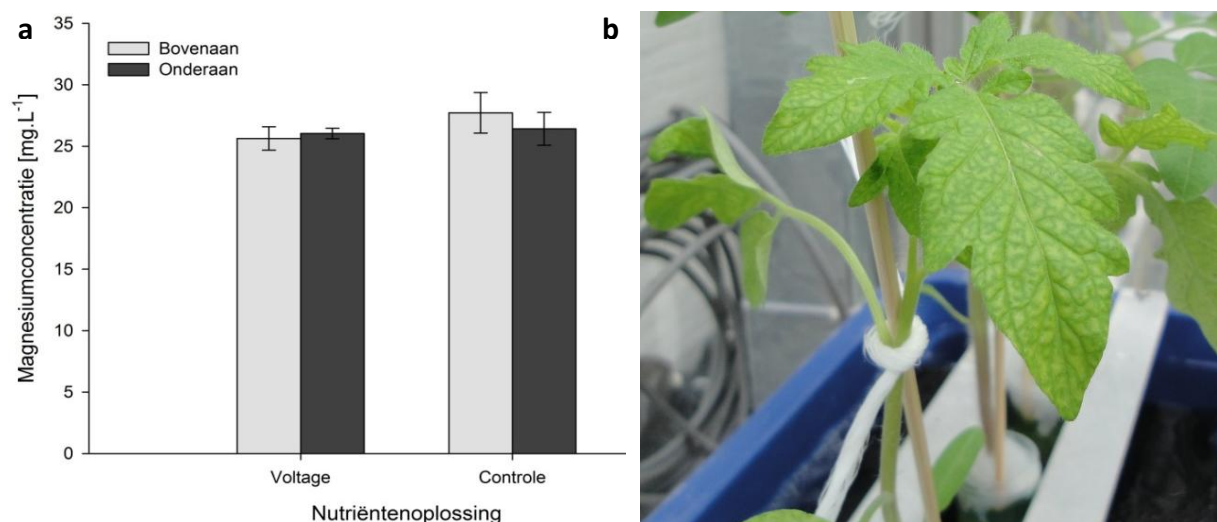
**Figuur IV-22: Verloop van de luchttemperatuur (grijze gebroken lijn) en de stroomdichtheid (zwarte volle lijn) in de proefperiode. De pijlen duiden aan wanneer verse 50%- voedingsoplossing werd toegevoegd.**

Deze dalende stroomsterkte hield waarschijnlijk verband met het verschil in EC-waarden tussen de vers toegevoegde 50%-voedingsoplossing ( $EC = \pm 1,60 \text{ mS.cm}^{-1}$ ) en deze van de nog aanwezige oplossing. De nutriëntenconcentratie van deze laatste oplossing nam toe in de tijd en dit relatief gelijk voor controle- en testopstelling (resultaten niet weergegeven). De reden hiervoor is waarschijnlijk de snelle verdamping van water uit het recipiënt en een grotere wateropname, relatief ten opzichte van de ionenopname, door de planten. De stroomdichtheid bereikte dagelijks zijn maximumwaarde net na het warmste moment van de dag. Verder vertonen de temperatuurs- en stroomdichtheidscuurven

opmerkelijk minder overeenkomsten dan deze in proef 1 (Figuur IV-10). Het meest opvallend is echter de abrupte stijging van de stroomsterkte vanaf DOY 103. Mogelijkerwijs veroorzaakte de plantmeting op deze dag een zodanige oriëntatie van de plantenwortels (bv. meer direct contact tussen anode en kathode via de plantenwortel) in het medium dat een betere stroomdoorgang mogelijk werd.

Om na te gaan of de beluchtingsinstallatie in staat was om de opbouw van een ionen- en pH-gradiënt te verhinderen, werden op 27 maart (DOY 87) voor toevoeging van de nieuwe nutriëntenoplossing stalen genomen op één cm onder de anode (bovenaan) en op één cm boven de kathode (onderaan) en dit vooraan, in het midden en achteraan in het recipiënt. Hetzelfde gebeurde voor de controle-opstelling. Er werden geen verschillen gevonden in anionenconcentraties ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  en  $\text{SO}_4^{2-}$ ) en pH tussen enerzijds boven- en onderzijde binnen dezelfde opstelling en tussen anderzijds de controle- en testopstelling (resultaten niet weergegeven). Een goede menging kan dus worden verondersteld.

Tot hiertoe werd enkel gekeken naar de anionenverdeling onder invloed van het elektrische veld. De planten die elektrisch behandeld werden, vertoonden echter symptomen die magnesiumdeficiëntie deden vermoeden (testplant 2, Figuur IV-23b). Bij dergelijke deficiëntie treedt chlorose (vergeling) op tussen de bladnerven en dit het eerst bij de oudste bladeren aangezien magnesiumionen relatief mobiel zijn in plantenweefsel (Taiz & Zeiger, 2002). Via AAS-analyse op dezelfde stalen als hierboven konden de magnesiumconcentraties bepaald worden (Figuur IV-23a). Er konden geen verschillen worden vastgesteld in magnesiumconcentraties in de bulkvloeistof binnen hetzelfde recipiënt (boven of onder) en evenmin tussen de controle- en testopstelling. Ook voor andere kationen zou dus een uniforme verdeling mogen verondersteld worden.



**Figuur IV-23: (a) Magnesiumconcentraties in de nutriëntenoplossingen. Metingen werden zowel bovenaan als onderaan uitgevoerd. b) Symptomen van een vermoedelijke magnesiumdeficiëntie.**

Het derde van blad van de planten van elke groep werden na oogst samengevoegd en geanalyseerd op het magnesiumgehalte. Deze bedroeg  $5,168 \text{ g.kg}^{-1}$  bij de testgroep en  $5,878 \text{ g.kg}^{-1}$  bij de controlegroep.



---

## **V. Discussie**

---





## HOOFDSTUK 1

# INTERACTIES TUSSEN DE NUTRIËNTENCONCENTRATIES, ELEKTRISCHE STIMULATIE EN HET MICROKLIMAAT

In dit hoofdstuk zullen in de eerste twee paragrafen de resultaten van alle proeven uitgevoerd met rotswol als teeltsubstraat vergeleken worden met de bevindingen van andere auteurs in vergelijkbaar onderzoek. In de twee daaropvolgende paragrafen worden de resultaten bediscussieerd in het kader van een verschillend groeiseizoen. In dit hoofdstuk zal voornamelijk worden ingegaan op de verschillen tussen de planten die elektrisch behandeld werden en de controleplanten binnen éénzelfde concentratiereeks. Desalniettemin zal er ook over deze concentratiebarrière heen worden gekeken of de concentratie van de toegediende voedingsoplossing van invloed was op de waargenomen resultaten.

### 1. Effect van verschillende nutriëntenconcentraties op plantengroei

Uit de resultaten voor de controleplanten (d.i. de planten die niet elektrisch behandeld werden) van zowel de na- als voorjaarsuitvoering van proef 1 bleken de planten zich vegetatief beter te ontwikkelen wanneer de toegediende voedingsoplossing van hogere nutriëntenconcentraties voorzien werd, d.i. van 0% naar 100%. De gemiddelde stengellengte leek echter niet te lijden onder een verdunning van de 100%- naar de 50%-nutriëntenoplossing (Figuur IV-1). Toch kon gesteld worden dat bij elke verdunningsstap de controleplanten veel slechter presteerden voor wat betreft de verse en droge biomassa en de bladoppervlakte (Figuren IV-2,3 en 4). De verschillen tussen de 0%- en de 25%-planten waren daarbij over het algemeen het grootst. Siddiqi et al. (1998) vonden echter dat de reductie in concentratie van macronutriënten naar 50% en 25% van de standaardvoedingsoplossing (hier 100%) geen negatieve effecten had op de groei en opbrengst van tomaatplanten. Nochtans waren de macronutriënten in de door deze auteurs gebruikte 100%-oplossing gelijkaardig als deze gebruikt in deze thesis (d.i. 11 t.o.v.  $\pm 13,5$  mM  $\text{NO}_3^-$ ; 0,8 t.o.v.  $\pm 1,2$  mM  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en 8,0 t.o.v.  $\pm 6,8$  mM  $\text{K}^+$ ). In deze scriptie werden echter ook de micronutriënten mee verdund. De resultaten van Siddiqi et al. (1998) in acht nemend, blijken dus vooral de macro- en niet de micronutriënten te 'luxueus' aanwezig te zijn in de 100%-voedingsoplossing. Desalniettemin maakten Wilcox et al. (1985) en Larouche et al. (1989) melding van negatieve effecten op tomatengroei wanneer de nitraatconcentraties in de voedingsoplossing onder de 7-8 mM daalde, wat inderdaad het geval was bij de 0%, 25% en 50%-planten in proef 1.

Een vaststaand feit is dat in proef 1 bij de controleplanten met het toegepaste drainage-to-waste systeem, het onmogelijk bleek om het gebruik van nutriënten te doen afnemen zonder daarbij in te boeten aan plantengroei en -ontwikkeling.

## 2. Effect van elektrische stimulatie van tomaatplanten op rotswol

De grote verschillen in resultaten tussen de elektrisch behandelde tomaatplanten in de najaarsuitvoering van proef 1 en de voorjaarsuitvoering van proef 1 en proef 2 doen vragen rijzen over de waarde van de gunstige resultaten bekomen in de najaarsuitvoering van het eerste experiment. De planten in de tweede proef werden allemaal behandeld met de 50%-nutriëntenoplossing. Hierdoor konden de drie controleplanten zonder vilt en de drie planten met de 'normale' polariteit (d.i. de anode bovenaan) uit deze proef beschouwd worden als een herhaling van de 50%-planten uit de najaarsopzet van het eerste experiment. De controleplanten die wel met vilt bedekt waren in de tweede proef en opnieuw deze met de anode bovenaan waren op hun beurt een replicaat voor de 50%-planten uit de voorjaarsopzet van het eerste experiment.

Uit de resultaten bleek dat bij de najaarsopstelling van proef 1 de 50%-testplanten significant beter presteerden dan de 50%-controleplanten. Voor wat betreft de droge shootbiomassa ging dit om een toename van bijna 60%. Deze toename is gelijkaardig aan de 20-50% toename bij voedergewassen, vermeld door het voormalige Britse Electroculture-Committee (Sidaway, 1975). De specifieke bladoppervlakte (SLA) nam af met 25%, wat wijst op dikkere bladeren, die bovendien een oppervlakte bestreken die 20% groter was dan deze van de 50%-controleplanten. Wat de droge shootbiomassa betrof, konden deze 50%-testplanten probleemloos concurreren met de 100%-controleplanten ( $5,1 \pm 0,4$  t.o.v.  $5,4 \pm 0,2$  g, figuur IV-3a). Niettegenstaande de bladoppervlakte 43% achterbleef in vergelijking met de 100%-controleplanten, compenseerde de significant lagere SLA ( $387 \pm 9$  t.o.v.  $512 \pm 33$   $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $p=0,003$ ) bij de 50%-testplanten dit tekort aan licht percipiërend vermogen (Figuren IV-4a en IV-5a). De verschillen tussen deze dikkere testbladeren, vermoedelijk door meer lagen chloroplastrijke pallisade parenchymcellen, en de dunnere controlebladeren doen denken aan de verschillen tussen licht- en schaduwbladeren in de kruinen van bomen. Deze lichtbladeren zijn geoptimaliseerd voor lichtopvang in die zin dat ze, vergeleken met schaduwbladeren, met éénzelfde oppervlak meer fotonen kunnen opvangen en aanwenden in de fotosyntheselichtreacties, met daarenboven een voordeel op de waterhuishouding van de plant (kleiner verdampend oppervlak) (Steppe, 2011). Hierdoor zal ook de impact op de uiteindelijke opbrengst van de tomatenplanten beperkt blijven (Heuvelink et al., 2005).

Vlaamse tomatentelers verkozen in een rondvraag inderdaad de elektrisch behandelde 50%-testplanten met kleinere bladoppervlakte in combinatie met de lagere SLA boven de 100%-controleplanten. Vooral het feit dat er zodoende minder overmatige bladoppervlakte moet worden verwijderd in combinatie met het generatiever zijn van de testplanten (minder bladoppervlak), leek de doorslag te geven (Lefevre, persoonlijke communicatie, 2011; Stoffels, persoonlijke communicatie, 2012).

Tussen de 25%-controle- en testplanten werden in de najaarsopzet eveneens significante verschillen gevonden voor wat betreft de verse en droge biomassa en de bladoppervlakte. Bij de 0%-testplanten

lag de bladoppervlakte eveneens significant hoger dan bij de 0%-controleplanten (Figuren IV-2, 3 en 4). De hierboven beschreven vergelijking tussen de 50%- testplanten en de 100%-controleplanten kan analoog worden doorgetrokken naar de 25%-testplanten en de 50%-controleplanten.

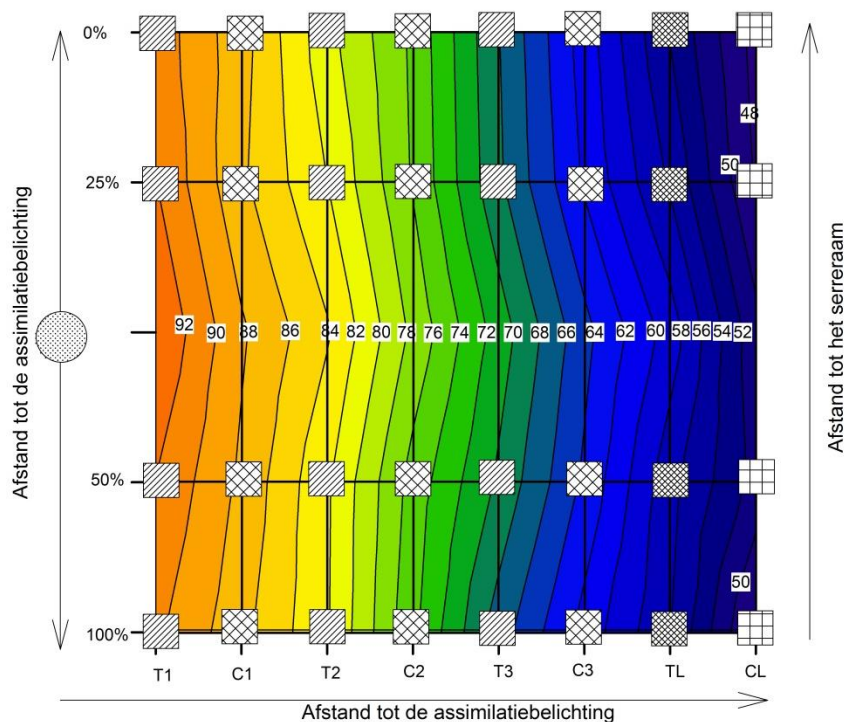
In geen enkel experiment werd de stengellengte echter significant beïnvloed door de elektrische stimulatie. Costanzo (2008) kon evenmin lineaire plantengroei waarnemen bij elektrische DC velden, maar wel bij AC velden met dezelfde nominale sterkte. De door deze auteur gebruikte velden waren bovendien 100 ( $18 \text{ V.cm}^{-1}$ ) tot 200 ( $36 \text{ V.cm}^{-1}$ ) keer sterker dan de DC-velden ( $0,18 \text{ V.cm}^{-1}$ ) gebruikt in deze rotswolproeven. Šoch en Čermák (1981) daarentegen, die onder vrij gelijkaardige elektrische omstandigheden werkten (zie ook Deel I, p.11), zagen wel significante toenames (tot 200%) in de lengtegroei bij jonge sparrenboompjes. Black et al. (1971), die de bovenste elektrode aanbrachten in de stengel van jonge tomaatplanten, vonden een lineaire toename tot 30% (zie ook Deel I, p.11). Tot slot vermeldden ook Diprose et al. (1984) een versnelde (stengel)groei bij verschillende plantensoorten wanneer kleine elektrische stromen (in de  $\mu\text{A}$  range) door de bodem liepen. Deze stromen waren gelijkaardig als deze door de rotswolblokjes in proeven 1 en 2 ( $\pm 1 \mu\text{A.cm}^{-2}$ , Tabellen IV-3 en 6). Verder onderzoek moet uitwijzen wanneer juist verticale ontwikkeling wordt gestimuleerd en of de mechanismen hierachter dezelfde zijn als deze voor meer horizontale plantontwikkeling .

De resultaten van de voorjaarsexperimenten op rotswol lieten nergens noemenswaardige verschillen zien in plantkarakteristieken tussen elektrisch behandelde en controleplanten. In dit opzicht bevestigden de resultaten gevonden in het tweede experiment deze van de voorjaarsuitvoering van het eerste experiment, maar niet deze van de najaarsuitvoering. In de volgende paragrafen zal getracht worden een verklaring te vinden voor deze verschillen.

### 3. Verschillen in serremicroklimaat tussen najaar en voorjaar

Naast de verschillen in uitvoering tussen de najaarsopzet en voorjaarsopzet van het eerste experiment (gebruik van vilt bij de controleplanten en een doorschuifstelsel gesitueerd naar het serreraam in plaats van naar de assimilatieverlichting) was ook het microklimaat sterk verschillend (Bijlage I en II). De PAR-straling is de belangrijkste abiotische factor die de tomaatopbrengst beïnvloedt (Heuvelink, 2005). De intensiteit van de PAR-straling verschilde echter duidelijk tussen beide seizoenen. Tijdens de najaarsproef werden slechts gedurende de meest zonnige dagen pieken bereikt tot maximaal  $450 \mu\text{mol PAR.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , waar dit in de voorjaarsproeven tot ruim  $1000 \mu\text{mol PAR.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  kon gaan. Daarnaast geldt ook nog dat de natuurlijke daglichtperiode duidelijk verschilde tussen de twee opzetten. Tijdens het najaar was deze beperkt tot slechts 8 uur, waar dit tijdens de voorjaarsproeven al gauw meer dan 12 uur werd. Dit verschil in daglichtperiode werd opgevangen door het gebruik van assimilatiebelichting ( $200 \mu\text{mol PAR.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) gedurende de najaarsproef (tussen 7.00 u en 19.00 u). Aangezien de assimilatielamp zich boven de middengang in het serrecompartiment situeerde en de

opstelling aan de linkerzijde, was er sprake van een lichtintensiteitsgradiënt naargelang de planten zich dichter of verder van de middengang bevonden (Figuur V-1). Een verschil in lichtintensiteit van  $\pm 30 \mu\text{mol fotonen.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  werd opgetekend tussen de eerste testplanten(T) en de laatste controleplanten(C) van elke concentratiereeks. Om deze verschillen in lichtintensiteit te minimaliseren, werden de planten net voor de watergift doorgeschoven, dit echter met een beperkte benadeling van de controleplanten. De controleplanten stonden immers steeds een plaats achter de testplanten (t.o.v. de assimilatiebelichting) door beperkte elektrische bedrading, wat een verschil in lichtintensiteit betekende van  $\pm 5 \mu\text{mol fotonen.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  tussen test- en controleplanten.



**Figuur V-1: Lichtdistributiegradiënt op rotswolhoogte in relatie tot de afstand tot de assimilatielamp (weergegeven met cirkel) tijdens de najaarsopzet van experiment 1. De lichtintensiteit is weergegeven in  $\mu\text{mol fotonen.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  en werd gemeten wanneer het buiten volledige donker was. Per rij staan de planten behandeld met eenzelfde nutriëntenoplossing. Per kolom staat de benaming van de plant/lege blokje.**

Als voorbeeld beschouwen we een dergelijk doorschuiven: T1-planten werden vervangen door T2-planten en C1-planten werden vervangen door C2-planten. De T1- en C1-planten namen dan respectievelijk de plaatsen in van de T3- en C3-planten, die zelf de plaatsen innamen van respectievelijk de T2- en C2 planten. De lege TL- en CL-rotswolblokjes werden niet doorgeschoven, er stond immers geen plant in die licht nodig had. Alle planten stonden evenveel dagen op dezelfde positie waardoor de lichtdistributiegradiënt van het kunstmatige licht binnen de test- en controleplantgroepen van elke concentratiereeks werden geëlimineerd.

De vraag stelt zich of deze benadeling van de controleplanten een grote invloed zal gehad hebben op de geproduceerde droge stofmassa. Dit werd berekend als volgt: stel dat de controleplanten  $5 \mu\text{mol fotonen.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  meer hadden ontvangen gedurende de tijd dat de kunstmatige lichtintensiteit hoger was

dan deze van het natuurlijke licht (over de groeiperiode van 50 dagen was dit gemiddeld 3 uur per dag, Bijlage I). Het verschil in  $P_n$ , dat volgt uit de lichtresponsiekrommen (Figuur IV-6), kan worden omgezet naar de hoeveelheid  $CO_2$ -opname door vermenigvuldiging met de bladoppervlakte (bepaald bij oogst) en de belichtingsduur (hier drie uur). Deze berekende molhoeveelheid  $CO_2$  kan vervolgens herleid worden tot de opgenomen koolstofmassa. Gemiddeld is 50% van de droge stof organische koolstof, waardoor de ‘gemiste’ droge stofmassa kan worden berekend (Tabel V-1).

**Tabel V-1: Weergave van de hoeveelheid extra droge stofmassa indien de controleplanten op de plaats van de testplanten zouden hebben gestaan ( $\pm 5 \mu\text{mol fotonen}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  gedurende 3 uren per dag).**

	0% C	25% C	50% C	100% C
Extra droge stof massa [g]	0,05	0,21	0,37	0,63
DS Controle met correctie [g]	1,03±0,19	2,90±0,51	3,55±0,36*	6,03±0,24
DS Test [g]	1,27±0,25	3,94±0,55	5,06±0,44*	6,07±1,38

\*: Significante verschillen op het 5%-significantieniveau, enkel weergegeven voor verschillen tussen test- en controleplanten.

Deze correctie zorgt ervoor dat het verschil tussen de test- en controleplanten van de 25%-concentratierreeks net niet meer significant is ( $p = 0,074$  t.o.v.  $0,044$ ). Deze berekening overschat echter sterk de werkelijke hoeveelheid droge biomassa die niet ingebouwd is kunnen worden. De berekening gebeurde immers met een constante, bij oogst bepaalde, bladoppervlakte. Idealiter zou de bladoppervlakte op elk ogenblik gekend moeten zijn om een correcte schatting van de  $CO_2$ -opname te bekomen. Desalniettemin is duidelijk dat de trend van de resultaten met dergelijke lage waarden niet zal veranderen. Kortom, de plaatsing van de controleplanten t.o.v. de behandelde planten had een verwaarloosbaar klein effect op de uiteindelijke resultaten. De verdere besprekingen zullen dan ook gebeuren aan de hand van de gemeten waarden zoals beschreven in de resultatensectie.

Tijdens de voorjaarsuitvoering van het eerste experiment en het tweede experiment schoven de planten analoog door zoals in de najaarsproef al was de oriëntatie deze maal gericht naar het serreraam en konden bovendien ook de controleplanten volledig doorschuiven naar voren. De T1-planten, initieel het dichtst bij het serreraam werden dus vervangen door C1-planten, de T1-planten vervingen achteraan de C3-planten enz. Door dergelijk doorschuiven konden de verschillen tussen de planten van de verschillende concentratiereksen eerlijk beoordeeld worden, maar nam de variatie tussen de verschillende planten binnen eenzelfde concentratiereeks toe, wat de aantoonbaarheid van significante verschillen ten gevolge van een elektrische behandeling niet eenvoudig maakt. Op zonnige maart- en april dagen kregen de planten het dichtst bij het raam namelijk veel meer licht dan deze achteraan.

#### 4. Koolstofvilt: meer dan een elektrode alleen?

Met de duidelijke verschillen tussen test- en controleplanten uit de najaarsproef en de beperkte verschillen in lichtdistributie, rees enkel nog de vraag of de controleplanten zonder vilt wel konden beschouwd worden als ‘echte’ controleopstellingen. In deze opstelling zou immers niet enkel het

effect van het opgelegde voltage gebleken zijn, maar ook de invloed van het aanbrengen van het koolstofvilt op zich. Het zwarte koolstofvilt zou door zijn structuur in staat kunnen geweest zijn om de evaporatiesnelheid van water, aanwezig in het rotswolblokje, te wijzigen. Anderzijds zou het zwarte vilt bij sterke instraling meer warmte kunnen geabsorbeerd en vastgehouden hebben waardoor de substraattemperatuur, en bijgevolg de worteltemperatuur, gestegen waren. Davis en Lingle (1959, 1961) vonden dat de shoot van jonge tomaatplanten sneller groeide wanneer de worteltemperaturen toenamen over de range 10°C tot 25°C. Jaworski en Valli (1964) bevestigden een toenemende plantengroei bij stijgende worteltemperaturen, maar namen bij worteltemperaturen hoger dan 29°C groeivertraging waar. De aan- of afwezigheid van het vilt had echter geen noemenswaardige impact op de temperatuur binnenin de rotswolblokjes (Figuur IV-15a). Er mag dus worden aangenomen dat de worteltemperaturen van alle planten tijdens eenzelfde proef nauwelijks verschilden en dus niet van invloed waren op de bekomen resultaten van test- en controleplanten. De soms intens hoge luchttemperaturen (> 40°C) tijdens de voorjaarsproeven (Bijlage II) in combinatie met de lage temperatuurbuffercapaciteit (beperkte waterinhoud) van de rotswolblokjes laten echter vermoeden dat de worteltemperaturen vaak ook effectief dergelijke schadelijke temperaturen hebben ondervonden. Dit laat toe te verklaren waarom de plantkarakteristieken tussen de controleplanten van najaar- en voorjaarsuitvoering van proef 1 zo weinig verschilden ondanks de duidelijk hogere gemiddelde temperatuur en intensere PAR-stralingen gedurende de middagperioden in het voorjaar (Bijlagen I en II). Het vochtverlies van een rotswolblokje zonder vilt was evenmin groter dan dit met vilt over een periode van drie dagen (Figuur IV-15b). De afwezigheid van het vilt in de najaarsopzet van proef 1 is dus waarschijnlijk niet van belang geweest bij de mindere groei van de controleplanten. Deze bevindingen werden inderdaad bevestigd door de resultaten van proef 2 waar nauwelijks en geen consequente verschillen werden gevonden tussen controleplanten met en zonder vilt.

Uit voorgaande paragrafen kan worden besloten dat het onmogelijk is om de effecten van de opgelegde spanning éénduidig te vergelijken tussen enerzijds de najaars- en voorjaarsopzet van het eerste experiment en anderzijds de najaarsproef van het eerste experiment en het tweede experiment en dit door de mogelijke interferenties van het serremicroklimaat dat sterk verschilde tussen het najaar en het voorjaar. De voorjaarsproef van het eerste experiment en het tweede experiment werden uitgevoerd in deels overlappende tijdsperioden en konden bijgevolg toch vergeleken worden. De resultaten van de overlappende opzet (50%-controleplanten met vilt en de 50%-testplanten met de anode bovenaan) waren daarbij inderdaad gelijkaardig met nergens significante verschillen tussen elektrisch behandelde planten en controleplanten.

De conclusie van dit hoofdstuk luidt dan ook dat, net zoals ruim twee eeuwen geleden Ingenhousz en Schwankhardt (1785) sceptisch waren over de tot dan toe bekomen resultaten van electrocultuur, de heterogeniteit van andere omgevingsfactoren, in dit geval het serremicroklimaat opnieuw aanmaant tot voorzichtigheid bij het interpreteren van de resultaten.

## HOOFDSTUK 2

# MOGELIJK EFFECT VAN ELEKTROCULTUUR OP DE ACTIEVE IONENOPNAME BIJ HYDROTEELTEN?

De resultaten van de zuivere hydroponische opstelling in proef 3 weken sterk af van de resultaten die werden gevonden in de proeven 1 en 2 waarbij tomaatplanten gekweekt werden op rotswolsubstraat. Bijna over de ganse lijn scoorden de elektrisch gestimuleerde planten significant slechter dan de controleplanten en was het ook visueel waarneembaar dat deze planten niet gezond waren (Figuur IV-23b). De schadesymptomen leken te wijzen op magnesiumdeficiëntie. Staalanalyses van de nutriëntenoplossing toonden echter geen verschillen aan in magnesiumconcentratie tussen de bulkvloeistof van beide opstellingen (Figuur IV-23a). Een bladstaalanalyse gaf nochtans aan dat de controleplanten een hoger Mg-gehalte hadden in hun bladeren dan de elektrisch behandelde planten ( $5,878 \text{ g.kg}^{-1}$  t.o.v.  $5,168 \text{ g.kg}^{-1}$ ), al lagen beide waarden boven de deficiëntiegrens van  $3 \text{ g.kg}^{-1}$  voor tomaatplanten, zoals bepaald door Adams (2002). Het zou echter toch kunnen dat deze deficiëntiegrens voor testplant 2 (met de ergste symptomen maar kleinere blad) werd overschreden, aangezien bij de staalname de bladeren van de hele testgroep werden samengebracht en het resultaat dus uitgemiddeld werd. Aangezien de test- en controleopstelling vlak naast elkaar stonden, lijken oorzaken die verband houden met het microklimaat uitgesloten. Er werden evenmin noemenswaardige verschillen gevonden in EC- en pH-waarden binnen dezelfde bulkoplossing en evenmin tussen de bulkoplossingen van test- en controleopstelling (resultaten niet weergegeven). De oorzaak moet dus gezocht worden in de elektrische behandeling op zich. Een reductie van  $\text{Mg}^{2+}$ -ionen naar metallisch onopneembaar magnesium ( $\text{Mg}^0$ ) is hierbij echter onwaarschijnlijk door de hoge reductiepotentiaal ( $E^\circ = -2,37 \text{ V}$ ) (Zumdahl, 2005).

Dat enkel de root-shootratio van de verse biomassa en niet deze van de droge biomassa significant hoger lag bij de controleplanten t.o.v. de testplanten en dat bovendien voor deze tweede plantengroep de root-shoot voor de verse biomassa lager lag dan deze voor de droge biomassa (Figuur IV-18b) kan wijzen op een verminderde mogelijkheid tot wateropname door de wortels bij de testplanten. De gelijke transpiratiesnelheden tussen de test- en controlegroep, welke geen verschillen in de waterhuishouding van de plant reflecteerden, leken dit echter tegen te spreken (Figuur IV-21b).

De stroomdichtheid vertoonde een opmerkelijke stijging vanaf DOY 103 tot piekwaarden van  $7,55 \mu\text{A.cm}^{-2}$  (Figuur IV-22). De schadeverschijnselen bij testplanten 1 en 3 begonnen zich vlak na deze abrupte stijging te manifesteren. Bij testplant 2 was dit echter al eerder zichtbaar, vlak nadat de kathode onder deze plant deels van de recipiëntbodem was losgekomen. Door deze tijdelijk kleinere afstand tussen beide elektroden verhoogde de sterkte van het elektrische veld en daarmee waarschijnlijk de plaatselijke stroomdichtheid.



Een mogelijke hypothese zou kunnen zijn dat de magnesiumopname bemoeilijkt werd bij dergelijk hoge stromen. Black et al. (1971) zagen eveneens dat de bladeren van jonge tomaatplanten waardoor een stroomsterkte (DC) van 15 en 30  $\mu\text{A}$  werd opgelegd, minder magnesium bevatten dan de controleplanten, niettegenstaande de concentraties aan kalium, calcium, fosfor en nitraten in dezelfde bladeren was toegenomen. Ondanks deze magnesiumafname, scoorden de elektrisch behandelde planten op plantniveau echter beter wat verse en droge biomassa betrof. In de opzet van deze auteurs was één van beide zilverelektroden wel in de plantenstengel geplaatst waar beiden elektroden in deze thesis initieel niet in contact waren met het wortelstelsel. Nochtans bereikten de wortels spoedig de onderste elektrode (kathode) van het recipiënt en geholpen door de opwaartse wervelingen, veroorzaakt door de beluchting, maakten de wortels ook contact met de bovenste elektrode (anode), waardoor de opstelling meer gelijkaardig werd aan deze van voorgenoemde auteurs.

Een mogelijke verklaring voor deze verminderde Mg-opname werd gegeven door Kurvits en Kirkby (1980) die stelden dat  $\text{Mg}^{2+}$ -ionen t.o.v. andere kationen slechts zwak binden op de negatief geladen moleculen van de wortelcelwand die instaan voor de opconcentratie van de kationen ter vergemakkelijking van hun actieve opname en dit door de grote hydratatieschil die zich rond het  $\text{Mg}^{2+}$ -ion bevindt. Verschillende auteurs gaven aan dat daardoor de opname van magnesium in competitie treedt met andere ionen ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  en  $\text{K}^+$ ) en zelfs sterk kan onderdrukt worden (Leggett & Gilbert, 1969; Schwartz & Bar-Yosef, 1981; Marschner, 1995).

Black et al. (1971) berekenden dat het onmogelijk was dat alleen passieve (d. i. volgens afnemende elektrochemische potentiaalgradiënt) ionenopname instond voor de toename in nutriëntenconcentraties van de bladeren (wat niet gold voor magnesium) en concludeerden dan ook dat de stroom de werking van actieve ionenpompen (zowel deze van anionen als kationen) zou gestimuleerd hebben. Twintig jaar eerder toonden Breazeale et al. (1951) en Breazeale en McGeorge (1953) reeds aan dat de opname van kationen gestimuleerd konden worden bij oplegging van elektrisch gelijkspanning wat het vermoeden van deze auteurs dus niet tegenspreekt.

Een hypothese die deze bevindingen samenvat en combineert met de resultaten gevonden in deze thesis luidt dan ook als volgt: “Elektrische stroom stimuleert globaal de actieve ionenopnamen waarbij de opname van  $\text{Mg}^{2+}$ , sowieso in competitie met andere kationen, bij toenemende stroomsterkten steeds meer wordt onderdrukt door zijn belangrijkste antagonisten  $\text{K}^+$  en  $\text{Ca}^{2+}$ .”

Vanaf een bepaalde stroomsterkte zal de Mg-opname dan zodanig worden onderdrukt, dat deficiëntie optreedt die de gunstige effecten van de totale ionentoe name teniet doet. Verder onderzoek zal deze hypothese moeten nagaan en moeten uitwijzen vanaf welke stroomdichtheid dit effect zich duidelijk manifesteert. Een analyse van het  $\text{K}^+$ - en  $\text{Ca}^{2+}$ -gehalte is daarbij noodzakelijk. De vraag stelt zich ook of deze verschijnselen reversibel zijn of anders gezegd, dat bij opnieuw dalende stroomdichtheden de Mg-opname kan hersteld worden of dat deze veranderingen in actieve opname irreversibel zijn.

## HOOFDSTUK 3

### ELEKTROCHEMISCHE ASPECTEN

Het aanleggen van een voltagegradiënt tussen anode en kathode bij een rotswolblokje (1 V over 5,5 cm afstand) creëerde een elektrisch veld over het wortelstelsel van  $0,18 \text{ V.cm}^{-1}$ . Bij het zuivere hydroponische experiment (proef 3) lagen de elektroden  $\pm 10 \text{ cm}$  uit elkaar wat resulteerde in een veld van  $0,10 \text{ V.cm}^{-1}$ . Stenz en Weisenseel (1993) constateerden bij dergelijke zwakke DC velden geen wortelbeschadiging. Wawrecki en Zagórska-Marek (2007) merkten pas veranderingen in de wortelstructuur van maïsplanten bij DC velden groter dan  $1,0 \text{ V.cm}^{-1}$ . Het is aannemelijk dat de wortels van de tomaatplanten in deze proeven dan ook geen nadelige gevolgen hebben ondervonden van het opgelegde spanningsveld. Andere elektrochemische aspecten van het opgelegde voltageverschil en de mogelijke effecten hiervan op plantengroei zullen hieronder besproken worden.

#### 1. Ionen- en EC-gradiënten in het rotswolsubstraat

De gemiddelde geleidbaarheid van de verschillende nutriëntenoplossingen bedroeg in oplopende concentratie (van 0% naar 100%)  $0,60 \text{ mS.cm}^{-1}$ ,  $1,10 \text{ mS.cm}^{-1}$ ,  $1,60 \text{ mS.cm}^{-1}$  en  $2,65 \text{ mS.cm}^{-1}$ . De EC-waarde van de oplossing aanwezig in een rotswolblokje kan echter oplopen tot ruim  $10 \text{ mS.cm}^{-1}$  wanneer een nutriëntenoplossing van 2 à 3  $\text{mS.cm}^{-1}$  wordt toegediend (De Rijck & Schrevens, 1998). Deze auteurs vermeldden ook verticale EC-gradiënten tussen boven- en onderzijde van een rotswolblokje tot  $4 \text{ mS.cm}^{-1}$  wanneer tomaatplanten aanwezig waren. Deze verschillen werden verwaarloosbaar zonder planten.

De IC-resultaten van de lege controle rotswolblokjes bevestigden grotendeels deze bevindingen (Tabel IV-4) met concentratieverschillen tussen boven- en onderzijde die beperkt bleven tot maximaal 33%  $\text{PO}_4^{3-}$ -aanrijking aan de onderzijde bij 0%-CL in het voorjaar. De situatie bij de blokjes die onderworpen werden aan het elektrisch veld verschilde grondig. Voornamelijk  $\text{PO}_4^{3-}$  kwam, vermoedelijk door de elektrostatische aantrekkingskrachten, in grote mate voor aan de bovenzijde van de blokjes (tot 291% aanrijking bij 25%-L in het voorjaar). Verder viel op dat bij toenemende concentraties van de toegediende nutriëntenoplossing, de verschillen in anionensom tussen boven- en onderzijde afnamen. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat bij toenemende concentraties de absolute hoeveelheden ionen die onder invloed van het elektrisch veld migreren relatief klein zijn ten opzichte van de aanwezige nutriëntenhoeveelheid in het blokje, waardoor de migratie van dezelfde hoeveelheid ionen minder tot uiting komt in verschillen in concentratie. Bovendien zal er zich sneller een elektrische dubbellaag kunnen vormen aan de elektrodes, waardoor het effectieve elektrische veld snel kleiner wordt (zie ook Deel I, p.5). De totale gemeten anionensom (som van boven- en onderzijde) laat eveneens vermoeden dat er o.i.v. het elektrische veld een retentie van extra ionen kon

plaatsvinden, aangezien deze steeds hoger was bij de lege testblokjes vergeleken met de controleblokjes en dit vooral bij de lage concentraties. Het kan echter zijn dat er in de testblokjes een ophoping van lading aan de boven- en onderzijde heeft plaatsgevonden met een nutriëntenverarming in het midden tot gevolg, terwijl in de controleblokjes de lading nog steeds evenredig verdeeld is over het hele blokje. Verder onderzoek zal het totale ionenprofiel van de blokjes moeten nagaan (met dus ook metingen van het centrale deel) om op deze vraag een éénduidig antwoord te kunnen geven.

## 2. pH-gradiënten in het rotswolsubstraat

De Rijck & Schrevens (1998) vonden dat natuurlijke gradiënten in pH tussen boven- en onderzijde van lege rotswolblokjes verwaarloosbaar waren en bovendien weinig afhankelijk van de EC-waarde van de toegediende nutriëntenoplossing. Deze bevindingen van de auteurs werden maar deels bevestigd in dit onderzoek (Tabel IV-4). De verschillen in pH tussen boven- en onderzijde in de lege controleblokjes waren inderdaad nergens groter dan 0,7 pH-eenheden (25% CL, najaar). Desalniettemin bleek de pH toch sterk gestegen, vooral bij de meest verdunde oplossingen, hoewel de pH van elke nutriëntenoplossing voor toediening in een nauwe range werd gebracht (5,90-6,05). Een reden hiervoor zou kunnen zijn dat door toevoeging van het zwavelzuur de extra protonen reageerden met bicarbonaat ( $\text{HCO}_3^-$ ) en carbonaat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) aanwezig in de oplossing, afkomstig van het kraantjeswater (Vergelijking V-1). Hierdoor werd het zuur deels geneutraliseerd en steeg de pH langzaam opnieuw naar waarden die boven de instantaan gemeten pH-waarden ( $\pm 6$ ) lagen.



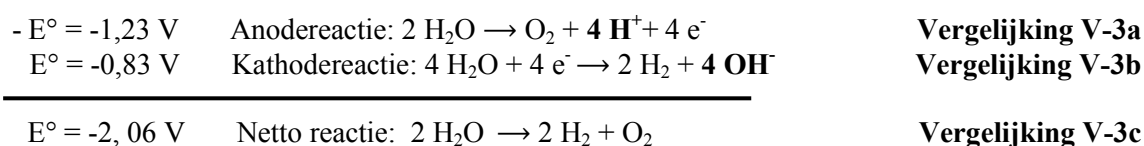
Waarom de voedingsoplossingen met hogere nutriëntenconcentraties minder hoge pH-waarden lieten optekenen (Tabel IV-4), heeft waarschijnlijk te maken met de bufferende werking van de aanwezige fosfaten die al te hoge pH-schommelingen opving. De buffercapaciteit van een oplossing neemt immers toe met stijgende concentratie van het bufferende zuur/basepaar (Zumdahl, 2005). In dit geval het zuur/basepaar  $[\text{H}_2\text{PO}_4^-] + [\text{HPO}_4^{2-}]$  dat in concentratie toenam van de 0%- naar de 100%-oplossing. De pH van een ideaal buffermengsel of omgekeerd, de verhouding tussen de concentraties van de zure en basische moleculen, kan berekend worden met de formule van Henderson-Hasselbalch. (Vergelijking V-2). Hierin staat  $\text{pK}_a$  voor de logaritmische zuurconstante van het zuur/basekoppel. Voor  $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$  is deze waarde 7,21 (Zumdahl, 2005).

$$\text{pH} = \text{pK}_a + \log \left( \frac{[\text{HPO}_4^{2-}]}{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]} \right) \quad \text{Vergelijking V-2}$$

Bij de elektrisch behandelde blokjes bleek de substraatoplossing onderaan bij de kathode een licht hogere zuurtegraad te hebben vergeleken met de controleblokjes (uitgezonderd de 0%-blokjes). De pH-waarden gemeten aan de bovenzijde bij de anode lagen echter gevoelig lager dan deze aan de onderkant. Voor het blokje 0% L werd in het najaar een verticaal pH-verschil gevonden van 4,6 pH-

eenheden (Tabel IV-4). Bi et al. (2011) wisselden in hun experiment (zie ook Deel I, p. 13) om de drie uur de polariteit van het aangelegde gelijkspanningsveld ( $1 \text{ V.cm}^{-1}$ ) over de bodem om dergelijke pH-gradiënten te vermijden. Met deze ingreep kon de pH-verandering tot 0,4 eenheden beperkt blijven tot op een afstand van vier centimeter van elke elektrode.

Waarschijnlijk is de elektrolyse van water de voornaamste redoxreactie die doorging in dit systeem. Hierbij werden protonen geproduceerd aan de anode en hydroxyl-ionen aan de kathode volgens vergelijking V-3. De bij standaardomstandigheden ( $T = 298 \text{ K}$  en  $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 1 \text{ M}$ ,  $p_{\text{H}_2} = p_{\text{O}_2} = 1 \text{ atm}$ ) op te leggen celpotentialiaal  $E^\circ$  bedraagt 2,06 V. De wet van Nernst (Vergelijking I-7) laat echter zien dat het op te leggen potentiaalverschil ( $\Delta V = E - E^\circ$ ) afhankelijk is van zowel de temperatuur ( $T$ ), de partiedruk van de betrokken gassen ( $\text{O}_2$  en  $\text{H}_2$ ) als de concentratie van de ionen, in dit geval  $\text{H}^+$  en  $\text{OH}^-$ , m.a.w. de pH. In het geval van zuiver water ( $\text{pH} = 7,0$ ) bedraagt de op te leggen celpotentialiaal nog  $E^\circ = 1,23 \text{ V}$  (Zumdahl, 2005). Hogere temperaturen, een gunstige pH en andere afwijkingen van de standaardomstandigheden (o.a. lagere  $p_{\text{O}_2}$ ) maakten deze reactie toch mogelijk bij slechts één Volt.



### 3. Stroomfluctuaties gerelateerd aan de wet van Nernst

De dagelijkse fluctuatie van de stroomsterkte, die sterk bleek samen te hangen met de dagelijkse temperatuurgang, in de rotswolproeven 1 (Figuur IV-10) en 2 (resultaten niet weergegeven) kan verklaard worden m.b.v. de Nernstvergelijking (Vergelijking I-7). Volgens deze vergelijking is de verhouding tussen twee temperaturen gelijk aan de verhouding tussen twee voltages (en dus stroomsterkten cfr. Wet van Ohm, Vergelijking I-2) als de andere variabelen ( $z$ ,  $C_1$  en  $C_2$ ) constant blijven. Dit komt mooi tot uiting wanneer de dag/nachtverhouding van de temperatuur (0,85 najaar proef 1 en 0,72 voorjaar proef 1, tabel IV-2 en 0,73 proef 2, tabel IV-6) wordt vergeleken met de dag/nachtverhouding van de gemeten stroomdichtheden ( $0,87 \pm 0,3$  najaar proef 1 en  $0,65 \pm 0,3$  voorjaar proef 1, tabel IV-3 en 0,73 (anode boven) en 0,78 (kathode boven) proef 3, tabel IV-6).

Het hoeft niet te verwonderen dat deze relatie niet duidelijk opging voor de volledig hydroponische proef 3 (0,75 (T) t.o.v. 0,90 (J), tabel IV-8). De temperatuur van de elektroden, die in benadering gelijk zal zijn aan deze van het medium (niet gemeten), zal de luchttemperatuur slechts in beperkte mate en met een zekere inertie gevolgd hebben (Figuur IV-22). De relatief grote hoeveelheden ( $\pm 3,5 \text{ L}$ ) voedingsoplossing met hoge warmtecapaciteit (zuiver water:  $4,2 \text{ kJ.L}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) in vergelijking met deze aanwezig in rotswolblokjes ( $\pm 200 \text{ mL}$ ) zijn hier debet aan. Deze kleinere temperatuurvariaties tussen dag en nacht resulteerden dan waarschijnlijk ook in de minder fluctuerende stroomdichtheid.

Waar de vergelijking met de wet van Nernst tussen dag en nacht ( $\pm$  constante  $C_1$  en  $C_2$ ) binnen dezelfde rotswolproef goed opging, was dit niet het geval tussen de najaars- en voorjaarsopzet van proef 1. De gemiddelde stroomdichtheid was zelfs afgenomen bij de 0%- en 25%-planten in de voorjaarsopzet vergeleken met het najaar ondanks de duidelijk hogere gemiddelde temperatuur (17,6°C t.o.v. 20,4°C). Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de elektroden door de hogere temperaturen en lagere luchtvochtigheid (Bijlage II) sneller uitdroogden in het voorjaar, waardoor het elektrisch contact met het rotswolsubstraat afnam t.o.v. deze in het najaar. Het temperatuurseffect op de stroomsterkte was bij de beter ontwikkelde 50%- en 100%-planten waarschijnlijk belangrijker dan de impact van de elektrode-uitdroging. Immers, ook in het najaar was de bovenste elektrode relatief snel droog door de snellere wateropname in vergelijking met de minder grote 0%- en 25%-planten.

#### **4. Het effect van EC- en pH-gradiënten op plantengroei**

Welke invloed een ongelijke ruimtelijke ionendistributie heeft op gewasgroei werd uitgebreid beschreven door Sonneveld en Voogt (2009): plantenwortels groeiden weg van plaatsen waar er zich (te) hoge nutriëntenconcentraties bevonden. Flores et al. (2002) zagen bij tomaatplanten met opgesplitst wortelstelsel dat het worteldeel blootgesteld aan lagere nutriëntenconcentraties de wateropname van het worteldeel blootgesteld aan (te) hoge nutriëntenconcentraties compenseerde, maar dat de nutriëntenopname vooral bij het laatste worteldeel plaatsvond en meer geconcentreerd was. Cerda en Roorda van Eysinga (1981) vonden dat de opbrengst van tomaatplanten, blootgesteld aan ruimtelijk variërende EC-waarden in het groeimedium, vaak hoger waren dan verwacht op basis van de gemiddelde EC van de toegediende voedingsoplossing.

Dit zou kunnen verklaren waarom in de najaarsproef betere resultaten werden gevonden voor de planten die werden blootgesteld aan het opgelegde elektrische veld en niet bij de controleplanten waar geen noemenswaardige ionenscheiding werd vastgesteld (Tabel IV-4). Waarom dan toch geen gelijke trends werden gevonden in de voorjaarsopzet van proef 1 en proef 2 kan eventueel gerelateerd worden aan de resultaten van Sonneveld en De Kreij (1999). Deze auteurs vergeleken tijdens een herfst- en lente-experiment de opbrengst van komkommer waarbij 50% van de wortelmasa werd blootgesteld aan hogere EC-waarden. Hierbij werd de opbrengst significant gereduceerd tijdens het lente-experiment terwijl er geen effecten optraden bij het herfstexperiment. Hoge EC-waarden in de wortelomgeving blijken immers onder arme lichtomstandigheden minder schadelijk dan onder intense lichtomstandigheden (Maas & Hoffman, 1977; Sonneveld & Welles, 1988).

De stijging van de zuurtegraad in de rotswolproeven zal niet zonder gevolgen gebleven zijn voor de biobeschikbaarheid van de nutriënten voor de plant (Marschner, 1995). Voornamelijk fosfor is in de pH-range 7,0-8,5 (pH van de 0%-, 25%- en 50%- controleblokjes, tabel IV-4) zeer weinig opneembaar voor plantenwortels (Lucas & Davis, 1961; Dyško et al, 2009). De absorptie van magnesium, kalium

en nitraat door jonge tomaatplanten wordt in deze pH-range echter nauwelijks beïnvloed (Arnon et al, 1942). Een tekort aan fosfor, dat ondermeer een belangrijke rol speelt bij de fotosynthese, en energietransfers (constituent van NADP, ATP) in de plantencellen, uit zich voornamelijk in een gereduceerde shootgroei met kleinere bladeren en een vertraging van de plantontwikkeling (Tucker, 1999; Taiz & Zeiger, 2002). Deze bevindingen sluiten nauw aan bij de resultaten van de najaarsuitvoering van het eerste experiment waarbij de bladoppervlakte en de shootmassa's van de drie laagste concentraties inderdaad belangrijk hoger waren bij de testplanten. Dat de 100%-testplanten het niet opmerkelijk beter deden dan de controleplanten zou dan ook te maken kunnen hebben met de geringe pH-verschillen van de voedingsoplossing die aanwezig waren in deze rotswolblokjes (Tabel IV-4). Dit werd in de vorige paragraaf reeds toegeschreven aan de bufferende werking van de aanwezige fosfaten. Het feit dat er zich door de aanleg van een elektrisch veld een pH-daling voordoet nabij de anode kan voor de wortels dus een manier zijn om aan de hoge pH-waarden elders in het rotswolsubstraat te ontsnappen en de wortels de mogelijkheid bieden om op de meest geschikte plaats (wat pH betreft) de nodige nutriënten op te nemen. Kang et al. (2011) vonden dat bij pH acht (cfr. o.a. 25%-L onderaan, najaar; 25%-CL boven- en onderaan, tabel IV-4) de groei van tomaatzaailingen geremd werd ten opzichte van een pH van zes (cfr. 25%-L bovenaan, najaar, tabel IV-4). Bovendien viel in de elektrisch behandelde blokjes de hoogste fosforbiobeschikbaarheid (lagere pH) samen met de hoogste fosforconcentraties (Tabel IV-4). Dit werd bevestigd door de visuele waarneming dat in het najaar de wortels van de testplanten opvallend aan de bovenzijde aanwezig waren. Dit was echter niet het geval bij de controleplanten in het najaar, noch bij de test- en controleplanten in het voorjaar. Dit zou verklaard kunnen worden door de bevindingen van Tucker (1999) die vond dat bij hogere bodemtemperaturen meer fosfor biobeschikbaar is dan bij koudere temperaturen en dit bij dezelfde fosforconcentraties.

In principe zou bij het omkeren van de polariteit met de kathode bovenaan en de anode onderaan, zoals uitgevoerd in experiment twee, een betere plantengroei kunnen verwacht worden. Immers, in dit geval was de zone met de lagere pH, en dus de beste (fosfor)biobeschikbaarheid, gesitueerd onderaan het rotswolblokje (resultaten niet weergegeven). De wortels van de planten, initieel in de groeiopening van het rotswolblokje geplaatst (Figuur III-1), bereikten zo sneller deze zone en dit volgens de natuurlijke neerwaartse groei in de richting van het gravitatieveld (Konings, 1995). Met de anode bovenaan gesitueerd, zouden de planten dus extra energie moeten steken in een opwaartse wortelgroei alvorens ze de beter beschikbare nutriënten konden opnemen in de pH-geschikte zone. Hoewel de verschillen klein waren, scoorde de planten van de testgroep met de kathode bovenaan in proef 2 inderdaad het best voor wat betreft de plantlengte, biomassa, droge stofgehalte en de SLA (Figuren IV-11, 12, 13 en 14b), wat deze gedachtegang dus niet tegensprekt.

In de hypothese die hieruit volgt zou het opleggen van een spanningsverschil over het rotswolsubstraat dus enkel dienen om een gedeeltelijke ionenscheiding (anionen naar de anode en kationen naar de

kathode) en een pH-gradiënt ((gevoelig) lager aan de anode en hoger aan de kathode) te bewerkstelligen. Hierdoor kunnen wortels zich specialiseren in enerzijds wateropname en anderzijds ionenopname. Op zich zou deze techniek dan wel uniek zijn in zijn opstelling, maar niet in zijn doelstelling: er bestaan reeds systemen die handig inspelen op de wortelreacties bij dergelijke nutriëntendistributies om nutriëntenverliezen door uitloging te reduceren. Hierbij worden bepaalde meststoffen op specifieke plaatsen in het wortelsysteem aangebracht om een verbeterde opname van het element (vaak een micronutriënt) te bekomen (Sonneveld & Voogt, 2009).

## **5. Elektrochemische impedantie spectroscopie voor niet-destructieve wortelgroei-evaluatie**

De niet-destructieve evaluatie van wortelgroei is nog steeds een uitdaging in plantonderzoek (Repo et al. 2005). Meer en meer wordt hiervoor beroep gedaan op elektrische technieken en dan vooral op het meten van een veranderende elektrische capaciteit van de bodem bij wortelgroei (Chloupek, 1977; Dalton, 1995; Rajkai et al, 2002). Repo et al. (2005) waren de eerste om via elektrische impedantie spectroscopie (IES) de wortelgroei bij hydroponisch opgegroeide wilgen te onderzoeken. In hun onderzoek werd echter één elektrode in de stam van de plant bevestigd en de andere in de hydroponische oplossing. In deze scriptie waren zoals steeds de elektroden boven- en onderaan het rotswolblokje bevestigd. De resultaten van deze auteurs sluiten echter aan bij de resultaten gevonden in deze thesis (Figuur IV-9): de weerstand van het systeem nam lineair af bij toenemende wortelmassa's. De  $R^2$ -waarde van de regressierechte bedroeg in deze thesis 0,72 tegenover 0,49 in het onderzoek van Repo et al (2005). Hierbij moet wel vermeld worden dat deze onderzoekers voor elke plant de IES parameters tweewekelijks opmaten gedurende één maand tegenover slechts één momentopname (net na de oogst) in deze thesis. Bovendien is bij deze metingen verondersteld dat de bijdragen van de elektroden, de aanwezige oplossing en het rotswolsubstraat op zich, bij elke meting identiek waren. Deze veronderstelling zal echter enkel bij benadering gelden door fabrieksafwijkingen in de rotswol- en viltproductie en de uitspoelingefficiëntie van het rotswolblokje net voor de meting.

Concluderend kan worden gesteld dat het gebruik van IES voor een niet-destructieve bepaling van de wortelmassa een zekere toekomst heeft, maar nog vatbaar is voor een verdere op punt stelling (b.v. door de totale weerstand onder te verdelen in verschillende subweerstanden). De vraag blijft immers welke factor het grootste aandeel heeft gehad in de weerstandsdaling van het rotswolblokje: de toenemende wortelmassa, de toenemende wortelopervlakte of eerder een veranderende faseverdeling tussen de wortels, de oplossing en het substraatmedium door veranderingen van de fysische substraateigenschappen (o.a. porositeit en poriëngrootteverdeling) bij toenemende wortelmassa's. Een verdere verdieping in deze materie viel echter buiten het bestek van deze masterscriptie.

## HOOFDSTUK 4

# TOEKOMSTPERSPECTIEVEN

### 1. Economische haalbaarheid

Een ander belangrijk aspect naast de technische haalbaarheid van elektrocultuur is het financiële kosten/baten-plaatje. Het doel van dergelijke installatie zou gericht zijn op de reductie van het nutriëntengebruik in de intensieve glasteelten. Dit om enerzijds de nutriëntenconcentraties in het spuiwater van serres te verminderen, maar zeker ook om de stijgende nutriëntenkost tegen te gaan. De vraag stelt zich of de kosten van dergelijke installatie (o.a. het aanbrengen van elektrodes, elektrische bedrading en de kostprijs van de elektriciteit) in verhouding zijn met de belangrijkste economische baten, het reduceren van de nutriëntenkost. In onderstaande kostenbecijfering werd verondersteld dat de 50%-testplanten het even goed deden dan de 100%-controleplanten en dit gebaseerd op de motieven aangehaald in Hoofdstuk I, p. 68 van deze discussie.

In onze streken bedraagt de gemiddelde teeltdichtheid 250 tomaatplanten per are (Atherton & Rudich, 1986; Heuvelink, 2005). Voor de 50%-planten in de najaarsproef van experiment 1 bedroeg de gemiddelde stroom per plant  $\pm 50 \mu\text{A}$  bij een opgelegd voltage van 1 V (Tabel IV-3). Per are moet het geleverde vermogen dus 12,5 mW bedragen (Vergelijking I-3). Als wordt uitgegaan van een groeiseizoen van  $\pm 300$  dagen (doortelt, zie Deel I, p. 16), wat neerkomt op 7.200 uren, bedraagt de hoeveelheid te leveren elektrische energie  $0,09 \text{ kWh}\cdot\text{are}^{-1}$  (Vergelijking I-4). Met een elektriciteitsprijs die schommelt rond  $0,20 \text{ €}\cdot\text{kWh}^{-1}$  betekent dit een elektriciteitskost van  $0,018 \text{ €}\cdot\text{are}^{-1}$ . Deze kost valt in het niets vergeleken met de kosten die kunnen uitgespaard worden door het kunstmestgebruik met de helft te reduceren. De gemiddelde kostprijs per are bedraagt 177 € (zie Deel I, p. 18) waardoor er dus  $88,5 \text{ €}\cdot\text{are}^{-1}$  bespaard kan worden. De balans slaat in dit opzicht gunstig uit in het voordeel van de elektrische behandeling vergeleken met de conventionele teelttechnieken die vandaag worden toegepast. Er mag echter niet vergeten worden ook de installatiekosten van het elektrodenet in rekening te brengen. Voorlopig is het gebruik van koolstofvilt als elektrode nog een kostelijke aangelegenheid. In 2008 bedroeg de prijs voor koolstofvilt nog  $100 \text{ €}\cdot\text{m}^{-2}$ , wat intussen reeds gedaald is naar  $\pm 50 \text{ €}\cdot\text{m}^{-2}$ . Deze kost zal op termijn waarschijnlijk nog verder kunnen dalen tot  $5 \text{ €}\cdot\text{m}^{-2}$  door de implementatie van nieuwe productietechnieken (Rozendal et al., 2008).

Per tomaatplant zijn er twee elektroden nodig van ongeveer  $50 \text{ cm}^2$ . Per vierkante meter koolstofvilt kunnen dus 100 planten van elektroden worden voorzien. Op een are kunnen echter 250 planten geplaatst worden waardoor per are  $2,5 \text{ m}^2$  koolstofvilt nodig is. Dit geeft actueel een kostenplaatje voor het elektrodemateriaal van  $125 \text{ €}\cdot\text{are}^{-1}$ , op termijn dalend naar  $12,5 \text{ €}\cdot\text{are}^{-1}$ . Hierbij werd echter nog geen rekening gehouden met de kostprijs van de elektrische bedrading, de spanningsbronnen en de extra werkuren die nodig zijn om deze uitvoering mogelijk te maken. Om vandaag de dag enkel en



alleen het break-even punt te bereiken voor de elektrodekost, dienen de nutriëntenprijzen met 40% te stijgen, wat op de korte termijn niet te verwachten valt (FAO, 2008; Heffer & Prud'homme, 2011). Op termijn lijken de stijgende nutriëntenkosten in combinatie met de dalende elektrodekost echter wel een effectief kostenvoordeel voor telers mogelijk te maken.

In voorgaande economische beschouwing werd aangenomen dat de goede resultaten bij het opleggen van het elektrisch veld zichtbaar blijven gedurende heel de teeltperiode (d.i.  $\pm 10$  maanden). Hierbij moeten de resultaten echter geëxtrapoleerd worden tot ver buiten de onderzochte groeiperiode ( $\leq 50$  dagen). Verschillende auteurs rapporteerden echter dat effecten van elektrische stimulatie vooral zichtbaar waren in de eerste weken van de plantengroei (Sidaway, 1975; Šoch & Čermák, 1981). In dit opzicht is het niet noodzakelijk gedurende de volledige teelt de techniek toe te passen en kan dit eventueel beperkt worden tot de gespecialiseerde zaaibedrijven waar de tomaatplanten worden opgekweekt totdat deze groot genoeg zijn voor uitplanting in de grote tomatenserres. Hierbij worden de tomaatplanten gezaaid rond eind november en overgeplant na een zevental weken (Van Labeke, 2011; Lefevre, persoonlijke communicatie, 2011). Dit valt binnen zowel het gunstige najaarsseizoen (cfr. Resultaten najaar proef 1) als de proefperiode ( $\leq 50$  dagen) die in deze thesis onderzocht werden. Bovendien zouden daarbij de koolstofelektroden kunnen verwijderd worden vooraleer de wortels deze beschadigen. Hierdoor kan hergebruik gedurende enkele jaren mogelijk worden. Desalniettemin is een leeftijdsduur van meer dan vijf jaar niet aan de orde bij intensief gebruik (Rozendal et al., 2008), waardoor de huidige elektrodekost rond de  $25 \text{ €} \cdot \text{are}^{-1}$  zal schommelen. Dit is met de huidige stand van zaken (een nutriëntenkost van  $88,5 \text{ €} \cdot \text{are}^{-1}$ ) al een stuk interessanter.

## 2. Verder onderzoek

De sterk verschillende microklimaatcondities bij de verschillende proeven maken het riskant de uitgevoerde proeven onderling te vergelijken. In nieuw onderzoek is het dan ook aangeraden om de proeven te herhalen in groeikamers bij gecontroleerde temperaturen en relatieve luchtvochtigheid, maar vooral bij uniforme lichtcondities om variaties binnen dezelfde plantengroep te minimaliseren. Door te werken met verschillende lichtintensiteiten en temperaturen kan onderzocht worden of de temperatuur en PAR-intensiteit een drempelwaarde vertonen waarboven positieve elektrische effecten teniet gedaan worden of worden overschaduwd door de sterkere temperatuur- of lichteffecten. De significante verschillen tussen test- en controleplanten in de najaarsproef van het eerste experiment lieten uitschijnen dat het aanleggen van een voltageverschil wel degelijk een positieve invloed kan hebben op plantengroei. De exacte onderliggende mechanismen hiervoor zijn in deze masterscriptie echter niet volledig opgehelderd. De EC- en pH-gradiënten die ontstonden door het aanleggen van het veld kunnen zeker bijdragen tot een betere plantengroei, maar er valt niet uit te sluiten dat ook plantgerelateerde mechanismen, zoals de stimulatie van de actieve ionenopname, werden gestimuleerd

door de elektrische spanning of stroom. Het vermijden van pH- en EC-gradiënten, bijvoorbeeld door het frequent omwisselen van de polariteit van het gelijkspanningsveld, is dan ook een must in toekomstig onderzoek om onderscheid te maken tussen plantgebonden mechanismen en effecten die samenhangen met de heterogeniteit van de substraatoplossing. In de zuivere hydroponische proef werd het best deze pH- en EC-uniformiteit bereikt, maar ondervonden de geëlektrificeerde planten schadeverschijnselen die sterk leken op symptomen die zich voordoen bij een magnesiumdeficiëntie. Verder onderzoek moet uitwijzen of dit inderdaad te wijten was aan te hoge stroomsterkten, vermoedelijk gekoppeld aan een overmatige onderdrukking van de magnesiumopname, en of deze schadeverschijnselen reversibel zijn.

Een laatste belangrijk punt voor verbetering betreft de populatiegrootte van elke plantengroep. In deze thesis werd consequent gewerkt met drie planten per behandeling ( $n = 3$ ) en dit voornamelijk ingegeven door praktische beperkingen. Het aantonen van significante verschillen tussen twee behandelingen is bij dergelijk kleine populatiegrootte echter niet evident. Gunstige effecten van de elektrische behandeling kunnen door toevallige omgevingsfactoren slecht of helemaal niet aantoonbaar zijn.

Zo waren er in de najaarsopzet van experiment 1 enkel géén significante verschillen merkbaar tussen de test- en controlegroep bij het gebruik van de 100%-voedingsoplossing. Een mogelijke oorzaak werd gezocht in de afwezigheid van grote verschillen in pH van de substraatoplossing tussen test- en controleblokken. Wanneer de mogelijke stimulatie van de actieve ionenopname echter de overhand zou gehad hebben, was dit resultaat niet te verwachten. Een analyse van de data van de 100%-planten liet inderdaad zien dat één plant (100%-3) het groepsgemiddelde voor wat betreft de droge shootbiomassa en de bladoppervlakte sterk naar beneden trok, terwijl er bij de controleplanten slechts weinig variatie was. Wanneer deze vermoedelijke outlier niet werd meegenomen, kon wel een significant verschil worden gevonden voor wat betreft de droge shootbiomassa ( $6,8 \pm 0,6$  t.o.v.  $5,4 \pm 0,2$  g,  $p = 0,027$ ). Aangezien geen verschillen werden vastgesteld in bladoppervlakte ( $1987 \pm 54$  t.o.v.  $1964 \pm 90$  cm<sup>2</sup>) was de SLA opnieuw duidelijk lager voor de 100%-testplanten ( $415 \pm 64$  t.o.v.  $512 \pm 33$  cm<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>,  $p = 0,103$ ).

In toekomstig onderzoek moet dus resoluut gewerkt worden met grotere n-waarden zodat eventuele outliers minder invloed hebben op de betrouwbaarheid van het uiteindelijke resultaat van de elektrische behandeling. Wanneer in dat geval inderdaad kan aangetoond worden dat ook voor de 100%-planten significant betere resultaten kunnen gevonden worden, zal het economisch waarschijnlijk ook interessant zijn om, naast het streven naar een verminderd nutriëntengebruik met het behoud van de huidige opbrengsten, de totale vruchtopbrengst te verhogen bij gelijke nutriëntenconcentraties van de voedingsoplossing. Testen waarin planten ook het generatieve stadium bereiken, zullen hierbij noodzakelijk zijn om effectief aan te tonen dat de vruchtopbrengst kan verhoogd worden door een elektrische behandeling.



---

## **VI. Algemeen besluit**

---



In het kader van deze scriptie werd de hypothese getoetst die stelde dat tomaatplanten gekweekt op rotswolsubstraat elektrisch gestimuleerd kunnen worden op een manier die technisch haalbaar is voor toepassingen in de praktijk, i.e. in commerciële serres met rotswolsubstraatteelten. Er werd hierbij nagegaan of de concentratie van de toegediende nutriëntenoplossing van invloed was op de effecten van het aangelegde voltageverschil van één Volt en dit met het oog op het terugdringen van het nutriëntengebruik in de intensieve Vlaamse glasteelten.

Dit onderzoek werd echter sterk bemoeilijkt door de sterk afwijkende klimaatcondities die heersten op de plaats van opstelling tijdens de verschillende experimenten. Het in kaart brengen van het serremicroklimaat en onderzoek naar de impact van deze verschillende microklimaten op de groei van jonge tomaatplanten bleken essentieel om de gevonden resultaten op een genuanceerde manier te interpreteren. De hoge, sterk fluctuerende temperaturen, de lage relatieve luchtvochtigheid samenhangend met de sterke dagelijkse verschillen in stralingsintensiteit in het voorjaar hebben vermoedelijk de positieve effecten van het elektrische veld bij de substraatexperimenten gemaskeerd of teniet gedaan.

De positieve resultaten uit het najaarsexperiment in combinatie met de minder variabele en minder extreme microklimaatvariabelen laten ruimte voor het bevestigen van de hypothese dat tomaatplanten elektrisch gestimuleerd kunnen worden. De mogelijke oorzaken voor deze positieve elektrische stimulatie werden gezocht in enerzijds een mogelijke stimulatie van de actieve ionenopname en anderzijds het ontstaan van EC- en pH-gradiënten in de substraatoplossing van de rotswolblokjes met elektrische behandeling. De 100%-planten bleken hierbij het minste baat te hebben van het aangebrachte elektrische circuit. De elektrisch behandelde 50%-planten scoorden echter significant beter dan de 50%-controleplanten voor wat betreft de droge shootbiomassa en de specifieke bladoppervlakte, twee belangrijke plantkarakteristieken met betrekking tot de latere vruchtopbrengst. Deze karakteristieken alsook de plantlengte bleken niet verschillend voor de controleplanten die behandeld werden met de 100%-nutriëntenoplossing. In de onderzochte proefperiode ( $\pm 50$  dagen) kon de nutriëntenconcentratie dan ook met de helft gereduceerd worden zonder in te boeten aan plantenopbrengst en dit enkel bij spanningsoplegging.

Noch het koolstofvilt op zich, noch de polariteit van het opgelegde elektrische veld bleken een noemenswaardige rol te spelen in de resultaten die gevonden werden bij de testplanten. Daartegenover stonden de duidelijke schadeverschijnselen bij de elektrisch behandelde planten wanneer deze zuiver hydroponisch opgegroeid werden. Dit had waarschijnlijk te maken met de hogere stroomdichtheid die volgens de hier gestelde hypothese interfereerden met de actieve opname van magnesium.

Voor wat betreft het terugdringen van het nutriëntengebruik in serreteelten, bleek de economische haalbaarheid van de praktische toepassing van de in deze masterscriptie gehanteerde methode voorlopig nog gehypothekeerd te zijn door de hoge elektrodekost (actueel 125 €·are<sup>-1</sup> serreoppervlak).

Hierteenover stonden de lage operationele kosten (elektriciteit) van slechts  $0,018 \text{ €} \cdot \text{are}^{-1}$  per groeiseizoen. Het mag duidelijk zijn dat de interesse van professionele tomatentelers gering zal zijn wanneer hier slechts een reductie in de nutriëntenkost van  $88,5 \text{ €} \cdot \text{are}^{-1}$  tegenover zal staan. De meest haalbare toepassing vandaag de dag, in afwachting van dalende elektrodeprijzen, lijkt de applicatie van de techniek in de professionele zaaibedrijven met hergebruik van de elektroden.

Verder onderzoek moet echter uitwijzen of bij behoud van de huidige nutriëntenhoeveelheden geen extra verbeteringen in de gewasopbrengst mogelijk zijn, aangezien hierover in deze scriptie geen uitsluitsel kon gegeven worden. Indien dit bewaarheid wordt, zou dit niet enkel goed nieuws zijn voor de omzet van commerciële telers, maar zou electrocultuur in de nabije toekomst ook een belangrijke rol kunnen spelen in het terugdringen van voedselschaarste op globaal niveau met daaraan gekoppeld de snel stijgende voedselprijzen.

---

## **VII. Referenties**

---





- Adams, P., (2002): "Nutritional control in hydroponics. In: Hydroponic production of vegetables and ornamentals." Savvas. D. & Passam, H. ed., Embryo Publications, p. 211-261.
- Arnon, D.I., Fratzke, W. E. & Johnson, C.M., (1942): "Hydrogen ion concentrations in relation to absorption of inorganic nutrients by higher plants." *Plant physiology*, 17 (4), p. 515-524.
- Atherton, J.G. & Rudich, J. (eds), (1986): "The tomato crop. A scientific basis for improvement.", Chapman & Hall, London, 661 p.
- Auerswald, H., Schwarz, D., Kornelson, C., Krumbein, A. & Brückner, B., (1999): "Sensory analysis, sugar and acid content of tomato at different EC-values of the nutrient solution." *Scientia Horticulturae*, 82, p. 227-242.
- Bernaerts, E. & Demuyne, E., (2010): "Tuinbouw.", Vlaamse Overheid, Departement Landbouw en visserij, afdeling Monitoring en Studie, Brussel, 21 p.
- Bertholon, P., (1783): "De l'Électricité des végétaux.", Parijs.
- Bi, R., Schlaak, M., Siefert, E., Lord, R. & Connolly, H., (2011): "Influence of electrical fields (AC and DC) on phytoremediation of metal polluted soils with rapeseed (*Brassica napus*) and tobacco (*Nicotiana tabacum*).", *Chemosphere*, 83, p.318-326.
- Blindeman, L., Ceustermans, N., Chow, T.T., De Bruyn, P., Deckers, S., De Rocker, E., Goen, K., Lapeere, E., Mertens, M., Nechelpuut, H., Pauwels, E., Penninckx, I., Planckaert, M., Van De Populiere, I., Van Oost, I. & Van Poucke, K., (2006): "Recirculatie van water in de glastuinbouw. Winst voor u en het milieu." Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Beleidsdomein Landbouw en visserij, Brussel, 47 p.
- Boe, A.A. & Salunkhe, D. K., (1963): "Effects of magnetic fields on tomato ripening." *Nature*, 199, p. 91-92.
- Bougoul, S., Ruy, S., de Groot, F. & Boulard, T., (2005): "Hydraulic and physical properties of stonewool substrates in horticulture." *Scientia Horticulturae*, 104, p. 391-405.
- Breazeale, E. L. & McGeorge, W.T., (1953): "Cation uptake by plants as affected by an applied potential." *Soil Science*, 75, p. 443-448.
- Breazeale, E.L., McGeorge, W.T. & Breazeale, J.F., (1951): "Nutrition of plants considered as an electrical phenomenon- A new approach." *Soil Science*, 71, p.371-375.
- Cerda, A., & Roorda van Eysinga, J.P.N.L., (1981): "Tomato plant growth as affected by horizontally unequal osmotic concentrations in rockwool." *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 29, p. 189-197.

Chloupek, O., (1977): "Evaluation of the size of a plants root system using its electrical capacitance." *Plant and Soil*, 48, p. 525-532.

Clauwaert, P., Aelterman, P., Pham, T.H., De Schamphelaire, L., Carballa, M., Rabaey, K. & Verstraete, W., (2008): "Minimizing losses in bio-electrochemical systems: the road to applications.", *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79, p. 901-913.

Clegg, C.J. & Mackean, D. G., (2006): "Advanced Biology – principles & applications" Hodder Stoughton Publishers, p. 340–343.

Curvers, D., (2005): "Modelleren van de elektro-osmotische ontwatering van afvalwaterslib. Elektro-osmose, wanneer water kruipt waar het niet stromen kan...", Masterscriptie, Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent.

Dalton, F.N., (1995): "In situ root extent measurements by electrical capacitance methods." *Plant and Soil*, 173, p. 157-165.

Dannehl, D., Huyskens-Keil, S., Eichholz, I., Ulrichs, C. & Schmidt, U., (2011): "Effects of direct-electric-current on secondary plant compounds and antioxidant activity in harvested tomato fruits (*Solanum lycopersicon L.*)." *Food Chemistry*, 126(1), p. 157-165.

Davy, (1807): "Philosophical Transactions." *Elements of Agricultural Chemistry*, p. 37.

De Rijck, G. & Schrevens, E., (1998): "Distribution of nutrients and water in rockwool slabs." *Scientia Horticulturae*, 72, p. 277-285.

Diprose, M. F., Benson, F. A., & Willis, A. J., (1984): "The effect of external applied electrostatic fields, microwave radiation and electric currents on plants and other organisms, with special reference to weed control.", *Botanical Review*, 50 (2), p. 171-223.

Du Laing, G. & Tack, F., (2010): "Cursus chemische analysetechnieken, partim anorganisch", Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent.

Dymek, K., Dejmek, P., Panarese, V., Vicente., A.A., Wadsö, L., Finnie, C. & Galindo, F.G., (2012): "Effect of pulsed electric field on the germination of barley seeds.", *Food Science and Technology*, 47, p. 161-166.

Dyśko, J., Kowalczyk, W. & Kaniszewski, S., (2009): "The influence of pH of nutrient solution on yield and nutritional status of tomato plants grown in soilless culture system." *Vegetable Crops Research Bulletins*, 70, p. 59-69.

Edwards, G.J., (1975): "Electrical experiments on citrus seedlings." *Florida State Horticultural Society*, p. 36-39.

- FAO, (2008): "Current world fertilizer trends and outlook to 2011/12.", Rome, 57 p.
- Flores, P., Botella, M.A., Martínez, V. & Cerdá, A., (2002): "Response to salinity of tomato seedlings with a split-root system: Nitrate uptake and reduction." *Journal of Plant Nutrition*, 25(1), p. 177-187.
- Franco, D., Geutjens, K., Holmstock, K., & Louwagie, L. (2007): "Vestigingskansen voor glastuinbouw in Vlaanderen. Clustering als duurzame ontwikkeling?" Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Beleidsdomein Landbouw en visserij, Afdeling Duurzame landbouwontwikkeling, Brussel, 80 p.
- Georges, H., Van Lierde, D., & Verspecht, A. (2003): "De Vlaamse glastuinbouw en zijn concurrenten." Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Beleidsdomein Landbouw en visserij, Centrum voor landbouweconomie, Brussel, 87 p.
- Giancoli, D.C., (2005): "Natuurkunde voor wetenschap en techniek. Deel II: Golven en geluid, kinetische theorie en thermodynamica, elektriciteit en magnetisme, licht." Dan Haag: Sdu Uitgevers, Academic Services, 686 p.
- Gorgolewski, S., (1996): "The importance of restoration of the atmospheric electrical environment in closed bioregenerative life supporting systems." *Advances in Space Research*, 18(4/5), p. 283-285.
- Gorgolewski, S., Rozej, B., (2001): "Evidence for electrotropism in some plant species." *Advances in Space Research*, 28 (4), p. 633-638.
- Heffer, P. & Prud'homme, M., (2011): "Short term fertilizer outlook 2011 – 2012." 37th IFA Enlarged Council Meeting, Mayakoba (Mexico), 9 p.
- Heuvelink, E., Bakker, M.J., Elings, A., Kaarsemaker, R. & Marcelis, L.F.M., (2005): "Effect of leaf area on tomato yield." *Acta Horticulturae*, 691, p. 43-49.
- Heuvelink, E. (ed), (2005): "Tomato. Crop production science in horticulture, n°13" Wallingford (UK): CAB International, 339 p.
- Hicks, W.W., (1957): "A series of experiments on trees and plants in electrostatic fields." *Journal of the Franklin Institute*, 264(1), p. 1-5.
- Hsiao, T.C., (1976): "Stomatal ion transport." In: *Transport in Plants, Volume II., Deel II, Tissues and Organs* (Ed. Lüttge, U. & Pitman, M.G.), New York: Springer, p. 195-221.
- Jaworski, C. A. & Valli, V.J., (1964): "Tomato seed germination and plant growth in relation to soil temperatures and phosphorus levels." *Florida State Horticultural Society*, p. 177-183.

Kang, Y-I., Park, J-M., Kim, S-H., Kang, N-J., Park, K-S., Lee, S-Y. & Jeong, B. R., (2011): "Effects of root zone pH and nutrient concentration on the growth and nutrient uptake of tomato seedlings." *Journal of Plant Nutrition*, 34, p. 640-652.

Konings, L., (1995): "Gravitropism of roots: an evaluation of progress during the last three decades." *Botanica Acta*, 44(3), p. 195-223.

Krueger, A.P., Kotaka, S. & Andriese, P.C., (1963): "A study of the mechanism of air-ion-induced growth stimulation in *Hordeum vulgare*." *International Journal of Biometeorology*, 7(1), p. 17-25.

Krueger, A.P., Kotaka, S. & Andriese, P.C., (1965): "The effects of abnormally low concentrations of air ions on the growth of *Hordeum vulgare*." *International Journal of Biometeorology*, 9(3), p. 201-209.

Kurvits, A. & Kirkby, E.A., (1980): "The uptake of nutrients by sunflower plants (*Helianthus annuus*) growing in continuous flowing culture system, supplied with nitrate or ammonium as nitrogen source." *Z. Pflanzenernähr Bodenk*, 143, p. 140-149.

Larouche, R., Vezina, L. & Gosselin, A., (1989): "Nitrogen concentration and photosynthetic photon flux in greenhouse tomato production. I. Growth and development." *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114, p. 458-461.

Le Bot, J., Jeannequin, B. & Fabre, R., (2001): "Growth and nitrogen status of soilless tomato plants following nitrate withdrawal from the nutrient solution." *Annals of Botany*, 88, p. 361-370.

Leggett, J.E. & Gilbert, W.A. (1969): "Magnesium uptake by Soybeans.", *Plant Physiology*, 44, p. 1182-1186.

Lemström, S., (1904): "Elektricity in agriculture and horticulture." Londen: "The Electrician" Printing & Publishing Company, 72 p.

Li, Y.L., Stanghellini, C. & Challa, H., (2001): "Effect of EC and transpiration on production of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* L.)." *Scientia Horticulturae*, 88, p. 11-29.

Lingle, J.C., & Davis, R.M., (1959): "The influence of soil temperature and phosphorus fertilization on the growth and mineral absorption of tomato seedlings." *Proc. American Society for Horticultural Science*, 73, p. 312-322.

Lingle, J.C., & Davis, R.M., (1961): "Basis of shoot response to root temperature in tomato." *Plant Physiology*, 36(2), p 153-162.

Lucas, R.E. & Davis, J.F., (1961): "Relationships between pH values of organic soils and availabilities of 12 plants nutrients." *Soil science*, 92, p. 177-182.

- Maas, E.V., & Hoffman, G.J., (1983): "Crop salt tolerance: Current assessment." *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103, p.115-134.
- Marschner, H., (1995): "Mineral Nutrition of Higher Plants.", New York: Academic Press., 889 p.
- Moon, J. & Chung, H., (2000): "Acceleration of germination of tomato seeds by applying AC electric and magnetic fields.", *Journal of electrostatics*, 48, p. 103–114.
- Murr, L.E., (1963): "Plant growth response in a simulated electric field-environment." *Nature*, 200, p. 490-491.
- Nechelput, H., (2007): "Water. Elke druppel telt. Groenteteelt op substraat." Vlaamse milieumaatschappij, Afdeling Water, Brussel, 24 p.
- Oeyen, A. & Tacquenier, B., (2011): "Rentabiliteitsrapport Land- en tuinbouw 2009." Beleidsdomein Landbouw en Visserij, Afdeling Monitoring en Studie, Brussel, 85 p.
- Platteau, J., (2010): "Landbouw in de Europese Unie." Vlaamse Overheid, Departement Landbouw en Visserij, Afdeling Monitoring en Studie, Brussel, 24 p.
- Pohl, H.A., & Todd, G.W., (1981): "Electroculture for Crop Enhancement by Air Anions." *International Journal of Biometeorology.*, 25(4), p. 309-321.
- Rajkai, K., Végh, K.R. & Nasca, T., (2002): "Electrical capacitance as the indicator of root size and activity." *Agrokémia és Talajtan*, 51, p. 1-10.
- Raschke, K., (1976): "Transfer of ions and products of photosynthesis to guard cells.", In: *Transport and transfer processes in plants* (Ed. Wardlaw, I.F. & Passioura, I.B.), New York: Academic Press, p 203-215.
- Repo, T., Laukkanen, J. & Silvennoinen, R., (2005): "Measurement of the tree root growth using electrical impedance spectroscopy." *Silva Fennica*, 39(2), p. 159-166.
- Rozendal, R.A., Hamelers, H.V.M., Rabaey, K., Keller, J. & Buisman, C.J.N., (2008): "Towards implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. Review" *Trends in Biotechnology*, 26(8), p. 450-459
- Schwankhardt, (1785): "Rozier, *Journal de Physique*", ii, p. 462.
- Schwartz, S. & Bar-Yosef, B., (1981): "Magnesium uptake by tomato plants as affected by Mg and Ca concentration in solution culture and plant age.", 75(2), p. 267-272.
- Schwarz, D., Grosch, R., (2003): "Influence of nutrient solution concentration and a root pathogen (*Pythium aphanidermatum*) on tomato root growth and morphology." *Scientia Horticulturae*, 97, p. 109-120.

- Sidaway, G.H.,(1975): "Some early experiments in electro-culture." *Journal of Electrostatics*, 1, p. 389-393
- Siddiqi, M.Y., Kronzucker, H.J., Britto, D.T. & Glass, A.D.M, (1998): "Growth of a tomato crop at reduced nutrient concentrations as a strategy to limit eutrophication." *Journal of Plant Nutrition*, 21(9), p.1879-1895.
- Šoch, J. & Čermák, J., (1981): "Stimulace výškového růstu smrkových sazenic gradientem stejnosměrného elektrického napětí v kořenové zóně." *Facultas silviculturae*, 50, p. 11-23.
- Solly, E., (1846): "On the influence of electricity on vegetation." *The Journal of the Horticultural society of London*, 1, p. 81-109.
- Sonneveld, C. & Voogt, W., (2009): "Crop response to an unequal distribution of ions in space and time.", In: *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*, Dordrecht: Springer, p. 159-172.
- Sonneveld, C. & Welles, G.W.H., (1988): "Yield and quality of rockwool-grown tomatoes as affected by variations in EC-value and climatic conditions." *Plant and Soil*, 111, p. 37-42.
- Steppe, K., (2011): "Cursus Ecofysiologie." *Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent*.
- Taiz, L., & Zeiger, E., (2002): "Plant physiology." *Massachusetts: Sinauer Associates, Inc., Publisher*. 690 p.
- Tucker, R., (1999): "Essential plant nutrients: Their presence in North Carolina soils and role in plant nutrition." *NCDA & CS, Agronomic Division*, 9 p.
- Vandenbergh, A., Cools, A., Van Lierde, D. & Van Gastel, L., (2007): "Inventarisatie van reductiemogelijkheden voor het gebruik van gewasbeschermingsmiddelen en nutriënten in de groenteteelt onder glas." *Ministerie van de Vlaamse Overheid, Departement Landbouw en visserij, Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek, Merelbeke*, 118 p.
- Van Labeke, M., (2011): "Cursus Plantenteelt, partim Tuinbouwgewassen." *Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent*.
- Van Meulebroek, L., Vanhaecke, L., De Swaef, T., Steppe, K. & De Brabant, H., (2012): "U-HPLC-MS/MS to quantify liposoluble antioxidants in red-ripe tomatoes, grown under different salt stress levels." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, p. 566-573.
- Van Noordwijk, M., (1990): "Synchronization of supply and demand is necessary to increase efficiency of nutrient use in soilless horticulture." *Plant nutrition – physiology and applications*, p. 525-531.

Vlaams departement Landbouw en Visserij, (2010): “Gebruik van kunstmest door de landbouw (stikstof en fosfor), 2005-2009”, Vlaamse overheid, Brussel.

Wall, S., (2010): “The history of electrokinetic phenomena.” *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15, p. 119-124.

Warnock, S.J., (1988): “A review of taxonomy and phylogeny of the genus *Lycopersicon*.” *HortScience*, 23, p. 669-673.

Wawrecki, W. & Zagórska-Marek, B., (2007): “Influence of a weak DC electric field on root meristem architecture.” *Annals of Botany*, 100, p. 791-796.

Wilcox, G.E., Magalhaes, G.E. & Silva, F.L.I.M, (1985): “Ammonium and nitrate concentrations as factors in tomato growth and nutrient uptake. *Journal of Plant Nutrition*, 8, p. 989-998.

Zumdahl S.S., (2005): “Chemical Principles.” New York: Houghton Mifflin Company, 1070 p.

## **Internetreferenties**

Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO: <http://www.fao.org/>, (laatste raadpleging: april 2012)

Index mundi: <http://www.indexmundi.com>, (laatste raadpleging, maart 2012)

Nelson, R.A., (2000):” Hemp husbandry.”, <http://www.rexresearch.com/hhusb/hh5elc.htm>, (laatste raadpleging, januari 2012).

## **Persoonlijke communicatie**

Persoonlijke communicatie: Lefevre, T., zaakvoerder Hortipower bvba, 13 december 2011, mondelinge vragenlijst.

Persoonlijke communicatie: Lefevre, T., zaakvoerder Hortipower bvba, 31 maart 2012, email.

Persoonlijke communicatie: Stoffels, P., zaakvoerder Stoffels bvba, 2 juni 2012, email.



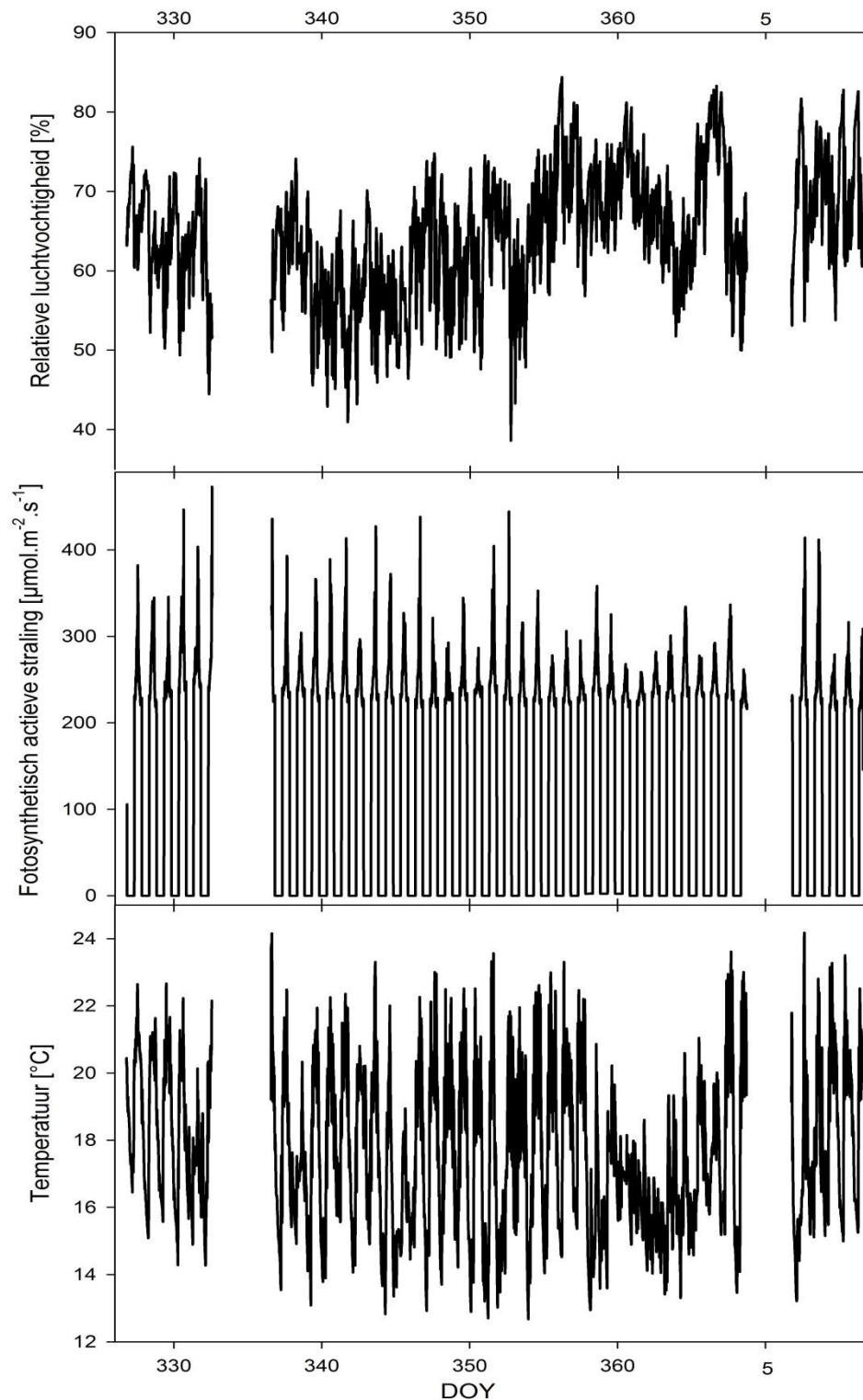


---

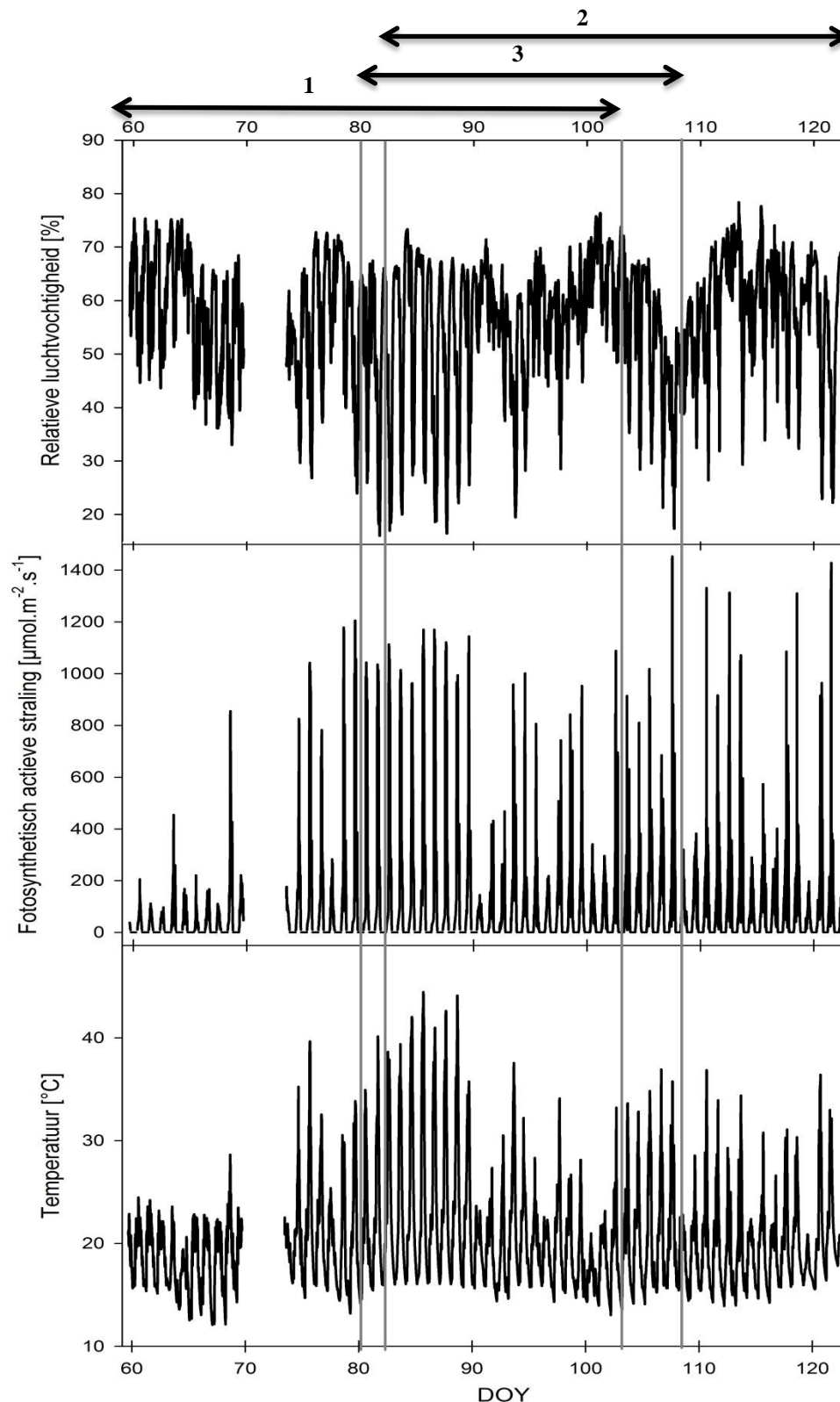
## **VIII. Bijlagen**

---





**Bijlage I:** Het verloop van de temperatuur, PAR-straling en relatieve luchtvochtigheid zijn weergegeven voor de beschrijving van het serremicroklimaat in het najaar. De proefperiode was tussen 22 november 2011 en 11 januari 2012 (DOY 326-5). Door technische aspecten waren er geen data beschikbaar tussen 28 november en 2 december 2011 (DOY 331-336) en tussen 4 en 6 januari 2012 (DOY 4-6).



**Bijlage II:** Het verloop van de temperatuur, PAR-straling en relatieve luchtvochtigheid zijn weergegeven voor de beschrijving van het serremicroklimaat in het voorjaar. De proefperioden zijn weergegeven met een cijfer. Proef 1 liep tussen 28 februari en 12 april 2012 (DOY 59-103). Proef 2 startte op 22 maart 2012 en eindigde op 1 mei 2012 (DOY 82-122). Experiment 3 liep tussen 20 maart en 17 april 2012 (DOY 80-108). Door technische aspecten waren er geen data beschikbaar tussen 10 en 13 maart 2012 (DOY 70-73).



