

5.2 Optimala förhållanden för upptagning av näringsämnen hos sockerbeta (*Beta vulgaris*) vid tidig tillväxt

Olof Hellgren och Hans Larsson, SLU

Introduktion

Den initiala tillväxten hos sockerbeta (*Beta vulgaris*) anses ha stor betydelse för växternas utveckling mot hög skörd. Därför är olika möjligheter att gynna den tidiga tillväxten av stort intresse. En möjlighet som kan gynna tidig tillväxt är att tillse att de näringsämnen som växten behöver för sin biomassaproduktion är så optimalt tillgängliga som möjligt. Målsättningen med detta arbete var att fastställa sockerbetans krav på optimala näringsproportioner under den tidiga tillväxten.

Många analyser på näringsinnehållet i sockerbeta finns gjorda. Däremot är de få som är gjorda under den tidiga tillväxten och framför allt är det få som är verifierade som optimala under denna period. Greger et al. (1991) visade i preliminära experiment en sammansättning som omfattade makronäringsämnen och som var användbar i ett vattenbaserat odlingsystem. Sammansättningen av den lösning som utnyttjades var i vikt-% ca 185 % K, 100 % N, 13 % P, 31 % Ca, 17 % Mg, 13 % Na och 7 % S. Denna näringsammansättning användes vid pH 6.5.

För sockerbetor i fält (blast och beta) har analyser från tidig tillväxt visat på proportionerna ca 111 % K, 100 % N, 12 % P och 60 % Na (Olanders, 1996).

Växternas upptagningsmöjligheter av näringsämnen, och därmed tillväxtmöjligheter, är beroende av genetisk upptagningskapacitet, näringstillgänglighet i rotsfären och sådana omgivningsfaktorer som påverkar upptagningen. Omgivningsfaktorer som påverkar tillväxtprocesserna, men inte direkt näringsupptagningen, kommer som en konsekvens av tillväxtpåverkan också att påverka växtens krav på näringsämnen och därmed upptagningen.

Med icke-begränsande näringsförhållanden menas att inga ämnen begränsar upptagningen. Däremot betyder det inte att inga andra faktorer kan begränsa tillväxten. För att optimal tillväxt skall kunna upprätthållas krävs att icke-begränsande näringsförhållanden kan upprätthållas.

En metod för att kontrollera och fastställa icke-begränsande näringsförhållanden har tagits fram av Ingestad och Lund, 1986. Metoden baserar sig på en teknik där näringsämnen kontinuerligt är tillgängliga för upptagning. Detta möjliggörs genom att en näringslösning, en s.k. kulturlösning, sprayas på växternas rötter. Näringsämnena i lösningen är i proportioner och mängder som resulterar i kontinuerlig upptagning under så lång tidsperiod så att tillväxthastighet och fysiologiskt tillstånd hos växterna kan verifieras. Efterhand som näringsämnena tas upp titreras nya ämnen in i lösningen som sprayas på rötterna. Detta betyder inte att en konstant näringskoncentration måste upprätthållas. Istället betyder det att en näringskoncentration som säkerställer en minimal konduktivitetsnivå kan upprätthållas och att näringsämnena tillförs baserat på växtens upptagningsvillkor (Hellgren & Ingestad, 1996). Om proportionerna mellan de olika näringsämnena i lösningen skulle skilja sig från de som analyserats fram ur växternas biomassa är detta en indikation på begränsade näringsproportioner i lösningen och att en justering måste göras. Varje gång en justering av näringsproportionerna

genomförts ska resultatet ge en ökning av upptagnings- och därmed tillväxthastigheten för att kunna sägas vara ett led i fastställande av optimala förhållanden. Efter varje justering ska skillnaden mellan proportionerna i lösningen och växterna kunna minska tills ingen optimering längre kan registreras. Tekniken har tidigare framgångsrikt använts på växtslag som exempelvis björk, gran och tomat. Hur verifiering och behandling av data kan göras är beskrivet i Ingestad et al. (1994a, 1994b och 1996).

Material and metoder

Hantering av växtmaterial

Den odlingsteknik som användes för att studera sockerbetans egenskaper var hämtad från Ingestad och Lund (1979, 1986) och Ingestad, Hellgren och Lund Ingestad (1994a, b). I odlingsenheter (Biotronic AB, Uppsala) växte intakta sockerbetsplantor med rötterna inneslutna i en rotkammare. Varje växt i odlingsenheten hade sina rötter separerade från skottet genom en skumplasthållare. En kulturlösning, omkring 5 liter, recirkulerades och sprayades kontinuerligt på rötterna. Alla experiment genomfördes i klimatkammare i Biotronen, Alnarp.

Frögroning och plantering

Icke pelleterade frön, nakna frön, av sockerbeta (*Beta vulgaris* L. cv. Hanna) groddes i petriskålar under 3 dagar. Fröplantor (omkring 100 mg friskvikt per planta) planterades i odlingsenheter.

Näringsstillförsel

Näringslösningarnas sammansättning baserade sig på analyser från växternas rötter och skott. För varje experiment justerades näringsämnenas proportioner mot optimerad relativ tillväxthastighet.

Kulturlösningen som sprayades på växternas rötter utgick från destillerat vatten i vilket näringsämnen från stamlösningar tillfördes genom frekvent titrering (ner till ett intervall av 10 minuter). Näringsämnena tillfördes i en hastighet, upptagningshastighet, och för att göra detta användes datorstyrd teknik. Alla näringsämnen tillfördes genom titrering från olika stamlösningar som alla innehöll konstanta proportioner mellan näringsämnena så att dessa upprätthölls i kulturlösningen. För att upprätthålla konstanta förhållanden i växterna måste näringsämnena tillföras i exponentiellt ökande mängder i takt med biomassaökningen i växterna. För att upprätthålla konstanta tillstånd hos växterna krävs exponentiellt ökade mängder i dessa, annars kommer en gradvis ökad begränsning av tillväxten att bli resultatet.

Omgivningsförhållanden

Optimala tillväxtförhållanden, när endast växtens genetiska kapacitet är begränsande, kräver optimering av samtliga omgivningsfaktorer. Därför testades olika lufttemperaturer, fotoperioder, fotonfluktäteter (ljusintensiteter), kvävekällor, konduktiviteter, salter och pH. Den relativa luftfuktigheten var 70 % i alla experiment. Fotonfluktäteten mättes regelbundet vid växternas översta blad.

Förberedande experiment

Ett antal förberedande experiment genomfördes för att fastställa förutsättningarna för sockerbetans egenskaper i förhållande till ett antal omgivningsfaktorer; ljusperiod (dagslängd), salttolerans (pH-titreringslösningar), rotbegränsning och användningen av pelleterade kontra nakna fröer.

Fotoperiod. Effekterna av två olika fotoperioder, 18 timmar per dag och kontinuerligt ljus, studerades.

Salt. Eftersom sockerbetan tillhör de växter som trivs i salthaltiga förhållanden, halofyt, användes olika salter i överskott i de optimala proportionerna av näringsämnen. Nitrater av kalcium, magnesium och kalium användes. Natriumklorid och natriumhydroxid användes också. För övriga salter se pH-titreringslösningar.

pH-titreringslösningar. I tidigare experiment har alla stamlösningar inklusive pH-titreringslösningarna varit sammansatta med de bestämda proportioner mellan näringsämnena som experimentet baserats på. För att justera pH neråt har en lösning baserad på salpetersyra, HNO_3 , använts och för att justera pH uppåt har en lösning baserad på ammoniak, NH_3 , använts. Detta kräver dock att protonutbytet är balanserat med jonupptagningen, dvs upptagningen av näringsämnen, både katjoner och anjoner. Sockerbetan har dock en så hög aktivitet av protonavgivande att tidigare strategi för pH-justering inte kunnat användas. Istället testades olika hydroxidlösningar; kalciumhydroxid, natriumhydroxid och kaliumhydroxid. Alla tre hydroxiderna fungerade väl för att justera pH uppåt. Kalciumhydroxid användes som mättad lösning vilket krävde speciell teknik för att inte titrera in icke löst salt.

Rotbegränsning. Volymen i odlingsenhetens rotkammare begränsades genom en skiva som hindrade rötterna att hänga fritt ner. Kulturlösningen sprayades likadant som utan rotbegränsaren, vilket betydde att växternas tillgång på näringsämnen inte ändrades till följd av rotbegränsaren.

Pelleterade och opelleterade (nakna) fröer. Både pelleterade och icke pelleterade fröer groddes enligt procedur beskriven under Frögroning och plantering.

Experiment

Titring av näringsämnen. För att tillförsäkra icke-begränsad upptagning av näringsämnen tillfördes dessa genom titring som fri tillgång till växterna. Detta betyder att varje gång upptagningen förbrukat näringsmängderna i kulturlösningen under det givna börvärdet tillfördes ny stamlösning. När hydroxidtitring användes för att kontrollera pH påverkades dock kulturlösningen så att konduktiviteten steg utan att nya näringsämnen tillförts. För att lösa detta problem kontrollerades titring av näringsämnen genom tillförsel med en bestämd relativ tillförselhastighet. Relativ tillförselhastighet betyder exponentiellt ökande tillförsel baserad på mängden näringsämne i växten vid experimentets start. Efter varje skörd kunde vid behov en finjustering av värdet på den relativa tillförselhastigheten korrigeras.

Fotonfluxtäteten. Effekterna av olika fotonfluxtätheter (quantum sensor, LiCor, USA; fluorescent tubes, CW, 215 W, Sylvania, Canada) mellan 50 och 430 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ studerades.

Konduktivitet. Mängden näringsämnen i kulturlösningen kontrollerades så att denna inte vid något tillfälle skulle understiga ett givet konduktivitetsvärde, vilket betyder att ett lägsta börvärde för konduktiviteten kunde ställas in och användas. När konduktiviteten till följd av växternas upptagning minskade under börvärdet titrerades ny stamlösning in i kulturlösningen. Konduktivitetsvärden i området mellan 50 och 400 $\mu\text{S cm}^{-1}$ användes.

Kvävekällor. Som kvävekällor användes olika kombinationer av ammonium och nitrat ($\text{NH}_4\text{-\%/NO}_3\text{-\%}$); 0/100, 10/90, 15/85, och 20/80.

pH. Experiment genomfördes i vilka en konstant pH-nivå kontrollerades. pH i dessa experiment varierades i ett område mellan 4.0 och 8.0 enheter. För att upprätthålla en bestämd konstant nivå på pH testades användningen av olika hydroxider; NaOH, KOH, Ca(OH)_2 . Ca(OH)_2 användes så att mättad lösning titrerades in i kulturlösningen. KOH och NaOH titrerades som lösta salter.

Lufttemperatur. Effekterna av olika lufttemperaturer studerades i ett intervall mellan 10 och 26°C.

Genomförande av experiment. Varje experiment startades med att mellan 70 och 80 små fröplantor planterades i varje odlingsenhet. Efter 4-5 dagar skördades ca 10-20 plantor. Därefter skördades plantor 5 gånger med så många plantor varje gång så att beskuggning mellan växterna undveks.

Växtanalyser. Vid varje skördetillfälle bestämdes torr- och friskvikter för växternas rötter respektive skott. Innehållet av näringsämnen i växternas biomassa analyserades för skott och rötter separat.

Analys av data. Tillväxtkapaciteten, även benämnd relativ tillväxthastighet, bestämdes genom att friskvikts- respektive torrviktsökningen per planta beräknades som mängd producerad biomassa per mängd befintlig biomassa per dag enligt:

$$r = \frac{dW}{dt} \frac{1}{W} \quad (\text{g g}^{-1} \text{dag}^{-1}) \quad (1)$$

$$W_2 = W_1 e^{r(t_2-t_1)} \quad (2)$$

$$r = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

W står för vikt, dvs frisk- respektive torr vikt ur skördedata. t står för tid, dvs $(t_2 - t_1)$ är tid mellan skördar. r står för tillväxtkapacitet.

Tillväxtkapaciteten verifierades genom linjär regressionsanalys. Växternas tillstånd verifierades genom förhållande mellan rotvikt:plantvikt och torrsvikt:frisksvikt.

Resultat

Förberedande experiment

Fotoperiod. Det var ingen skillnad i tillväxtkapacitet mellan 18 och 24 timmars dagslängd, varför 24 timmars dagslängd, dvs kontinuerligt ljus var inte begränsande för tillväxten och kunde därför användas i experimenten.

Salt. De förberedande experimenten visade inte på någon skillnad i tillväxt mellan tillförsel av natriumklorid och natriumhydroxid. Ingen skillnad kunde heller registreras för olika överskottstillförsel av magnesium eller kalcium

pH-titreringslösningar. Kaliumhydroxid var inte lämpligt att använda eftersom det ingår i kulturlösningen i bestämda proportioner. Natriumhydroxid fungerade väl och var den lösning som sedan användes för pH-justering.

Rotbegränsning. Ingen begränsning av den tidiga tillväxten registrerades till följd av den fysiska rotbegränsaren.

Pelleterade och opelleterade (nakna) fröer. Ingen avgörande skillnad kunde registreras för tillväxten mellan växter från pelleterade eller icke pelleterade fröer i de förberedande experimenten.

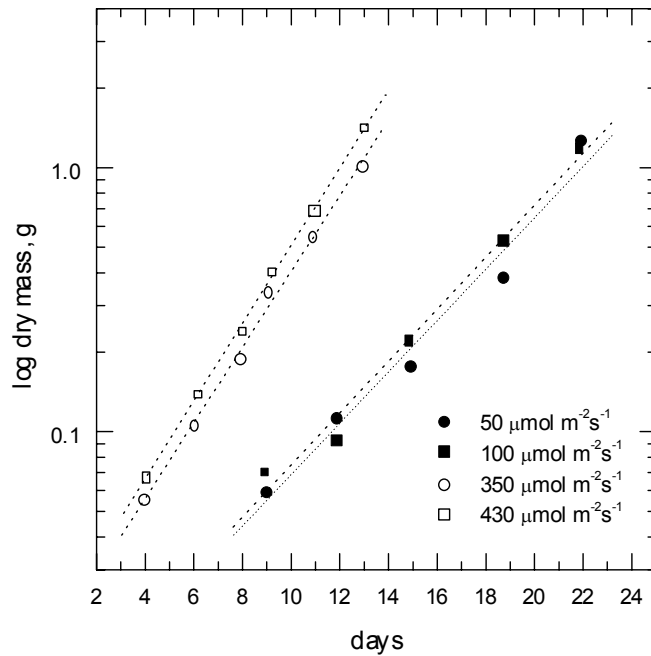
Experiment

Fotonfluxtätheten. De högsta tillväxtkapaciteterna registrerades i $430 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. I 18°C under 50 och $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ registrerades en tillväxtkapacitet av 23-24 g torrsvikt per g per dag (Figur 1). I 18°C under 350 och $430 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ var tillväxtkapaciteten 33-34 g torrsvikt per g per dag. Under 350 och $430 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ uppnåddes en kvot mellan rot och planta som var 0.25-0.27 g rot per g planta. För $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ var kvoten inte stabil utan steg från ca 0.13 till 0.26 med 0.17-0.18 som medelvärde, vilket den även gjorde för 50 (tabell 1). Torrsvikthalten, g torrsvikt per g frisksvikt, var däremot tämligen stabil.

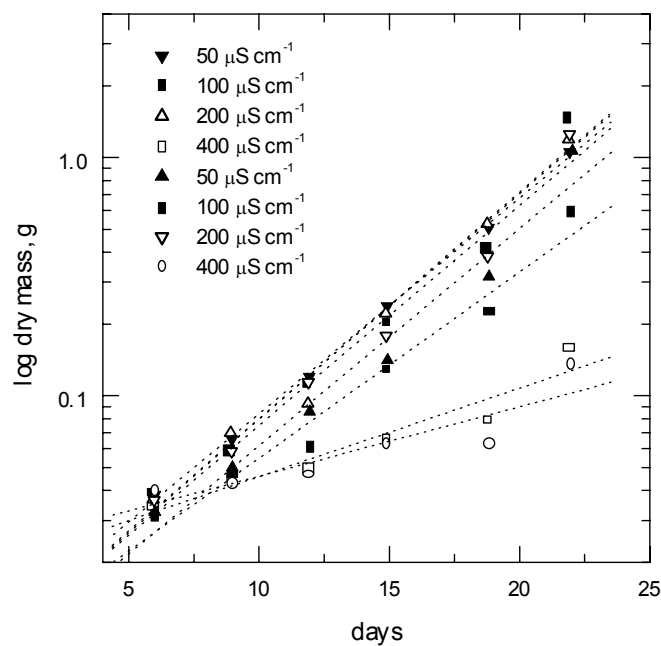
Tabell 1. Tillväxtkapaciteter för olika ljusintensiteter samt förhållande mellan rot:planta och torrsvikt:frisksvikt. CDW_P står för tillväxtkapacitet för planta beskriven i torrsviktswärde. DW_R/DW_P står för kvoten torrsvikt rot till torrsvikt planta. DW_S/FW_S står för kvoten torrsvikt skott till frisksvikt skott, medan DW_R/FW_R står för torrsvikt rot till frisksvikt rot

Ljusintensitet $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	CDW_P	DW_R/DW_P	DW_S/FW_S	DW_R/FW_R
50	0.23	0.18	0.08	0.06
100	0.24	0.17	0.08	0.07
350	0.33	0.25	0.08	0.05
430	0.34	0.27	0.08	0.05

Konduktivitet. Hög konduktivitet i kulturlösningen, $400 \mu\text{S cm}^{-1}$, gav en betydligt lägre tillväxtkapacitet än konduktiviteter lägre eller lika med $200 \mu\text{S cm}^{-1}$, som gav ungefär lika kapaciteter (figur 2).

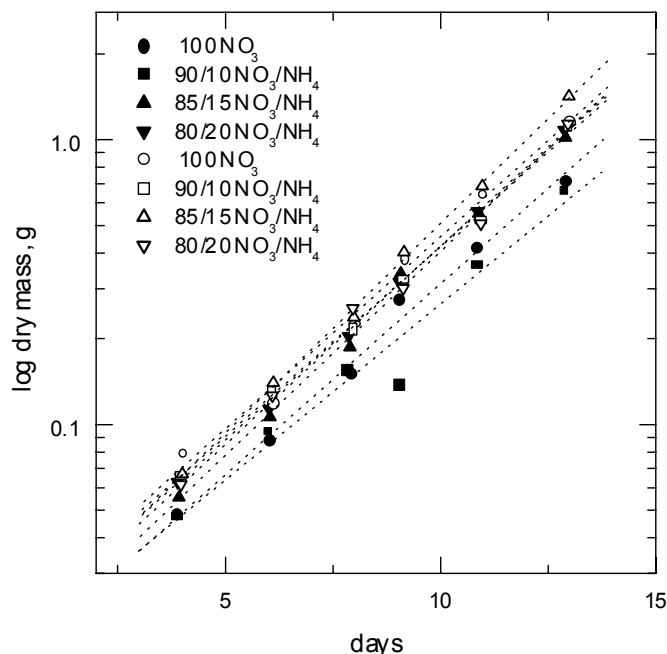


Figur 1. Tillväxtkapacitet för växter i olika ljusintensiteter beskriven som kontinuerliga skördedata för torrsvikt per planta ($r^2 = 0.99$ förutom för $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ där $r^2 = 0.97$).



Figur 2. Tillväxtkapacitet för växter med olika konduktiviteter beskriven som kontinuerliga skördedata för torrsvikt per planta ($r^2 = 0.97 - 0.99$ förutom för $400 \mu\text{S cm}^{-1}$ där $r^2 = 0.82 - 0.92$).

Kvävekällor. En kombination av 15 % ammonium och 85 % nitrat som kvävekälla gav den högsta tillväxtkapaciteten jämfört med andra viktsproportioner eller med enbart nitrat som kvävekälla (tabell 2, figur 3).



Figur 3. Tillväxtkapacitet för växter med olika proportioner mellan NO_3 och NH_4 beskriven som kontinuerliga skördedata för torrsvikt per planta ($r^2 = 0.99$ förutom för 90/10 i $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ där $r^2 = 0.96$). Fyllda symboler; $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ och ofyllda $430 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Tabell 2. Tillväxtkapaciteter för olika proportioner mellan nitrat och ammonium samt förhållande mellan rot:planta och torrsvikt:friskvikt i två icke begränsande ljusintensiteter. CDW_P står för tillväxtkapacitet för planta beskriven i torrsviktswärde. DW_R/DW_P står för kvoten torrsvikt rot till torrsvikt planta. DW_S/FW_S står för kvoten torrsvikt skott till friskvikt skott, medan DW_R/FW_R står för torrsvikt rot till friskvikt rot

NO_3/NH_4	ljusintensitet, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$							
	350 CDW_P	430 CDW_P	350 DW_R/DW_P	430 DW_R/DW_P	350 DW_S/FW_S	430 DW_S/FW_S	350 DW_R/FW_R	430 DW_R/FW_R
100/0	0.31	0.31	0.25	0.25	0.09	0.09	0.06	0.06
90/10	0.29	0.31	0.21	0.24	0.09	0.08	0.06	0.05
85/15	0.33	0.34	0.25	0.27	0.08	0.08	0.05	0.06
80/20	0.32	0.31	0.27	0.25	0.08	0.08	0.05	0.06

pH. pH mellan 5.4 och 6.2 resulterade i de högsta tillväxtkapaciteterna. I experimenten med olika lufttemperatur användes både pH 5.4 och 6.0.

Tabell 3. Tillväxtkapaciteter för olika pH samt förhållande mellan rot:planta och torr-
vikt:friskvikt. CDW_P står för tillväxtkapacitet för planta beskriven i torrviktsvärde. DW_R/DW_P
står för kvoten torrsvikt rot till torrsvikt planta. DW_S/FW_S står för kvoten torrsvikt skott till frisk-
svikt skott, medan DW_R/FW_R står för torrsvikt rot till frisksvikt rot

pH	proportion NO_3/NH_4 , $g\ g^{-1}$							
	85/15 CDW_P	100/0 CDW_P	85/15 DW_R/DW_P	100/0 DW_R/DW_P	85/15 DW_S/FW_S	100/0 DW_S/FW_S	85/15 DW_R/FW_R	100/0 DW_R/FW_R
5.2	0.32	0.27	0.28	0.31	0.08	0.08	0.05	0.06
5.4	0.33	0.30	0.26	0.30	0.08	0.08	0.05	0.06
5.6	0.34	0.27	0.25	0.29	0.07	0.08	0.05	0.06
5.8	0.33	0.30	0.26	0.30	0.08	0.08	0.05	0.06
6.0	0.33	0.28	0.27	0.29	0.08	0.08	0.05	0.06
6.2	0.34	0.28	0.27	0.27	0.08	0.07	0.05	0.06
6.4	0.31	0.30	0.22	0.27	0.08	0.07	0.06	0.06
6.6	0.25	0.23	0.16	0.27	0.10	0.08	0.08	0.06

Lufttemperatur. Den högsta tillväxtkapaciteten uppnåddes i 24°C.

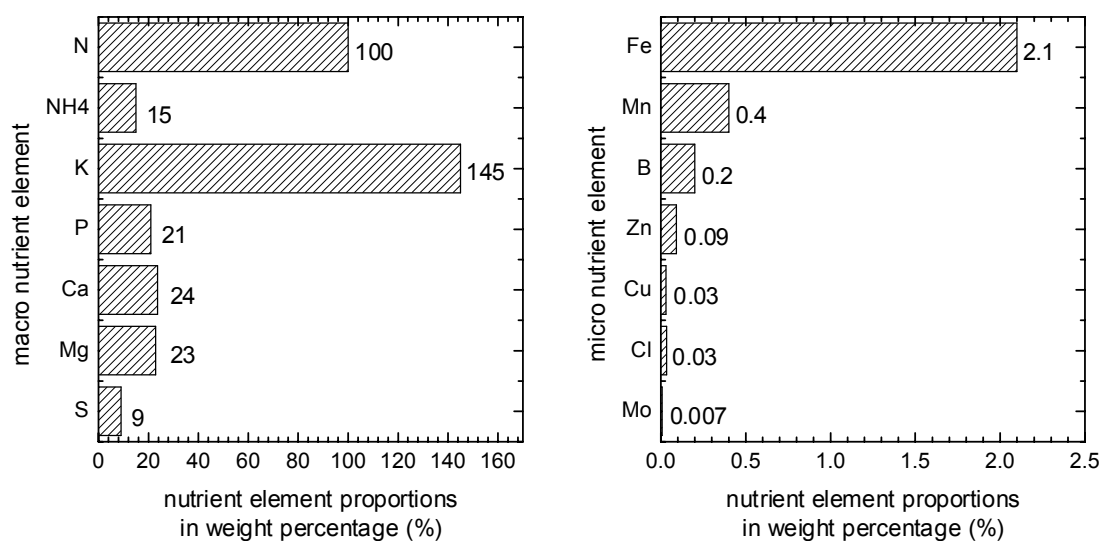
Tabell 4. Tillväxtkapaciteter för olika temperaturer, pH 5.4 och 6.0, näringslösning baserad
på 145 vikts-% kalium, samt förhållande mellan rot:planta och torrsvikt:friskvikt. CDW_P står
för tillväxtkapacitet för planta beskriven i torrviktsvärde. DW_R/DW_P står för kvoten torrsvikt
rot till torrsvikt planta. DW_S/FW_S står för kvoten torrsvikt skott till frisksvikt skott, medan
 DW_R/FW_R står för torrsvikt rot till frisksvikt rot

145% K °C	pH							
	5.4 CDW_P	6.0 CDW_P	5.4 DW_R/DW_P	6.0 DW_R/DW_P	5.4 DW_S/FW_S	6.0 DW_S/FW_S	5.4 DW_R/FW_R	6.0 DW_R/FW_R
10	0.18	0.18	0.26	0.25	0.10	0.11	0.06	0.06
12	0.21	0.21	0.19	0.22	0.10	0.10	0.06	0.06
14	0.27	0.25	0.24	0.23	0.09	0.10	0.06	0.07
16	0.31	0.31	0.25	0.26	0.08	0.08	0.06	0.06
18	0.33	0.33	0.26	0.27	0.08	0.07	0.05	0.05
20	0.44	0.41	0.25	0.25	0.08	0.08	0.06	0.06
22	0.47	-	0.23	-	0.07	-	0.06	-
24	0.50	-	0.21	-	0.07	-	0.06	-
26	0.47	0.46	0.21	0.21	0.07	0.07	0.06	0.06

Tabell 5. Tillväxtkapaciteter för olika temperaturer, pH 5.4 och 6.0, näringslösning baserad på 196 vikts-% kalium, samt förhållande mellan rot:planta och torrvt:friskvt. CDW_P står för tillväxtkapacitet för planta beskriven i torrvtsvärde. DW_R/DW_P står för kvoten torrvt rot till torrvt planta. DW_S/FW_S står för kvoten torrvt skott till friskvt skott, medan DW_R/FW_R står för torrvt rot till friskvt rot

196% K	pH							
	5.4	6.0	5.4	6.0	5.4	6.0	5.4	6.0
°C	CDW_P	CDW_P	DW_R/DW_P	DW_R/DW_P	DW_S/FW_S	DW_S/FW_S	DW_R/FW_R	DW_R/FW_R
10	0.18	0.17	0.26	0.25	0.10	0.11	0.06	0.07
12	0.22	0.23	0.20	0.22	0.10	0.10	0.06	0.06
14	0.26	0.27	0.25	0.24	0.09	0.09	0.06	0.06
16	0.31	0.30	0.26	0.26	0.08	0.08	0.06	0.06
18	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0.36	0.39	0.24	0.25	0.08	0.07	0.06	0.06
22	0.47	-	0.23	-	0.07	-	0.06	-
24	0.45	-	0.21	-	0.07	-	0.06	-

Näringsanalyser. Den framjusterade näringslösning som ledde fram till den högsta tillväxtkapaciteten visas i figur 6.



Figur 6. Nutrient element proportion in weight percentage of N.

Diskussion

Målsättningen med både de förberedande experimenten och huvudexperimenten var att fastslå förhållanden som var minst begränsande för upptagningen av näringsämnen och därmed för tillväxten.

De förberedande experimenten visade att olika överskott av ämnen som Mg, Ca och Na, dvs halter över den optimala i biomassan, inte var begränsande för den initiala tillväxten. Socker-

betsplantorna hade en mycket hög pH-sänkande aktivitet. Denna kraftiga och kontinuerliga sänkning av pH i kulturlösningen, justerades med intitrering av en pH-höjande lösning. För att det skulle vara möjligt att justera pH uppåt så att ett konstant pH-värde skulle upprätthållas, krävdes en hydroxidlösning. Natriumhydroxid var den hydroxidlösning som visade sig fungera på ett önskvärt sätt. Denna användes därför genomgående i experimenten. Även kalciumhydroxid fungerade bra men p.g.a. sin låga löslighetsprodukt som krävde mättade stamlösningar, användes inte denna hydroxid.

Fysiska hinder som begränsade utrymmet för rötter i rotkammaren minskade inte tillväxtkapaciteten, vilket togs som intäkt för att inte rotkammaren i sig begränsade tillväxten.

Inte heller någon skillnad mellan plantor från pelleterade och opelleterade fröer, i de preliminära experimenten, kunde noteras. Dock var det lättare att få en jämnhet i groningen hos opelleterade fröer, varför dessa användes i alla experimenten.

Detta betyder att ljusperiod, fotofluxtäthet, temperatur, pH, konduktivitet och näringsämnen kan betraktas vara fastställda som icke-begränsande, dvs optimala.

I låg ljusintensitet, 50 och 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, stiger andelen rot och sjunker därmed andelen skott under tillväxten de första 3 veckorna, medan i högre intensiteter, 350 och 430 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, en stabil kvot nås redan efter några dagar till en vecka.

I fasta substrat, typ jord, är rötterna beroende av (1) storlek och tillväxthastighet, (2) tillgång på näringsämnen i direkt närhet till rotytan och (3) näringsämnenas transport i jorden via massflöden eller diffusion (Clarkson 1985). I ett system där näringsämnen kontinuerligt sprayas på växternas rötter optimeras tillgången på näringsämnen genom att transporten till rotytan är i stort sett momentan. Tillgången på näringsämnen är optimerad och det enda som begränsar är växtens kapacitet att ta upp näringsämnen. Dock innebär optimerad tillgång att koncentrationen av näringsämnen inte får vara för hög så att begränsningar p.g.a. ex. osmotiska förhållanden uppstår. Detta betyder också att koncentrationen inte är avgörande för upptagningshastigheten. Det är tillförselhastigheten av näringsämnen som måste underhålla en upptagningshastighet. Eftersom konduktiviteter upp till och med 200 $\mu\text{S cm}^{-1}$ gav högst tillväxt var det avgörande att inte hålla högre koncentrationer i den näringslösning som sprayades på rötterna, däremot spelar inte variationer i koncentrationer under 200 $\mu\text{S cm}^{-1}$ någon roll för upptagnings- och tillväxthastighet, så länge tillförselhastigheten av näringsämnen kunde upprätthålla tillväxthastigheten.

Eftersom en blandning av 15 % ammonium och 85 % nitrat, som kvävekälla, gav bäst resultat användes dessa proportioner genomgående i försöken.

Det pH-värde som anges motsvarar pH i rhizosfären, vilket inte är liktydigt med det pH som växten har i sin omgivning kring rötterna.

De proportioner av näringsämnen som resulterade i den högsta upptagnings- och tillväxthastigheten, under icke-begränsande omgivningsförhållanden, var de som betraktades som optimala.

Då lufttemperaturen hade mycket liten inverkan på proportionerna av näringsämnen i biomassan gjordes inga korrigeringar för att ta hänsyn till detta.

Referenslista

- Clarkson, D. T. 1985. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 36; 77-115.
- Greger, M., Brammer, E., Lindberg, S., Larsson, G. och Idestam-Almquist, J. 1991. Uptake and physiological effects of Cadmium in Sugar Beet (*Beta vulgaris*) related to mineral provision. *J. Exp. Bot.* 42; 729-737.
- Hellgren, O. och Ingestad, T. 1996. A comparison between methods used to control nutrient supply. *J. Exp. Bot.* 47; 117-122.
- Ingestad, T. & Lund, A-B. 1979. Nitrogen stress in birch seedlings. I. Growth technique and growth. *Physiol. Plant.* 45; 137-148.
- Ingestad, T. och Lund, A-B. 1986. Theory and techniques for steady state mineral nutrition and growth of plants. *Scand. J. For. Res.* 1; 439-453.
- Ingestad, T., Hellgren O. och Lund Ingestad, A-B. 1994a. Data base for tomato plants at steady-state. Methods and performance of tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Solentos) under non-limiting conditions and under limitation by nitrogen and light. Department of Ecology and Environmental Research, Swedish University of Agricultural Sciences. Report No. 74, ISSN 0348-422x. ISRN SLU-EKOMIL-R-74--SE. The data base is available through anonymous ftp: ftp.sunet.se in the directory \pub\science\Plant_ecophysiology\Growth_analysis.
- Ingestad, T., Hellgren O. och Lund Ingestad, A-B. 1994b. Data base for birch plants at steady-state. Performance of birch plants (*Betula pendula* Roth.) under non-limiting conditions and under limitation by nitrogen and light. Department of Ecology and Environmental Research, Swedish University of Agricultural Sciences. Report No. 75, ISSN 0348-422x. ISRN SLU-EKOMIL-R-75--SE. (The data base is available through anonymous ftp, see Ingestad et al. 1994a).
- Ingestad, T., Hellgren, O. och Lund Ingestad, A-B. 1996. Data base for birch and tomato plants at steady-state. Methods and performance of birch plants (*Betula pendula* Roth.) and tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Solentos) under limitation by CO₂ and at enhanced CO₂ concentration in the air. - Biotron, Swedish University of Agricultural Sciences. Plant database 3, ISSN 1401-8403. (The data base is available through anonymous ftp, see Ingestad et al. 1994a).
- Olanders, J. 1996. Växtnäringsanalys (i Sockerbetans etablering och tidiga tillväxt). SLU, Institutionen för växtskyddsvetenskap, Rapport 6; 31-33.