

R  
2  
H  
44

15N = 276723 H

11

I N S T I T U U T V O O R B O D E M V R U C H T B A A R H E I D

NOTA 221

REGELING VAN HET NUTRIËNTENAANBOD AAN PLANTEN IN KUNSTMATIGE  
SUBSTRATEN. 1. SYSTEEMBESCHRIJVING EN ORIËNTEREND EXPERIMENT MET SLA  
*With an English summary: Control of nutrient supply to plants on  
artificial substrates. 1. System description and preliminary  
experiment with lettuce*

door

M. HEINEN, A. DE JAGER en H. NIERS

---

Nota's van het Instituut voor Bodemvruchtbaarheid zijn in principe interne communicatiemiddelen en worden derhalve niet als officiële publikaties beschouwd. Zij zullen veelal resultaten van niet afgesloten onderzoek bevatten en/of als discussiestuk dienen. Eventuele conclusies mogen niet als definitief worden beschouwd. Deze nota's worden slechts in beperkte mate of in het geheel niet buiten het Instituut verspreid.

---

1990

Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Oosterweg 92, Postbus 30003,  
9750 RA Haren (Gr.)

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS  
  
0000 0961 8857

## INHOUD

Voorwoord	
Samenvatting	
Abstract	
Inhoud	
1. Inleiding	8
1.1. Substraatteelt	8
1.2. Literatuuroverzicht	10
1.2.1. NFT algemeen	10
1.2.2. Sla op NFT	11
1.3. Vraagstelling	13
1.4. Project IB 402	14
2. Materiaal en methoden	16
2.1. Beschrijving NFT-opstelling	16
2.2. Computerbesturing	20
2.3. Zoutdosering	21
2.4. Werkwijze	27
2.5. Opname van nutriënten door het gewas en verlies uit de voedingsoplossing	30
3. Resultaten en discussie	32
3.1. Analyseresultaten	32
3.2. Temperatuur en straling	35
3.3. Droog- en versgewicht	37
3.4. Nutriënten	40
Referenties	52
Appendices	57

## VOORWOORD

Door het Landelijk Onderzoeks Programma Substraatteelt (LOPS) is een project gefinancierd met de naam: Regeling van het nutriëntenaanbod aan planten in kunstmatige substraten. Dit project wordt uitgevoerd op het IB (IB-project 402). Het project is in 1987 opgestart met het idee om naar de opname door het gewas te kijken, hierbij gebruik makend van bestaande, bedrijfszekere meetapparatuur. Het ontwikkelen van voor de praktijk geschikte meet- en regelapparatuur zou in een aanverwant project door het IMAG (projectleider Th. Gieling) uitgevoerd worden. Nu, ruim twee jaar verder, blijkt dat de aangeschafte meetapparatuur niet aan de verwachtingen voldoet. Het onderzoek op het IB is daarom sterk omgebogen in de richting van het ontwikkelen van een betrouwbaar meet- en regelsysteem. Hiertoe is op het IB een interne werkgroep opgericht.

Dit eerste rapport over het IB-project 402 beschrijft de proefopstelling zoals die in 1988 is gebruikt voor een eerste oriënterend experiment met sla. De resultaten van dit experiment zullen beschreven worden. De manieren waarop de resultaten geïnterpreteerd kunnen worden geven een idee hoe vervolggexperimenten geëvalueerd moeten worden, en hoe later uit te voeren modellering aangepakt kan worden.

Onze dank gaat uit naar alle leden van de IB-werkgroep voor het uitdenken van de proefopstelling en het uitvoeren van het oriënterende experiment. Met name gaat onze dank uit naar K. Boersma, G. Heling en J. de Koning voor het opbouwen van de proefopstelling, en naar P. Zandt voor het ontwikkelen van het besturingsprogramma.

## SAMENVATTING

Bij de introductie van substraatteelt in de kastuinbouw is de verwachting uitgesproken dat in deze teeltsystemen (steenwol, NFT: Nutrient Film Technique) een betere sturing van de gewasgroei mogelijk zou zijn (beïnvloeding kwantiteit en kwaliteit). Hierbij is het van belang om nauwkeurig de opnamepatronen van de diverse voedings-elementen te bestuderen. Deze zullen in het kader van dit project via experimenten verzameld worden. Om een opnamepatroon in de tijd te kunnen volgen is een meet- en regelsysteem nodig. Hiermee kan de opname van nutriënten worden waargenomen via een concentratiedaling in de voedingsoplossing. Het niveau van de voedingsstoffen in de oplossing kan min of meer constant gehouden worden of volgens een bepaald patroon gewijzigd worden.

In de eerste helft van 1988 is een prototype van een proefopstelling gereed gekomen. Het is een NFT-systeem met hergebruik van drainagewater, en met een geautomatiseerd meet- en regelsysteem. In de periode 13 juni tot en met 25 juli is een oriënterend experiment met sla, cv Sativa, uitgevoerd. Het meet- en regelsysteem bleek niet betrouwbaar te zijn, en er werd overgestapt op handmatige controle en aanpassing van de voedingsoplossing. Elke week werd een aantal planten geoogst en geanalyseerd op inhoud aan N, P, K, Ca, Mg, S, Cl, Na, Fe, Mn, B, Cu, Zn en Mo. Deze elementen werden ook bepaald in watermonsters die tweemaal per week werden genomen. Dagelijks werd  $\text{NO}_3$  in de voedingsoplossing gemeten, en aan de hand van dit gehalte werd de voedingsoplossing weer op het niveau gebracht van de oorspronkelijke concentratie. De afname van de overige macro-elementen werd gerelateerd aan die van  $\text{NO}_3$  op basis van de analyses van de watermonsters.

De opname door het gewas werd op twee manieren bepaald: 1) uit de analyse van het gewas, en 2) uit de afname van de concentratie van de voedingsoplossing, rekening houdende met de doseringen. Het verlies uit de voedingsoplossing was groter dan de opname door het gewas (gemiddeld 40%), en moet verklaard worden door een combinatie van de

volgende factoren: 1) meetfouten, 2) lekkage, en 3) verwijdering van verflenst blad bij de laatste twee of drie oogsten.

De plantgewichten en de cumulatieve opnames zijn goed te beschrijven door mathematische groei- of opnamemodellen. Gemiddeld over de zes weken beschrijft een logistische curve en het Richards' model de datasets goed. De tweede-orde exponentiële polynoom beschrijft de data goed in de eerste drie weken, maar aan het eind wijkt deze sterk af. Gompertz' groei beschrijft goed aan het eind, maar slecht aan het begin.

De cumulatieve opname en plantinhoud vertoonden in enkele gevallen min of meer constante verhoudingen tussen macro- en micro-elementen in de tweede helft van de teelt. Met betrekking tot de opname volgde hieruit dat dosering van B gekoppeld kan worden aan dosering van N, Mg of Cl. Hierbij werd een verschil van 40% tussen minimale en maximale verhouding toegestaan. Met betrekking tot de inhoud van de gehele plant kan dosering van B gekoppeld worden aan dosering van K of Cl. Met betrekking tot de inhoud van de krop kan dosering van B gekoppeld worden aan dosering van N, P, K, Ca, Mg of Cl; dosering van Zn kan gekoppeld worden aan dosering van N, K, Ca, Mg of Cl, en dosering van Cu kan gekoppeld worden aan dosering van P. Bij beschouwingen aangaande de inhoud werd een verschil van 20% tussen minimale en maximale verhouding toegestaan.

De relatieve opname-concentratie, gedefinieerd als de verhouding tussen de snelheid van opname van een nutriënt gedeeld door de snelheid van wateropname ( $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) en de systeemconcentratie ( $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ), liet voor de meeste elementen gedurende het middengedeelte van het experiment een uitputting van het systeem zien. De wateropname is hiervoor echter niet nauwkeurig genoeg gemeten, en derhalve is deze conclusie onzeker.

## ABSTRACT

One of the expected advantages of the introduction of soilless growth media in horticulture (rockwool, NFT: Nutrient Film Technique) was a better control of plant growth (quantity and quality). To achieve this, insight in the uptake patterns of several nutrients is required. These will be obtained in this study by means of experiments. To follow an uptake pattern in time an automatic measurement and control system is necessary. With such a setup the uptake follows from the decrease in concentration of the nutrient solution. The concentration can be kept constant or changed according to a certain pattern.

In the first six months of 1988 a prototype experimental setup was constructed. It is a NFT system with reuse of drainage water, and an automatic measurement and control system. A pilot experiment with lettuce, cv Sativa, was conducted in the period 13 June until 25 July. Unfortunately, the automatic measurement and control system was found to be unreliable and the nutrient supply was carried out by hand. The amount of salts to be added was calculated from the decrease in  $\text{NO}_3$  concentration, which was determined daily. The decrease in concentration of the other macroelements was correlated with the decrease in  $\text{NO}_3$  concentration. These correlation factors were obtained and could be adapted from chemical analyses of solution samples. These solution samples were taken twice a week, and were analyzed for N, P, K, Ca, Mg, S, Cl, Na, Fe, Mn, B, Cu, Zn and Mo. The same elements were determined in plants harvested each week.

Crop uptake was determined in two ways: 1) from plant analysis, and 2) from the decrease in nutrient solution concentration, taking the amounts dosed into consideration. At the end of the experiment, the loss from the nutrient solution was larger than the uptake by the plants (average 40%). This may be explained by a combination of errors: 1) measurement errors, 2) leakage, and 3) removal of wilted leaves (at the last two or three harvests).

A good discription of plant weights and cumulative uptake can be

achieved with mathematical growth or uptake models. The logistic and Richards' models gave a good description during the whole growth period. The second order exponential polynome gave a good description during the first three weeks, but failed at the end. The Gompertz' curve gave a good description at the end, but failed in the beginning.

Cumulative plant uptake and plant content showed a few more or less constant ratios between macro- and microelements during the second half of the growth period. It followed from the uptake data that B can be dosed proportional to N, Mg or Cl. It followed from the content data of the whole plant that B can be dosed proportional to K or Cl. It followed from the content data of the heads that B can be dosed proportional to N, P, K, Ca, Mg or Cl, and that Zn can be dosed proportional to N, K, Ca, Mg or Cl, and that Cu can be dosed proportional to P.

The relative uptake concentration, defined as the ratio of the rate of nutrient uptake divided by the rate of water uptake ( $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) and the system concentration ( $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ), showed for most elements a depletion of the system during the middle of the growth period. However, the water uptake was not measured accurately, and, therefore, there are doubts about this conclusion.

## 1. INLEIDING

### 1.1. Substraatteelt

Bij de introductie van substraatteelt in de kassuinbouw is de verwachting uitgesproken dat in deze zwak-gebufferde teeltsystemen (bijv. steenwolteelt of NFT: Nutrient Film Technique) een betere sturing van de gewasgroei mogelijk zou zijn dan in de gangbare vollegrondsteelten. Als teeltsysteem tonen steenwol en NFT buffering via het volume van de in omloop zijnde voedingsoplossing (dit ter onderscheiding van wat in gronden onder buffering wordt verstaan: het adsorberend en desorberend vermogen). Onder sturing van de gewasgroei wordt hier verstaan de beïnvloeding van de kwantiteit en kwaliteit van het gewas (bijv.  $\text{NO}_3$ -gehalte in sla). Hierbij is het van belang om nauwkeurig het opnamepatroon van de diverse voedingselementen te bestuderen. Hiervoor is een meet- en regelsysteem nodig. De technische mogelijkheden voor een dergelijk regelsysteem zijn in principe aanwezig, maar er is gebrek aan inzicht in de juiste "instelwaarden" voor een op te zetten regelsysteem, in de buffering van het systeem en in de fluctuaties in verdamping en nutriëntenopname door het gewas.

In veel van de huidige substraatsystemen wordt de pH en EC van de voedingsoplossing gemeten door de tuinder. Eens in de twee weken wordt een watermonster op alle hoofdelementen geanalyseerd, en eens in de vier weken worden dan tevens de spoorelementen geanalyseerd. Hierbij probeert men de drainageverliezen minimaal te houden. Dit drainwater wordt echter in vele gevallen geloosd op de grond, en zal uiteindelijk het grond- en oppervlaktewater bereiken. Deze teeltmethode heeft als grootste bezwaren de vervuiling van grond- en oppervlaktewater. In commerciële praktijksystemen worden nutriëntverliezen van 40 tot 70% waargenomen (De Willigen and Van Noordwijk, 1987). Men verwacht dat binnen afzienbare tijd een wet tot stand zal komen die deze lozing aan banden zal leggen. Het is daarom interessant dit drainwater te hergebruiken (eventueel na sterilisatie). Dit betekent dan tevens een efficiënt gebruik van meststoffen.



Regelmatige controle op de samenstelling van de voedingsoplossing levert informatie over het opnamepatroon van het gewas. Hierbij ligt de nadruk op de macro-elementen (N, P, K, S, Ca, Mg). Er kan ook gekeken worden naar mogelijke overeenkomsten in opname van de micro-elementen (Cl, Fe, Mn, B, Cu, Zn, Mo) met die van één van de macro-elementen, zodat micro-elementen gedoseerd kunnen worden met één van de macroelementen. Hieruit kan dan voor ieder gewas een bruikbaar recept worden opgesteld. Dit is een doeltreffender methode dan het uitproberen van diverse recepten. Tevens is het mogelijk om veranderingen in opname gedurende de teelt waar te nemen, en daarmee tot verschillende instelwaarden per groeistadium te komen.

De analyse van nutriëntenbehoefte staat centraal in IB-project 402. Oplossingen voor regelproblemen bij het realiseren van het gewenste aanbod in diverse teeltsystemen zullen bestudeerd worden op het IMAG (contactpersoon Th. Gieling). Verschillen in buffering en doorstromingsnelheid zijn daarbij van belang. Zo zal in een NFT-systeem, waarin de voedingsoplossing snel circuleert, de concentratie van de voedingsstoffen aan het worteloppervlak veel dichterbij de instelwaarde liggen dan in een systeem met teelt op steenwol. De doorstromingsnelheid is hier laag en ophoping en depletie kunnen tegelijk optreden, afhankelijk van de plaats in de mat en het soort nutriënt. In eerste instantie zal de aandacht uitgaan naar NFT-systemen.

Hoewel planten voor de meeste voedingsstoffen beschikken over interne regulatiesystemen die ervoor zorgen dat de opnamesnelheid slechts in geringe mate afhankelijk is van de externe concentratie,  $c_e$  (mits niet te laag), (De Jager, 1985), zijn er toch voordelen verbonden aan het constant houden van  $c_e$ . De interne regeling (die voor de opnamesnelheid zorgt) werkt mogelijk niet zo snel dat sterke en/of snelle fluctuaties (bijv. ten gevolge van sterke verdamping) kunnen worden gevolgd, wat resulteert in fluctuerende nutriëntgehalten. Het meten van monsters met min of meer dezelfde concentraties is meettechnisch ook betrouwbaarder. Een dosering van nutriënten waarbij de concentratie exponentieel toeneemt in de tijd, wordt door Ingestad (1986) en Ingestad and Lund (1986) voorgesteld om de gehalten in de plant op een constant niveau te handhaven (gedurende de exponentiële

groeifase). Dit leidt tot verhoging van de groeisnelheid.

## 1.2. Literatuuroverzicht

In het nu volgende zal een kort overzicht worden gegeven van de literatuur, waarin NFT als onderzoekobject centraal heeft gestaan. Het is niet de bedoeling van deze studie geweest om een uitgebreide literatuurstudie te doen.

### 1.2.1. NFT algemeen

Watercultures zijn al heel lang in gebruik bij studie naar het opnamegedrag van gewassen. Een eerste publikatie stamt uit 1660 (Steiner, 1985). Tegenwoordig worden NFT-systemen (zoals beschreven in bijv. Cooper, 1979; Graves, 1983; Hall and Wilson, 1986; Wild *et al.*, 1988; Winsor *et al.*, 1979) vaak gebruikt in onderzoek naar productie en opname van gewassen. Vaak wordt hierbij gebruik gemaakt van circulerende voedingsoplossingen (bijv. Steenhuizen, 1985, 1986, 1987a,b, 1988; Steenhuizen and Van der Boon, 1985; Van der Boon and Steenhuizen, 1984, 1986a,b). Er zijn meet- en regelsystemen ontwikkeld waarin de concentratie van één of meerdere elementen automatisch wordt geregistreerd. Hierbij wordt de samenstelling van de voedingsoplossing op een constant niveau gehandhaafd of gevarieerd volgens een bepaald patroon (Adams and Massey, 1984; Asher and Blamey, 1987; Bailey *et al.*, 1988; Clement *et al.*, 1974, 1978a,b; Hashimoto *et al.*, 1988; Hatch and Canaway, 1984; Ingestad and Lund, 1986; Nielsen, 1984). De concentratie van een aantal ionen wordt in veel gevallen gemeten met behulp van ion-selectieve electrodes (ISE) (Albery *et al.*, 1986a,b; Bailey *et al.*, 1988; Blom-Zandstra and Jupijn, 1987; Clement *et al.*, 1974, 1978a,b; Hashimoto *et al.*, 1988). ISE-metingen zijn snel, non-destructief, direct en goedkoop. Echter er zijn ook vele nadelen aan verbonden (bijv. Cammann, 1980; Heinen, 1990b), welke een grote rol spelen bij ijking van de ISE in het systeem.

Er is onderzoek verricht aan verschillende gewassen, zoals sla, tomaat, komkommer, meloen, paprika, augurk, aardbei. Het onderzoek richtte zich op verschillende facetten zoals de invloed van EC, pH, gaten, temperatuur, CO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub> concentraties op kwantiteit/kwaliteit

van het gewas (bijv. Adams and Massey, 1984; Benoit and Geustermans, 1980, 1986; Hicklenton and Wolynetz, 1987; Ingestad, 1979; Wees and Stewart, 1987).

De voedingsoplossing kan worden samengesteld volgens het recept van Steiner (1961, 1984). De beschikbaarheid van de diverse elementen hangt af van de thermodynamische evenwichten in de oplossing (Morard *et al.*, 1987). De uiteindelijke samenstelling van de voedingsoplossing hangt af van de mate van menging (Raats, 1980). De samenstelling wordt beïnvloed door doseringen en door opname door het gewas. In snel stromende NFT-systemen is menging vrijwel volledig, maar in steenwolcultures is menging onvolledig. Er kunnen zouten ophopen in bepaalde delen van de steenwolmat (Van Noordwijk and Raats, 1981).

Naast experimenteel verkregen gegevens, wordt er ook gekeken naar de efficiëntie van nutriëntengebruik en opname via groei- en/of opnamemodellen (bijv. Asher and Blamey, 1987; De Willigen and Van Noordwijk, 1987; Heinen, 1990a; Ingestad, 1986; Ingestad and Lund, 1986; Nye and Tinker, 1977; Youngdahl, 1988). De meeste gewassen vertonen in het begin een exponentiële groei gevolgd door een lineaire groeifase. Aan het eind neemt de groeisnelheid af als gevolg van ouderdom of differentiatie. In de commerciële tuinbouw zal deze fase vaak niet zichtbaar zijn omdat het gewas dan al is geoogst. De opname van nutriënten kan geacht worden een zelfde beeld te vertonen. Maar opname wordt soms ook verondersteld een Michaelis-Menten kinetiek te volgen (bijv. Youngdahl, 1988).

### 1.2.2 Sla op NFT

Met het gewas sla (dat in IB-402 als eerste gewas is gebruikt) zijn reeds vele experimenten met NFT uitgevoerd. In een korte literatuurstudie door Van Goor (1987) zijn de opnamepatronen van verschillende elementen weergegeven. De onderlinge verschillen zijn bekeken, evenals de invloed van de hoeveelheid straling op de opname. Tussen de drie hoofdelementen N, P en K werden geen duidelijke verschillen waargenomen in relatieve opnameverdeling over het seizoen. Uit onderzoek in België met NFT (Benoit and Geustermans, 1986) is gebleken dat een lagere opbrengst wordt verkregen (een verlaging van 20% of meer

in vergelijking met vollegrondsteelt), en dat veel bladrandschade optreedt (50-100%). Zij vonden dat de krop zwaarder werd bij toenemende EC (tot 3 mS/cm). Voor een uniforme opbrengst wordt een maximale gootlengte opgegeven van 20 m. De breedte is niet van grote invloed, maar aangeraden wordt de goten niet smaller dan 15 cm te maken. Uit experimenten met goten op hellingen van 1.5 en 3% bleek 1.5% helling betere kroppen te leveren. Een hoge temperatuur van de voedingsoplossing van 14 à 16 °C (in vergelijking met een lagere temperatuur van 7 à 10 °C) gaf een betere opbrengst. Onderzoek naar de invloed van de samenstelling van de voedingsoplossing richtte zich op verschillende Ca-niveaus, door verschillende  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ -niveaus aan te brengen. De waargenomen effecten konden niet verklaard worden naar een Ca-effect, omdat scheiding met  $\text{NO}_3$ -effect niet mogelijk was.

Van der Boon and Steenhuizen (1984, 1986a,b), Steenhuizen (1985, 1986, 1987a,b, 1988) en Steenhuizen and Van der Boon (1985) hebben het  $\text{NO}_3$ -gehalte van sla op voedingsfilm bestudeerd. Uit deze experimenten is onder meer gebleken dat een verhoogde  $\text{NH}_4/\text{NO}_3$ -verhouding in de voedingsoplossing resulteerde in een lager  $\text{NO}_3$ -gehalte in de krop. Dit ging vaak gepaard met een lichte opbrengst- en kwaliteitsdaling (o.a. rand, rot en verflenst blad). Verhoging van de Ca-concentratie in de voedingsoplossing leidde tot een lager  $\text{NO}_3$ -gehalte in de krop, maar verminderde de randaantasting niet. Vervanging van de voedingsoplossing door een voedingsoplossing met een hogere  $\text{NH}_4/\text{NO}_3$ -verhouding een aantal dagen voor de oogst leidde tot een lager  $\text{NO}_3$ -gehalte in de krop. Bij een te vroege verwisseling werd de kans op kwaliteitsdaling groter. Vervanging door een stikstofloze voedingsoplossing leidde tot drastische dalingen van het  $\text{NO}_3$ -gehalte in de krop, opbrengst en kwaliteit. Bij voedingsoplossingen waarin  $\text{NH}_4$  aanwezig was werd bij een hogere EC of Cl-concentratie een lager  $\text{NO}_3$ -gehalte in de krop waargenomen. Verwarming van de voedingsoplossing gedurende de nacht in de winterperiode leverde een verhoogde opbrengst en een hoger  $\text{NO}_3$ -gehalte in de krop.

Prince and Koontz (1984) hebben de plantafstand van slaplant bestudeerd in relatie tot verwachte groei. Dag- en nachttemperaturen zijn onderwerp van studie geweest voor Hicklenton and Wolynetz (1987). In groeikamers bleek dat bij lage fotosynthetische fotonflux

( $3.8 \text{ mol/d/m}^2$ ) een goede groei werd verkregen bij een nachttemperatuur van  $4^\circ\text{C}$  en een dagtemperatuur van  $19^\circ\text{C}$ . De worteltemperatuur had weinig effect op plantgrootte. Toename had alleen effect op specifiek bladoppervlak en bladoppervlak-verhouding (leaf area ratio). Wees and Stewart (1987) hebben de  $\text{CO}_2$ - en  $\text{O}_2$ -concentraties in de goten gemeten nadat bicarbonaat en/of lucht was toegediend. Binnen de beperkingen van hun onderzoek concluderen zij dat  $[\text{O}_2]$  slechts gering werd beïnvloed na beluchting, en dat  $[\text{CO}_2]$  toenam bij bicarbonaat-toediening. In de korte (2.5 m) goten nam  $[\text{CO}_2]$  toe in de richting van de afvoer, en nam  $[\text{O}_2]$  af. De concentraties werden daarnaast nog beïnvloed door de temperatuur van de oplossing en door de groei van de slapplanten.

### 1.3. Vraagstelling

Aan de hand van de gegevens over opname door het gewas, verliezen uit de voedingsoplossing en uitgevoerde doseringen, kunnen verschillende aspecten bestudeerd worden. In eerste instantie behoort de opname door het gewas gelijk te zijn aan de verliezen uit de voedingsoplossing, en behoort de opname electro-neutraal te verlopen. De elementgehalten kunnen op basis van droog- of versgewicht bekeken worden. Hierbij kan sprake zijn van constante of fluctuerende gehalten. Er kunnen constante verhoudingen van gehalten zijn tussen de macro-elementen onderling. Deze verhoudingen kunnen veranderen in de tijd, en dan zien we dat terug in een veranderende opnameverhouding. Ook kan de opnameverhouding tussen micro- en macro-elementen bekeken worden. Bij een constante verhouding kan dosering van de micro-elementen gekoppeld worden aan dosering van het betreffende macro-element. Het verband droog- versus versgewicht toont de verandering in percentage drogestof van het gewas in de tijd. Het verband cumulatieve opname versus gewicht (droog of vers) laat zien hoe de opname verandert tijdens de groei. Het verband relatieve cumulatieve opname ten opzichte van relatief drooggewicht in de tijd laat zien of er sprake is van preferente opname, in welk geval de relatieve opname groter is dan het relatieve drooggewicht. Een ander aspect kan zijn het verband tussen relatieve opnameconcentratie,  $C_i/C_s$  (De Willigen

and Van Noordwijk, 1987), en de tijd. Hierin stelt  $C_i$  een opnameconcentratie voor gedefinieerd als:

$$C_i = \frac{\text{snelheid van opname van nutriënt } i \text{ (mol/plant/dag)}}{\text{snelheid van wateropname (l/plant/dag)}}. \quad (1)$$

$C_s$  stelt de systeemconcentratie voor. Dit is de concentratie van nutriënt  $i$  in de voedingsoplossing, welke de op dat moment heersende of de gewenste (setpoint) concentratie kan zijn. Als  $C_i/C_s > 1.0$  dan raakt element  $i$  uitgeput in het systeem, en kan besloten worden om  $C_s$  te verhogen. Als  $C_i/C_s < 1.0$  dan hoopt element  $i$  zich op in het systeem, en kan besloten worden om  $C_s$  te verlagen.

#### 1.4. Project IB 402

Project 402 heeft als titel: Regeling van het nutriëntenaanbod aan planten in kunstmatige substraten. Het project is gestart in 1987, en wordt gesubsidieerd door "substraattteeltgelden" van de directie Akker- en Tuinbouw. Er vindt samenwerking plaats met het Landelijk Onderzoeks Programma Substraatteelt (LOPS), en met de hierdoor ingestelde werkgroepen Meten en Regelen, Wortelmedia, en Groei en Ontwikkeling. Via deze werkgroepen zijn er contacten met de instellingen IMAG (Th. Gieling, project 46300), CABO (B. Veen, F. Meyboom), PTG (C. Sonneveld, C. de Krey). Er is een IB-werkgroep ingesteld, welke de bestaande meet- en regelopstelling heeft uitgedacht en opgebouwd. De werkgroep bestaat uit de volgende leden:

- |              |  |
|--------------|--|
| A. de Jager  | - voorheen wetenschappelijk medewerker afdeling Bodemfysica en Wortelecologie, <u>coördinator tot oktober 1988</u> |
| M. Heinen    | - wetenschappelijk medewerker afdeling Bodemfysica en Wortelecologie, <u>coördinator sinds oktober 1988</u>        |
| P. Zandt     | - programmeur afdeling Wiskunde en Informatieverwerking  |
| G. Heling    | - leiding werkplaats   |
| J. de Koning | - medewerker werkplaats  |
| K. Boersma   | - electronicus   |
| E. Jongman   | - medewerkster potproevendienst  |

- M. van Noordwijk - wetenschappelijk medewerker afdeling Bodemfysica  
en Wortelecologie
- P. Raats - hoofd afdeling Bodemfysica en Wortelecologie
- H. Niers - wetenschappelijk medewerker afdeling Bemesting  
en Plantevoeding
- P. Lont - adjunct-directeur en lid LOPS.

Deze nota dient als basis voor verdere uit te voeren experimenten. Een doel van dit project is om de nutriëntenhuishouding in de substraatteelt te modelleren, met name de opnamepatronen tijdens een teelt. De groei wordt beïnvloed door externe factoren zoals straling en temperatuur. Vooruitlopend op een dergelijke modellering heeft Heinen (1990a) het praktische gebruik van een aantal analytische groeimodellen beschreven, welke tevens geschikt kunnen zijn voor de beschrijving van de opname van diverse nutriënten. In Heinen (1990b) is stilgestaan bij de theorie over ion-specifieke elektroden. In hoofdstuk twee wordt de gebruikte proefopstelling uitgebreid beschreven. Er zal globaal een beschrijving worden gegeven van het te gebruiken besturingsprogramma. Een uitgebreide beschrijving hiervan wordt in een aparte nota vastgelegd (Zandt, in prep.). Hiervan zal één module echter uitgebreid besproken worden namelijk de zoutdoserings. Vervolgens worden definities gegeven van opname door het gewas en het verlies van voedingsstoffen uit het systeem. Er wordt aangegeven hoe het oriënterend experiment is uitgevoerd. In hoofdstuk drie zullen de resultaten hiervan gepresenteerd en besproken worden.

## 2. MATERIAAL EN METHODEN

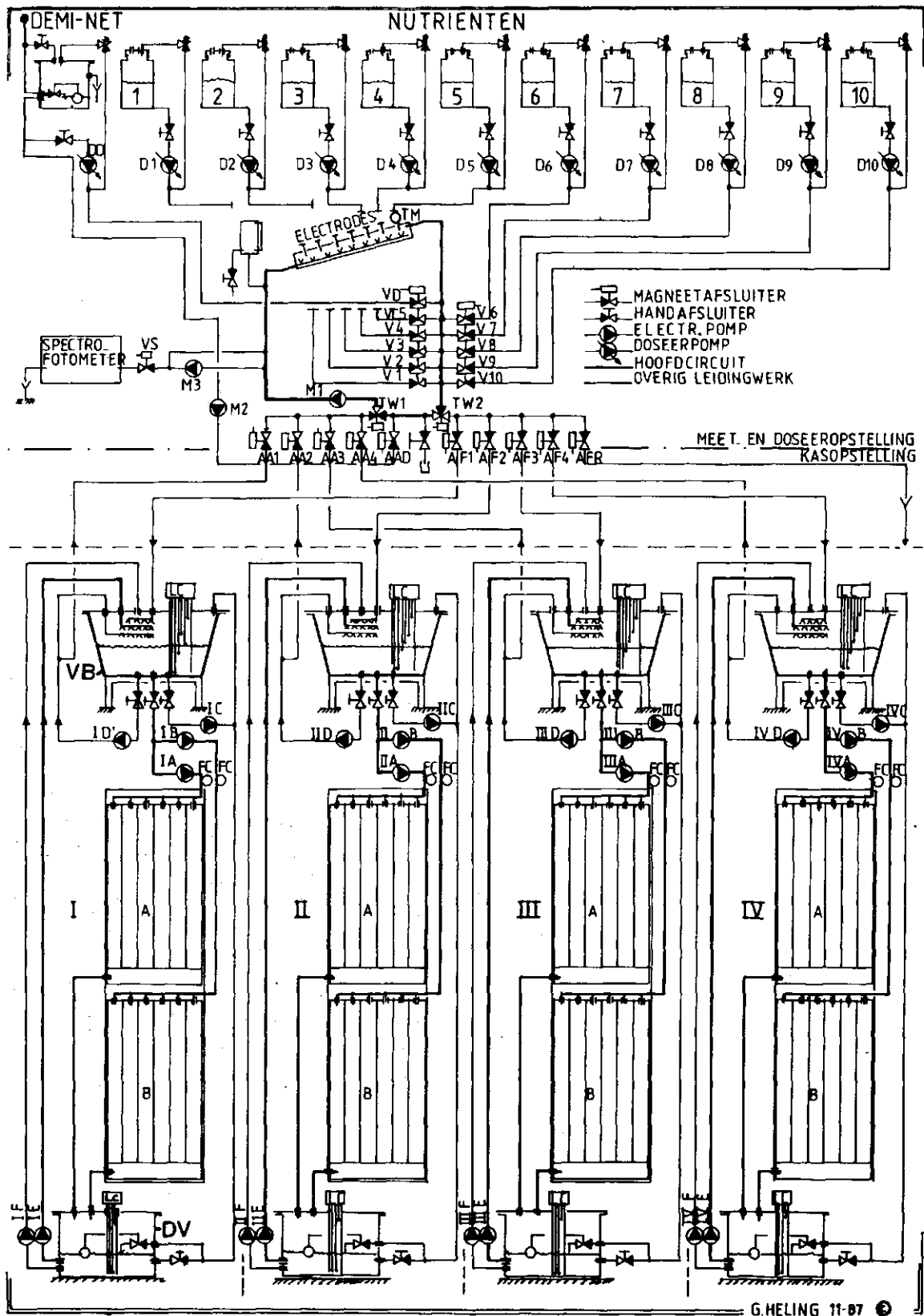
In dit hoofdstuk wordt de proefopstelling uitgebreid beschreven zoals deze er midden 1988 uitzag (par. 2.1). Het besturingsprogramma wordt kort beschreven in par. 2.2, en de bijbehorende zoutmodule zal uitgebreid behandeld worden in par. 2.3. Het hoofdstuk besluit met het vermelden van de condities waaronder het eerste oriënterende experiment is uitgevoerd (par. 2.4), en met het vermelden van de definities voor opname en verlies (par. 2.5).

### *2.1. Beschrijving NFT-opstelling*

Er wordt uitgegaan van een bestaande NFT-opstelling op het IB, die is gebruikt door Van der Boon and Steenhuizen (1984, 1986a,b), Steenhuizen (1985, 1986, 1987a,b, 1988) en Steenhuizen and Van der Boon (1985). Deze opstelling, bestaande uit vier systemen waarin voedingsoplossing circuleert, is destijds door de Technische Dienst van het IB ontwikkeld en gebouwd. Eén van de vier systemen is thans gemodificeerd ten behoeve van de nieuwe uit te voeren experimenten. Het systeem bestaat uit een voorraadbak (400 l, Brinkman) en twee teelttabletten, gevormd door zes met glasvezel versterkte polyester goten. De goten liggen onder een helling van 1:75 (afloop naar het zuiden) en zijn 326.5 cm lang, 23.5 cm breed en 4.0 cm diep. Het rondpompen geschiedt met behulp van centrifugaal-pompen (merken Eheim en Brown-Boveri) met geheel uit kunststof vervaardigde pomphuisen. Alle leidingen zijn vervaardigd van ondoorzichtig PVC. Om ervoor te zorgen dat de stroom voedingsoplossing ook in het begin van de teelt bij de wortels terecht komt, is het nodig onvolledige drempels (plastic plakstrips in open V-vorm) in de goten te brengen.

Een gedetailleerd diagram van de proefopstelling is weergegeven in figuur 2.1, waarin alle vier systemen in de kas zijn ingetekend. Van onder uit de voorraadbak, VB, wordt de voedingsoplossing door middel van pompen 1A en 1B naar de teelttabletten A en B gevoerd, waar de voedingsoplossing over zes goten wordt verdeeld.





Figuur 2.1. Gedetailleerd diagram van de proefopstelling.  
 Figure 2.1. Detailed diagram of the experimental setup.

Aan het eind van de goten komt de voedingsoplossing in een drainleiding terecht die uitmondt in een drainvat, DV (53 l, Stucki). De oplossing wordt met behulp van pomp 1E uit DV naar VB gepompt. Omdat 1E sneller DV leegpompt dan DV volloopt, is een extra toevoering aangelegd. Pomp 1C pompt voedingsoplossing vanuit VB direct naar DV. Wanneer in DV een bepaald niveau wordt bereikt, wordt deze toevoer afgesloten met behulp van een vlottermechanisme. In dat geval zal pomp 1C al zijn debiet direct terugpompen naar VB. Mocht DV te vol raken (bijv. bij een weigerend vlottermechanisme) dan wordt pomp 1F ingeschakeld welke voor extra afvoer zorgt. Deze wordt uitgeschakeld wanneer het niveau in DV weer op de gewenste waarde is gedaald. Pomp 1D pompt voedingsoplossing onder uit VB naar het meetcircuit. In geval dat het meetcircuit is afgesloten (bijv. voor interne spoeling) pompt 1D de voedingsoplossing terug VB in. Omdat altijd een deel van het debiet van de pompen 1C en 1D direct naar VB wordt teruggevoerd is er sprake van continue menging in VB. De vrije val die de voedingsoplossing maakt in VB en DV zorgt voor beluchting en menging van de oplossing. De niveau in VB en DV worden geregistreerd met elektronische niveau-voelers, LC. Deze LC zijn door de afdeling Elektronica van het IB ontwikkeld en werken op het principe van geleiding van elektrische stroom door vloeistof.

De bakken VB en DV zijn afgesloten om verdamping tegen te gaan en om licht tegen te houden en zo algengroei te remmen. De goten worden om dezelfde redenen afgedekt door plaatjes met in het midden een opening waarin een plant geplaatst wordt, of waarop een afdekkend blokje geplaatst wordt wanneer een plant is geoogst.

De concentratie van de voedingsoplossing in VB wordt gemeten in het meetcircuit. Hiervoor zijn op dit moment ion-selectieve electrodes (ISE) aanwezig voor  $\text{NO}_3$ , K en Ca (Philips, IS561). Tevens is er een pH-electrode (Philips, G15 K BNC) en een EC-electrode (Philips, PW 9550/60), en wordt de temperatuur gemeten. Er is een gel-referentie electrode (Yokagawa Electrofact, SR 20/AP 24) in combinatie met een platinadraad. De platinadraad zorgt voor de aarding van de voedingsoplossing. De ISE zijn geïnstalleerd in een meetcel. De voedingsoplossing wordt via pomp 1D naar het meetcircuit gepompt, en komt via elektrische magneetkleppen (merk FIP) AA en TW1 het meet-

circuit binnen. De voedingsoplossing stroomt door de meetcel en wordt daarna via de elektrische-magneetkleppen TW2 en AF teruggevoerd naar VB. Tevens is een vertakking aanwezig naar een spectrofotometer-opstelling. Deze is in het eerste experiment niet gebruikt en zal hier niet besproken worden. Er is ook een thermostaat geïnstalleerd vlak voor de meetcel (niet ingetekend). Hiermee is het mogelijk om in een kortgesloten meetcircuit van ca. 3 l (na omzetten van de drieweg magneetkleppen TW1 en TW2) de temperatuur constant te houden. In dat geval pompt M1 (Eheim) de voedingsoplossing rond.

De electrodes zijn via coaxkabels aangesloten op electrometer-versterkers. Dit is nodig omdat electrodes een hoge impedantie hebben. Alle sensoren, magneetkleppen, doseerpompen en de niveauvoelers zijn aangesloten op schakelkasten. De centrale computer kan op gezette tijden de signalen in de schakelkasten opvragen.

In het meetcircuit is ook de mogelijkheid om te doseren. Hiervoor zijn negen stockoplossingen (tabel 2.1) aanwezig in de nutriënt-vaten 1 t/m 9 (10 l).

TABEL 2.1. De zoutconcentraties van de stockoplossingen ( $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ), en de setpoints van de macro- ( $\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) en micro-elementen ( $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) en de pH.

TABLE 2.1. The salt concentrations of the stock solutions ( $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ), and the setpoints of the macro- ( $\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) and micro-elements ( $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) and the pH.

Salt	Concentration	Macro- elem.	Setpoint	Micro- elem.	Setpoint
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0.595	N	10.003	Fe	179
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	0.149	P	0.667	Mn	6.73
$\text{KNO}_3$	0.857	K	5.254	B	32.6
$\text{HNO}_3$	0.100	Ca	2.344	Cu	0.58
KOH	0.100	Mg	0.784	Zn	2.0
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	0.247	S	0.336	Mo	0.41
$\text{K}_2\text{SO}_4$	0.250	Cl	0.166		
$\text{MgSO}_4$	0.580			pH	6.0
$\text{CaCl}_2$	0.100				

Hieruit kan met behulp van precisiepompen, D1 t/m D9 (Oxford; 5 ml per omwenteling), via magneetkleppen, V1 t/m V9, zout aan de voedingsoplossing worden toegediend. Er zijn overstortventielen

(Duco, KM1/2") aanwezig om de pompen bij een eventuele te grote tegendruk (bijv. weigerende magneetklep) te kunnen ontlasten. Deze ventielen openen zich bij een bepaalde overdruk. Deze druk is zichtbaar op een drukmeter. Nutriënt-vat 10 bevat demi-water. Dit wordt toegediend (in porties van 20 ml) wanneer het niveau (geregistreerd met LC) in VB daalt. Het (kortgesloten) meetcircuit kan ook geheel gevuld worden met demi-water om te spoelen. Hiervoor is een vat (met een constant niveau) aanwezig (linksboven in figuur 2.1). Aanvoer geschiedt via DD en VD. Na spoeling wordt het afvalwater afgevoerd via afvoerklep AFR.

Er zijn verschillende met de hand afsluitbare kleppen/kranen en aftappunten geïnstalleerd. Deze kunnen worden gebruikt wanneer het systeem stil ligt en schoongemaakt wordt.

Het is mogelijk om met een meetcircuit vier systemen te controleren.

## *2.2. Computerbesturing*

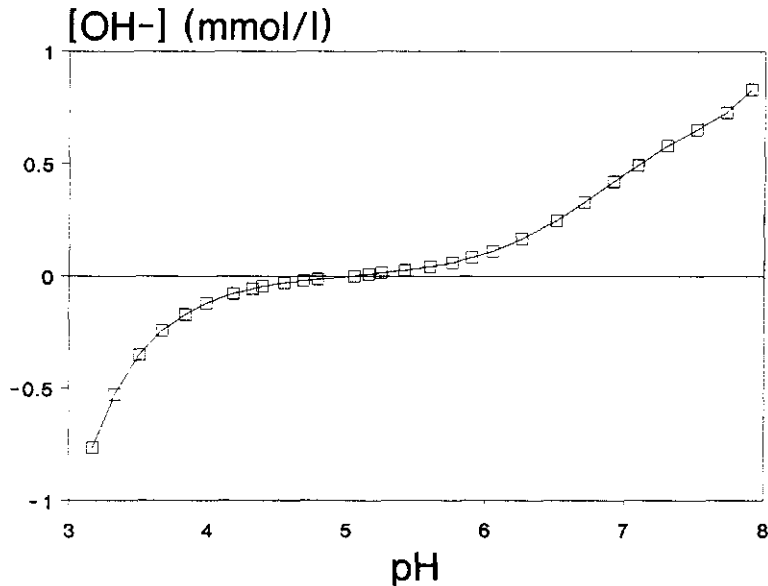
De diverse signalen (van ion-selectieve electrodes, temperatuur-, niveauvoelers) worden door een computer (Olivetti M24) geregistreerd met een door P. Zandt aangepaste versie van het aangeschafte programma LABLOG. Dit programma is uitgebreid om de magneetkleppen en doseerpompen te besturen, en om diverse berekeningen uit te voeren. Alle metingen en acties zijn op het scherm zichtbaar en kunnen worden geprint en/of op schijf weggeschreven worden. Het besturingsprogramma zal nog uitgebreid beschreven worden (Zandt, in prep.). Samengevat komt het erop neer dat de inkomende signalen worden omgezet naar concentraties of temperatuur en op scherm worden weergegeven. De concentraties worden vergeleken met de setpoints. Zodra één van de concentraties te veel afwijkt van diens setpoint (bijv. 10%) dan wordt berekend hoeveel van welke zouten er moet worden toegediend om alle concentraties terug te brengen naar de gewenste setpoints (zie paragraaf 2.3). Hierna worden de doseerpompen en bijbehorende magneetkleppen bestuurd. Op deze manier wordt de concentratie van de voedingsoplossing min of meer constant gehouden. De tijd tussen de metingen kan te allen tijde veranderd worden. In de toekomst zal het

minimum tijdsinterval bepaald worden door de tijd die nodig is om een spectrometrische bepaling uit te voeren.

In eerste instantie was het de bedoeling om de ISE regelmatig in het systeem te ijken (namelijk op de momenten dat dosering gewenst is). Dit geschiedde volgens een zogenaamde dubbele-standaard-additie methode in het kortgesloten meetcircuit. Na uitgebreid testen van deze methode is besloten om hiervan af te zien (Heinen, 1990b). De ISE zullen bij constante temperatuur in het laboratorium geijkt worden. Aangenomen wordt dat de gevoeligheid van de ISE niet noemenswaardig zal veranderen tijdens een experiment. Door regelmatige controle van de werkelijke concentratie van de voedingsoplossing, kan gezien worden hoe het niveau van de ijklijn (intercept) aangepast moet worden.

### 2.3. Zoutdosering

Zodra één van de gemeten concentraties ( $\text{NO}_3$ , Ca, K, en later ook  $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) meer dan bijvoorbeeld 10% afwijkt van de gewenste waarde (= setpoint, tabel 2.1), dan wordt besloten de concentraties van alle elementen terug te brengen naar hun setpoint. De hoeveelheid van elk element dat toegediend moet worden volgt uit het verschil van de concentratie op dat moment en de setpoint voor dit element. De afname in concentratie van de niet gemeten elementen (Mg, S, Cl) wordt gerelateerd aan de afname in concentratie van  $\text{NO}_3$ . Bijvoorbeeld, uit het eerste experiment (hoofdstuk 3) is gebleken dat per mol  $\text{NO}_3$ -opname er 0.039, 0.040 en 0.026 mol Mg, S en Cl zijn opgenomen. Deze verhoudingen worden van te voren in het besturingsprogramma ingevoerd en kunnen veranderd worden zodra veranderende inzichten daar aanleiding toe geven. Een alternatief is om een voedingsoplossing zonder Cl (en zonder Na) te gebruiken. De afname in concentraties van  $\text{SO}_4$  en Mg kunnen dan geschat worden aan de hand van de gemeten concentraties van  $\text{NO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4$ , K en Ca en de gemeten EC (zie Heinen, 1990b). Tevens wordt de pH teruggebracht naar diens setpoint (tabel 2.1). De hoeveelheid zuur (= [H]) of base (= [OH]) die hiervoor nodig is volgt uit een titratiecurve van de voedingsoplossing die vooraf in het laboratorium is bepaald (figuur 2.2).



Figuur 2.2. Titratiecurve van de voedingsoplossing.  
 Figure 2.2. Titration curve of the nutrient solution

De titratiecurve is bepaald door in 500 ml voedingsoplossing HCl of KOH (0.02 N) in kleine porties toe te dienen. De verkregen dataset is als tabel in het besturingsprogramma ingevoerd: de pH versus de hoeveelheid toe te dienen H ( $\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ ). Tussentijdse punten worden door middel van lineaire interpolatie bepaald. Doordat de punten vrij dicht bij elkaar liggen is de fout die hierbij optreedt gering. De hoeveelheid toe te dienen zuur of base volgt uit de aflezing bij de heersende pH minus de aflezing bij de gewenste pH.

Nu zijn voor negen elementen (N, P, K, Ca, Mg, S, Cl, H, OH) de toe te dienen hoeveelheden bekend. Er is keuze uit negen stockoplossingen (tabel 2.1) om in deze behoefte te voorzien. Er ontstaat dus een stelsel van negen vergelijkingen met negen onbekenden, dat als volgt weergegeven kan worden

$$A \cdot X = F. \quad (2)$$

Hierin is X de vector met 9 onbekenden (= de toe te dienen hoeveel-

heid (ml) van elke stockoplossing per liter voedingsoplossing),  $F$  is de vector met de negen bekenden (= de hoeveelheid toe te dienen van elk element, mmol per liter voedingsoplossing). In de coëfficiëntenmatrix  $A$  staat vermeld hoeveel mol van elk element aanwezig is in één mol zout van de stockoplossing (zie Appendix 1).

De waargenomen concentratiedalingen in de voedingsoplossing voldoen niet altijd aan de eis van electroneutraliteit, dat wil zeggen dat de som van de afname van de anionen inclusief OH (meq) niet altijd gelijk is aan de som van de afname van de kationen inclusief H (meq). Oorzaken hiervoor zijn meetfouten, een tijdelijk ongebalançeerd opname door het gewas, of uitscheiding van organische zuren (Van Noordwijk, pers. meded.). Alvorens Vgl (2) wordt opgelost, worden eerst de hoeveelheden van de toe te dienen elementen zodanig gecorrigeerd dat aan de eis van electroneutraliteit wordt voldaan. In het geval dat de som van de toe te dienen kationen (SK) groter is dan de som van de toe te dienen anionen (SA), wordt de toe te dienen hoeveelheid van alle kationen gecorrigeerd met de factor SA/SK. In het geval dat  $SA > SK$ , wordt de toe te dienen hoeveelheid van alle anionen gecorrigeerd met de factor SK/SA. De toe te dienen hoeveelheid geconcentreerde stockoplossingen zal nu voldoen aan de eis van electroneutraliteit. Het directe gevolg van deze procedure is dat de voedingsoplossing niet exact op de gewenste concentratie wordt teruggebracht.

Er is geen unieke oplossing van Vgl (2), omdat  $A$  singulier is (de determinant van  $A$  is nul, zie Appendix 1). Er moet een oplossing gekozen worden. De elementen Cl, H, OH en P kunnen ieder slechts door één stockoplossing toegediend worden. De hoeveelheid stockoplossing die per liter voedingsoplossing toegediend moet worden (aangeduid met {zout}, ml), is gelijk aan de vereiste hoeveelheid van het element,  $E$ , (aangeduid met  $[E]$ , mmol/l) gedeeld door de zoutconcentratie van de stockoplossing (aangeduid met [zout], mmol/ml) (tabel 2.2). Cl wordt toegediend via  $\text{CaCl}_2$ . Omdat per mol  $\text{CaCl}_2$  twee mol Cl wordt toegediend moet { $\text{CaCl}_2$ } door twee worden gedeeld. Nadat { $\text{CaCl}_2$ } is uitgerekend kan ook { $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ } worden berekend om aan [Ca] te voldoen, gecorrigeerd voor de hoeveelheid Ca reeds toegediend via  $\text{CaCl}_2$ . Het zout  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  wordt gebruikt om in de P-behoefte te

voorzien. De zouten  $\text{HNO}_3$  en  $\text{KOH}$  worden gebruikt om de pH van de voedingsoplossing bij te regelen. Nu blijven er nog vier zouten en vier elementen over.

TABEL 2.2 Zoutdoseringschema. {zout} en [E] stellen respectievelijk de hoeveelheid (ml) stockoplossing en element E (mmol) voor die aan 1 l voedingsoplossing toegediend moet worden. [zout] is de concentratie ( $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) van de stockoplossing.

TABLE 2.2 Salt dosing scheme. {salt} and [E] represent the amount of salt solution (ml) and the amount of element E to be added to 1 l of nutrient solution, respectively. [salt] is the salt concentration ( $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) of the stock solution.

---

{CaCl <sub>2</sub> }	=	$0.5 \cdot [\text{Cl}] / [\text{CaCl}_2]$
{HNO <sub>3</sub> }	=	$[\text{H}] / [\text{HNO}_3]$
{KOH}	=	$[\text{OH}] / [\text{KOH}]$
{KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> }	=	$[\text{P}] / [\text{KH}_2\text{PO}_4]$
{Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> }	=	$([\text{Ca}] - 0.5 \cdot [\text{Cl}]) / [\text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$
if [N] < (2 · [Ca] + 2 · [Mg] + [H] - [Cl]) then		
{KNO <sub>3</sub> }	=	0
{Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> }	=	$(0.5 \cdot [\text{N}] + 0.5 \cdot [\text{Cl}] - [\text{Ca}] - 0.5 \cdot [\text{H}]) / [\text{Mg}(\text{NO}_3)_2]$
{MgSO <sub>4</sub> }	=	$([\text{Mg}] + [\text{Ca}] + 0.5 \cdot [\text{H}] - 0.5 \cdot [\text{Cl}] - 0.5 \cdot [\text{N}]) / [\text{MgSO}_4]$
{K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> }	=	$(0.5 \cdot [\text{K}] - 0.5 \cdot [\text{P}] - 0.5 \cdot [\text{OH}]) / [\text{K}_2\text{SO}_4]$
else		
{MgSO <sub>4</sub> }	=	0
{Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> }	=	$[\text{Mg}] / [\text{Mg}(\text{NO}_3)_2]$
{K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> }	=	$[\text{S}] / [\text{K}_2\text{SO}_4]$
{KNO <sub>3</sub> }	=	$([\text{N}] + [\text{Cl}] - 2 \cdot [\text{Ca}] - 2 \cdot [\text{Mg}] - [\text{H}]) / [\text{KNO}_3]$

---

Er kunnen nu vier oplossingen verkregen worden door achtereenvolgens één van de hoeveelheden toe te dienen stockoplossingen op nul te stellen. We zullen gebruik maken van de twee oplossingschema's waarbij of  $\text{KNO}_3$  of  $\text{MgSO}_4$  gelijk aan nul gesteld wordt. Welke van de twee schema's gevolgd moet worden hangt af van de conditie of [N] kleiner dan wel groter of gelijk is aan  $(2 \cdot [\text{Ca}] + 2 \cdot [\text{Mg}] + [\text{H}] - [\text{Cl}])$ .

In het eerste geval wordt geen  $\text{KNO}_3$  toegediend. [N], gecorrigeerd voor de hoeveelheid reeds toegediend via  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  en  $\text{HNO}_3$ , wordt als  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  toegediend. [Mg], gecorrigeerd voor de hoeveelheid reeds toegediend via  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ , wordt als  $\text{MgSO}_4$  toegediend. [K], gecorrigeerd voor de hoeveelheid reeds toegediend via  $\text{KOH}$  en  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , wordt als  $\text{K}_2\text{SO}_4$  toegediend. In dit schema wordt geen rekening gehouden met



[S].

In het tweede geval wordt geen  $\text{MgSO}_4$  toegediend. [Mg] en [S] worden toegediend via respectievelijk  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  en  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . [N], gecorrigeerd voor de hoeveelheid toegediend via  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  en  $\text{HNO}_3$ , wordt toegediend als  $\text{KNO}_3$ . In dit schema wordt geen rekening gehouden met [K].

Vervolgens worden alle toe te dienen hoeveelheden zout per liter voedingsoplossing vermenigvuldigd met het totale volume van de voedingsoplossing. De pompen die gekoppeld zijn aan de voorraadvaten van de stockoplossingen worden bestuurd om deze hoeveelheid toe te voegen aan de voedingsoplossing.

De hierboven beschreven zoutdoseringsmodule van het besturingsprogramma kan negatieve doseringen berekenen. Dit kan zich voordoen als gevolg van meetfouten, of als er sprake is van indikking van een nutriënt. Het geval dat alle doseringen positief zijn wordt alleen dan bereikt als aan diverse randvoorwaarden (RV) wordt voldaan. Allereerst moet  $[E] \geq 0$ , zo niet dan stellen we dat  $[E] = 0$ . Voor de pH-regeling worden  $\text{HNO}_3$  en  $\text{KOH}$  gebruikt. Voor een gewenste pH-daling moet alleen  $\text{HNO}_3$  worden toegediend en [OH] wordt op nul gesteld, en vice versa. De RV behorende bij de toediening van  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  en  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  luiden

$$[\text{Ca}] \geq 0.5 \cdot [\text{Cl}], \quad (3)$$

$$[\text{K}] \geq [\text{P}] + [\text{OH}], \quad (4)$$

$$[\text{N}] \geq [\text{H}] + 2 \cdot [\text{Ca}] - [\text{Cl}]. \quad (5)$$

Epstein (1972) geeft in zijn Tabel 4-3 gemiddelde waarden voor het aantal atomen dat in een plant voorkomt (in verhouding tot het aantal Mo atomen). Hier zal worden aangenomen dat gemiddeld over de hele groei het opnamepatroon dezelfde verhoudingen zal vertonen. Uit Epstein's tabel volgt dat de opname van Ca zich tot Cl verhoudt als 125:3 (equivalenten), en er wordt daarmee voldaan aan RV (3). De opname van N overtreft in de meeste gevallen die van de andere ionen. Wanneer N wordt toegediend via  $\text{NO}_3$  (zoals in het eerste experiment) of bij zeer hoge  $\text{NO}_3/\text{NH}_4$ -verhouding, zal de totale opname van de anionen (N, P, S, Cl) groter zijn dan die van de kationen (K, Ca, Mg,

Na). Om electroneutraliteit te waarborgen zal er sprake zijn van netto  $H^+$ -opname, en dus van pH-verhoging van de voedingsoplossing (Van Beusichem, 1984). In dat geval geldt  $[OH] = 0$ . Volgens Epstein geldt dat de verhouding K:P in de orde ligt van 250:60, zodat aan RV (4) wordt voldaan. De H-opname kan uit Epstein (1972) geschat worden:

$$\begin{aligned} H &= P + 2 \cdot S + Cl + NO_3 - 2 \cdot Ca - 2 \cdot Mg - K \\ &= 60 + 60 + 3 + 1000 - 250 - 160 - 250 = 463. \end{aligned}$$

Volgens dit getallenvoorbeeld wordt ook aan RV (5) voldaan.

De RV die behoren bij schema 1 luiden

$$[N] \geq [H] + 2 \cdot [Ca] - [Cl], \quad (6)$$

$$[K] \geq [OH] + [P], \quad (7)$$

$$\begin{aligned} 2 \cdot [Mg] + 2 \cdot [Ca] + [H] - [N] - [Cl] - \\ - 2 \cdot [S] + [P] + [OH] - [K]. \end{aligned} \quad (8)$$

RV (6) en (7) zijn hetzelfde als RV (5) en (4). RV (8) is de uitdrukking voor electroneutraliteit, waar per definitie al aan wordt voldaan.

De RV die behoren bij schema 2 luiden

$$[N] \geq 0.5 \cdot [Mg] \quad (9)$$

$$[K] \geq 0.5 \cdot [S] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} [N] + [Cl] - 2 \cdot [Ca] - 2 \cdot [Mg] - [H] - \\ - [K] - 2 \cdot [S] - [P] - [OH]. \end{aligned} \quad (11)$$

Volgens Epstein's tabel wordt aan RV (9) en (10) voldaan. RV (11) is de uitdrukking voor de electroneutraliteit, waar per definitie al aan wordt voldaan.

In Appendix 2 zijn twee alternatieve oplossingschema's vermeld (geen  $Mg(NO_3)_2$  of geen  $K_2SO_4$  toedienen), inclusief de bijbehorende RV.

In de gebruikte twee doseerschema's wordt niet gekeken naar  $[SO_4]$  (schema 1) of  $[K]$  (schema 2). Wanneer telkens weer bij het doorlopen van de doseermodule hetzelfde schema wordt gebruikt, is het in prin-

cipe mogelijk dat S of K steeds weer onder- of overgedoseerd wordt, met mogelijk resultaat van respectievelijk gebrek of overmaat (toxiciteit). In de proefopstelling zoals die nu gebruikt wordt, wordt S niet gemeten. De opname van S is gerelateerd aan die van N via een bepaalde opnameverhouding. Als deze opnameverhouding correct is zal S-gebrek of S-overmaat niet optreden. Hierbij wordt aangenomen dat de N-opname goed gemeten wordt. Een verkeerde opnameverhouding kan alleen aan het licht komen via tussentijdse analyse van de voedingsoplossing, of eventueel via visuele gewasanalyse. In geval dat  $[K] < 0$ , wordt besloten om geen  $KNO_3$  en  $K_2SO_4$  te doseren (tabel 2.2) (vergelijk schema 4 in Appendix 3). Als te weinig K wordt toegediend zal vrij snel na een dosering de K-concentratie meer dan 10% van diens setpoint afwijken, zodat een nieuwe doseringsprocedure gestart zal worden, waarbij mogelijk wel K gedoseerd wordt.

Bij het gereed komen van dit rapport wordt gewerkt aan een aangepaste versie van de doseermodule. Deze zal later gepubliceerd worden.

#### 2.4. Werkwijze

De opname door het gewas van de macro-elementen N, P, K, Ca, Mg, S, Na en van de micro-elementen Cl, Fe, Mn, B, Cu, Zn, Mo werd bepaald door elke week een aantal planten te oogsten. Van elke plant werd de scheut van de wortels+veenperspotje verwijderd en apart vers gewogen. Daarna werden alle scheuten van een oogst bij elkaar gevoegd, gedroogd bij 70 °C en gemengd. Hiervan werd een drooggewicht bepaald. De wortels die buiten het veenperspotje groeiden werden afgeknipt, gedroogd (70 °C) en gewogen. De helft van het aantal veenperspotjes (inclusief de nog aanwezige wortelresten) werd gedroogd (70 °C) en gewogen. De andere helft van de veenperspotjes werd gebruikt om wortelresten uit te spoelen. Deze methode bleek tijdrovend en moeilijk te zijn en zal derhalve niet besproken worden. In de gedroogde monsters werden de gehalten bepaald (Centraal Laboratorium, IB). Er werd bij 70 °C gedroogd omdat bij drogen bij 100 °C  $NO_3$  kan verdwijnen (Van Noordwijk, pers. meded.) en we juist hierin geïnteresseerd zijn. Het nadeel van drogen bij 70 °C is dat het gewas nog een tijdje door kan gaan met ademen, hetgeen de gehalten op droge-

stofbasis van alle elementen doet toenemen.

Het eerste oriënterende experiment startte op 13 juni 1988 en er werd sla, cv Sativa, geteeld. De kasttemperatuur was ingesteld op 15 °C overdag (luchten bij 17 °C), en 10 °C in de nacht. Er waren 244 planten, waarvan er 144 werden geplaatst in de NFT-opstelling (12 per goot), en 100 plantjes werden gebruikt voor de "nul-oogst" ( $t_0$ ). De oogsten vonden plaats op 20 juni ( $t_1$ ), 27 juni ( $t_2$ ), 4 juli ( $t_3$ ), 11 juli ( $t_4$ ), 18 juli ( $t_5$ ) en 25 juli ( $t_6$ ), waarbij respectievelijk 48, 24, 24, 24, 12 en 12 planten werden geoogst voor analyse. In figuur 2.3 zijn de plantnummers in de opstelling aangegeven en in tabel 2.3 zijn de plantnummers per oogst weergegeven.

12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	144
11	•	•	•	•	•	83	•	•	•	•	•
10	•	•	•	•	•	82	•	•	•	•	•
9	•	•	•	•	•	81	•	•	•	•	•
8	•	•	•	•	•	80	•	•	•	•	•
7	•	•	•	•	•	79	•	•	•	•	•
6	•	•	•	•	•	78	•	•	•	•	•
5	•	•	•	•	•	77	•	•	•	•	•
4	•	•	•	•	•	76	•	•	•	•	•
3	•	•	•	•	•	75	•	•	•	•	•
2	•	•	•	•	•	74	•	•	•	•	•
1	13	25	37	49	61	73	85	97	109	121	133

Tablet A

Tablet B

Figuur 2.3. Plantnummering in NFT-opstelling.  
 Figure 2.3. Plant numbers in NFT setup.

TABEL 2.3 De plantnummers die per oogst verwijderd zijn.  
 TABLE 2.3 The plant numbers used for each harvest.

Oogst	Plantnummers
1	2, 6, 8, 12, 14, 16, 22, 24, 26, 30, 32, 36, 40, 46, 48, 50, 54, 56, 58, 60, 64, 66, 70, 72, 74, 78, 80, 84, 86, 88, 94, 96, 98, 102, 104, 108, 112, 118, 120, 122, 126, 128, 130, 132, 136, 138, 142, 144
2	4, 10, 18, 20, 28, 34, 38, 42, 44, 52, 62, 68, 76, 82, 90, 92, 100, 106, 110, 114, 116, 124, 134, 140
3	1, 11, 19, 21, 29, 31, 37, 39, 51, 57, 61, 67, 79, 81, 89, 93, 101, 105, 109, 119, 121, 129, 137, 141
4	3, 7, 13, 23, 27, 33, 45, 47, 49, 55, 69, 71, 75, 83, 91, 95, 99, 103, 115, 117, 127, 131, 133, 135
5	5, 15, 35, 43, 53, 65, 77, 87, 97, 111, 123, 143
6	9, 17, 25, 41, 59, 63, 73, 85, 107, 113, 125, 139

De keuze van de plantnummers per oogst is deels aselekt en deels select geweest. Er is bij elke oogst geprobeerd om de overblijvende planten ongeveer evenveel ruimte om zich heen te laten. Dit om elke plant representatief te laten groeien. De eerste oogst is gekenmerkt doordat de planten achter in de goot allemaal geoogst zijn. Hiermee werd verhinderd dat de wortels van deze planten verstrengeld zouden raken in de drainleidingen. Na twee oogsten waren er uit elke goot om en om planten geoogst. De keuze bij de overige oogsten was aselekt. Het oogstpatroon was in beide tabletten identiek. De geoogste planten werden representatief geacht voor alle planten die tot dat moment gegroeid hadden.

Op elke maandag (vlak voor de oogst) en elke donderdag van de week werden watermonsters uit VB genomen, om de concentratie van alle elementen te laten bepalen (BLGG, Naaldwijk). Dat gebeurde een uur (ca. 9.00 uur) nadat de voorraad voedingsoplossing in VB met demi-water op 300 l was gebracht. Dagelijks werd een monster uit VB genomen om het  $\text{NO}_3$ -gehalte te bepalen. Aan de hand van de dagelijks gemeten  $\text{NO}_3$ -concentratie werd besloten hoeveel er gedoseerd moest worden. Hierbij werd de afname van de overige elementen gerelateerd aan de  $\text{NO}_3$ -afname. De relatiefactoren werden steeds aangepast aan de hand van de twee-wekelijks gemeten concentraties (deze cijfers waren ongeveer drie à vier dagen na monsternamen beschikbaar). Voor berekening van de hoeveelheid toe te dienen zouten werd vrijwel hetzelfde schema gebruikt als beschreven in paragraaf 2.3.

Met de logistische, Gompertz', Richards' en tweede-orde exponentiele polynome groeimodellen (France and Thornley, 1984; Heinen, 1990a) kunnen naast de drooggewichten ook de versgewichten, de inhoud van de diverse elementen in de plant, of de cumulatieve opname van de diverse elementen door de plant als functie van de tijd weergegeven worden. De hierboven genoemde groeimodellen kunnen respectievelijk als volgt geschreven worden

$$W = W_0 \cdot W_f / (W_0 + (W_f - W_0) \cdot \exp[-k \cdot t]), \quad (12)$$

$$\begin{aligned} W &= W_0 \cdot \exp[k_0 \cdot (1 - \exp[-k \cdot t]) / k] = \\ &= W_f \cdot \exp[-k_0 / k \cdot \exp[-k \cdot t]], \end{aligned} \quad (13)$$

$$W = W_0 \cdot W_f / (W_0^n + (W_f^n - W_0^n) \cdot \exp[-k \cdot t])^{1/n}, \quad (14)$$

$$W = \exp[a + b \cdot t + c \cdot t^2]. \quad (15)$$

De parameters  $W_0$ ,  $W_f$ ,  $k$ ,  $a$ ,  $b$ , en  $c$  in Vgl (12)-(15) kunnen met behulp van het statistische verwerkingsprogramma GENSTAT 5 (1987) geschat worden (zie Heinen, 1990a).

#### 2.5. Opname van nutriënten door het gewas en verlies uit de voedingsoplossing

Als gevolg van de opname door het gewas ( $O$ ) zal de concentratie van de voedingsstoffen in de oplossing dalen (verlies,  $V$ ), en zal het gehalte in de plant stijgen (tenzij er groeiverdunning plaatsvindt). Afgezien van meetfouten geldt  $O = V$ . Het gehalte in de plant wordt bepaald door regelmatig een aantal planten te oogsten, die representatief voor alle aanwezige planten zijn. De totale opname door de planten,  $O$ , is gedefinieerd als

$$O = N \cdot (A_t - A_{t-1}), \quad (16)$$

waarin  $O$  : totale opname (mmol/tijdsinterval)  
 $N$  : aantal planten dat heeft gegroeid gedurende het beschouwde tijdsinterval (1/tijdsinterval)  
 $A_t$  : nutriëntinhoud van plant aan het eind van het beschouwde tijdsinterval (mmol)  
 $A_{t-1}$  : nutriëntinhoud van plant aan het begin van het beschouwde tijdsinterval (mmol).

In geval dat de planten in veenperspotjes groeien, moeten deze laatste bij A betrokken worden. De totale opname wordt vergeleken met de afname in voedingsoplossing,  $V$

$$V = (C_{t-1} + D - C_t) \cdot \text{VOL}, \quad (17)$$

- waarin  $V$  : verlies van nutriënt uit de voedingsoplossing  
(mmol/tijdsinterval)
- $C_{t-1}$  : concentratie nutriënt in voedingsoplossing aan het  
begin van het beschouwde tijdsinterval (mmol·l<sup>-1</sup>)
- $C_t$  : concentratie nutriënt in voedingsoplossing aan het  
eind van het beschouwde tijdsinterval (mmol·l<sup>-1</sup>)
- $D$  : de hoeveelheid nutriënt gedoseerd gedurende het  
beschouwde tijdsinterval (mmol·l<sup>-1</sup>)
- $\text{VOL}$  : volume van het systeem (l).

Wanneer de concentratie van de voedingsoplossing constant gehouden wordt geldt  $C_t = C_{t-1}$ , en uit Vgl (17) volgt dan dat  $V = D \cdot \text{VOL}$ . Het verlies en dus de opname is dan gelijk aan de hoeveelheid die gedoseerd is.

## 3. RESULTATEN EN DISCUSSIE

## 3.1. Analyseresultaten

Gebaseerd op het gemiddelde scheutgewicht is het percentage drogestof berekend (tabel 3.1). Er is uitgegaan van het scheutgewicht omdat het versgewicht van de wortels niet bekend is. In tabel 3.1 zijn tevens de standaardafwijkingen van de versgewichten weergegeven, en de drooggewichten van de wortels en van de veenperspotjes.

TABEL 3.1. Het aantal geoogste planten, aantal planten dat tot aan de desbetreffende week gegroeid heeft, de kropgewichten (vers + standaardafwijking, droog (g)), het percentage drogestof in de krop, en de drooggewichten (g) van de wortels (buiten het veenperspotje) en het veenperspotje, op de verschillende oogsttijdstippen  $t$  (week).

TABLE 3.1. Number of plants per harvest, number of plants grown up to that week, weights of the lettuce heads (fresh + standard deviation (g)), the percentage dry matter of the lettuce head, and the dry weights (g) of the roots (outside peat pot) and the peat pots, at the harvest times  $t$  (week).

t	Oogst	Ge- groeid	Scheut				Wortel droog	Pot droog
			vers	st.afw.	droog	%d.s.		
0	100		0.94	0.237	0.06	6.56	0.001	12.23
1	48	144	7.23	1.249	0.48	6.86	0.006	13.19
2	24	96	35.78	4.452	1.80	5.07	0.045	13.70
3	24	72	91.38	17.547	4.95	5.47	0.144	13.90
4	24	48	253.57	28.076	12.33	4.87	0.362	14.10
5	12	24	385.65	46.057	15.77	4.11	0.433	14.30
6	12	12	478.23	38.892	18.53	3.89	0.593	14.50

Het gewicht van de veenperspotjes neemt toe in de tijd (tabel 3.1). Deze toename moet dan worden toegeschreven aan de toename van wortel-massa in het veenperspotje, met name via het dikker worden van de stronk (NB: de uit het veen gespoelde wortels vertoonden een toename in gewicht; deze gegevens worden niet vermeld omdat niet alle wortels vrijgespoeld konden worden). Stel dat het veenperspotje op  $t_0$  alleen uit veen bestaat, dan kan een nieuw drooggewicht van wortels berekend



worden door het verschil in pot-drooggewicht op  $t$  en  $t_0$  bij het oude wortel-drooggewicht op  $t$  te tellen: 0.001, 0.966, 1.515, 1.814, 2.232, 2.503 en 2.863 g. Hiermee kunnen droog scheut/wortel-verhoudingen berekend worden: (60), 0.50, 1.19, 2.73, 5.52, 6.30 en 6.47. Deze waarden wijken sterk af van de waarden zoals die uit tabel 3.1 berekend zouden worden (variërend tussen 30 en 80). De eindwaarde van dit experiment komt nu goed overeen met waarden die in de literatuur gevonden worden voor 'butterhead' sla cultivars, namelijk variërend tussen 6.5 en 8.5 (Reinink and Eenink, 1988; Silva and Toop, 1986; Toop *et al.*, 1988). Deze waarden zijn berekend uit de opgegeven gewichten, waarbij is aangenomen dat het percentage drogestof van de scheut en de wortels 5% is. De waarde op het eerste tijdstip is onredelijk hoog. Dit is te verklaren door het feit dat ook al op  $t_0$  worteldelen in het veenperspotje aanwezig waren. Deze hoeveelheid is onbekend, en hier eenvoudigheidshalve op nul gesteld; daarmee zijn alle berekende scheut/wortel-verhoudingen overschat.

De gehalten aan N, P en K staan vermeld in tabel 3.2.

TABEL 3.2. De gehalten ( $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ ) van N, P en K in de krop, wortels en veen op de verschillende oogsttijdstippen  $t$  (week).  
 TABLE 3.2. N, P and K concentrations ( $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ ) in the lettuce heads, roots and peat at the harvest times  $t$  (week).

t	Scheut			Wortel			Veen		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
0	4.27	0.29	1.74	5.28			0.66	0.024	0.037
1	3.61	0.21	1.94	4.46	0.36		0.39	0.012	0.018
2	3.79	0.20	2.30	4.21	0.34		0.20	0.012	0.018
3	3.37	0.23	2.41	4.22	0.43	1.72	0.16	0.012	0.018
4	3.62	0.24	2.64	4.23	0.45	2.09	0.13	0.012	0.018
5	3.88	0.28	2.70	3.82	0.45	2.28	0.19	0.012	0.018
6	3.65	0.32	2.55	3.69	0.48	2.43	0.16	0.012	0.018

De resultaten van alle elementen zijn vermeld in Appendix 3. Als gevolg van een geringe hoeveelheid drogestof van de wortels konden in de eerste weken niet voor alle elementen de gehalten gemeten worden. De gehalten, die in het veenperspotje zijn gemeten, zijn in het

ideale geval opgebouwd uit gehaltenes in het veen en gehaltenes in de daarin aanwezige worteldelen. Het gehalte in het veen kan als volgt berekend worden

$$E_v = (E_{bl} \cdot G_{bl} - E_w \cdot G_w) / G_v, \quad (18)$$

waarin:  $E_v$  E-gehalte in veen ( $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ )  
 $E_{bl}$  E-gehalte in veenperspotje (inclusief daarin aanwezige wortels) ( $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ )  
 $E_w$  E-gehalte in wortels aanwezig in veenperspotje ( $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ )  
 $G_v$  drooggewicht veen (=12.23 g)  
 $G_{bl}$  drooggewicht veenperspotje (inclusief daarin aanwezige wortels) (g)  
 $G_w$  drooggewicht wortels aanwezig in veenperspotje =  $G_{bl} - G_v$  (g)

De berekende  $E_v$  zijn in tabel 3.2 en in Appendix 3 weergegeven. Het is mogelijk dat  $E_v$  negatief berekend wordt, als gevolg van een accumulatie van aannamefouten (bijv. is het gehalte van de elementen in de worteldelen en stronk die in het veen aanwezig waren werkelijk gelijk aan die van de wortels die buiten het veen groeiden?). In deze gevallen is aangenomen dat  $E_v$  gelijk is aan de helft van het laatst berekende positieve gehalte. Dit is opgetreden bij P, K, Cl en Mn. Aan de hand van tabel 3.1 en tabel 3.2 kan de opname per plant en de totale opname (plant+veenperspotje) per week berekend worden (tabel 3.3). De berekeningswijze kan teruggevonden worden in Appendix 3.

Op de oogsttijdstippen zijn watermonsters uit VB genomen en geanalyseerd (BLGG, Naaldwijk), tabel 3.4. Met behulp van de hoeveelheden die gedoseerd zijn (tabel 3.4) kunnen hieruit volgens Vgl (17) de totale verliezen per week berekend worden (tabel 3.3). Omdat vlak na de oogst op  $t_5$  het grootste deel van de voedingsoplossing was weggestroomd, is een nieuwe voedingsoplossing aangemaakt (16.00 uur) en voor  $C_{t-1}$  in tijdsinterval 5-6 is de concentratie genomen van de nieuwe voedingsoplossing. Deze luidde voor N, P en K respectievelijk, 3090, 156 en 1560 mmol per 300 l.

De gemeten concentratie, de doseringen en de berekende verliezen voor alle elementen zijn vermeld in Appendix 4.

TABEL 3.3. De cumulatieve opname van N, P en K door de slaplant en door de slaplant + veen, en het cumulatieve verlies uit de voedingsoplossing per week (mmol/week).

TABLE 3.3. Cumulative N, P and K uptake by the plant and by plant + peat, and the cumulative loss from nutrient solution per week (mmol/week).

t	Plant			Plant + veen			Verlies		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
0-1	851	63	121	368	42	89	720	50	488
1-2	1527	104	429	827	82	397	1403	116	791
2-3	2329	179	1215	1591	158	1182	2595	188	1602
3-4	3756	276	2278	3002	256	2246	4014	343	2677
4-5	4156	314	2544	3417	294	2511	4584	370	3095
5-6	4245	336	2615	3503	315	2583	5153	379	3449

TABEL 3.4. De wekelijks gemeten concentraties van N, P en K in de voedingsoplossing, en de hoeveelheid N, P en K die per week gedoseerd zijn (mmol per systeemvolume).

TABLE 3.4. The weekly measured concentrations of N, P and K of the nutrient solution, and the amount of N, P and K added to the nutrient solution (mmol per system volume).

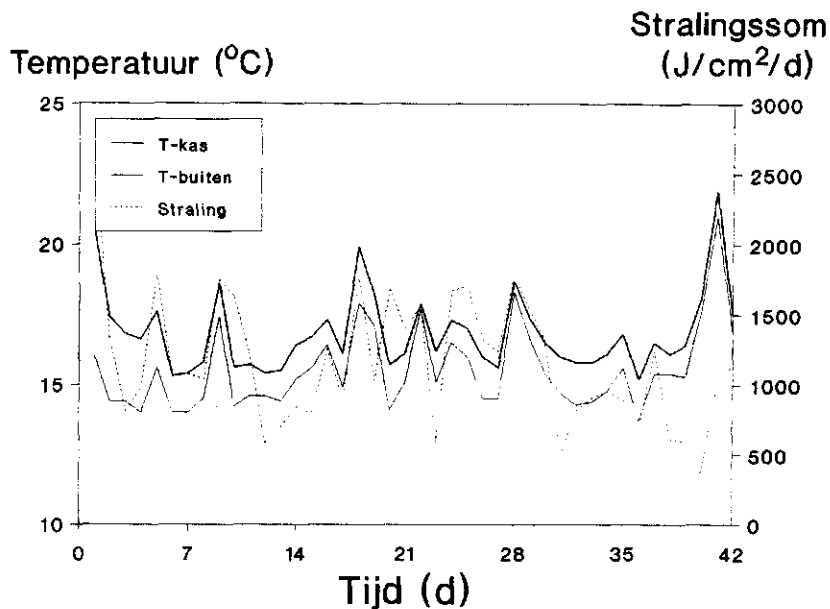
t	Concentratie			t	Dosering		
	N	P	K		N	P	K
0	3000	200	1568				
1	2880	198	1380	0-1	599	48	300
2	3030	207	1470	1-2	832	75	392
3	2700	213	1350	2-3	862	78	692
4	3210	219	1770	3-4	1929	161	1494
5	3030	216	1500	4-5	390	24	149
6	2850	174	1410	5-6	329	27	212

### 3.2. Temperatuur en straling

De temperatuur in de kas en buiten de kas, en de stralingsom (buiten de kas) zijn bekend (figuur 3.1). De temperatuur geeft een etmaal-gemiddelde weer van twee-uurlijkse waarden. Dit etmaal start om

08:00. De stralingsom geldt voor hetzelfde etmaal. Omdat er geen gegevens bekend zijn over dagelijkse of uurlijkse fluctuaties in nutriëntenopname, wordt hier volstaan met het geven van daggemiddelden.

Dagelijks is VB met demi-water aangevuld tot ongeveer een constant niveau. De hoeveelheid toegediend demi-water is gelijk aan de hoeveelheid door het gewas verdampt, en mogelijk een deel dat in de goot achterblijft als gevolg van de toename in wortelmassa.

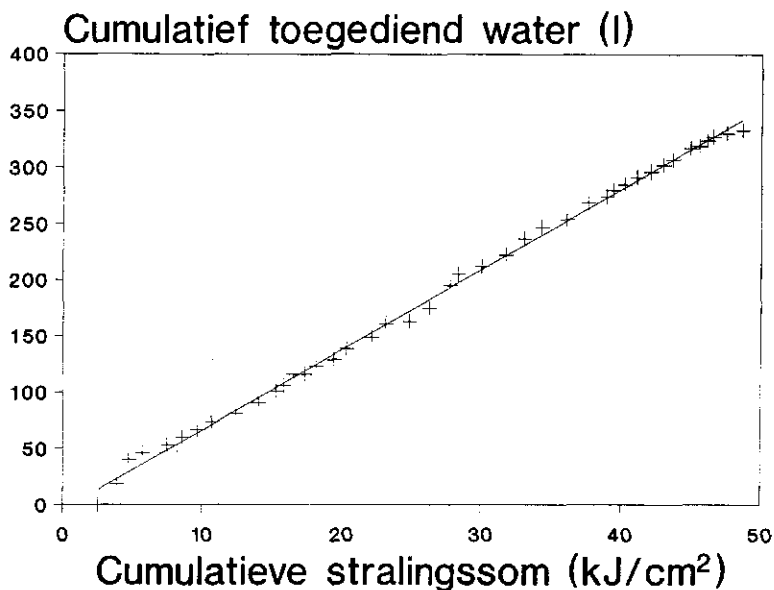


Figuur 3.1. De gemiddelde dagtemperaturen in de teeltkas en buiten, en de stralingsom per dag gedurende de teeltperiode. Dag 0 is 13 juni 1988.

*Figuur 3.1. Mean day temperatures in the glasshouse and outside, and the radiation sum per day during the growth period. Day 0 is 13 June 1988.*

Veelal wordt er een lineair verband waargenomen tussen het cumulatief waterverbruik (CW) en de cumulatieve straling (CS) (Van Goor, 1987; Adams and Massey, 1984). Met behulp van GENSTAT 5 is een lineair verband ( $y = a \cdot x + b$ ) tussen CW (y) en CS (x) berekend. De helling (a) en het intercept (b) werden berekend als 0.0071395 en -4.74, respectievelijk. Hierbij wordt 99.8% van de variantie verklaard, hetgeen erop duidt dat een lineair verband inderdaad een

goede relatie is. De waarden voor a en b zijn getoetst of zij werkelijk afwijken van de waarde 0. Voor zowel a als b wordt de nulhypothese verworpen bij een onbetrouwbaarheidspercentage van 1%. Toevoeging van een kwadratische CS-term levert geen significante verbetering op. Het lineaire verband tussen CW en CS is weergegeven in figuur 3.2.



Figuur 3.2. De relatie tussen de cumulatieve hoeveelheid aan het systeem toegevoegd demi-water (= verdamping en cumulatieve stralingssom).

Figure 3.2. Relation between the cumulative amount of water added to the system (= evapotranspiration) and the cumulative radiation sum.

### 3.3. Droog- en versgewicht

De kropgewichten (droog en vers) zijn aangepast aan de modellen (12), (13), (14) en (15), hierna respectievelijk aangeduid met de letters L (Logistic), R (Richards'), G (Gompertz') en EP (Exponentiële Polynoom). Voor de versgewichten is zowel gebruik gemaakt van de gemiddelde versgewichten van de krop als van de gewichten van alle kropen afzonderlijk. In het laatste geval wordt de variatie van kropgewicht op een tijdstip erbij betrokken. De gefitte parameters voor de vier modellen zijn weergegeven in tabel 3.5.

TABEL 3.5. De geschatte parameters uit de vier groei modellen Vgl (12), (13), (14) en (15), respectievelijk L, R, G en EP, voor de drooggewichten van de slaplant en de krop, en voor de versgewichten van de krop op basis van gemiddeld gewicht en op basis van alle afzonderlijke gewichten per oogst. De verklaarde variantie is weergegeven via PVA en de correlatie via  $R^2$ .

TABLE 3.5. The estimated parameters of the four growth models Eq. (12), (13), (14) and (15), respectively L, R, G and EP, for the dry weights of the lettuce plant and head, and for the fresh weights of the heads based on mean weights and on all separate weights per harvest. The percentage variance accounted for is presented by PVA, and the correlation by  $R^2$ .

	Droog (krop)				Vers (gemiddeld)			
	L	R	G	EP	L	R	G	EP
$W_0$	0.100	0.067	0	0.066	2.434	1.297	0.001	1.003
$W_f$	18.8	19.0	20.8	18.2	512.3	530.0	605.2	462.1
k	0.2054	0.1854	0.1145		0.1873	0.1574	0.0964	
$t^*$	25.47	25.12	23.24	27.42	28.54	28.06	26.83	29.45
n		0.784				0.672		
$k_0$			1.6396				1.2822	
a				-2.7243				0.0033
b				0.2880				0.2976
c				-3.6849E-03				-3.6098E-03
PVA	99.5	99.4	99.3	99.7	99.8	99.8	99.6	99.8
$R^2$	99.9	99.9	99.8	99.8	99.9	99.9	99.9	99.9

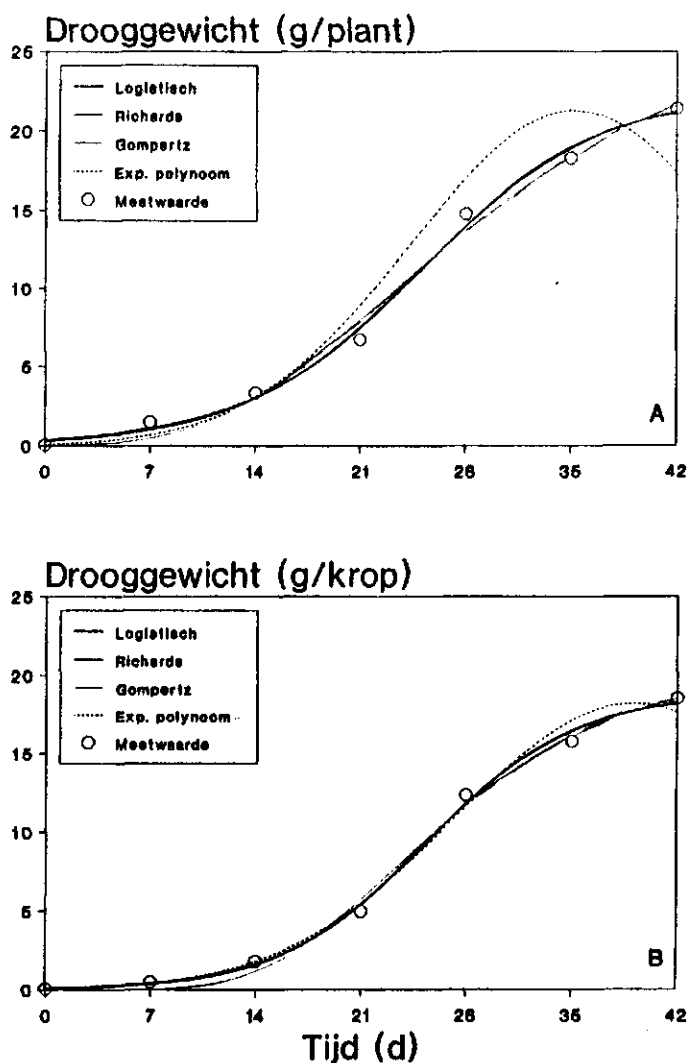
	Droog (plant)				Vers (alle)			
	L	R	G	EP	L	R	G	EP
$W_0$	0.318	0.392	0.019	0.101	2.074	1.520	0.002	0.936
$W_f$	22.4	21.9	26.3	21.2	505.4	517.2	614.8	446.2
k	0.1694	0.1940	0.0858		0.1943	0.1732	0.0942	
$t^*$	25.03	25.45	23.04	24.42	28.26	28.05	27.02	28.92
n		1.292				0.796		
$k_0$			0.6188				1.2027	
a				-2.2914				-0.0664
b				0.3041				0.3051
c				-4.32221E-03				-3.7729E-03
PVA	99.3	99.1	98.7	94.2	98.5	98.5	98.3	99.1
$R^2$	99.8	99.8	99.6	96.1	98.9	98.9	98.8	99.1

Hierin staan ook twee parameters voor de nauwkeurigheid van de aanpassing, namelijk PVA (Percentage Variance Accounted for) en  $R^2$ :

$$PVA = 100\% * \left( 1 - \frac{\text{residual mean of squares}}{\text{total mean of squares}} \right)$$

$$R^2 = 100\% * \frac{\text{regression sum of squares}}{\text{total sum of squares}}$$

Als de aanpassing exact is, dan zijn PVA en  $R^2$  beide 100%. Bij PVA wordt de 'mean of squares' gebruikt, wat gelijk is aan de 'sum of squares' gedeeld door het aantal vrijheidsgraden. Over het algemeen zijn de aanpassingen goed, maar bij de droog- en gemiddelde versgewichten dient rekening te worden gehouden dat de aanpassing aan slechts zeven meetpunten heeft plaatsgevonden. Bovendien kunnen deze cijfers niet vertaald worden naar een volledig gesloten groeiend gewas, omdat in dit gewas elke week een aantal planten geoogst is. De grootste  $R^2$  wordt bij de drooggewichten verkregen met modellen L en R. In figuur 3.3A beschrijft EP de data over het geheel slecht, en in figuur 3.3B valt te zien dat EP de data goed beschrijft gedurende de eerste drie weken, en slecht aan het eind. In vrijwel alle datasets in dit onderzoek vertoont model EP een maximum in het interval  $t_0 - t_{\max}$ , met  $t_{\max}$  het eindtijdstip van het experiment. Een verklaring en een oplossing hiervoor worden gegeven in Heinen, 1990a. Voor modellen L en R geldt dat ze alle meetdata vrij goed beschrijven. Model G voorspelt slecht in het begin. De gemiddelde versgewichten worden door alle vier de modellen goed beschreven volgens PVA en  $R^2$ . Ook hier geldt dat EP slecht voorspelt aan het eind, G slecht in het begin. Wanneer alle versgewicht data worden gebruikt, dan geeft EP de beste aanpassing (grootste PVA en  $R^2$ ), hoewel de data aan het eind weer slecht worden beschreven.



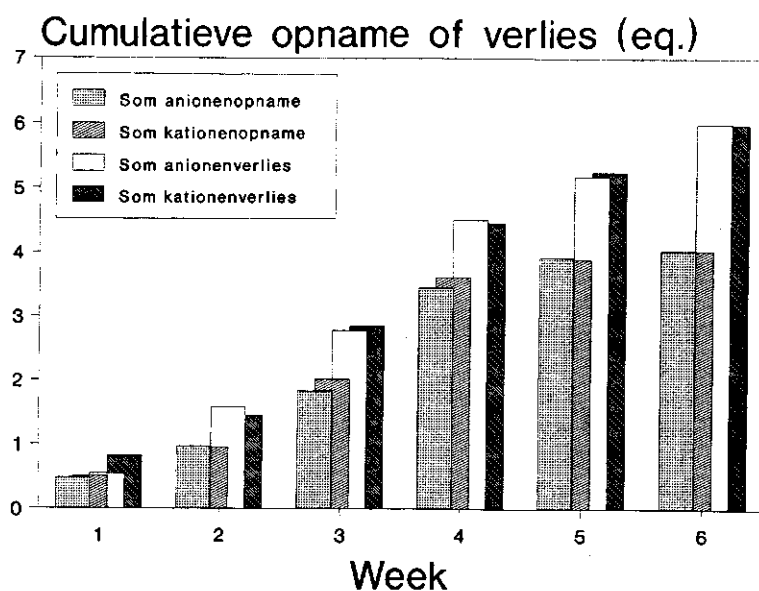
Figuur 3.3. Het drooggewicht van de slaplant (A) en slakrop (B) tegen de tijd aangepast volgens vier modellen: logistisch, Richards', Gompertz', en tweede-orde exponentiële polynoom.

Figure 3.3. Dry weight of lettuce plant (A) and head (B) versus time adapted to four growth models: logistic, Richards', Gompertz', and second order exponential polynome.

#### 3.4. Nutriënten

In het ideale geval zal de cumulatieve opname door de plant inclusief het veenperspotje gelijk zijn aan de cumulatieve verliezen uit de voedingsoplossing. Cumulatieve gegevens worden gebruikt om eventuele fouten te vereffenen, en om een verdeling te krijgen die beschreven kan worden door de vier modellen L, R, G en EP. Eerst worden de opname- en verliescijfers (per week) voor alle anionen (som anionen) en kationen (som kationen) te zamen bekeken, exclusief de micro-





Figuur 3.4. De cumulatieve opname door sla en het cumulatieve verlies uit de voedingsoplossing per week, uitgesplitst naar som van de anionen en som van de kationen.

Figure 3.4. Cumulative uptake by lettuce and cumulative loss from the nutrient solution per week, divided into sum of anions and sum of cations.

Hierbij is aangenomen dat de  $H^+$ -gift gelijk is aan het  $H^+$ -verlies en  $H^+$ -opname. Voor zowel het cumulatieve verlies als voor de cumulatieve opname geldt dat de som van de anionen ongeveer gelijk is aan de som van de kationen. Maar de niveaus voor verlies en opname verschillen. Gemiddeld is het niveau van het verlies 1.4 maal groter dan die van de opname. Verklaringen hiervoor kunnen zijn:

- meetfouten,
- aanwezigheid van een lek in het systeem, en
- verwijdering van slechte bladeren.

Dergelijke grote verschillen kunnen niet door meetfouten alleen verklaard worden. De absolute fout in de totale opname van macro-elementen (door plant + veenperspotje) varieert van week tot week en is minimaal 0.06 mmol (P, week 1) tot maximaal 3.1 mmol (N, week 4). De verliescijfers hebben een fout van 15 mmol (P: 1.5 mmol). Bij de berekening van beide fouten is aangenomen dat het volume van het

systeem exact 300 l is geweest.

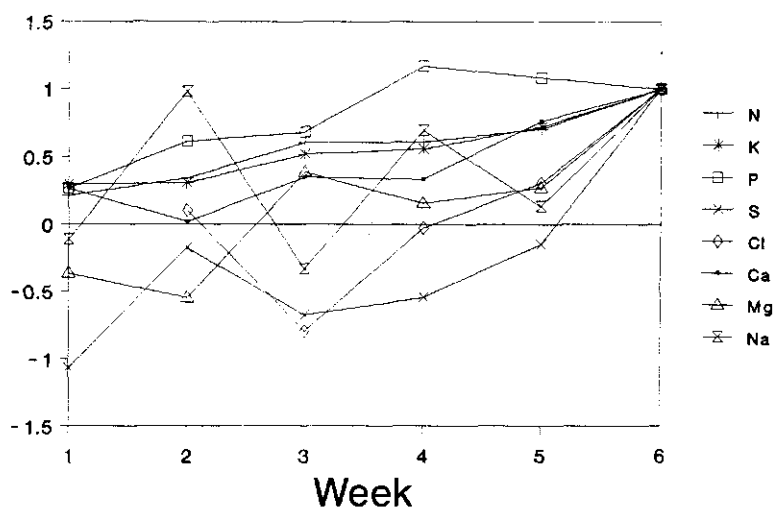
Er is gedurende het hele experiment echter sprake geweest van een kleine lekkage. Uitgaande van een gemiddelde concentratie gedurende een week (te berekenen uit tabel 3.4), is een constant lekvolume berekend, zodanig dat het verschil tussen de aangepaste waarden en de bekende verschillen minimaal was. Als er inderdaad sprake was van een constante lek, dan moet voor elk element hetzelfde lekvolume geschat worden. De lekvolumina varieerden echter van ongeveer 0 tot 50 l per week. Lekkage kan ook aangetoond worden door het verschil ( $V - 0$ ) uit te zetten tegen de tijd en wel relatief ten opzichte van het verschil in week 6. Bij een constante lek moeten alle elementen een verband met dezelfde helling vertonen. Dit treedt echter niet op (figuur 3.5). Dit lek alleen kan dus het opgetreden verschil niet verklaren.

Op 15 juni 1988 is er een lekkage geweest in het meetcircuit die na een paar uur verholpen was. Het weggestroomde volume is onbekend. Hierdoor wordt een groter verlies waargenomen dan in werkelijkheid is opgenomen.

Op 18 juli 1988 tussen 9.00 en 16.00 is ruim 230 l voedingsoplossing weggestroomd omdat een toevoerslang was losgeraakt. In die periode heeft wel opname plaatsgevonden. Deze wordt wel waargenomen bij de gewasanalyses, maar niet bij de watermonsteranalyses. Het verlies,  $V$ , in de periode  $t_5 - t_6$  mist de opname gedurende 9.00 en 16.00 uur. De concentratie van de watermonsters die op deze tijdstippen zijn genomen blijkt in die periode echter nauwelijks of niet te zijn veranderd. Dit zal bij het berekenen van de cumulatieve verliescijfers buiten beschouwing blijven.

De slakroppen werden veilingklaar gemaakt voor de bepaling van het gewicht, hiertoe zijn de slecht uitziende bladeren verwijderd (met name bij de laatste oogsten). Deze zijn helaas niet meegenomen voor verdere analyses. De opname wordt onderschat, en het verschil tussen verlies en opname wordt hierdoor groter. In figuur 3.4 valt waar te nemen dat de opname in de laatste twee weken nauwelijks is toegenomen. Dit valt mogelijk deels te wijten aan het verwijderen van de slechte bladeren.

### Relatief cumulatief verlies minus cumulatieve opname



Figuur 3.5. Het cumulatieve verschil tussen verlies uit voedingsoplossing en opname door sla als functie van de tijd. Het verschil is relatief ten opzichte van de waarde in week 6 weergegeven.

Figure 3.5. Cumulative difference between loss from nutrient solution and uptake by lettuce as a function of time. The differences are presented relative to week 6.

Al met al is er niet een duidelijke reden aan te geven om het opgetreden grote verschil tussen 0 en V te verklaren. Er is sprake geweest van een gecombineerd effect van de drie genoemde factoren, waarbij eventueel nog andere onbekende factoren een rol gespeeld kunnen hebben. De toename in [Zn] kan bijvoorbeeld verklaard worden door het feit dat vanaf 1 juli 1988 een rubberslang in de voedingsoplossing was geplaatst. Bij de fabricage van rubber wordt namelijk Zn gebruikt. Deze slang was in VB geplaatst om hierdoor koud water te laten stromen om zo de voedingsoplossing niet te warm te laten worden.

De gecumuleerde opname (door plant en veenperspotje) en verliezen voor alle elementen afzonderlijk zijn aangepast aan de vier modellen L, R, G en EP (Appendix 5). De gecumuleerde waarden zijn gebruikt zodat de dataverdeling voldoet aan het verwachte patroon van de modellen. De verschillen voor de voorspelde opname en verliezen uit

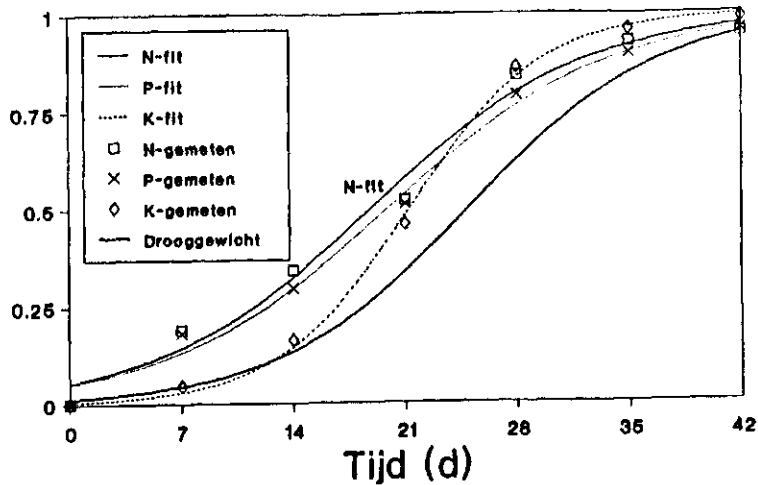
zich per model niet alleen in de andere positie van de minima en maxima ( $W_0$ ,  $W_f$ ), maar ook in de vorm en positie van de curve ( $k$ ,  $n$ ,  $k_0$ ,  $t^*$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ). Een aanpassing kan goed genoemd worden wanneer PVA groter of gelijk is aan 99%. De keuze hiervan is arbitrair (NB: in alle gevallen gaat op dat  $R^2 \geq \text{PVA}$ ). De cumulatieve opname wordt voor de volgende elementen goed beschreven (met tussen haakjes de modellen waar dit voor opgaat): N (R,EP), P (L,R,EP), K (L,R,EP), Mg (EP) en Cl (L,R). Het verlies wordt alleen voor N (L,R,G,EP), K (L,R) en Mn (EP) goed beschreven. Dit laatste duidt erop dat de opgetreden verliezen uit de voedingsoplossing niet goed voldoen aan de modelverwachtingen. Een extra lineaire component als gevolg van lekkage kan hier debet aan zijn. Tevens dient opgemerkt te worden dat de opname-dataset aan het eind afwijkt van de realiteit als gevolg van het verwijderen van slecht bladmateriaal. Dit heeft de aanpassing beïnvloed.

Ook de cumulatieve opname door de plant, exclusief het veenperspotje, is aangepast aan de vier modellen, waarbij voor de volgende elementen goede aanpassingen zijn verkregen (Appendix 5): N (EP), K (L,R,EP), Ca (L,G), Mg (L), Cl (R), Fe (L), B (L,R,EP), Cu (L,G), Zn (R), Mo (L,R,EP).

Per element kan de relatieve cumulatieve opname door de planten als functie van de tijd vergeleken worden met het relatieve drooggewicht. Dit is gebeurd voor de cumulatieve opname en het cumulatieve drooggewicht van alle planten die gedurende een week gegroeid hebben. Als referentiewaarde geldt dan de aangepaste  $W_f$ -waarde. Deze vergelijking kan derhalve alleen per model geschieden. Voor de vier modellen geldt dat N en P een preferente opname te zien geven, dat wil zeggen dat de relatieve opname op elk tijdstip groter is dan het relatieve drooggewicht (figuur 3.6). Het element K wijkt hiervan af. Dat is te verklaren door het feit dat de K-gehalten van de wortels in de eerste drie weken niet zijn bepaald.

De cumulatieve inhoud (per plant, exclusief het veenperspotje) is aangepast door de vier modellen voor alle elementen (Appendix 5) en deze kunnen vergeleken worden met het aangepaste drooggewicht, op relatieve basis. Deze vergelijking kan alleen per model besproken worden (figuur 3.7).

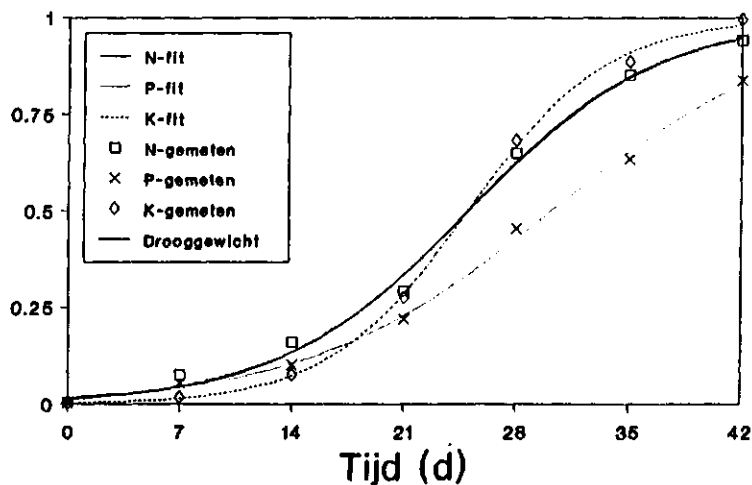
### Relatief cumulatieve opname of gewicht



Figuur 3.6. De relatieve cumulatieve opname van N, P, K door één slaplant (krop + wortels), en het relatieve drooggewicht als functie van de tijd volgens een logistisch groei- of opnamemodel.

Figure 3.6. Relative cumulative uptake of N, P, K by one lettuce plant, and relative dry weight as a function of time according to the logistic growth or uptake model.

### Relatief cumulatieve inhoud of gewicht

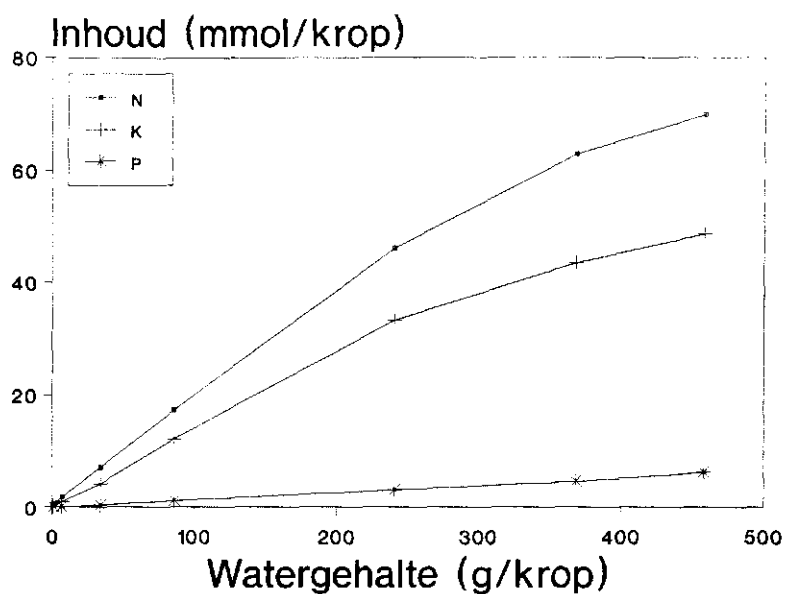


Figuur 3.7. De relatieve cumulatieve inhoud van N, P, K in één slaplant (krop + wortels), en het relatieve drooggewicht als functie van de tijd volgens een logistisch groei- of opnamemodel.

Figure 3.7. Relative cumulative N, P, K content in one lettuce plant, and relative dry weight as a function of time according to the logistic growth or uptake model.

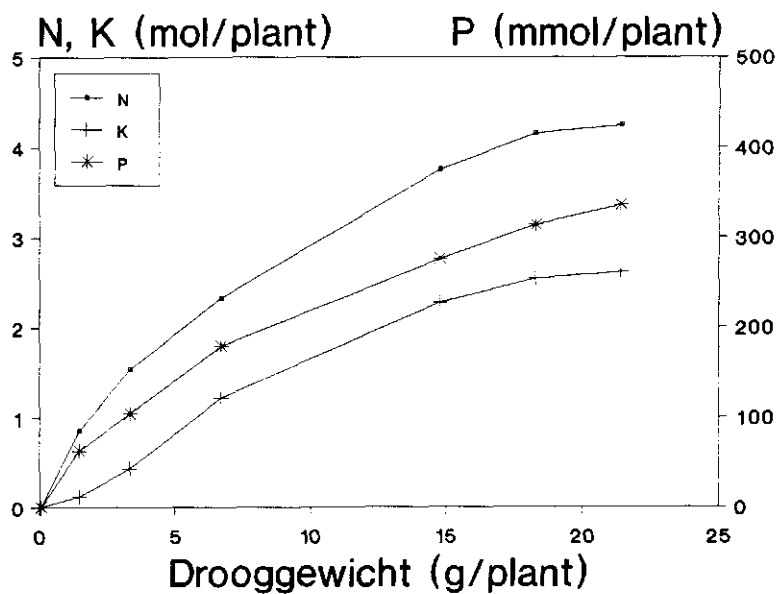
Goede aanpassingen worden verkregen voor de volgende elementen: N (L,R), P (L,R,G), K (L,R,G,EP), Ca (L,R,G,EP), Mg (L,R,G,EP), Cl (L,R), Mn (L), B (L,R,G,EP), Cu (G), Zn (R,EP). Voor model L geldt dat de relatieve cumulatieve inhoud van N gelijk is aan het relatieve drooggewicht. Dat betekent dat N een constante fractie van het drooggewicht uitmaakt, wat ook te zien valt in tabel 3.2. De opnamesnelheid van N is gelijk aan de snelheid waarmee drogestof wordt geproduceerd (groeisnelheid). K laat in de eerste drie weken een lagere toenamesnelheid in inhoud zien, omdat in die periode het gehalte in de wortels niet bekend is (tabel 3.2). Aan het eind is de toenamesnelheid groter dan de groeisnelheid. Dit betekent dat het gehalte van K in de plant toeneemt, wat ook te zien valt in tabel 3.2. Voor P geldt dat de relatieve inhoud ver beneden het relatieve drooggewicht ligt. De opnamesnelheid van P is kleiner dan de groeisnelheid (uit zich in een kleinere k- en een grotere  $t^*$ -waarde). Aan het einde (na week vier) loopt de P-kromme snel naar de drooggewicht-kromme toe. Dit kan alleen verklaard worden door een toename van P-inhoud, hetgeen inderdaad het geval is na de eerste week (tabel 3.2). We moeten hierbij rekening houden met het feit dat de cumulatieve P-inhoud data slecht het verwachte modelbeeld tonen, met name de afvlakking aan het eind is niet aanwezig. Dit beïnvloedt de aanpassing. Cl vertoont vrijwel hetzelfde beeld als N. Het beeld van P wordt teruggevonden voor S (afwijking  $> P$ ), Ca en Mg (afwijking  $< P$ ). De opnamesnelheid van Na is veel groter dan de groeisnelheid. Modellen R, G en EP vertonen eenzelfde beeld als model L.

De inhoud van de krop kan ook uitgezet worden tegen het watergehalte van de krop (figuur 3.8). Een rechte lijn in een dergelijke figuur stelt een constante concentratie van het nutriënt in het plantvocht voor. Gedurende de eerste vier weken is de N-concentratie ongeveer  $200 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ , waarna afname tot ongeveer  $150 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$  optreedt aan het einde van het experiment. De K-concentratie is in de eerste vier weken ongeveer  $150 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ , waarna deze afneemt tot bijna  $100 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$  na zes weken. De P-concentratie is ongeveer  $13 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$  gedurende zes weken. Voor de meeste elementen geldt dat gedurende de eerste weken de concentratie ongeveer constant is, en dat deze in de laatste weken afneemt.



Figuur 3.8. De inhoud aan N, P, K in de krop als functie van het watergehalte van één krop.

Figure 3.8. N, P, K content in the head as a function of water content of the head.



Figuur 3.9. De cumulatieve opname van N, P, K door één slakrop als functie van het drooggewicht.

Figure 3.9. Cumulative N, P, K uptake by one lettuce head as a function of its dry weight.

De cumulatieve opname van N uitgezet tegen het drooggewicht per plant exclusief het veenperspotje (figuur 3.9) laat zien dat in de tweede week ongeveer  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{g}^{-1}$  is opgenomen. Dit neemt geleidelijk af tot ongeveer  $0.2 \text{ mol} \cdot \text{g}^{-1}$ , en vooral in de laatste week is de opname zeer gering. Voor P is de cumulatieve opname ongeveer  $50 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$  in de tweede week, waarna dit afneemt tot ongeveer  $15 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ . Voor K is de cumulatieve opname ongeveer  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{g}^{-1}$  gedurende de eerste twee weken, waarna dit eerst toeneemt en daarna afneemt. In de zesde week is de opname zeer gering.

Uit Appendix 3 kan bepaald worden of er bepaalde verhoudingen tussen elementen aan te wijzen zijn met betrekking tot de cumulatieve opname door de hele plant. Een arbitrair verschil van 40% tussen maximale en minimale verhouding (ten opzichte van het gemiddelde van minimum en maximum) wordt toegestaan, voor weken twee tot en met zes (tabel 3.6).

TABEL 3.6. Waargenomen verhoudingen,  $v$ , in cumulatieve opname tussen macro- (mmol) en micro- ( $\mu\text{mol}$ ) elementen in de weken 2 t/m 6 en 3 t/m 6. Hierbij werd in die periode een arbitrair verschil,  $\Delta$  (%), toegestaan van 40% tussen maximale en minimale verhouding (ten opzichte van hun gemiddelde).  
 TABLE 3.6. Observed ratios,  $v$ , of cumulative uptake between macro (mmol) and micro ( $\mu\text{mol}$ ) elements during the weeks 2 to 6 and 3 to 6. An arbitrary difference,  $\Delta$  (%), of 40% was allowed between the maximum and minimum ratio (in relation to their mean) in that period.

$t_2-t_6$	$v$	$\Delta$	$t_3-t_6$	$v$	$\Delta$	$v$	$\Delta$	
Cl/K	0.056	39.3	K/N	0.822	38.4	Cl/Mg	1.557	33.1
B/Cl	19.306	19.2	Cl/N	0.047	23.1	B/Mg	28.396	25.1
			B/N	0.868	29.9	B/Cl	19.306	19.2
			Cl/K	0.056	39.3			

Alleen voor het micro-element B is er sprake dat dosering aan een macro-element (Cl) dosering gekoppeld kan worden. Wordt de tweede helft van het experiment beschouwd (weken drie tot en met zes) dan worden constantere verhoudingen waargenomen (tabel 3.6). In deze periode kan dosering van het micro-element B gekoppeld worden aan dosering de macro-elementen N, Mg en Cl. Een dergelijke vergelijking



kan ook gemaakt worden met betrekking tot de inhoud van de diverse elementen in de plant en in de krop (tabel 3.7 A en B). In weken twee tot en met zes kan de inhoud van de microelementen Zn en B aan één van de macro-elementen gerelateerd worden. In de weken drie tot en met zes geldt voor de micro-elementen Zn en B.

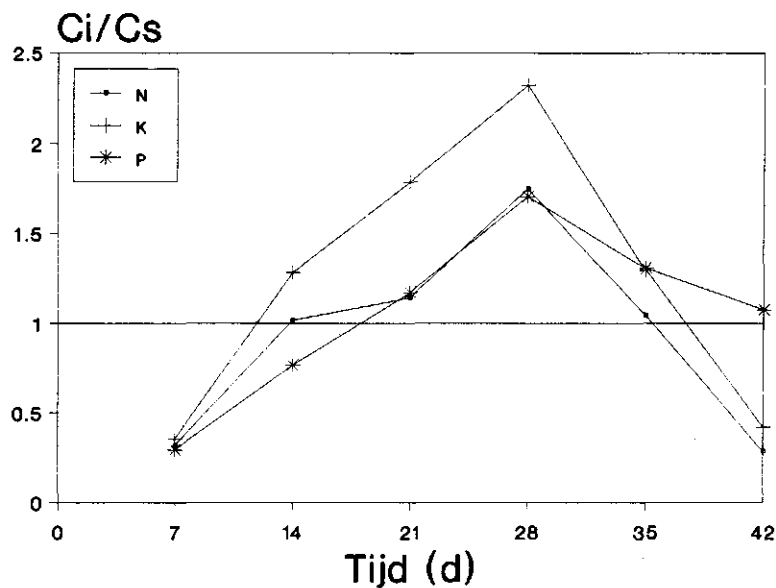
TABEL 3.7. Waargenomen verhoudingen,  $v$ , in plant- (A) en kropinhoud (B) tussen macro- (mmol) en micro- ( $\mu\text{mol}$ ) elementen in de weken 2 t/m 6 en 3 t/m 6. Hierbij werd in die periode een arbitrair verschil,  $\Delta$  (%), toegestaan van 20% tussen maximale en minimale verhouding (ten opzichte van hun gemiddelde).

TABLE 3.7. Observed ratios,  $v$ , of plant (A) and head (B) content between macro-(mmol) and micro-( $\mu\text{mol}$ ) elements during the weeks 2 to 6 and 3 to 6. An arbitrary difference,  $\Delta$  (%), of 20% was allowed between the maximum and minimum ratio (in relation to their mean) in that period.

A								
$t_2-t_6$	$v$	$\Delta$		$v$	$\Delta$		$v$	$\Delta$
Ca/N	0.053	10.9	Mg/Ca	0.466	13.3	Zn/B	0.297	19.6
Mg/N	0.025	11.3						
$t_3-t_6$	$v$	$\Delta$		$v$	$\Delta$		$v$	$\Delta$
K/N	0.656	11.4	Mg/P	0.301	13.4	B/K	0.981	19.5
Ca/N	0.053	10.9	Cl/P	0.476	18.5	Mg/Ca	0.466	13.3
Mg/N	0.025	11.3	Ca/K	0.080	17.6	Cl/Ca	1.539	10.8
Cl/N	0.037	17.9	Mg/K	0.036	10.3	B/Cl	17.18	13.0
Ca/P	0.647	16.4	Cl/K	0.057	6.5	Zn/B	0.297	19.6
B								
$t_2-t_6$	$v$	$\Delta$		$v$	$\Delta$		$v$	$\Delta$
K/N	0.668	18.3	Cl/K	0.063	7.3	Zn/Ca	3.763	12.6
Cl/N	0.042	11.7	B/K	1.159	13.1	Zn/Mg	7.417	15.7
Zn/N	0.201	15.6	Mg/Ca	0.500	10.5	B/Cl	18.677	10.8
Cu/P	0.541	18.4						
$t_3-t_6$	$v$	$\Delta$		$v$	$\Delta$		$v$	$\Delta$
K/N	0.713	4.7	Ca/K	0.074	10.8	Zn/Ca	3.763	12.6
Ca/N	0.052	11.2	Mg/K	0.037	14.0	Cl/Mg	1.689	10.5
Mg/N	0.026	9.7	Cl/K	0.062	3.8	B/Mg	31.094	7.8
Cl/N	0.044	1.6	B/K	1.159	13.1	Zn/Mg	7.650	9.2
B/N	0.827	8.8	Zn/K	0.282	19.9	B/Cl	18.781	9.7
Zn/N	0.201	15.6	Mg/Ca	0.500	10.5	Zn/Cl	4.563	16.4
B/P	10.880	19.1	Cl/Ca	0.847	11.2	Zn/B	0.247	16.9
Cu/P	0.541	18.4	B/Ca	15.972	12.9			

De verhoudingen gebaseerd op cumulatieve opname en die gebaseerd op inhoud wijken van elkaar af. Dit komt omdat inhoud betrekking heeft op een plant, terwijl cumulatieve opname betrekking heeft op een steeds wisselend aantal planten (namelijk het aantal planten dat gedurende een week gegroeid heeft). Wanneer niet tussentijds oogsten plaatsvinden moeten beide verhoudingen in principe overeenstemmen.

$C_i/C_s$ , met  $C_s$  de gemeten concentratie van de voedingsoplossing, uitgezet tegen de tijd (figuur 3.10) laat voor N en K een ophoping zien in de eerste week.



Figuur 3.10. De relatieve opnameconcentratie,  $C_i/C_s$ , als functie van de tijd voor N, P en K.

Figure 3.10. Relative uptake concentration,  $C_i/C_s$ , as a function of time for N, P and K.

Tot aan de vijfde week is er sprake van uitputting en in de laatste week is er weer sprake van ophoping. Voor P is er sprake van ophoping in de eerste twee weken en uitputting in de daaropvolgende weken. Een aantal elementen laat een continue ophoping zien: Ca, Mg, S, Fe, B, Cu, Zn, Mo en Na. Men kan ook de gewenste concentratie van het nutriënt in de voedingsoplossing nemen (setpoint). De macro-elementen vertonen dan hetzelfde beeld als hierboven geschetst. Dit was ook te verwachten omdat de concentratie van de voedingsoplossing regelmatig werd bijgesteld naar de setpoints. De  $[\text{NO}_3]$ , welke dagelijks werd gemeten, is gemiddeld  $9.5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$  geweest (variatie coëfficiënt CV =

6.7%). Alleen C1 laat een heel ander beeld zien wanneer diens set-point als  $C_s$  wordt gebruikt, namelijk een continue ophoping. Uitputting van het systeem werd niet verwacht omdat bij hoge concentraties is geteeld. Een reden hiervoor kan zijn dat de wateropname niet nauwkeurig gemeten is.

## REFERENTIES

- Adams P. and D.M. Massey. 1984. Nutrient uptake by tomatoes from recirculating solutions. ISOSC 6th Intern. Congr. on Soilless Culture, Lunteren, The Netherlands, p. 71-79.
- Albery W.J., P.N. Bartlett, A.E.G. Cass, D.H. Craston and B.G.D. Hagget. 1986a. Electrochemical sensors: Theory and experiment. *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1*, 82: 1033-1050.
- Albery W.J., B.G.D. Hagget and L.R. Svanberg. 1986b. The development of electrochemical sensors. In: W.G. Gensler (ed.). *Advanced agricultural instrumentation: design and use. Proceedings of the NATO advanced study institute on 'Advanced Agricultural Instruments'*, Italy, 1984. Nijhoff, Dordrecht, pp. 349-392.
- Asher C.J. and F.P. Blamey. 1987. Experimental control of plant nutrient status using programmed nutrient addition. *J. Plant Nutr.* 10: 1371-1380.
- Bailey B.J., B.G.D. Haggett, A. Hunter, W.J. Albery and L.R. Svanberg. 1988. Monitoring nutrient film solutions using ion-selective electrodes. *J. Agric. Eng. Res.* 40: 129-142.
- Benoit F. and N. Ceustermans. 1980. The effect of gully length in NFT tomatoes, peppers and lettuce. ISOSC 5th Intern. Congr. on Soilless Culture, Wageningen, The Netherlands, p.197-203.
- Benoit F. and N. Ceustermans. 1986. Survey of a decade of research (1974-1984) with nutrient film technique (NFT) on glasshouse vegetables. *Soilless Culture* 2: 5-17.
- Blom-Zandstra M. and G.L. Jupijn. 1987. A computer-controlled multi-titration system to study transpiration,  $\text{OH}^-$  efflux and nitrate uptake by intact lettuce plants (*Lactuca sativa* L.) under different environmental conditions. *Plant, Cell and Environment* 10: 545-550.
- Cammann K. 1980. Fehlerquellen bei Messungen mit ionenselektiven Elektroden. In H. Kienetz et al., *Analytiker Taschenbuch 1*, Springer, pp. 245-267.
- Clement C.R., M.J. Hopper, R.J. Canaway and L.H.P. Jones. 1974. A system for measuring the uptake of ions by plants from flowing solutions of controlled composition. *J. Exp. Bot.* 25: 81-99.
- Clement C.R., M.J. Hopper and L.H.P. Jones. 1978a. The uptake of nitrate by *Lolium perenne* from flowing nutrient solution. 1. Effect of  $\text{NO}_3^-$  concentration. *J. Exp. Bot.*, 29: 453-464.
- Clement C.R., M.J. Hopper, L.H.P. Jones and E.L. Leafe. 1978b. The uptake of nitrate by *Lolium perenne* from flowing nutrient solution. 2. Effect of light, defoliation, and relationship to  $\text{CO}_2$  flux. *J. Exp. Bot.* 29: 1173-1183.

- Cooper A., 1979. The ABC of NFT. Grower Books, London, 255 pp.
- De Jager A. 1985. Response of plants to a localized nutrient supply. PhD thesis, University of Utrecht, The Netherlands, 137 pp.
- De Willigen P. and M. van Noordwijk. 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. PhD thesis, Agricultural University Wageningen, The Netherlands, 282 pp.
- Epstein E., 1972. Mineral nutrition of plants: principles and perspectives. John Wiley and Sons, New York, 412 pp.
- France J. and J.H.M Thornley. 1984. Mathematical models in agriculture: a quantitative approach to problems in agriculture and related sciences. Butterworth, London, 335 pp.
- Genstat 5 Committee. 1987. GENSTAT 5 reference manual. Clarendon Press, Oxford, 749 pp.
- Graves J. 1983. The nutrient film technique. Hort. Rev. 5: 1-44.
- Hall D.A. and G.C.S. Wilson. 1986. The development of hydroponic culture in Scotland. Research and Development in Agriculture 3: 61-69.
- Hashimoto Y., T. Morimoto, T. Fukuyama, H. Watake, S. Yamaguchi and H. Kikuchi. 1988. Identification and control of hydroponic system using ion sensors. Unpublished manuscript, 8 pp.
- Hatch D.J. and R.J. Canaway. 1984. Control of pH in a system of flowing solution culture using a microcomputer. J. Exp. Bot., 35: 1860-1868.
- Heinen M. 1990a. Analytical growth equations and their GENSTAT 5 equivalents. Inst. Bodemvruchtbaarheid, Nota 223, pp.
- Heinen M. 1990b. The use of ion-selective electrodes in NFT systems. Inst. Bodemvruchtbaarheid, Nota 222, pp.
- Hicklenton P.R. and M.S. Wolynetz. 1987. Influence of light- and dark-period air temperatures and root temperature on growth of lettuce in nutrient flow systems. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 112: 932-935.
- Ingestad T. 1979. A definition of optimum nutrient requirements in birch seedlings. 3. Influence of pH and temperature of nutrient solution. Physiol. Plant. 46: 31-35.
- Ingestad T. 1986. New concepts on soil fertility and plant nutrition as illustrated by research on forest trees and stands. Geoderma 40: 237-252.
- Ingestad T. and A.B. Lund. 1986. Theory and techniques for steady state mineral nutrition and growth of plants. Scand. J. For. Res. 1: 439-453.

- Morard P., V. Valles and M.P. Anglard. 1987. Assessment of the availability of ions to plant roots from the determination of their chemical activity in nutrient solutions. *J. Plant Nutr.* 10: 539-551.
- Nielsen N.E. 1984. Crop production in recirculating nutrient solution according to the principle of regeneration. ISOSC 6th Intern. Congr. on Soilless Culture, Lunteren, The Netherlands, pp. 421-446.
- Nye P.H. and P.B. Tinker. 1977. Solute movement in the soil-root system. *Studies in ecology*, vol. 4. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 342 pp.
- Prince R.P. and H.V. Koontz. 1984. Lettuce production from a systems approach. ISOSC 6th Intern. Congr. on Soilless Culture, Lunteren, The Netherlands, pp. 533-545.
- Raats P.A.C. 1980. The supply of water and nutrients in soilless culture. ISOSC 5th Int. Congr. on Soilless Culture, Wageningen, The Netherlands, pp. 53-62.
- Reinink K. and A.H. Eenink, 1988. Genotypical differences in nitrate accumulation in shoots and roots of lettuce. *Sci. Hortic.* 37: 13-24.
- Silva G.H. and E.W Toop, 1986. Lettuce growth in a nutrient film with carbon dioxide enrichment within a controlled-environment system. *Soilless Culture*, 2, 2, pp. 41-47.
- Steenhuizen J.W. 1985. Het nitraatgehalte van sla op voedingsfilm. 3. Ammonium/nitraatverhoudingen, stikstofconcentraties, en Ca-, K- en Mg-verhoudingen van de voedingsoplossing; invloed op het optreden van rand (in Dutch with a summary: Nitrate content of lettuce on nutrient culture (NFT). 3. Ammonium to nitrate ratios, nitrogen concentrations, and Ca, K, Mg ratios of the nutrient solution; effect on the incidence of tipburn). *Inst. Bodemvruchtbaarheid, Rapp.* 16-85, 105 pp.
- Steenhuizen J.W. 1986. Het nitraatgehalte van sla op voedingsfilm. 4. Ammonium/nitraatverhoudingen; invloed vervanging 15, 12, 8 en 4 dagen voor de oogst door hoger ammoniumaandeel of stikstofvrije oplossing op de externe kwaliteit (in Dutch with a summary: Nitrate content of lettuce on nutrient culture (NFT). 4. External quality as affected by raising the ammonium to nitrate ratio and by omitting nitrogen 15, 12, 8 and 4 days before harvest). *Inst. Bodemvruchtbaarheid, Rapp.* 6-86, 85 pp.
- Steenhuizen J.W. 1987a. Het nitraatgehalte van sla op voedingsfilm. 5. Invloed temperatuur van het wortelmilieu; stikstofconcentraties en constante, toe- of afnemende ammonium/nitraatverhoudingen gedurende de teelt (in Dutch with a summary: Nitrate content of lettuce on nutrient culture (NFT). 5. Effect of root temperature; nitrogen level and fixed, increased or decreased ratio of ammonium to nitrate during culture). *Inst. Bodemvruchtbaarheid, Rapp.* 5-87, 127 pp.

- Steenhuizen J.W. 1987b. Het nitraatgehalte van sla op voedingsfilm. 6. EC-waarde en Ca/Mg-verhouding van de voedingsoplossing (in Dutch with a summary: Nitrate content of lettuce on nutrient culture (NFT). 6. EC level and Ca/Mg ratio of the nutrient solution). Inst. Bodemvruchtbaarheid, Rapp. 8-87, 89 pp.
- Steenhuizen J.W. 1988. Het nitraatgehalte van sla op voedingsfilm. 7. Invloed chlorideconcentratie in de voedingsoplossing (in Dutch with a summary: Nitrate content of lettuce on nutrient culture (NFT). 7. Effect of chloride concentration of the nutrient solution). Inst. Bodemvruchtbaarheid, Rapp. 11-87, 110 pp.
- Steenhuizen J.W. and J. van der Boon, 1985. Het nitraatgehalte van sla op voedingsfilm. 2. Stikstofniveau en ammonium/nitraat-verhouding; vervanging voor de oogst door een oplossing met een hoger ammoniumaandeel (in Dutch with a summary: Nitrate content of lettuce on nutrient culture (NFT). 2. Nitrogen level and ratio of ammonium to nitrate; increase in proportion of ammonium prior to harvest). Inst. Bodemvruchtbaarheid, Rapp. 1-85, 85 pp.
- Steiner A.A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil* 15: 134-154.
- Steiner A.A. 1984. The universal nutrient solution. ISOSC 6th Intern. Congr. on Soilless Culture, Lubnteren, The Netherlands, pp. 633-649.
- Steiner A.A. 1985. The history of mineral plant nutrition till about 1860 as source of the origin of soilless culture methods. *Soilless Culture* 1: 7-24.
- Toop E.W., G.H. Silva and G. Botar, 1988. Comparison of 24 lettuce cultivars in a controlled environment with extra CO<sub>2</sub> in NFT and stagnant solution. *Soilless Culture*, 4, 1, pp. 51-62.
- Van Beusichem M.L., 1984. Non-ionic nitrogen nutrition of plants. Nutrient uptake and assimilation and proton extrusion during utilization of urea or symbiotically fixed nitrogen. PhD thesis, Agricultural University Wageningen, The Netherlands, 141 pp.
- Van der Boon J. and J.W. Steenhuizen. 1984. Het nitraatgehalte van sla op voedingsfilm. 1. Ammonium/nitraatverhoudingen; groter ammoniumaandeel of stikstofvrije oplossing voor de oogst (in Dutch with a summary: Nitrate content of lettuce on nutrient culture (NFT). 1. Ratios of ammonium to nitrate; increase of ammonium or omission of nitrogen before harvest). Inst. Bodemvruchtbaarheid, Rapp. 13-84, 73 pp.
- Van der Boon J. and J.W. Steenhuizen. 1986a. Reduction of the nitrate concentration of lettuce grown in recirculating nutrient solution. In: H. Lambers, J.J. Neeteson and I. Stulen (eds.), *Fundamental, ecological and agricultural aspects of nitrogen metabolism in higher plants*. Martinus Nijhoff, Dordrecht, pp. 485-488.

- Van der Boon J. and J.W. Steenhuizen. 1986b. Nitrate in lettuce on recirculating nutrient solution. *Acta Hortic.* 178: 67-72.
- Van Goor B.J. 1987. Nutrientenbehoefte van sla in verschillende groeistadia: literatuurstudie (in Dutch with a summary: Nutrient requirement of lettuce in different growth stages: literature study). *Inst. Bodemvruchtbaarheid, Rapp.* 10-87, 29 pp.
- Van Noordwijk M. and P.A.C. Raats, 1981. Zoutophoping en -uitspoeling in samenhang met het druppelsysteem bij de teelt op steenwol (in Dutch with a summary: The influence of the drip system upon the accumulation and leaching of salts in rockwool cultures). *Inst. Bodemvruchtbaarheid, Rapp.* 9-81, 37 pp.
- Wees D. and K. Stewart. 1987. The influence of bicarbonate enrichment and aeration on dissolved carbon dioxide and oxygen in NFT nutrient solutions used for lettuce production. *Soilless Culture* 3: 51-62.
- Wild A., L.H.P. Jones and J.H. Macduff. 1988. Uptake of mineral nutrients and crop growth: the use of flowing nutrient solutions. *Adv. in Agron.* 41: 171-219.
- Winsor G.W., R.G. Hurd and D. Price. 1979. Nutrient film technique. *Growers' Bulletin* 5, Glasshouse Crops Research Institute, Littlehampton, England, 47 pp.
- Youngdahl L.J. 1988. Method for the estimation of nutrient uptake kinetic parameters using nonparametric statistics. *J. Plant Nutr.* 11: 321-331.
- Zandt P. in prep. Regeling van het nutriëntenaanbod aan planten in kunstmatige substraten: Beschrijving besturingsprogramma voor meet- en regelopstelling (voorlopige titel).



Appendix 1

De coëfficiëntenmatrix A ziet er als volgt uit:

	N	P	K	Ca	Mg	S	Cl	H	OH
HNO <sub>3</sub>	1	0	0	0	0	0	0	1	0
KNO <sub>3</sub>	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2	0	0	1	0	0	0	0	0
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2	0	0	0	1	0	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	1	0	0	2	0	0
MgSO <sub>4</sub>	0	0	0	0	1	1	0	0	0
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	0	2	0	0	1	0	0	0
KOH	0	0	1	0	0	0	0	0	1
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	0

Om te zien of de vergelijking  $A \cdot X = F$  (Vgl. (2) uit de tekst) een unieke oplossing heeft moet de determinant van A (D) ongelijk aan nul zijn (in dat geval kan de inverse matrix  $A^{-1}$  bepaald worden en is de oplossing:  $X = F \cdot A^{-1}$ ). De determinant van A kan op verschillende manieren bepaald worden. Zie bijvoorbeeld B. Rootselaar, 1978 (Lineaire algebra, Wolters Noordhoff, Groningen, The Netherlands, 162 pp). Hier wordt gekozen voor de volgende methode. De matrix kan worden ingekrompen wanneer er ergens een rij of kolom aanwezig is waarin slechts één getal ongelijk aan nul staat. Dit getal wordt dan als vermenigvuldiger voor de matrix gezet. Hiervoor komt dan nog een plus of min teken, hetgeen afhangt van kolom en rijnummer waar dit getal stond: als de som van kolom- en rijnummer even is dan een +, anders een -. Een kolom of rij met slechts één getal ongelijk aan nul kan worden verkregen door kolommen (of rijen) van elkaar af te trekken of bij elkaar op te tellen, waarbij veelvouden van een andere kolom (of rij) gebruikt mogen worden. Dit wordt net zolang herhaald totdat een twee bij twee matrix overblijft met een vermenigvuldiger (V):

$$V * \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix}$$

De determinant van A luidt nu:  $D = V \cdot ((a \cdot d) - (b \cdot c))$ .

Toegepast op A levert dit:

$$\left( \begin{array}{cccccccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \xRightarrow{(1)} - \left( \begin{array}{cccccccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \xRightarrow{(2)}$$

$$\left( \begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \xRightarrow{(3)} - \left( \begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right) \xRightarrow{(4)} -2 \left( \begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

$$\xRightarrow{(5)} 2 \left( \begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \end{array} \right) \xRightarrow{(6)} 2 \left( \begin{array}{cccc|c} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -2 & 2 & 0 & 1 \end{array} \right) \xRightarrow{(7)} -2 \left( \begin{array}{ccc|c} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ -2 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

$$\xRightarrow{(8)} -2 \left( \begin{array}{ccc|c} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{array} \right) \xRightarrow{(9)} -4 \left( \begin{array}{cc|c} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{array} \right)$$

en:  $D = -4 \cdot ((1 \cdot 1) - (1 \cdot 1)) = 0.$

Er is dus geen unieke oplossing voor het stelsel van negen vergelijkingen met negen onbekenden.

Verklaring:

- (1) ontwikkelen naar rij 8 en kolom 9 (OH)
- (2) ontwikkelen naar rij 1 en kolom 8 (H)
- (3) ontwikkelen naar rij 7 en kolom 2 (P)
- (4) ontwikkelen naar rij 4 en kolom 6 (Cl)
- (5) ontwikkelen naar rij 2 en kolom 3 (Ca)
- (6) kolom 2 van kolom 1 aftrekken
- (7) ontwikkelen naar rij 1 en kolom 2
- (8) rij 1 bij rij 3 optellen
- (9) ontwikkelen naar rij 1 en kolom 1

Appendix 2

## Schema 3

$$\begin{aligned}
\{\text{Mg}(\text{NO}_3)_2\} &= 0 \\
\{\text{KNO}_3\} &= ([\text{N}] + [\text{Cl}] - [\text{H}] - 2 \cdot [\text{Ca}]) / [\text{KNO}_3] \\
\{\text{MgSO}_4\} &= [\text{Mg}] / [\text{MgSO}_4] \\
\{\text{K}_2\text{SO}_4\} &= ([\text{S}] - [\text{Mg}]) / [\text{K}_2\text{SO}_4]
\end{aligned}$$

## RV

$$\begin{aligned}
[\text{S}] &\geq [\text{Mg}] \\
[\text{N}] - 2 \cdot [\text{Ca}] - [\text{H}] + [\text{Cl}] &= [\text{K}] - [\text{P}] - [\text{OH}] - 2 \cdot [\text{S}] + 2 \cdot [\text{Mg}]
\end{aligned}$$

## Schema 4

$$\begin{aligned}
\{\text{K}_2\text{SO}_4\} &= 0 \\
\{\text{KNO}_3\} &= ([\text{K}] - [\text{OH}] - [\text{P}]) / [\text{KNO}_3] \\
\{\text{MgSO}_4\} &= [\text{S}] / [\text{MgSO}_4] \\
\{\text{Mg}(\text{NO}_3)_2\} &= ([\text{Mg}] - [\text{S}]) / [\text{Mg}(\text{NO}_3)_2]
\end{aligned}$$

## RV

$$\begin{aligned}
[\text{Mg}] &\geq [\text{S}] \\
[\text{N}] - [\text{H}] - 2 \cdot [\text{Ca}] - 2 \cdot [\text{Mg}] + [\text{Cl}] + 2 \cdot [\text{S}] &= [\text{K}] - [\text{OH}] - [\text{P}]
\end{aligned}$$



## Appendix 3

## Verklaring kolomtitels.

Kolomtitel	kode	omschrijving
t		
aant. pl. geoogst	K1	tijdstip
aant. pl. opstel.	K2	aantal planten dat is geoogst op t
sch. vers	K3	(K3(t-1)-K2(t-1)) aantal planten die gegroeid hebben tussen t0 en t
sch. dr. oogst	K4	versgewicht van de scheut, van alle geoogste planten samen (g)
sch. dr. plant	K5	drooggewicht van alle geoogste scheuten samen (g)
sch. dr. opst.	K6	(K5/K2) droog scheutgewicht per geoogste plant (g)
g dr. st.	K7	(K6*K3) droog scheutgewicht van alle planten die op t (vlak voor oogst) aanwezig waren in de opstelling (g)
bl. dr. aantal	K8	(100%*K5/K4) percentage droge stof in geoogste scheuten
bl. dr. oogst	K9	aantal bemonsterde veenperspotjes (de helft van het aantal geoogste planten)
bl. dr. opst.	K10	drooggewicht van alle veenperspotjes samen (g)
w. dr. oogst	K11	(K3*K10/K9) drooggewicht van alle veenperspotjes die op t (vlak voor oogst) aanwezig waren in de opstelling (g)
w. dr. opst.	K12	drooggewicht van alle geoogste wortels samen (g)
E-sch	K13	drooggewicht van alle wortels die op t (vlak voor oogst) aanwezig waren in de opstelling (g)
E-w	K14	gehalte van element E in 1 g gedroogde scheut (mol/g)
E-bl	K15	gehalte van element E in 1 g gedroogde wortel (mol/g)
E-sch	K16	gehalte van element E in 1 g gedroogd veen (mol/g); berekend uit gehalte veenperspotje (= veen + daarin aanwezige wortels). Volgens vgl. (16) uit tekst (K14*K7) totale inhoud van E in alle scheuten die op t (vlak voor oogst) aanwezig waren in de opstelling (mol)
E-w	K17	(K15*K13) totale inhoud van E in alle wortels die op t (vlak voor oogst) aanwezig waren in de opstelling (mol)
E-bl	K18	(K16*K11) totale inhoud van E in al het veen dat op t (vlak voor oogst) aanwezig was in de opstelling (mol)
E-pl	K19	(K17+K18) totale inhoud van E in alle planten die op t (vlak voor oogst)

E-tot	K21	aanwezig waren in de opstelling (mol) (K20+K19) totale inhoud van E in alle plantentveen die op t (vlak voor oogst) aanwezig waren in de opstelling (mol)
opn/w	K22	(K3*(K24(t)-K24(t-1))) de totale opname van E door de plantentveenperspotjes in de periode (t-1) t/m t (mol)
E-pl/pl	K23	(K20/K3) totale inhoud van E in 1 plant die op t (vlak voor oogst) aanwezig was nin de opstelling (mol)
E-tot/pl	K24	(K21/K3) totale inhoud van E in 1 plant+veenperspotje die op t (vlak voor oogst) aanwezig was in de opstelling (mol)
opn/w/pl	K25	(K23(t)-K23(t-1)) de totale opname van E door 1 plant in de periode (t-1) t/m t (mol)
verlies	K26	verlies uit voedingsoplossing gedurende t en t-1 (mol)
cumopn	K27	(K22(t)+K27(t-1)) cumulatieve opname tussen t en t0 (mol)
cumverl	K28	(K26(t)+K28(t-1)) cumulatief verlies tussen t en t0 (mol)

t	aant.pl. geogst	aant.pl. opstel	sch.vers gram	sch.dr. oogst	sch.dr. plant	sch.dr. gram	sch.dr. opst.	adr.st. gram	bl.dr. aantal
t0	100	144	86.30	5.66	0.06	8.15	6.56	48.00	
t1	48	144	338.00	23.20	0.48	69.60	6.86	24.00	
t2	24	96	853.60	43.30	1.80	173.20	5.07	12.00	
t3	24	72	2,175.50	118.90	4.95	356.70	5.47	12.00	
t4	24	48	6,076.60	295.90	12.33	591.80	4.87	12.00	
t5	12	24	4,608.80	189.20	15.77	378.40	4.11	6.00	
t6	12	12	5,721.80	222.40	18.53	222.40	3.89	6.00	

t	bl.dr. gram	bl.dr. gram	w.dr. oogst	w.dr. gram
t0	586.90	1,760.70	0.10	0.14
t1	316.50	1,899.00	0.30	0.90
t2	164.40	1,315.20	1.07	4.28
t3	166.80	1,000.80	3.45	10.35
t4	169.20	676.80	8.69	17.38
t5	85.80	343.20	5.20	10.40
t6	87.00	174.00	7.12	7.12

t	K-sch mm/g	K-w mm/g	K-bl mm/g	K-sch mmol	K-w mmol	K-bl mmol	K-pl mmol	K-tot mmol	opn/w mmol	K-pl/pl mmol
t0	1.74	0.0365	14.18	0.00	64.27	14.18	78.45			0.10
t1	1.94	0.0182	135.02	0.00	32.04	135.02	167.07			0.94
t2	2.90	0.0182	398.36	0.00	21.36	398.36	419.72			4.15
t3	2.41	1.72	0.0182	859.65	224.63	16.02	1,084.28	1,100.30	785.51	15.06
t4	2.64	2.09	0.0182	1,562.35	223.91	10.68	1,786.27	1,796.95	1,063.41	37.21
t5	2.70	2.28	0.0182	1,021.68	137.02	5.34	1,158.70	1,164.04	263.57	48.28
t6	2.55	2.43	0.0182	567.12	83.50	2.67	650.62	653.29	71.27	54.22

t	K-tot/pl mmol	Opn/w/pl mmol	verlies mmol	cumopn week	curverl week
t0	0.54				
t1	1.16	0.84	488.00	88.62	488.00
t2	4.37	3.21	302.00	396.97	790.00
t3	15.28	10.91	812.00	1,182.48	1,602.00
t4	37.44	22.15	1,074.00	2,245.89	2,676.00
t5	48.50	11.07	419.00	2,511.45	3,095.00
t6	54.44	5.94	362.00	2,582.73	3,457.00

t	Ca-sch mm/g	Ca-w mm/g	Ca-bl mm/g	Ca-sch mmol	Ca-w mmol	Ca-bl mmol	Ca-pl mmol	Ca-tot mmol	opn/w mmol	Ca-pl/pl mmol
t0	0.27	0.5719	2.20	0.00	976.06	2.20	978.26			0.02
t1	0.25	0.6248	17.40	0.00	1,066.35	17.40	1,083.75			0.12
t2	0.23	0.18	0.617	39.84	26.17	702.02	66.01	768.03	45.53	0.69
t3	0.18	0.23	0.6579	64.21	30.04	561.42	94.24	655.66	79.64	1.31
t4	0.19	0.19	0.7249	112.44	20.36	412.40	132.80	545.19	108.08	2.77
t5	0.19	0.21	0.7345	71.90	12.62	208.93	84.52	293.44	20.85	3.52
t6	0.20	0.22	0.7427	44.48	7.56	105.63	52.04	157.67	10.95	4.34

t	Ca-tot/pl mmol	Opn/w/pl mmol	verlies mmol	cumopn week	curverl week
t0	6.79				
t1	7.53	0.11	178.00	105.48	178.00
t2	8.00	0.57	-17.00	151.02	161.00
t3	9.11	0.62	155.00	230.66	316.00
t4	11.36	1.46	93.00	338.74	409.00
t5	12.23	0.75	122.00	359.59	531.00
t6	13.14	0.82	69.00	370.54	600.00

t	N-sch mm/g	N-w mmol	N-bl mmol	N-sch mmol	N-w mmol	N-bl mmol	N-pl mmol	N-tot mmol	opn/w mmol
t0	4.27	5.28	0.6643	34.80	2.20	1,169.63	37.01	1,206.64	
t1	3.61	4.46	0.3895	251.26	637.23	685.79	888.49	1,574.28	367.64
t2	3.79	4.21	0.2046	656.43	612.10	240.16	1,268.53	1,508.69	459.17
t3	3.37	4.22	0.1614	1,202.08	551.14	142.09	1,753.21	1,895.30	763.79
t4	3.62	4.23	0.1348	2,142.32	453.19	79.11	2,595.50	2,674.62	1,411.08
t5	3.88	3.82	0.1875	1,468.19	229.57	55.02	1,697.76	1,752.78	415.47
t6	3.65	3.69	0.1606	811.76	126.80	23.56	938.56	962.12	85.73

t	N-pl/pl mmol	Opn/w/pl mmol	verlies mmol	cumopn week	curverl week	
t0	0.26					
t1	6.17	10.93	5.91	719.00	367.64	719.00
t2	13.21	15.72	7.04	682.00	826.81	1,401.00
t3	24.35	26.32	11.14	1,192.00	1,590.59	2,593.00
t4	54.07	55.72	29.72	1,418.00	3,001.67	4,011.00
t5	70.74	73.03	16.67	570.00	3,417.15	4,581.00
t6	78.21	80.18	7.47	569.00	3,502.88	5,150.00

t	P-sch mm/g	P-w mmol	P-bl mmol	P-sch mmol	P-w mmol	P-bl mmol	P-pl mmol	P-tot mmol	opn/w mmol	P-pl/pl mmol	P-tot/pl mmol
t0	0.29	0.0241	2.36	0.00	42.43	2.36	44.80			0.02	0.31
t1	0.21	0.36	0.012	14.62	51.44	21.13	66.05	87.18	42.38	0.46	0.61
t2	0.20	0.34	0.012	34.64	49.43	14.09	84.07	98.16	40.04	0.88	1.02
t3	0.23	0.43	0.012	82.04	56.16	10.56	138.20	148.76	75.14	1.92	2.07
t4	0.24	0.45	0.012	142.03	48.21	7.04	190.24	197.29	98.11	3.96	4.11
t5	0.28	0.45	0.012	105.95	27.04	3.52	133.00	136.52	37.87	5.54	5.69
t6	0.32	0.48	0.012	71.17	16.49	1.76	87.66	89.42	21.16	7.31	7.45

t	Opn/w/pl mmol	verlies mmol	cumopn week	curverl week
t0				
t1	0.44	50.00	42.38	50.00
t2	0.42	66.00	82.42	116.00
t3	1.04	72.00	157.57	188.00
t4	2.04	156.00	255.68	344.00
t5	1.58	27.00	293.55	371.00
t6	1.76	9.00	314.72	380.00

t	Cl-sch mmol/g	Cl-w mmol/g	Cl-bl mmol/g	Cl-sch mmol	Cl-w mmol	Cl-bl mmol	Cl-tot mmol	opn/w mmol	Cl-pl/pl mmol
t0	0.47	0.15	0.0131	3.83	0.06	23.07	3.89	26.96	0.03
t1	0.21	0.07	0.008	14.62	10.00	14.09	24.62	38.70	0.17
t2	0.15	0.05	0.0034	25.98	7.27	3.99	33.25	37.24	0.35
t3	0.15	0.05	0.0042	53.51	6.53	3.70	60.04	63.73	0.83
t4	0.16	0.04	0.0021	94.69	4.29	1.23	98.97	100.21	2.06
t5	0.17	0.05	0.0021	64.33	3.00	0.62	67.33	67.95	2.81
t6	0.16	0.08	0.0021	35.58	2.75	0.31	38.33	38.64	3.19

t Cl-tot/pl opn/w/pl verlies cumopn cuuverl  
mmol mmol oploss. week week  
mmol mmol

t0	0.19								
t1	0.27	0.14	-160.00	11.74	-160.00				
t2	0.39	0.18	177.00	23.18	17.00				
t3	0.89	0.49	0.00	58.99	17.00				
t4	2.09	1.23	90.00	116.70	107.00				
t5	2.83	0.74	30.00	134.55	137.00				
t6	3.22	0.39	30.00	139.22	167.00				

t	Na-sch mmol/g	Na-w mmol/g	Na-bl mmol/g	Na-sch mmol	Na-w mmol	Na-bl mmol	Na-tot mmol	opn/w mmol	Na-pl/pl mmol
t0	0.11	0.0183	0.90	0.00	0.00	32.22	0.90	33.12	0.01
t1	0.06	0.0155	4.18	0.00	27.29	4.18	31.47	-1.65	0.03
t2	0.04	0.0105	6.93	0.00	12.32	6.93	19.25	-1.72	0.07
t3	0.03	0.04	0.0055	10.70	5.22	4.84	15.93	20.77	0.22
t4	0.03	0.03	0.0077	17.75	3.21	4.52	20.97	25.49	0.44
t5	0.02	0.03	0.0064	7.57	1.80	1.88	9.37	11.25	0.39
t6	0.02	0.03	0.0059	4.45	1.03	0.87	5.48	6.34	0.46

t Na-tot/pl Opn/w/pl verlies cumopn cuuverl  
mmol mmol oploss. week week  
mmol mmol

t0	0.23								
t1	0.22	0.02	-60.00	-1.65	-60.00				
t2	0.20	0.04	60.04	-3.38	0.04				
t3	0.29	0.15	-120.00	2.95	-119.96				
t4	0.53	0.22	120.00	14.59	0.04				
t5	0.47	-0.05	-59.90	13.10	-59.86				
t6	0.53	0.07	90.00	13.82	30.14				

t	Mg-sch mmol/g	Mg-w mmol/g	Mg-bl mmol/g	Mg-sch mmol	Mg-w mmol	Mg-bl mmol	Mg-tot mmol	opn/w mmol	Mg-pl/pl mmol
t0	0.16	0.1325	1.30	0.00	233.29	1.30	234.60		0.01
t1	0.13	0.1357	9.05	0.00	238.93	9.05	247.97	13.38	0.06
t2	0.12	0.06	0.1289	20.78	8.72	152.48	29.51	181.98	0.31
t3	0.09	0.07	0.1315	32.10	9.14	115.77	41.25	157.01	0.57
t4	0.09	0.07	0.1356	53.26	7.50	79.58	60.76	140.35	1.27
t5	0.10	0.07	0.1191	37.84	4.21	34.95	42.05	77.00	1.75
t6	0.10	0.07	0.1213	22.24	2.41	17.80	24.65	42.44	2.05

t Mg-tot/pl Opn/w/pl verlies cumopn cuuverl  
mmol mmol oploss. week week  
mmol mmol

t0	1.63								
t1	1.72	0.05	10.00	13.38	10.00				
t2	1.90	0.24	0.00	30.05	10.00				
t3	2.18	0.27	60.00	50.57	70.00				
t4	2.92	0.69	30.00	86.24	100.00				
t5	3.21	0.49	10.00	93.06	110.00				
t6	3.54	0.30	56.00	97.01	166.00				

t	S-sch mmol/g	S-w mmol/g	S-bl mmol/g	S-sch mmol	S-w mmol	S-bl mmol	S-tot mmol	opn/w mmol	S-pl/pl mmol	S-tot/pl mmol
t0	0.057	0.0635	0.00	0.00	111.80	0.00	111.80		0.00	0.78
t1	0.048	0.0688	3.97	0.00	156.17	3.97	160.14	48.34	0.03	1.11
t2	0.048	0.0655	8.31	0.00	80.76	8.31	89.07	-17.69	0.09	0.93
t3	0.045	0.065	17.12	0.00	57.22	17.12	74.34	7.54	0.24	1.03
t4	0.037	0.188	0.0385	26.63	20.14	22.60	46.77	69.37	19.81	1.45
t5	0.055	0.199	0.0332	14.00	11.96	9.74	25.96	35.70	1.02	1.49
t6	0.055	0.194	0.0270	12.23	6.67	3.96	18.90	22.86	5.01	1.91

t Opn/w/pl verlies cumopn cuuverl  
mmol mmol oploss. week week  
mmol mmol

t0	0.03	-32.00	48.34	-32.00						
t1	0.06	48.00	30.65	16.00						
t2	0.15	-30.00	38.19	-14.00						
t3	0.74	30.00	57.99	16.00						
t4	0.11	30.00	59.01	46.00						
t5	0.49	98.00	64.02	144.00						



t	B-sch µm/g	B-w µm/g	B-bl µm/g	B-sch µmol	B-w µmol	B-bl µmol	B-pl µmol	B-tot µmol	Opn/w µmol
t0	2.12	2.18	0.00	0.00	3,838.33	0.00	3,838.33		
t1	2.65	1.80	147.55	0.00	3,169.26	147.55	3,316.81	-521.51	
t2	2.69	1.75	458.98	0.00	2,054.15	458.98	2,513.13	301.92	
t3	2.86	2.80	959.52	0.00	2,464.98	959.52	3,424.50	1,539.66	
t4	3.23	3.02	1,692.55	0.00	1,772.44	1,692.55	3,464.99	1,181.98	
t5	3.15	2.34	1,222.23	0.00	686.67	1,222.23	1,908.91	176.41	
t6	3.15	2.22	700.56	0.00	325.73	700.56	1,026.29	71.84	

t	B-pl/pl µmol	B-tot/pl µmol	Opn/w/pl µmol	verlies oploss. µmol	cumopn week µmol	cumverl week µmol
t0	0.00	26.66				
t1	1.02	23.03	1.02	-700.00	-521.51	-700.00
t2	4.78	26.18	3.76	1,050.00	-219.59	350.00
t3	13.33	47.56	8.55	900.00	1,320.06	1,250.00
t4	35.26	72.19	21.93	-1,500.00	2,502.05	-250.00
t5	50.93	79.54	15.66	1,200.00	2,678.46	950.00
t6	58.38	85.52	7.45	3,600.00	2,750.30	4,550.00

t	Cu-sch µm/g	Cu-w µm/g	Cu-bl µm/g	Cu-sch µmol	Cu-w µmol	Cu-bl µmol	Cu-pl µmol	Cu-tot opn/w µmol	Cu-pl/pl µmol
t0	0.085	0.21	0.69	0.00	369.75	0.69	370.44		0.00
t1	0.063	0.34	4.38	0.00	598.64	4.38	603.02	232.58	0.03
t2	0.099	0.40	17.15	0.00	469.52	17.15	486.67	84.65	0.18
t3	0.113	0.27	40.31	0.00	237.69	40.31	278.00	-87.00	0.56
t4	0.118	1.43	69.83	153.20	281.71	223.04	504.75	319.41	4.65
t5	0.153	1.55	0.480	57.90	93.15	140.86	151.04	291.90	6.29
t6	0.189	1.43	0.410	42.03	49.14	60.16	91.17	151.33	7.60

t	Cu-tot/pl µmol	Opn/w/pl µmol	verlies oploss. week µmol	cumopn week µmol	cumverl week µmol
t0	2.57				
t1	4.19	0.03	-730.00	232.58	-730.00
t2	5.07	0.15	-340.00	317.23	-1,070.00
t3	3.86	0.38	-400.00	230.24	-1,470.00
t4	10.52	4.09	-400.00	549.65	-1,870.00
t5	12.16	1.65	0.00	589.18	-1,870.00
t6	12.61	1.30	-700.00	594.56	-2,570.00

t	Fe-sch µm/g	Fe-w µm/g	Fe-bl µm/g	Fe-sch µmol	Fe-w µmol	Fe-bl µmol	Fe-pl µmol	Fe-tot µmol	opn/w µmol
t0	4.10	28.78	33.42	0.00	50,672.95	33.42	50,706.36		
t1	5.36	29.81	373.06	0.00	52,486.47	373.06	52,859.52	2,153.16	
t2	3.80	33.83	658.16	0.00	39,709.65	658.16	40,367.81	5,128.13	
t3	1.99	27.79	709.83	0.00	24,464.93	709.83	25,174.76	-5,101.10	
t4	1.60	26.94	946.88	10,392.19	15,811.09	11,339.07	27,150.16	10,366.99	
t5	1.38	83.10	29.32	522.19	4,993.98	8,603.95	5,516.17	14,120.12	545.04
t6	1.36	95.80	32.73	302.46	3,291.99	4,802.31	3,594.46	8,396.77	1,336.71

t	Fe-pl/pl µmol	Fe-tot/pl µmol	Opn/w/pl µmol	verlies oploss. week µmol	cumopn week µmol	cumverl week µmol
t0	0.23	352.13				
t1	2.59	367.08	2.36	22,900.00	2,153.16	22,900.00
t2	6.86	420.50	4.27	3,800.00	7,281.29	26,700.00
t3	9.86	349.65	3.00	16,500.00	2,180.19	43,200.00
t4	236.23	565.63	226.37	10,200.00	12,547.18	53,400.00
t5	229.84	588.34	-6.39	-600.00	13,092.22	52,800.00
t6	299.54	699.73	69.70	-300.00	14,428.93	52,500.00

t	Mn-sch µm/g	Mn-w µm/g	Mn-bl µm/g	Mn-sch µmol	Mn-w µmol	Mn-bl µmol	Mn-pl µmol	Mn-tot µmol	opn/w µmol
t0	1.97	1.15	16.06	0.00	2,024.81	16.06	2,040.86		
t1	1.24	1.22	86.30	0.00	2,148.05	86.30	2,234.36	193.50	
t2	1.76	1.19	304.83	0.00	1,396.82	304.83	1,701.65	212.08	
t3	1.86	0.59	663.46	0.00	519.41	663.46	1,182.87	-93.37	
t4	1.91	8.39	1,130.34	898.87	346.27	2,029.21	2,375.48	1,586.90	
t5	1.73	4.82	0.59	654.63	289.66	173.14	944.29	1,117.43	-70.31
t6	1.57	4.32	0.42	349.17	148.45	61.62	497.62	559.24	0.53

t	Mn-pl/pl µmol	Mn-tot/pl µmol	Opn/w/pl µmol	verlies oploss. week µmol	cumopn week µmol	cumverl week µmol
t0	0.11	14.17				
t1	0.60	15.52	0.49	400.00	193.50	400.00
t2	3.18	17.73	2.58	300.00	405.58	700.00
t3	9.21	16.43	6.04	600.00	312.21	1,300.00
t4	42.28	49.49	33.06	500.00	1,899.11	1,800.00
t5	39.35	46.56	-2.93	300.00	1,828.80	2,100.00
t6	41.47	46.60	2.12	600.00	1,829.32	2,700.00

t	Zn-sch μm/g	Zn-w μm/g	Zn-bl μm/g	Zn-sch μmol	Zn-w μmol	Zn-bl μmol	Zn-pl μmol	Zn-tot μmol	Opn/w μmol	Zn-pl/pl μmol
t0	1.29		0.69	10.51	0.00	1,214.88	10.51	1,225.40		0.07
t1	0.64		0.67	44.54	0.00	1,179.67	44.54	1,224.21	-1.18	0.31
t2	0.82		0.58	142.02	0.00	680.80	142.02	822.83	6.69	1.48
t3	0.72		0.24	256.82	0.00	211.28	256.82	468.11	-149.01	3.57
t4	0.67	1.45	0.25	396.51	155.35	146.73	551.85	698.58	386.51	11.50
t5	0.73	1.08	0.25	276.23	64.90	73.36	341.14	414.50	65.21	14.21
t6	0.79	0.93	0.22	175.70	31.96	32.28	207.65	239.93	32.68	17.30

t	Zn-tot/pl μmol	Opn/w/pl μmol	verlies μmol	cumopn week	cumverl week
t0	8.51		0.24	-500.00	-1.18
t1	8.50		1.17	-400.00	5.50
t2	8.57		2.09	-600.00	-143.51
t3	6.50		7.93	-300.00	243.00
t4	14.55		2.72	0.00	308.20
t5	17.27		3.09	-800.00	340.89
t6	19.99				-2,600.00

t	Mo-sch μm/g	Mo-w μm/g	Mo-bl μm/g	Mo-sch μmol	Mo-w μmol	Mo-bl μmol	Mo-pl μmol	Mo-tot μmol	Opn/w μmol	Mo-pl/pl μmol
t0	0.0022		0.106	0.00	0.00	186.63	0.00	186.63		0.00
t1	0.0056		0.134	0.15	0.00	235.93	0.15	236.09	49.45	0.00
t2	0.0083		0.131	0.97	0.00	153.77	0.97	154.74	-2.65	0.01
t3	0.0106		0.139	2.96	0.00	122.37	2.96	125.33	9.28	0.04
t4	0.0125		0.130	6.27	0.00	76.30	6.27	82.57	-0.98	0.13
t5	0.0075		0.122	4.73	0.00	35.80	4.73	40.53	-0.75	0.20
t6	0.0075		0.119	1.67	0.00	17.46	1.67	19.13	-1.14	0.14

t	Mo-tot/pl μmol	Opn/w/pl μmol	verlies μmol	cumopn week	cumverl week
t0	1.30		0.00	70.00	49.45
t1	1.64		0.01	30.00	46.80
t2	1.61		0.03	-40.00	56.08
t3	1.74		0.09	10.00	55.09
t4	1.69		0.07	0.00	54.34
t5	1.59		-0.06	-10.00	53.20
t6					60.00

## Appendix 4

De concentraties C op t en t-1, de doseringen en het verlies zijn uitgedrukt in mmol per systeemvolume, VOL=300 l.

$$\text{Verlies} = C(t-1) - C(t) + \text{Dosering}$$

\*:

Op 18/7/88 is de voedingsoplossing na de vijfde oogst vervangen door een nieuwe voedingsoplossing (sgv een lekkage). De concentratie van de nieuwe voedingsoplossing is gebruikt voor C(t-1) op t6.

N			P						
t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies	t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies				
t0	3000		t0	200					
t1	2880	599	719	t1	198	200	48	50	
t2	3030	2880	832	683	t2	207	198	75	66
t3	2700	3030	862	1192	t3	213	207	78	72
t4	3210	2700	1928	1418	t4	219	213	161	155
t5	3030	3210	390	570	t5	216	219	24	27
t6	2850	3090*	329	569	t6	174	156*	27	9

K			Ca						
t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies	t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies				
t0	1568		t0	706					
t1	1380	1568	300	488	t1	630	706	102	178
t2	1470	1380	392	302	t2	750	630	103	-17
t3	1350	1470	692	812	t3	720	750	125	155
t4	1770	1350	1494	1074	t4	810	720	183	93
t5	1500	1770	149	419	t5	720	810	32	122
t6	1410	1560*	212	362	t6	720	750*	39	69

Mg			S						
t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies	t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies				
t0	235		t0	100					
t1	270	235	45	10	t1	150	100	19	-32
t2	330	270	60	0	t2	120	150	18	49
t3	270	330	0	60	t3	150	120	0	-30
t4	240	270	0	30	t4	120	150	0	30
t5	240	240	10	10	t5	90	120	0	30
t6	240	270*	26	56	t6	60	150*	8	98

Cl			Na				
t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies	t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies		
t0	50		t0	120			
t1	210	50	0	180	120	0	-60
t2	180	210	147	177	180	0	60
t3	180	180	0	240	120	0	-120
t4	90	180	0	240	240	0	120
t5	60	90	0	180	120	0	-60
t6	60	90*	0	90	180*	0	90

Fe			Mn				
t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies	t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies		
t0	53.8		t0	2.0			
t1	30.9	53.8	0	1.6	2.0	0	0.4
t2	33.9	30.9	6.8	2.0	1.6	0.7	0.3
t3	38.4	33.9	21	1.4	2.0	0	0.6
t4	49.2	38.4	21	0.9	1.4	0	0.5
t5	49.8	49.2	0	0.6	0.9	0	0.3
t6	38.4	38.1*	0	1.2	1.8*	0	0.6

B			Cu				
t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies	t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies		
t0	9.8		t0	0.17			
t1	10.5	9.8	0	0.9	0.17	0	-0.73
t2	11.1	10.5	1.65	1.3	0.9	0.06	-0.34
t3	10.2	11.1	0	1.7	1.3	0	-0.4
t4	11.7	10.2	0	2.1	1.7	0	-0.4
t5	10.5	11.7	0	2.1	2.1	0	0
t6	11.4	15.0*	0	1.1	0.4*	0	-0.7

Zn			Mo				
t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies	t	C(t)	C(t-1) Dosering Verlies		
t0	0.6		t0	0.123			
t1	1.1	0.6	0	0.05	0.123	0	0.07
t2	2.1	1.1	0.6	0.04	0.05	0.02	0.03
t3	2.7	2.1	0	0.08	0.04	0	-0.04
t4	3.0	2.7	0	0.07	0.08	0	0.01
t5	3.0	3.0	0	0.12	0.07	0.05	0
t6	1.4	0.6*	0	0.12	0.11*	0	-0.01

## Appendix 5

## Verklaring:

- E\_opname\_totaal : opname van element E door plant + veenpers-  
potje (mmol)
- E\_verlies : verlies van E uit voedingsoplossing (mmol)
- E\_inhoud : inhoud van E in plant (mmol)
- E\_plantopname : opname van E door plant (mmol)
- t : tijdstip
- L,R,G,EP : Logistisch, Richards, Gompertz en Exponentiële  
Polynoms modellen
- $W_0$  en  $W_f$  : (mmol)
- K en  $K_0$  :  $d^{-1}$
- a : -
- b :  $d^{-1}$
- c :  $d^{-2}$
- PVA,  $R^2$  : %
- Verklaring noten:
- (1) : Nadering Gompertz curve
  - (2) : Geen convergentie na 100 iteraties
  - (3) : Limiet geval is een step-functie
  - (4) : Geen fit mogelijk vanwege onmogelijke LN-transformatie  
- alle data zijn negatief
  - (5) : Data nemen te snel toe voor Logistic curve
  - (6) : Limiet geval is Exponentiële curve
  - (7) :  $W_f$  en  $t^*$  niet te berekenen omdat  $c > 0$
  - (8) : Nadering tot "Arrested Exponential" curve
  - (9) : Geen optimalisatie mogelijk - parameter 'out of bounds'
  - (10) : Fatale GENSTAT 5 fout - mogelijk dat data niet voldoen aan het  
verwachte verloop
  - (11) : Informatie matrix is "singular"

		N_verlies			Ca_verlies		
t	L	R	G	R	G	EP	
W <sub>0</sub>	225.58	169.80	89.36	(1)	43.14	105.74	
W <sub>f</sub>	5308	5536	6025		894	1688	
K <sub>f</sub> *	0.1483	0.1149	0.0793		0.0517		
t*	21.00	19.85	18.13		21.45	57.31	
n		0.517			0.157		
K <sub>0</sub>			0.334			4.661	
a						0.0556	
b						-2.79E-04	
c						86.9	
PYA	99.4	99.2	99.3		95.7		
R <sub>L</sub>	99.9	99.9	99.9		99.2	92.1	

		P_verlies			Mg_verlies		
t	L	R	G	R	G	EP	
W <sub>0</sub>	11.954	24.446	2.623	(1)	0.839	2.289	
W <sub>f</sub>	397	375	431		218.7	172.4	
K <sub>f</sub> *	0.1737	0.614	0.097		0.0672		
t*	19.99	24.60	16.80		25.54	31.06	
n		6.20			0.374		
K <sub>0</sub>			0.495			0.828	
a						0.1836	
b						-1.95E-03	
c						82.4	
PYA	98.1	98.7	97.0		94.4		
R <sub>L</sub>	99.6	99.8	99.3		98.4	89.5	

		K_verlies			S_verlies		
t	L	R	G	R	G	EP	
W <sub>0</sub>	121.02	140.19	41.16	(1)	0	(7)	
W <sub>f</sub>	3588	3513	4136		1592		
K <sub>f</sub> *	0.1532	0.1792	0.0791		0.050		
t*	21.90	22.52	19.32		60		
n		1.35			1.004		
K <sub>0</sub>			0.365			4.613	
a						-0.01968	
b						4.89E-03	
c						96.8	
PYA	99.2	99.0	98.6		87.4		
R <sub>L</sub>	99.8	99.9	99.7		93.2	98.9	

Cl_verlies			
t	L	R	G
W <sub>0</sub>	0.01	(1)	0
W <sub>f</sub>	156.3		164.5
K <sub>*</sub>	0.370		0.211
t	26.17		24.54
n			37.414
K <sub>0</sub>			0.22
a			0.193
b			-1.74E-03
c	45.9		46.2
PYA	68.9		69.1
R <sub>2</sub>			86.5
EP			

Mn_verlies			
t	L	R	G
W <sub>0</sub>	178.1	(1)	107.5
W <sub>f</sub>	2941		3652
K <sub>*</sub>	0.1133		0.0564
t	24.20		22.34
n			0.199
K <sub>0</sub>			5.243
a			0.1145
b			-1.239E-03
c	97.8		98.8
PYA	99.5		99.7
R <sub>2</sub>			99.4
EP			

Na_verlies			
t	L	R	G
W <sub>0</sub>	-0.383	(2)	(3)
W <sub>f</sub>	-155		(4)
K <sub>*</sub>	2		
t	3		
n			
K <sub>0</sub>			
a			
b			
c			
PYA	36.4		
R <sub>2</sub>	90.5		
EP			

B_verlies			
t	L	R	G
W <sub>0</sub>	(5)	(1)	(6)
W <sub>f</sub>			(7)
K <sub>*</sub>			
t			
n			
K <sub>0</sub>			
a			
b			
c			
PYA			
R <sub>2</sub>			
EP			

Cu_verlies			
t	L	R	G
W <sub>0</sub>	-2.17	(1)	(3)
W <sub>f</sub>	-1773		(4)
K <sub>*</sub>	0.9		
t	7.45		
n			
K <sub>0</sub>			
a			
b			
c			
PYA	57.2		
R <sub>2</sub>	92.9		
EP			

Fe_verlies			
t	L	R	G
W <sub>0</sub>	6129	(1)	4115.6
W <sub>f</sub>	54240		55616
K <sub>*</sub>	0.1659		0.1114
t	12.42		8.59
n			15.18
K <sub>0</sub>			0.29
a			9.487
b			0.0755
c			-1.008E-03
PYA	92.9		93.8
R <sub>2</sub>	99.0		99.1
EP			94.8

Zn_verlies				
t	L	R	G	EP
	(5)	(1)	(3)	(4)
W0				
Wf				
k*				
t				
n				
k0				
a				
b				
c				
PVA				
R <sub>2</sub>				

Mo_verlies				
t	L	R	G	EP
	(9)	(8)	(3)	
W0				76.71
Wf				77.21
k*				-45.93
t				
n				
k0				4.34
a				0.0022
b				-1.86E-04
c				
PVA				
R <sub>2</sub>				25.1

N_opname_totaal				
	L	R	G	EP
W0	66.993	152.492	4.544	117.065
Wf	3654.8	3479.4	3973.9	3615.0
k*	0.1870	0.4484	0.1041	
t	21.28	24.50	18.38	24.43
n		3.953		
k0			0.7050	
A				4.7627
B				0.1736
C				-0.21964E-02
PVA	98.9	99.5	97.6	99.2
R <sub>2</sub>	99.7	99.9	99.4	99.5

P_opname_totaal				
	L	R	G	EP
W0	11.022	13.391	3.137	15.871
Wf	326.0	319.3	363.6	317.7
k*	0.1610	0.1944	0.0872	
t	20.82	21.65	17.88	23.95
n		1.447		
k0			0.4143	
A				2.7645
B				0.1480
C				-0.18284E-02
PVA	99.4	99.3	98.9	99.4
R <sub>2</sub>	99.9	99.9	99.8	99.7

K_opname_totaal				
	L	R	G	EP
W0	11.971	28.453	0.000	14.029
Wf	2611.4	2571.3	2721.6	2834.0
k*	0.2510	0.3357	0.1534	
t	21.44	22.52	18.97	24.91
n		1.811		
k0			2.8165	
A				2.6411
B				0.2954
C				-0.41095E-02
PVA	99.8	99.9	99.1	9.6
R <sub>2</sub>	100	100	99.8	99.8

Ca_opname_totaal			
L	R	G	EP
W0	31.148	(4)	19.675 55.339
Wf	385.9		414.6 378.1
k*	0.1442		0.0854
t	16.87		13.05 20.21
n			
k0			0.2603
A			4.0135
B			0.0932
C			-0.11296E-02
PYA	96.9		97.0 97.8
R2	99.5		99.5 98.7

Mg_opname_totaal			
L	R	G	EP
W0	3.433		5.867 0.880 4.930
Wf	100.6		96.0 109.3 99.1
k*	0.1701		0.3650 0.0956
t	19.65		22.81 16.45 22.66
n			3.419
k0			0.4611
A			1.5953
B			0.1567
C			-0.20464E-02
PYA	98.7		98.7 97.9 99.4
R2	99.7		99.8 99.5 99.6

S_opname_totaal			
L	R	G	EP
W0	16.105	(1)	13.544 (7)
Wf	66.8		66.2
k*	0.0933		0.0748
t	12.29		6.18
n			
k0			0.1187
A			3.8073
B			-0.0180
C			0.68351E-03
PYA	54.7		57.3 32.5 59.5
R2	94.3		94.6

Cl_opname_totaal			
L	R	G	EP
W0	1.195		3.442 0.000 3.153
Wf	142.8		138.0 150.8 145.5
k*	0.2171		0.3986 0.1314
t	22.00		24.24 19.38 25.89
n			2.907
k0			1.6766
A			1.1482
B			0.1890
C			-0.23316E-02
PYA	99.4		99.8 98.1 97.8
R2	99.8		100 99.5 98.7

Na_opname_totaal			
L	R	G	EP
W0	(2)	(10)	(3) 0.001
Wf			17.4
k*			27.64
t			
n			
k0			-7.1350
A			0.5613
B			-0.78828E-02
C			70.9
PYA			90.3
R2			

Fe_opname_totaal			
L	R	G	EP
W0	971.263	(2)	749.212 1615.342
Wf	16899.2		22018.9 161026.4
k*	0.1143		0.0518
t	24.47		23.50 96.29
n			
k0			0.1753
A			7.3873
B			0.0641
C			-0.22307E-03
PYA	72.7		72.2 34.8
R2	93.4		93.3 60.9



Mn_opname_totaal			
L	R	G	EP
(5)	(10)	(3)	79.438
W <sub>0</sub>			2982.0
W <sub>f</sub>			
k*			37.45
t			
n			
k <sub>0</sub>			4.3750
A			0.1217
B			-0.10215E-02
C			71.3
PYA			82.8
R <sub>2</sub>			

B_opname_totaal			
L	R	G	EP
(5)	(2)	0.000	43.489
W <sub>0</sub>		2720.2	2925.8
W <sub>f</sub>		0.3220	
k*		20.02	24.04
t			
n			
k <sub>0</sub>		202.8661	3.7725
A			0.2295
B			-0.31274E-02
C		96.2	88.5
PYA		98.6	96.2
R <sub>2</sub>			

Cu_opname_totaal			
L	R	G	EP
(5)	(2)	70.095	(7)
W <sub>0</sub>		757.9	
W <sub>f</sub>		0.0587	
k*		14.77	
t			
n			
k <sub>0</sub>		0.1398	5.2208
A			0.0293
B			0.19426E-04
C		79.6	57.9
PYA		96.5	74.7
R <sub>2</sub>			

Zn_opname_totaal			
L	R	G	EP
(11)	(1)	0.000	0.006
W <sub>0</sub>		326.8	391.2
W <sub>f</sub>		0.4873	
k*		25.54	28.99
t			
n			
k <sub>0</sub>		123665.5781	-5.0585
A			0.5988
B			-0.81275E-02
C		84.9	98.1
PYA		92.8	99.4
R <sub>2</sub>			

Mo_opname_totaal			
L	R	G	EP
(9)	(1)	(3)	43.710
W <sub>0</sub>			54.7
W <sub>f</sub>			
k*			-15.65
t			
n			
k <sub>0</sub>			3.7776
A			0.0141
B			-0.22195E-03
C			23.8
PYA			54.3
R <sub>2</sub>			

N_plantopname				
	L	R	G	EP
W <sub>0</sub>	247.690	344.213	122.864	386.449
W <sub>F</sub>	4476.8	4285.2	4901.2	4335.7
k*	0.1500	0.2650	0.0845	
t	18.92	21.74	15.44	21.94
n		2.675		
k <sub>0</sub>			0.3114	
A				5.9570
B				0.1202
C				-0.14937E-02
PVA	98.0	97.6	97.6	99.0
R	99.6	99.6	99.5	99.4

P_plantopname				
	L	R	G	EP
W <sub>0</sub>	18.300	19.840	9.252	28.717
W <sub>F</sub>	351.6	346.9	394.7	341.8
k*	0.1453	0.1618	0.0786	
t	19.97	20.49	16.82	23.35
n		1.246		
k <sub>0</sub>			0.2952	
A				3.3575
B				0.1168
C				-0.13777E-02
PVA	98.8	98.4	98.5	98.9
R	99.8	99.8	99.7	99.3

K_plantopname				
	L	R	G	EP
W <sub>0</sub>	15.072	37.324	0.000	22.484
W <sub>F</sub>	2651.5	2602.2	2764.8	2811.1
k*	0.2422	0.3443	0.1490	
t	21.32	22.64	18.79	24.79
n		2.000		
k <sub>0</sub>			2.4528	
A				3.1128
B				0.2642
C				-0.36149E-02
PVA	99.8	99.9	98.9	99.7
R	99.9	100	99.7	99.8

Ca_plantopname				
	L	R	G	EP
W <sub>0</sub>	6.230	3.329	0.716	4.116
W <sub>F</sub>	216.1	222.0	229.9	227.6
k*	0.1812	0.1394	0.1080	
t	19.42	17.91	16.24	22.65
n		0.439		
k <sub>0</sub>			0.6231	
A				1.4148
B				0.2292
C				-0.32735E-02
PVA	99.0	98.8	99.0	96.3
R	99.8	99.8	99.8	97.8

Mg_plantopname				
	L	R	G	EP
W <sub>0</sub>	3.046	2.586	0.464	2.245
W <sub>F</sub>	102.1	103.2	110.1	103.7
k*	0.1728	0.1566	0.1002	
t	20.15	19.63	16.96	22.91
n		0.784		
k <sub>0</sub>			0.5478	
A				0.8089
B				0.2137
C				-0.29789E-02
PVA	99.1	98.7	98.9	97.3
R	99.8	99.8	99.7	98.4

S_plantopname				
	L	R	G	EP
W <sub>0</sub>	0.103	(10)	0.000	0.987
W <sub>F</sub>	63.7		67.2	66.9
k*	0.2826		0.1592	
t	22.73		20.57	27.05
n				
k <sub>0</sub>			4.2096	
A				-0.0127
B				0.2044
C				-0.24765E-02
PVA	97.7		95.9	97.2
R	99.4		98.8	98.3

Cl_plantopname				
L	R	G	EP	
W <sub>0</sub>	3.895	7.837	0.649	7.456
W <sub>F</sub>	161.3	152.9	177.9	159.6
K <sub>*</sub>	0.1758	0.4162	0.0952	
t	21.04	24.29	18.12	24.56
n		3.858		
K <sub>0</sub>			0.5345	
A				2.0090
B				0.1487
C				-0.18044E-02
PYA	98.8	99.3	97.5	98.3
R	99.7	99.9	99.4	99.0

Na_plantopname				
L	R	G	EP	
W <sub>0</sub>	0.337	(8)	0.000	0.896
W <sub>F</sub>	28.8		29.4	30.6
K <sub>*</sub>	0.2434		0.1641	
t	18.23		15.72	22.16
n				
K <sub>0</sub>			2.1661	
A				-0.1101
B				0.1988
C				-0.27975E-02
PYA	98.5		97.0	98.3
R	99.7		99.3	99.0

Fe_plantopname				
L	R	G	EP	
W <sub>0</sub>	0.000	(10)	(3)	70.746
W <sub>F</sub>	12099.8			26484.9
K <sub>*</sub>	0.8856			
t	23.76			41.84
n				
K <sub>0</sub>				
A				4.2591
B				0.2010
C				-0.17039E-02
PYA	99.3			80.7
R	99.8			88.4

Mn_plantopname				
L	R	G	EP	
W <sub>0</sub>	0.003	(10)	(3)	10.521
W <sub>F</sub>	2318.9			2534.2
K <sub>*</sub>	0.6201			
t	22.13			25.75
n				
K <sub>0</sub>				
A				2.3534
B				0.2973
C				-0.40304E-02
PYA	97.8			98.2
R	99.4			99.0

B_plantopname				
L	R	G	EP	
W <sub>0</sub>	28.275	62.149	0.120	33.980
W <sub>F</sub>	2717.7	2636.0	2908.5	2749.7
K <sub>*</sub>	0.2069	0.3283	0.1199	
t	22.02	23.79	19.29	24.89
n		2.308		
K <sub>0</sub>			1.2102	
A				3.5258
B				0.2340
C				-0.31148E-02
PYA	99.6		98.6	99.8
R	99.9		99.6	99.9

Cu_plantopname				
L	R	G	EP	
W <sub>0</sub>	0.004	(8)	0.000	0.432
W <sub>F</sub>	290.8		292.8	322.9
K <sub>*</sub>	0.4541		0.3201	
t	24.59		22.93	29.81
n				
K <sub>0</sub>			493.9742	
A				-0.8390
B				0.3218
C				-0.39137E-02
PYA	99.5		99.5	96.9
R	99.9		99.8	98.1

Zn_plantopname				
	L	R	N_inhoud G	EP
W0	4.329	19.946	0.001	6.995
Wf	793.7	761.5	844.3	819.6
k*	0.2351	0.8008	0.1330	
t	22.14	25.82	19.56	25.06
n		6.177		
k0		1.7936		
A			1.9452	
B			0.2570	
C			-0.34653E-02	
PYA	98.6	99.5	97.2	98.9
R	99.6	99.9	99.2	99.4

Mc_plantopname				
	L	R	N_inhoud G	EP
W0	0.010	0.084	0.000	0.016
Wf	8.9	8.8	8.9	9.9
k*	0.3005	0.4950	0.2628	
t	22.55	24.54	20.98	25.70
n		2.838		
k0		65.1383		
A			-4.1212	
B			0.3599	
C			-0.50471E-02	
PYA	99.1	99.4	97.8	99.7
R	99.7	99.9	99.4	99.9

N_inhoud				
	L	R	N_inhoud G	EP
W0	1.139	2.078	0.074	0.427
Wf	83.1	78.4	97.5	78.7
k*	0.1713	0.2825	0.0860	
t	24.97	26.53	22.92	24.24
n		2.293		
k0			0.6176	
A			-0.8514	
B			0.2972	
C			-0.42328E-02	
PYA	99.3	99.4	98.2	93.3
R	99.8	99.9	99.5	95.6

P_inhoud				
	L	R	P_inhoud G	EP
W0	0.158	0.100	0.042	0.033
Wf	8.7	10.0	13.0	6.5
k*	0.1325	0.0904	0.0548	
t	30.16	30.29	31.87	25.55
n		0.451		
k0			0.3144	
A			-3.4113	
B			0.2863	
C			-0.38796E-02	
PYA	99.6	99.6	99.6	93.5
R	99.9	99.9	99.9	95.7

K_inhoud				
	L	R	K_inhoud G	EP
W0	0.170	0.105	0.000	0.105
Wf	54.5	55.0	58.4	55.2
k*	0.2309	0.2108	0.1366	
t	24.97	24.62	22.69	27.52
n		0.792		
k0			3.0322	
A			-2.2513	
B			0.3265	
C			-0.42553E-02	
PYA	99.8	99.8	99.6	99.9
R	100	100	99.9	99.9

Ca_inhousd			
L	R	G	EP
W <sub>0</sub>	0.075	0.034	0.008
W <sub>F</sub>	4.6	5.1	5.7
k <sub>F</sub>	0.1561	0.1071	0.0765
t <sub>*</sub>	26.30	25.36	24.70
n		0.385	
k <sub>0</sub>		0.5056	
A			-3.8507
B			0.2795
C			-0.37036E-02
PVA	99.3	99.2	99.3
R <sub>2</sub>	99.8	99.8	99.4

Mg_inhousd			
L	R	G	EP
W <sub>0</sub>	0.027	0.030	0.001
W <sub>F</sub>	2.2	2.2	2.7
k <sub>F</sub>	0.1658	0.1779	0.0811
t <sub>*</sub>	26.54	26.74	24.90
n		1.143	
k <sub>0</sub>		0.6112	
A			-4.5323
B			0.2699
C			-0.34965E-02
PVA	99.6	99.5	99.2
R <sub>2</sub>	99.9	99.9	99.8

S_inhousd			
L	R	C	EP
W <sub>0</sub>	0.008	(1)	0.000
W <sub>F</sub>	1.6		1.8
k <sub>F</sub>	0.1886		0.1065
t <sub>*</sub>	27.91		25.89
n			33.15
k <sub>0</sub>			1.6758
A			-5.1906
B			0.2440
C			-0.25933E-02
PVA	95.1		95.9
R <sub>2</sub>	98.3		98.6

Cl_inhousd			
L	R	G	EP
W <sub>0</sub>	0.021	0.036	0.000
W <sub>F</sub>	3.3	3.2	3.7
k <sub>F</sub>	0.1949	0.2460	0.1081
t <sub>*</sub>	25.91	26.67	23.65
n		1.562	
k <sub>0</sub>		1.3934	
A			-3.4007
B			0.2112
C			-0.24310E-02
PVA	99.6	99.6	98.9
R <sub>2</sub>	99.9	99.9	99.7

Na_inhousd			
L	R	G	EP
W <sub>0</sub>	0.001	(8)	0.000
W <sub>F</sub>	0.4		0.5
k <sub>F</sub>	0.2978		0.1817
t <sub>*</sub>	20.45		18.16
n			25.55
k <sub>0</sub>			4.9239
A			-4.7147
B			0.2004
C			-0.25295E-02
PVA	96.7		95.4
R <sub>2</sub>	99.1		98.8

Fe_inhousd			
L	R	G	EP
W <sub>0</sub>	(9)	(1)	0.000
W <sub>F</sub>			267.0
k <sub>F</sub>			0.4489
t <sub>*</sub>			23.56
n			41.93
k <sub>0</sub>			17630.6504
A			-1.3505
B			0.2773
C			-0.24691E-02
PVA			96.7
R <sub>2</sub>			98.8

Mn_inhousd			
L	R	Mn_G	EP
W0	0.000	(10)	0.096
Wf	41.0		46.1
k*	2.0462		
t	21.61		28.53
n			
k0			
A			-2.3468
B			0.3099
C			-0.38864E-02
PYA	99.1		98.5
R	99.7		99.0

Zn_inhousd			
L	R	Zn_G	EP
W0	0.044	0.017	0.000
Wf	17.1	17.4	18.5
k*	0.2314	0.1976	0.1361
t	25.77	25.25	23.70
n		0.665	
k0			3.4232
A			-2.7367
B			0.2628
C			-0.30700E-02
PYA	98.7	99.3	98.5
R	99.6	99.6	99.5

Mo_inhousd			
L	R	Mo_G	EP
W0	0.000	0.001	0.000
Wf	0.2	0.2	0.2
k*	0.3744	1.4206	0.2937
t	24.25	27.95	22.36
n		8.032	
k0			208.4710
A			-9.6768
B			0.4440
C			-0.61717E-02
PYA	92.2	90.8	91.5
R	97.4	97.7	97.1

B_inhousd			
L	R	B_G	EP
W0	0.223	0.231	0.000
Wf	60.4	60.3	66.9
k*	0.2103	0.2122	0.1177
t	26.61	26.64	24.42
n		1.020	
k0			2.0807
A			-1.8203
B			0.2883
C			-0.35248E-02
PYA	99.9	99.9	99.5
R	100	100	99.9

Cu_inhousd			
L	R	Cu_G	EP
W0	0.000	(1)	0.000
Wf	7.2	7.5	8.8
k*	0.3694	0.2149	
t	26.65	25.04	33.47
n			
k0			46.7570
A			-6.0021
B			0.3677
C			-0.41343E-02
PYA	98.6	99.2	96.8
R	99.5	99.7	98.1