

## Om formuleringen af næringsstofopløsninger og dyrkning af planter i vandkultur

*On formulation of nutrient solutions and cultivation of plants in water culture*

Niels Erik Nielsen

### Resumé

Ud fra den antagelse, at lokaliseringen af det hastighedsbestemmende led i planters optagelse af næringsstoffer varierer med ændringer i intensitetsniveauet af plantenæringsstoffer i den væske, som omgiver rødderne, opstilles et nyt princip for formulering af næringsstofopløsninger til dyrkning af planter i vandkultur. Det »optimale« forhold mellem ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), fosfat, sulfat og summen af kationer (kalium, magnesium og calcium) i vandkulturopløsningen (næringsstofopløsning I) beregnes ud fra forholdet mellem disse næringsstoffer i den dyrkede afgrøde. Optagelsen af ioner fra næringsstofopløsning I følges ved måling af den elektriske ledningsevne. De ioner, som optages af planterne fra næringsstofopløsning I, tilsættes ved titrering med næringsstofopløsning II<sub>a</sub> eller II<sub>b</sub>, hvori plantenæringsstofferne findes i det forhold, som de optages af planterne.

For at opretholde en given pH i næringsstofopløsning I er forholdet mellem  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  i næringsstofopløsning II<sub>a</sub> 30 procent lavere end beregnet for næringsstofopløsning I, medens forholdet mellem  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  i næringsstofopløsning II<sub>b</sub> er 30 procent højere end beregnet for næringsstofopløsning I.

Hvis pH og ledningsevnen begge er faldende, tilsættes næringsstofopløsning II<sub>a</sub>. Er pH stigende, og ledningsevnen faldende, tilsættes næringsstofopløsning II<sub>b</sub>.

**Nøgleord:** Næringsstofopløsninger, vandkultur.

### Summary

A new concept for formulating the composition of water culture solutions is presented. It is based on the assumption that the location in the plant of the rate determining step in ion uptake changes with the ion activity at the root surface.

The »optimum« ratio of ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), phosphate and cations (potassium, calcium and magnesium) in the water culture solution (Solution I) is calculated from the ration of the nutrient elements in the crop under cultivation.

The uptake of nutrient elements from Solution I is followed by measuring the electric conductivity. The nutrients absorbed from Solution I are replaced by titration with Solution II<sub>a</sub> or II<sub>b</sub> in which the ratio of the nutrient elements is the same as those of the absorbed nutrients and only differing in their  $\text{NH}_4/\text{NO}_3$ -ratio.

In order to maintain a given pH of Solution I by addition of Solution II<sub>a</sub> or II<sub>b</sub> the former has a  $\text{NH}_4/\text{NO}_3$ -ratio 30 per cent lower, and the latter solution has a  $\text{NH}_4/\text{NO}_3$ -ratio 30 per cent higher than that calculated for Solution I. If pH and conductivity of Solution I decreases, Solution II<sub>a</sub> is added. If pH increases and the conductivity decreases, Solution II<sub>b</sub> is added.

**Key-words:** Nutrient solutions, water culture.

## Indledning

Metoder, anvendt til dyrkning af planter i vandkuldture, kan deles i to hovedtyper:

a) »Large volume Cultures«, hvor planterne har deres rødder neddyppet i en beholder, som indeholder et stort volumen af næringsstofopløsning under omrøring, og

b) »Flowing cultures«, hvor rødderne er omgivet af en kontinuerligt strømmende næringsstofopløsning.

Af de to hovedtyper er dyrkning af planter i »Flowing cultures« et princip, som muliggør en konstant optimering af planterøddernes forsyning med ilt og næringsstoffer.

Indtil 1929 forblev dyrkning af planter i vandkultur næsten udelukkende en laboratoriemetode, anvendt ved studier af planters ernæring og vækst. I 1929 forsøgte Greicke imidlertid med et erhvervsmæssigt sigte at dyrke tomat i vandkultur. Planterne voksede på net over beholdere med næringsstofopløsning, hvori rødderne var neddyppet. Det viste sig dog hurtigt, at dyrkning af tomat i vandkultur ikke kunne konkurrere med dyrkning på jord.

Nogle år senere udvikledes den såkaldte »gruskulturmethode« Ellis og Swaney (1938), hvor planterne dyrkes på grus, som med jævne mellemrum fyldes med næringsstofopløsning fra en central tank. En tilfredsstillende iltforsyning af rødderne var opnåelig ved denne teknik.

I Holland modificeredes dette system til det såkaldte Filipposystem, Filipp (1947). Den væsentligste forskel mellem det hollandske og det amerikanske system er følgende: I Filipposystemet pumpes næringsstofopløsningen ind gennem bedet af grus og tilbage til tanken, således at der sker en fuldstændig udskiftning af opløsningen i bedet. I det amerikanske system fyldes bedet op med næringsstofopløsning og afdrænes gennem den samme studs. I bedet findes derfor en blanding af ny og gammel næringsstofopløsning.

I nyere tid er der af Cooper (1973) i England udviklet en anvendelig kulturteknik, hvor

planterne dyrkes i render, gennem hvilke der pumpes, og derved cirkuleres næringsstofopløsning fra et centralt tankanlæg.

Ligeledes har tiltrækning af vedagtige planter, som »containerkulturer« i et åbent system været særdeles effektivt, sådan som den er anvendt ved Statens Forsøgsstation i Hornum *Knoblauch* (1971). Ifølge denne kulturteknik dyrkes planterne i klodser af rock wool (Grodan), som gennem et drypslangesystem tilføres en fortyndet næringsstofopløsning i overskud.

Dyrkning af planter i vandkultur efter de metoder, som er nævnt ovenfor, bygger alle på det princip, at næringsstofopløsningen udskiftes eller fornyes med jævne mellemrum. Et alternativ ville være et princip, hvor næringsstofopløsningen regenereres, således at de næringsstoffer, som planterne fjerner, med jævne mellemrum tilsættes. Et sådant princip har været anvendt af *Ingestad* (1970) (1971) (1973a) (1973b). Dette princip udgør ligeledes et udgangspunkt for nærværende afhandling om formulering af næringsstofopløsninger og dyrkning af planter i vandkultur.

## Om udgangspunktet for formulering af næringsstofopløsninger

Formulering af vandkulturopløsningens kemiske sammensætning baserede *Ingestad* (1971) på den hypotese, at planters krav til forsyning med næringsstoffer for opnåelse af en vis maksimum produktion er tilfredsstillende, når:

- Alle nødvendige næringsstoffer findes i planten i et optimalt forhold.
- Forholdet er optimalt mellem ammonium og nitrat i den opløsning, som omgiver rødderne.
- Saltstyrken i vandkulturopløsningen er optimal.

*Ingestad* antager, at a) er opfyldt, når forholdet mellem koncentrationerne af de nødvendige plantenæringsstoffer i næringsstofopløsningen er de samme som i tørstoffet af planter med maximal vækst. Optimering af forhold

det mellem ammonium og nitrat (pkt. b) og af saltstyrken (pkt. c) søges opnået ved hjælp af resultater af dyrkningsforsøg, *Ingestad* (1970) (1971) (1973a) (1973b). Under planternes vækst kontrolleredes den totale saltkoncentration i næringsstofopløsningen ved måling af den elektriske ledningsevne og reguleredes ved tilsætning af vand eller en næringsstofopløsning, hvori næringsstofferne forekom i det forhold, som de formodedes optaget i planterne.

Regulering af pH gennemførtes ved titrering med en syre eller en base. Som syre anvendes en næringsstofopløsning tilsat salpetersyre og som base en næringsstofopløsning tilsat ammoniak. Der tilstræbes på denne måde en konstant og optimal pH-værdi og total koncentration af næringsstofferne i den opløsning, hvori planterne vokser.

En forudsætning for, at Ingestads hypotese og forslag til formulering af den kemiske sammensætning af vandkulturopløsninger kan være universel, er imidlertid, at forholdet mellem hastigheden (v) af optagelse i planter og den korresponderende ion-koncentration (c) (ionaktivitet) i vandkulturopløsningen er af samme størrelse for alle ioner.

Det er velkendt, og det kan ligeledes ses ud fra resultaterne i tabel 1, at v/c varierer betydeligt fra plantenæringsstof til plantenæringsstof. Som følge heraf må formulering af den kemiske sammensætning af næringsstofopløsninger til dyrkning af planter i vandkultur gennemføres under hensyntagen til placeringen af det hastighedsbestemmende led og kinetikken for planters optagelse af næringsstoffer, *Nielsen* (1975b).

Problemstillingen vil herefter være:

- 1) Formulering af en næringsstofopløsning *Næringsstofopløsning I*, således at ionaktiviteten (koncentrationen) af kvælstof ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ ), fosfat, sulfat, kalium, calcium, magnesium, jern, mangan, zink, kobber, bor, chlorid, molybdæn og brintioner er af en sådan størrelse og med et sådant indbyrdes forhold, at planterne optager næringsstoffer netop i det forhold,

som giver et højt udbytte af en god kvalitet.

- 2) Formulering af en næringsstofopløsning, *Næringsstofopløsning II*, hvor næringsstofferne nævnt under 1) findes i det forhold, hvori planterne optager disse fra *Næringsstofopløsning I*. *Næringsstofopløsning II* anvendes til at regenerere *Næringsstofopløsning I* under planternes vækst.

Formulering af *Næringsstofopløsning I* baseres dels på plantens kemiske sammensætning og dels på erfaringsmateriale opnået ved dyrkningsforsøg, medens formuleringen af *Næringsstofopløsning II* baseres udelukkende på plantens kemiske sammensætning gennem vækstperioden.

#### Om formulering af *Næringsstofopløsning I*.

Jord har en betydelig stødpudekapacitet, der modvirker større udsving i pH. Ved dyrkning af planter i vandkultur, som har en lille stødpudekapacitet, vil selv små indbyrdes forskydninger i optagelsen af de 13 næringsstoffer (kat- og anioner) fra næringsstofopløsningen medfører betydelige ændringer i pH. Det er et forhold, der kan tages hensyn til ved valg af det rette  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ -forhold i forbindelse med formuleringen af *Næringsstofopløsning I*. Antages det, at planter ved dyrkning i vandkultur er »mættet« med næringsstofferne kvælstof (N), phosphor (P), sulfat (S), kalium (K), calcium (Ca) og magnesium (Mg), vil det hastighedsbestemmende led i optagelsesprocesserne af N, P og S være deres indbygning i organiske stoffer, og af K, Ca og Mg vil det være deres binding til nydannede organiske stoffer, *Nielsen* (1976a) (1976b).

Fremholdes endvidere, at summen af kationkoncentrationer ( $c_K + c_{\text{Na}} + 2c_{\text{Ca}^{2+}} + 2c_{\text{Mg}^{2+}}$ ) i m.eq./g tørstof har en karakteristisk størrelse for en given planteart med en given fysiologisk alder og indhold af kvælstof, giver dette et udgangspunkt for formulering af *Næringsstofopløsning I*, fordi planters optagelse af N, P og S og summen af kationkoncentrationer ( $c_K + c_{\text{Na}} + 2c_{\text{Ca}^{2+}} + 2c_{\text{Mg}^{2+}}$ ) under

Tabel 1. Ækvivalensforholdet mellem kalium (K), calcium (Ca) og Magnesium (Mg) i jordvæsken, og det korresponderende forhold mellem disse ioner i tørstoffet i bygplanter

ion	Forholdet i		Forholdet i	
	jordvæske <sup>(1)</sup>	planter <sup>(1)</sup>	jordvæske <sup>(2)</sup>	planter <sup>(2)</sup>
K .....	16	74	10	77
Ca .....	60	16	82	19
Mg .....	24	10	8	4

<sup>(1)</sup>Hansen (1972), 12 dage efter planternes fremspiring i sandjord.

<sup>(2)</sup>Nielsen (upublicerede data), 29 dage efter planternes fremspiring i lavmosejord.

disse forhold vil være uafhængig af deres koncentration i næringsstofopløsningen. Næringsstofopløsning I kan derfor formuleres således, at forholdet mellem koncentrationerne af N, P, S og summen af kationkoncentrationer ( $c_K^+ + 2c_{Ca}^{2+} + 2c_{Mg}^{2+}$ ) er det samme som det forhold, hvori de fjernes af planterne. Dette vil bevirke, at vedvarende ophobninger eller fjernelser af brintioner ikke forekommer i næringsvæsken.

Hvis en kultur af planter med en høj produktion og kvalitet af det ønskede planteprodukt indeholder a% N, b% P, c% S, d% K, e% Ca og f% Mg er ækvivalensforholdet, hvori plantekulturen optager disse næringsstoffer A : B : C : D : E : F, idet  $(a/14.0) = A$ ,  $(b/31.0) = B$ ,  $(c/16.0) = C$ ,  $(d/39.1) = D$ ,  $(e/20.0) = E$  og  $(f/12) = F$ .

Skal denne kultur af planter dyrkes i vandkultur, formuleres Næringsstofopløsning I derfor således, at den indeholder disse næringsstoffer i ækvivalensforholdet A : B : C : (D + E + F).

Da  $(A+B+C) > (D+E+F)$  i planten angiver

$$\frac{((A+B+C) - (D+E+F)) \cdot 100}{A}, \text{ hvor mange}$$

procent af kvælstoffet, der skal tilføres Næringsstofopløsning I som ammoniumnitrat. Halvdelen heraf angiver, hvor mange procent af kvælstoffet, der tilføres som ammonium for at opnå det rette forhold mellem N, P, S og summen af kationskoncentrationer ( $c_K^+ + 2c_{Ca}^{2+} + 2c_{Mg}^{2+}$ ).

Resultaterne i tabel 1 giver et udgangspunkt for formulering af det relative forhold mellem koncentrationerne af K, Ca og Mg i Næringsstofopløsning I. Sættes summen af kationkoncentrationer ( $c_K^+ + 2c_{Ca}^{2+} + 2c_{Mg}^{2+}$ ) = 100 i tabel 1, er optimalt intervallet af  $c_K$  omkring 10–30 % af  $2c_{Ca}^{2+}$  omkring 40–60 % og af  $2c_{Mg}^{2+}$  omkring 10–30 %. For en given kultur kan grænserne for disse intervaller fastlægges med større nøjagtighed ved hjælp af resultater af dyrkningsforsøg.

Tabel 2. Hidtil anvendte koncentrationsniveauer af mikronæringsstofferne, når koncentrationen af kvælstof varierer mellem 5–20 mM (70–280 ppm) i næringsstofopløsninger

Mikronæringsstof	A	B	C	D	E
Jern $\mu\text{M}$	35–180	12.5–50	13–52	45	9–36
Mangan »	2–18	3.5–14	3.3–13	36	5–20
Zink »	0.3–3	0.3–1.2	0.3–1.4	1.5	0.32–1.3
Copper »	0.2–1.6	0.3–1.2	0.3–1.3	0.3	0.32–1.3
Bor »	30–100	7–28	10–40	46	13–52
Chlorid »	30–100				0.6–2.4
Molybdæn »	0.1–1	0.12–0.48	0.17–0.68	0.52	0.05–0.2

A Hewitt (1966)

C Cooper (1973)

E Ingestad (1973)

B Knoblauch (1971)

D Steiner (1966)

Tabel 2, som er baseret udelukkende på erfaringsmateriale, giver en rettesnor for koncentrationsniveauer af mikronæringsstofferne i Næringsstofopløsning I, når koncentrationer af kvælstof varierer mellem 5 og 20 mM (70–280 ppm) i opløsningen.

På nuværende tidspunkt findes der således ikke et teoretisk grundlag for valg af det relative forhold mellem koncentrationerne af mikronæringsstofferne i Næringsstofopløsning I. Til trods for dette er det i reglen muligt ved anvendelse af de koncentrationsniveauer, som er angivet i tabel 2, at dyrke planter i vandkultur uden forekomst af synlige symptomer hos planterne på mangel eller overmål af disse mikronæringsstoffer.

For at undgå udfældning må der ved fremstilling af Næringsstofopløsning I tages hensyn til opløseligheden af de mulige salte. Anvendelse af salpetersyre eller phosphorsyre, således at pH er omkring 5,0, kan i reglen afværge udfældninger af f. eks. phosphater og mikronæringsstoffer. Mikronæringsstofferne jern, mangan, zink og kobber kan chelateres ved tilsætning af f. eks. EDTA (ethylen-diamin-tetra-eddikesyre).

Den optimale totalkoncentration af salte i Næringsstofopløsning I fastlægges ved hjælp af resultater af dyrkningsforsøg.

**Om formulering af Næringsstofopløsning II<sub>a</sub> og II<sub>b</sub>**  
Næringsstofopløsning II<sub>a</sub> og II<sub>b</sub> tilsættes Næringsstofopløsning I og anvendes til regenerering og regulering af dens kemiske sammensætning f. eks. én gang i døgnet. I Næringsstofopløsning II<sub>a</sub> og II<sub>b</sub> skal de 13 nødvendige næringsstoffer derfor findes i det forhold, hvori planterne optager disse fra Næringsstofopløsning I.

Ud fra kendskab til afgrødens kemiske sammensætning eller til ændringer i den kemiske sammensætning af Næringsstofopløsning I bestemmes det relative ækvivalensforhold mellem næringsstofferne under optagelsen i planterne, således som det kan udledes af beskrivelsen under fremgangsmåden for fremstilling af Næringsstofopløsning I. På dette grundlag frem-

stilles Næringsstofopløsning II<sub>a</sub> og II<sub>b</sub>. Da pH under planternes vækst i Næringsstofopløsning I kan reguleres ved ændringer i forholdet mellem  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$ , er ammoniumindholdet i Næringsstofopløsning II<sub>a</sub> ca. 30 % lavere end det beregnede for Næringsstofopløsning I, medens ammoniumindholdet i Næringsstofopløsning II<sub>b</sub> er 30 % højere.

Hvis både pH og ledningsevnen i Næringsstofopløsning I falder, tilsættes Næringsstofopløsning II<sub>a</sub>, medens Næringsstofopløsning II<sub>b</sub> tilsættes, hvis pH stiger, og ledningsevnen falder i forhold til de valgte niveauer.

### Konklusion

Udvikling af en kulturteknik for dyrkning af planter i vandkultur med erhvervmæssigt sigte omfatter et faktorkompleks, hvoraf nogle faktorer er af biologisk natur, medens andre er af teknisk og erhvervsøkonomisk natur. En løsning af de biologiske forudsætter et indgående kendskab til kortlægning af planters reaktion på vækstoffaktorenes aktion med henblik på et valg af de intensitetsniveauer og kombinationer af vækstoffaktorerne, som optimerer produktionen.

Ud fra den foreliggende viden på området synes det fremlagte princip for formulering af næringsstofopløsninger at være et trin imod en løsning af de biologiske problemer.

### Litteraturliste

- Cooper, A. J.* (1973): Rapid crop turn-round is possible with experimental nutrient film technique. *The Grower* p. 1048–1052.
- Ellis, C., Swaney, N. W.* (1938): Soilless growth of plants. New York: Reinhold Publ. Corp. pp. 277.
- Filipp, H.* (1947): Verschillen tussen grind-, Wateren grond-cultuur. *Vakblad voor Bloemisterij*. 3: 8–9.
- Gericke, W. F.* (1929): Aquaculture, a means of crop production. Paper presented before the meeting of the Physiological section of the Bot. Soc. of America, de Moines, Iowa, pp. 1.
- Hansen, E. M.* (1972): Studies on the chemical composition of isolated soil solution and the cation absorption by plants. I. Relationship between form and amount of added nitrogen

- and absorption of N, K, Ca and Mg by barley. *Pl. Soil* 37: 589-607.
- Hewitt, E. J.* (1966): Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. Technical Communication, No. 22, pp. 547. Commonwealth Agricultural Bureaux, England.
- Ingestad, T.* (1970): A definition of optimum nutrient requirements in birch seedlings. I. *Physiologia Pl.* 23: 1127-1138.
- Ingestad, T.* (1971): The concept of nutrient requirements in birch seedlings. II. *Physiologia Pl.* 24: 118-125.
- Ingestad T.* (1973a): Mineral Nutrient requirements of *Vaccinium vitis idaea* L. and *V. ingretillus* L. *Physiologia Pl.* 29: 239-246.
- Ingestad T.* (1973b): Mineral Nutrient Requirements of Cucumber Seedlings. *Pl. Physiol.* 52: 332-338.
- Knoblauch, F.* (1971): Gødskning af planter dyrket i inaktivt substrat. 1006. Medd. fra Statens forsøgsvirksomhed i Planteavl, p.p. 4.
- Nielsen, N. E.* (1976a): Vækst, vækstfaktorer og dyrkning af planter. *Tidsskr. f. Planteavl.* 80: 170-174.
- Nielsen, N. E.* (1976b): Planters ionoptagelse og dyrkning af planter i vandkultur. *Tidsskr. f. Planteavl.* 80: 181-187.
- Steiner, A. A.* (1966): The influence of the chemical composition of a nutrient solution on the production of tomato plants. *Pl. Soil* 24: 454-466.

Manuskript modtaget den 1. oktober 1975.