

**SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET**

Biologisk processreglering i växthus

Biological Process Control in Greenhouses

Göran Nilsson

Institutionen för lantbruksteknik

**Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Agricultural Engineering**

**Rapport 158
Report
Uppsala 1992**

ISSN 0283-0086

ISRN SLU-LT-R--158--SE

DOKUMENTDATABLAD för rapportering till SLU:s lantbruksdatabas LANTDOK,
Svensk lantbruksbibliografi och AGRIS (FAO:s lantbruksdatabas)

Institution/motsvarande Sveriges lantbruksuniversitet Institutionen för lantbruksteknik Avd. för park- och trädgårds- teknik		Dokumenttyp Rapport	
		Utgivningsår 1992	Målgrupp F
Författare/upphov Göran Nilsson			
Dokumentets titel Biologisk processreglering i växthus Biological process control in greenhouses			
Amnesord (svenska och /eller engelska) Reglering, blomutveckling, växthus, bildanalys, glesning, matematisk modell Control, floral development, greenhouse, digital image analysis, spacing, mathematical models			
Projektnamn (endast SLU-projekt)			
Serie-/tidskriftstitel och volym/nr Sveriges lantbruksuniversitet Inst. för lantbruksteknik Rapport 158		ISBN/ISRN SLU-LT-R-158--SE ISSN 0283 - 0086	
Språk Svenska	Smf-språk Svenska, Engelska	Omfång 57s + appendix	Antal ref. 10

Postadress

SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET
Ultunabiblioteket, Förrävsavdelningen/LANTDOK
Box 7071
S- 750 07 UPPSALA
Sweden

Besöksadress

Centrala Ultuna 22
Uppsala

Telefonnummer

018-67 10 00 vx
018-671103

Telefax

018-3010 06

FÖRORD

Föreliggande rapport redovisar arbetet i projektet "Biologisk processreglering i växthus". Detta projekt har varit finansierat av Skogs- och jordbrukets forskningsråd (SJFR).

Projektet som bedrivits i Alnarp har varit ett samarbete mellan institutionerna för lantbruksteknik (LT), lantbrukets byggnadsteknik (LBT) och trädgårdsvetenskap (TV). Arbetet har genomförts av Civ.ing. Göran Nilsson (LBT) med Prof. Thomas Nybrant (LT) som projektledare och med biologisk handledning av Doc. Rolf Larsen (TV). Genom detta projekt har ett värdefullt interdisciplinärt samarbete kunnat etableras, vilket bland annat lett till en fortsättning i SJFR-projektet "Reglering av prydnadsväxters utveckling i växthus".

Vi inom projektet känner stor tacksamhet gentemot Driftsledare Gerdt Olsson med medarbetare vid odlingsavdelningen vid Institutionen för trädgårdsvetenskap, Alnarp. Deras yrkesskicklighet och intresse för projektet har i hög grad bidragit till dess lyckosamma genomförande.

Uppsala i mars 1992

Thomas Nybrant
Professor

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning	7
<i>Summary</i>	8
Bakgrund	9
Inledning	9
Problembeskrivning	9
Projekt mål	11
Biologisk bakgrund	12
Modell för <i>Cinerarias</i> blomutveckling	12
Utveckling av regleralgoritm	16
Grundprincip för reglering	16
Beräkning av önskad utvecklingshastighet	17
Beräkning av framtida instrålning och dagslängd	19
Reglerexperiment	24
Simulering	24
Simulering av klimat och utveckling	25
Exempel på resultat från en simulering	26
Jämförelse och val av regulator	28
Praktiska experiment	29
Försöksuppläggning	29
Genomförda experiment	29
Registrering av data	30
Resultat av experiment	30
Kalibrering av utvecklingsstadier	33
Sammanfattning	36
Förberedande studie av adaptiv reglering av blomutveckling	36
Resultat av känslighetsanalys	36
Simulering med adaptiv reglering	38
Bildanalys som metod för registrering av kulturförloppet hos ett krukväxt- bestånd	39
Identifiering av blomknoppens utveckling med digital bildanalys	39
Material och metoder	39
Resultat	43
Diskussion	44
Bestämning av krukväxtbeståndets planttäthet med digital bildanalys	44
Material och metoder	45
Resultat	45
Diskussion	48
Prognosmodell för glesning	49
Material och metoder	49
Modellbeskrivning	49
Parameterestimering	52
Validering	52
Resultat	53
Diskussion	56
Litteraturreferenser	57
Appendix	

SAMMANFATTNING

Dagens moderna växthus med dess tekniska driftsutrustning innebär en stor investering för växthusföretaget. Detta ställer i sin tur krav på maximalt utnyttjande av produktionsmedlen. Genom att använda datorer för övervakning och reglering av produktionsprocessen kan denna styras på ett effektivare sätt än vad som tidigare varit möjligt. Hittills har främst växthusklimatet varit i centrum för reglering. Men genom att utveckla biologiska tillväxt- och utvecklingsmodeller för olika kulturslag finns möjligheten att styra en kulturs tillväxt, utveckling, glesning och andra skötselåtgärder.

Denna rapport visar att det är möjligt att styra en kulturs utveckling noggrannt genom att variera växthusklimatet. Genom att utnyttja en biologisk utvecklingsmodell för *Cineraria (Senecio x hybridus (Hyl.) 'Molls stam')* har en regleralgoritm framtagits för styrning av kulturens blomutveckling. Experiment har visat att man med hög precision kan styra utvecklingen så att ett förutbestämt utvecklingsstadium inträffar vid önskad tidpunkt. Datorsimuleringar har visat att det även bör vara möjligt att använda adaptiva (självinställande) regulatorer för att styra utvecklingen.

I projektet undersöktes också möjligheten att använda digital bildanalys för identifiering av kulturens tillväxt och utveckling. Detta skulle möjliggöra en automatisk övervakning och reglering av processen. För att kunna identifiera *Cinerarias* blomutvecklingsstadier undersöktes ett samband mellan andel blå färg (blomfärg) i bilden och registrerade utvecklingsstadier. Denna metod fungerar dock endast mot slutet av odlingsperioden. För att kunna identifiera stadierna med större precision under hela odlingsperioden krävs en mer avancerad bildanalysutrustning än vad som fanns tillgänglig i projektet.

Bildanalysutrustningen användes också för övervakning av kulturens tillväxt i horisontalplanet. Ett samband bestämdes mellan planttäthet, plantans diameter och andel av odlingsytan som är täckt av bladverket. Genom mäta plantans diameter med bildanalyssystemet och bestämma en önskad andel av odlingsytan som skall vara täckt, kan önskad planttäthet således bestämmas i varje ögonblick. Detta medför att bildanalys kan användas för övervakning i ett system för automatisk glesning (t.ex. med robot). För att kunna prognosticera tidpunkten för glesningen utvecklades en glesningsmodell. Experiment visade att det är möjligt att med modellens hjälp kunna prognostisera tidpunkt för glesning.

SUMMARY

With its sophisticated technical systems the modern greenhouse of today implies major investments for the greenhouse nursery. Maximum utilization of the production equipment and high efficiency is therefore necessary. Computers offer a more efficient way of controlling and monitoring the production processes than was previously possible. So far, it has been the greenhouse climate that has been in focus for computerized control. However, by developing mathematical models describing various aspects of biological growth and development, the potential is created for computerized control of plant growth, development, spacing, and other production processes.

*This report shows that computerized control of the development of a pot plant is possible. A control algorithm was developed based on an existing model describing the floral development of *Cineraria* (*Senecio x hybridus* (Hyl.) 'Molls stam'). In simulations and experiments the floral development was controlled by changing the greenhouse climate. The extent of the climate changes was based on comparisons between desired and actual development. The experiments showed that crop development could be controlled with a high precision. Furthermore, computer simulations indicated that it is possible to use adaptive regulators in future strategy for controlling crop development.*

*The potential of digital image analysis for identifying stages of crop development and growth was also studied. In theory this should make automatic monitoring and control of the growth processes possible. For identifying *Cineraria*'s floral development the relation between percentage of flower colour and registered stage of floral development was investigated. However, the experiments showed that this approach could only be used during the end of the cultivation period. For precise identification of earlier stages of development more advanced technique and equipment is needed than those adapted.*

Further investigations of image analysis showed that the studied equipment could be used to monitor the growth of the plant canopy in terms of horizontal expansion. A model was constructed defining the relation between plant density, plant diameter, and bench area covered by the crop canopy. By measuring the plant diameter with the image system and by determining a desired area covered by the crop canopy, it is possible at any time to calculate a desired plant density. A further model was now developed making it possible to predict the time of spacing of the pot plant crop in relation to canopy growth. Experiments showed that this model made acceptable predictions. Combined, the two models make it possible to use image analysis as a means of monitoring the process in an automatic spacing system.

BAKGRUND

INLEDNING

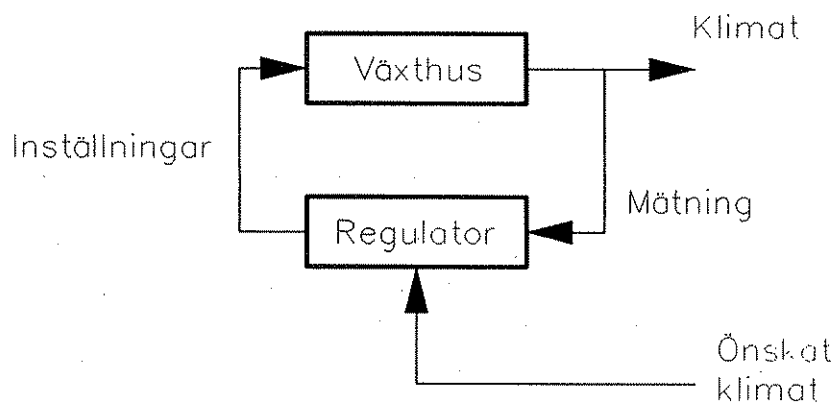
Energikrisen i början på 1970-talet samt den snabba utvecklingen på datorsidan har under de sista tio åren medfört en stark teknisk utveckling av odling i växthus. Kombinationen av rörlig isolering och dubbelskiktade täckningsmaterial, energilagring, värmepumpar med mera har minskat företagens energiförbrukning. Med konstbelysning och CO₂-gödning har kulturtiden kortats ned och avkastningen ökat. Datorer har dessutom gjort det möjligt att styra växthusklimatet med större precision än tidigare, samtidigt som odlare erbjuds stora möjligheter till olika typer av klimatregistreringar.

Odling på flyttbara bord, i en eller två våningar, har markant ökat utnyttjandet. Flyttbarheten innebär också att nya produktionsprinciper, till exempel linjeproduktion, har börjat tillämpas (Kjellström & Eriksson, 1988). I vissa stora holländska företag görs idag de första ansatserna till robotisering av vissa arbetsmoment, som glesning av krukväxter, sortering av produkter och bekämpningsmoment. Det moderna växthuset med dess tekniska driftsutrustning innebär en stor investering, vilket i sin tur ställer krav på maximalt utnyttjande av produktionsmedlen.

För att kunna uppfylla kraven på ett bättre utnyttjande av växthusarealen, både i tid och rum, krävs att man på något vis kan styra kulturens tillväxt och utveckling. Att mera precist kunna säga att kulturomgången är klar vid en viss tidpunkt, underlättar planeringen i växthuset. Leveranstiden kan härigenom fastställas långt innan kulturen är färdig till försäljning.

PROBLEMBESKRIVNING

I moderna växthus används idag datorer för övervakning och reglering av klimatet. Faktorer som påverkar plantornas tillväxt såsom lufttemperatur och belysning kan därigenom styras på ett effektivt sätt i enlighet med odlarens önskemål. Den principiella uppbyggnaden av sådana reglersystem framgår av figur 1.



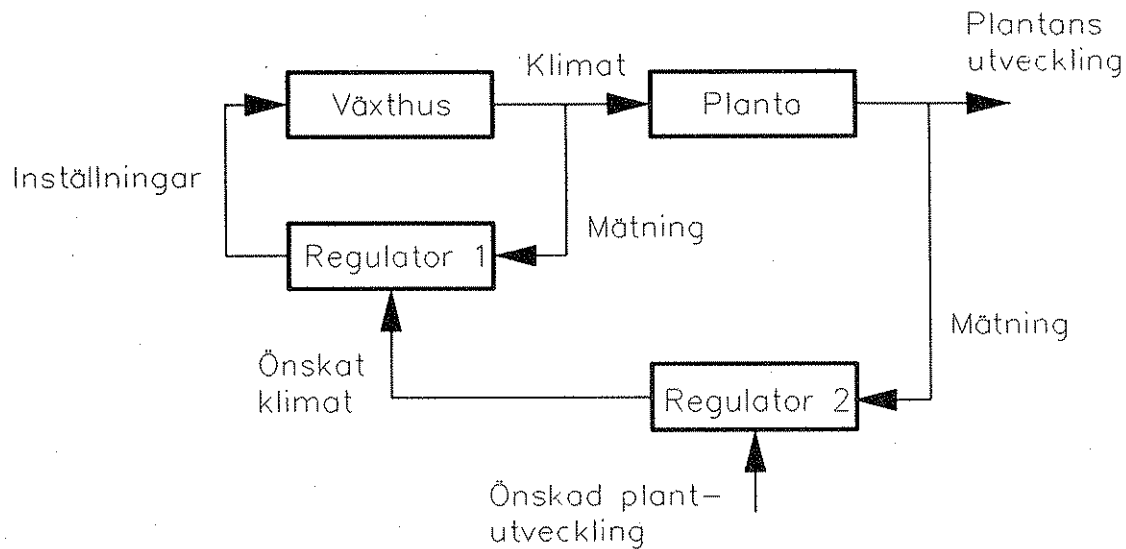
Figur 1. Principbild för ett klimatregleringssystem i växthus.

Figure 1. The principles of a climate control system in greenhouses.

Inställningar/adjustments, växthus/greenhouse, regulator/regulator, klimat/climate, mätning/measuring, önskat klimat/desired climate.

Genom mätningar av de olika klimatvariablerna jämförs det existerande klimatet med det önskade, och med hjälp av regleralgoritmer beräknas sedan de lämpliga inställningarna av shuntar, takluckor etc. Jämfört med konventionell teknik har datoriserade regulatorer fördelen av att de på ett flexibelt sätt kan anpassas till olika växthustyper och en dator kan dessutom styra flera växthus. Det är dessutom så att de kraftfulla regleralgoritmer som baserar sig på modern reglerteori kräver datorer för sin realisering.

I den praktiska användningen av det i figur 1 illustrerade reglersystemet är det odlaren själv som får bestämma vilket klimat han ska ha i sina växthus. Detta avgörs med hjälp av odlingsplaner samt hans erfarenhet och observationer av plantorna. En annan möjlighet är att istället automatiskt mäta och registrera plantornas tillstånd och sedan använda en biologisk modell för att beräkna det önskvärda klimatet. Denna möjlighet har bland annat föreslagits av Udink ten Cate m fl (1978). Ett sådant reglersystem skulle fungera enligt figur 2.



Figur 2. Principbild för reglering av plantutveckling.

Figure 2. The principles of controlling plant development through climate control.

Inställningar/adjustments, växthus/greenhouse, regulator/regulator, klimat/climate, mätning/measuring, önskat klimat/desired climate, planta/plant, plantans utveckling/plant development, önskad plant-utveckling/desired plant development.

Förutom den tidigare beskrivna klimatregleringen består detta regelsystem även av mätning och registrering av plantornas biologiska utveckling. Med ledning av dessa mätningar får datoralgoritmer beräkna det klimat som ger den önskade utvecklingen av plantorna. Datoralgoritmerna är här baserade på en modell som beskriver samspillet mellan klimatet och plantans utvecklingshastighet. Den önskade plantutvecklingen bestäms som tidigare av de odlingsplaner odlaren lägger upp.

En modell behöver vara individuellt anpassad till varje specifik gröda. Att utveckla alla dessa modeller, som detta krav medför, skulle medföra omfattande och dyrbara insatser i arbete och tid. Ett sätt att komma till rätta med detta problem kan vara att kalibrera modellen inför varje kulturomgång, vilket skulle bli praktiskt ohanterbart. Istället kan man låta modellen "kalibrera sig själv" under pågående kulturomgång. Genom att följa upp kulturen kan man under processens gång låta kalibrera modellen med avseende på utfallet, t.ex. erhållen utveckling som sätts i samband med ett registrerat klimat, adaptiv reglering.

PROJEKTMÅL

Projektets övergripande mål har varit att utveckla praktiskt användbara regelsystem för styrning av prydnadsväxters utveckling. Projektet har inriktats på den biolo-

giska processregleringen, dvs. hur det önskvärda klimatet bör varieras för att uppnå önskvärd plantutveckling (dvs. Regulator 2 i figur 2). Realiseringen av detta önskvärda klimat (Regulator 1) får därvid bygga på redan existerande reglersystem. Huvudmålet har indelats i följande delmål:

1. Utveckling av datorbaserade regleralgoritmer.
2. Utveckling av bildbehandlingsmetoder för identifiering av plantegenskaper.
3. Konstruktion och uppbyggnad av ett reglersystem i enlighet med resultaten i punkt 1 och 2 ovan.
4. Utvärdering i praktiska experiment i växthus.

BIOLOGISK BAKGRUND

I de följande experimenten användes Cineraria (*Senecio x hybridus* (Hyl.) 'Molls stam') som försöksväxtslag. Cineraria odlas som krukväxt under höst och vinter. Blomning och försäljning sker på våren. Sådd sker i slutet av juli vid 20 till 22°C. Därefter sker odling vid 18°C i 6 till 8 veckor. För att växtslaget skall blomma krävs sedan en period av låg temperatur cirka 10°C i 6 veckor. Efter köldbehandlingen kan blomutvecklingen påverkas av faktorer som lufttemperatur, ljusinstrålning eller dagslängd.

Modell för Cinerarias blomutveckling

Samspelet mellan klimatfaktorerna och blommans utvecklingshastighet är formulerade som en matematisk modell (Larsen, 1988). Modellen beskriver hur utvecklingshastigheten varierar med dygnsmedeltemperatur, daglig ljusintegral (instrålad energi) och dagslängden enligt ekvation 1;

$$R = (A_{ld} - a e^{-b(L - L_k)}) (1 - e^{-cT}) (T - T_b) \quad (1)$$

där

$$A_{ld} = A_{max} (1 - e^{-d(T_m - T)}) \quad (2)$$

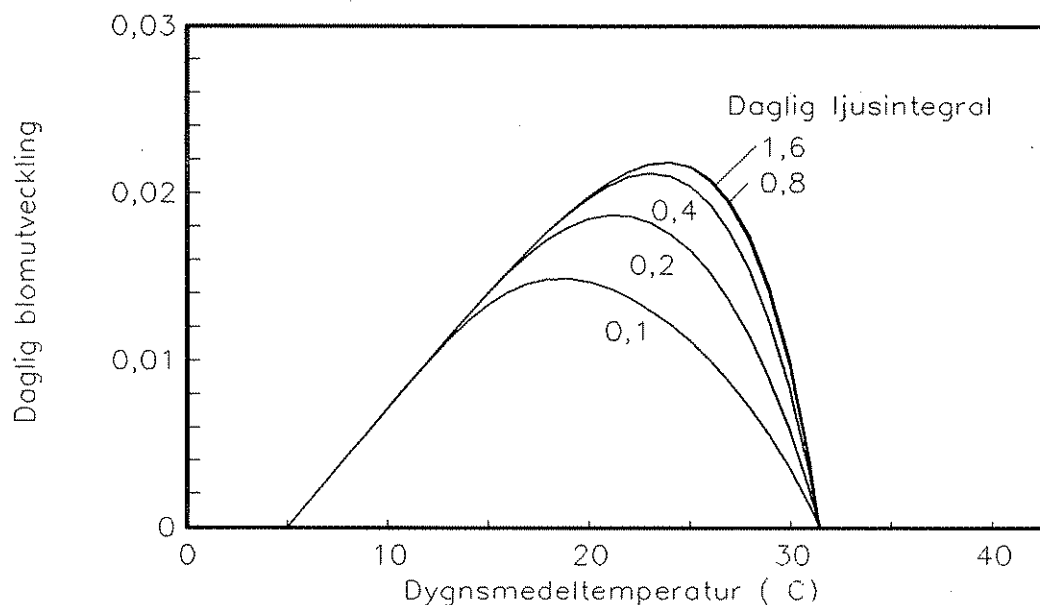
$$c = n T^{-m} \quad (3)$$

och

- R = daglig blomutveckling, utvecklingshastighet (1/dag)
daily flower development, development rate (1/day)
- T = daglig medeltemperatur (°C)
daily mean temperature (°C)

L	=	dagslängd (minuter) <i>daylength (minutes)</i>
I	=	daglig ljusintegral (kWh/m ²) <i>daily light integral (kWh/m²)</i>
L _k	=	kritisk dagslängd (= 800 minuter) <i>critical daylength (= 800 minutes)</i>
T _b	=	5 (°C)
T _m	=	33 (°C)
A _{max}	=	0,002
a	=	0,00055
b	=	0,020
d	=	0,211
n	=	54272
m	=	2,77.

Modellen beskriver hur plantans utvecklingshastighet har ett optimum med avseende på temperaturen (figur 3). En sänkning av ljusinstrålningen medför en förskjutning av detta temperaturoptimum. Flera kurvor är inritade i figuren och varje kurva motsvarar en viss mängd instrålad energi.



Figur 3. Daglig blomutveckling, utvecklingshastigheten, som funktion av dygnsmiddeltemperatur, T , ($^{\circ}\text{C}$) och daglig ljusintegral, I , (kWh/m^2). Dagslängden, L , är satt till ett konstant värde på 800 minuter. Angiven ljusintegral avser det ljus som når plantan.

Figure 3. Daily flower development, development rate, as function of daily mean temperature, T , ($^{\circ}\text{C}$) and daily light integral, I , (kWh/m^2). The day-length, L , has been given a constant value of 800 minutes. With light integral means the light which reaches the plant.

Daglig blomutveckling/daily floral development, Temperatur/temperature, Instrålning/radiation.

Som bas för modellprognosering används diskreta utvecklingsstadier. Dessa stadier varierar från 0 till 1. Värdet 0 motsvarar köldperiodens slut och värdet 1 motsvarar det stadium då första diskblomsraden är utslagen (anthesis). I den följande studien användes dessa utvecklingsstadier dock med en viss modifiering (tabell 1).

Tabell 1. Modifierade utvecklingsstadier i Cinerarias blomutveckling.

Table 1. Modified development stages of Cinerarias flower development.

Stadium/Stage	Beskrivning/Description
0,00	Köldbehandlingen slut <i>End of low temperature treatment</i>
0,20	Högblad bildade men inga blomanlag <i>Bracts formed but no flower primordia</i>
0,35	Terminalknoppen synlig för blotta ögat <i>Terminal bud visible to naked eye</i>
0,40	Sidoknoppar precis synliga <i>Lateral buds just visible</i>
0,50	Terminalknopp cirka 2,5 mm i diameter <i>Terminal bud approximately 2.5 mm in diameter</i>
0,60	Sidoknopparna har skilt sig från terminalen <i>Lateral buds have seperated from terminal bud</i>
0,70	Terminalknoppen börjar visa färg <i>Terminal bud has started to open and is showing colour</i>
0,80	Kantblommorna ungefär 5-8 mm utanför högbladen <i>Ray florets approximately 5-8 mm outside the bracts.</i>
0,90	Kantblommorna börjar öppna sig <i>Ray florets starting to seperate</i>
1,00	Första diskblomsraden är utslagen <i>First row of disc florets fully opened</i>

UTVECKLING AV REGLERALGORITM

GRUNDPRINCIP FÖR REGLERINGEN

Ekvationen 1 uttrycker blomutvecklingshastigheten som en funktion av temperatur, ljusintegral och dagslängd:

$$R = f(T, I, L) \quad (4)$$

Vill man med hjälp av denna ekvation använda temperaturen för att styra utvecklingshastigheten kan detta ske på följande sätt: Genom att i ekvationen sätta in lämpliga värden på önskad utvecklingshastighet, R , ljusintegral, I , och dagslängd, L , kan den temperatur lösas ut som ger den önskade utvecklingshastigheten. Ljusintegral och dagslängd betraktas som mätbara störningar på processen. (Om till exempel instrålningen under en period har varit låg och resulterat i att processen har gått för långsamt, kompenseras detta senare med en förändring av temperaturen.) Eftersom det är den önskade framtida utvecklingen som beräknas, bör instrålningen och dagslängden på något sätt prognostiseras för en period framåt. Den önskade temperaturen T_d kan således som en funktion;

$$T_d = f^{-1}(R_d, I_p, L_p) \quad (5)$$

där

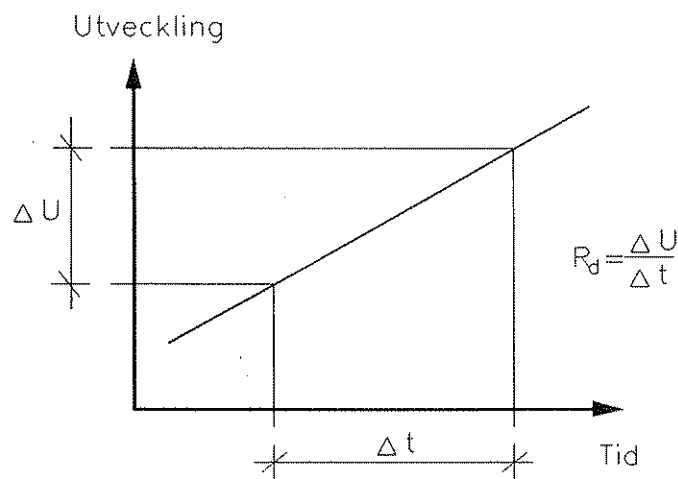
- T_d = önskad temperatur
desired temperature
- R_d = önskad utvecklingshastighet
desired development rate
- I_p = prognostiserad instrålning
predicted radiation
- L_p = prognostiserad dagslängd
predicted daylength.

BERÄKNING AV ÖNSKAD UTVECKLINGSHASTIGHET

För att kunna beräkna den önskade utvecklingshastigheten R_d krävs ett antagande om utvecklingens önskade variation i tiden samt en strategi för hur uppkomna avvikelser från den tänkta utvecklingsplanen skall korrigeras.

I detta arbete antas det ideala utvecklingsförloppet följa en rät linje enligt figur 4. Lutningen på denna linje utgör den önskade utvecklingshastigheten. Utvecklingshastigheten kan således beräknas som kvoten mellan ΔU och Δt , ekvation 7:

$$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad (7)$$



Figur 4. Definition av önskad utvecklingshastighet.

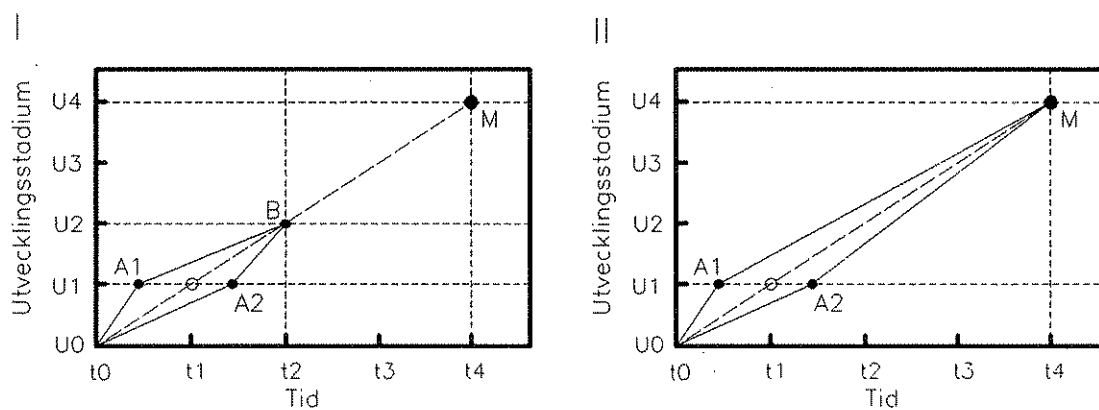
Figure 4. Definition of desired development rate.

Utveckling/development, Tid/time

Storleken på ΔU och Δt bestäms med hjälp av den odlingsplan som lagts upp för berörd kulturomgång. ΔU är den önskade totala utvecklingen och Δt den tid i dagar som finns till förfogande enligt den upprättade planen. Genom att ett linjärt förhållande antas råda mellan utvecklingsstadium och tid, är också tidpunkten t_n fastställd då varje mellanliggande definierade utvecklingsstadium U_n förväntas inträffa (figur 5).

Avvikelser mellan modellens prognoser och det verkliga utvecklingsförloppet kommer dock att uppstå. Dessa orsakas bl.a. av att modellen är en förenkling av verkligheten och att ett flertal stokastiska faktorer (t.ex. varierande instrålning) kommer

att påverka utvecklingen. Av denna anledning måste utvecklingshastigheten korrigeras efterhand som de definierade utvecklingsstadierna uppnås. För att korrigera uppkomna avvikelser från det önskade förloppet kan i princip två olika strategier användas (figur 5).



Figur 5. Två strategier för att korrigera en avvikelse från en önskad utvecklingsplan. A = observerat läge, o = önskat läge enligt ursprungliga utvecklingsplanen, B = delmål, M = slutligt målet (anthesis). I) Sikta på nästa utvecklingsstadium. II) Sikta på det slutliga utvecklingsstadiet.

Figure 5. Two different strategies for correcting a divergence from a desired development plan. A = observed position, o = desired position according to the original development plan, B = sub-target, M = final target (anthesis). I) aim at next development stage II) aim at final development stage.

Utvecklingsstadium/development stage, Tid/time

Enligt alternativ (I) eftersträvas en snabb korrektion av utvecklingsförloppet och temperaturen ändras med syfte att pricka in nästa utvecklingsstadium. Nästa tillfälle för temperaturkorrigering inträffar vid nästa utvecklingsstadium. Denna styrstrategi är dock behäftad med vissa nackdelar. Den kan bl.a. leda till att det krävs stora förändringar av temperaturen för att en snabb korrektion av utvecklingen skall kunna ske.

Enligt alternativ (II) eftersträvas ett lugnare utvecklingsförlopp än i (I). Detta erhålls genom att man hela tiden styr mot det slutliga målet (försäljningstidpunkten). Även med detta alternativ sker nästa möjliga temperaturkorrigering vid nästa påföljande utvecklingsstadium.

De två reglerprinciperna testades och utvärderades i simuleringsexperiment, se kapitel "SIMULERING".

BERÄKNING AV FRAMTIDA INSTRÅLNING OCH DAGSLÄNGD

För att man ur den önskade utvecklingshastigheten ska kunna beräkna styrtemperaturen krävs prognoser om framtida instrålning och dagslängd. Prognoser av instrålningen baserades på statistiska data för orten Svalöv (latitud 56°). En dygnsmedelinstrålning för den 15:e i varje månad beräknades, se tabell 2.

Tabell 2. Beräknad dygnsmedelinstrålning för den 15:e i varje månad gällande för Svalöv (latitud 56°), kWh/m²,dygn

Table 2. Calculated daily mean solar radiation for the 15:th in each month for Svalöv (latitude 56°), kWh/m²,day

Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
0,420	1,050	2,290	3,740	5,010	5,950	5,050	4,290	2,840	1,505	0,620	0,360

För att kunna beräkna medelinstrålningen under året, konstruerades en ekvation så att instrålningen blev en funktion av dagnummer. En manuell anpassning gjordes till en sinusfunktion och följande uttryck erhöles;

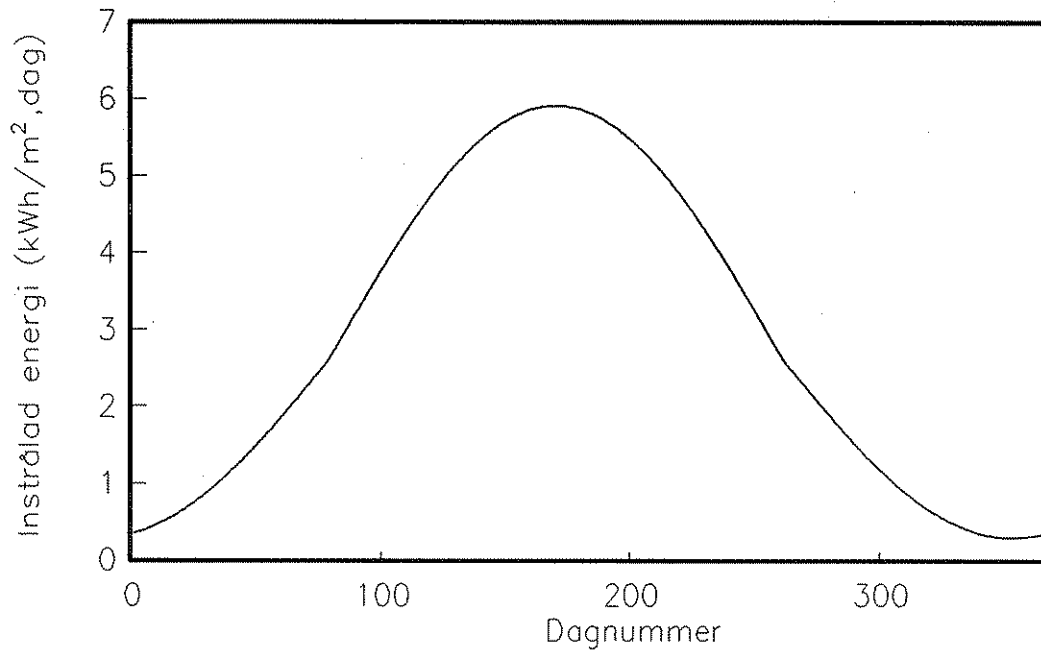
$$I_0 = 2,60 + 2,81 \sin\left(\frac{(x-79)}{365} 2\pi\right) + \left| 0,5 \sin\left(\frac{(x-79)}{365} 2\pi\right) \right| \quad (8)$$

där

I_0 = medelinstrålning utomhus (kWh/m²,dag)
mean radiation outdoor (kWh/m²,day)

x = dagnummer (1-365)
day number (1-365).

Genom att sätta in ett lämpligt värde på x erhålls ett uppskattat värde på medelinstrålningen I_0 för den aktuella dagen. Funktionen åskådliggörs i figur 6.



Figur 6. Daglig medelinstrålning utomhus som funktion av dagnummer (1-365), Svalöv.

Figure 6. Daily mean solar outdoor radiation as function of day number (1-365), Svalöv.

Instrålad energi/insolated energy, Dagnummer/day number

För att kunna bestämma ljusintegralen inne i växthuset, krävs också att transmissionsfaktorn för takkonstruktionen kan beräknas. Eftersom transmissionsvärdet varierar för direkt och diffust ljus, uppdelades den totala instrålningen i en direkt och en diffus andel enligt följande ekvation som beskrivits av Duffie & Beckman (1974);

$$I_{\text{med}} = I_{\text{klara}} \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (9)$$

där

I_{med} = medelinstrålning (direkt + diffust) (W/m^2)
mean radiation (direct + diffuse) (W/m^2)

I_{klara} = maximal instrålning en klar dag (W/m^2)
maximal radiation on a clear day (W/m^2)

n = antal medelsoltimmar i månaden
average daily hours of sunshine during the month

N = maximalt antal timmar med dagsljus i månaden
maximum number of hours with daylight during the month

- a = parameter, beroende på latitud och månad
parameter, dependant of latitude and month
- b = konstant, skattad till 0,61 (Duffie & Beckman, 1974)
constant, estimated to 0,61 (Duffie & Beckman, 1974).

Den diffusa och direkta andelen av I_{med} beräknas enligt följande:

$$I_{dif} = a I_{klara} \quad (10)$$

$$I_{dir} = b \frac{n}{N} I_{klara} \quad (11)$$

Andelen direkt respektive diffust ljus beräknas timme för timme. Värdena på a och n/N erhålls ur tabell 3. Värdena för maximal instrålning under klara dagar är hämtade från Brown & Isfält (1969).

Tabell 3. Värden som använts för beräkning av diffus respektive direkt andel av medelinstrålningen på latitud 56 grader (Nilsson, 1983)

Table 3. Values which have been used for calculating diffuse and direct part of mean solar radiation at latitude 56 degrees (Nilsson, 1983)

Månad/Month	a	n/N	I_{med} kWh/m ² ,dygn
Januari/January	0,386	0,15	0,420
Februari/February	0,367	0,23	1,050
Mars/March	0,377	0,35	2,290
April/April	0,319	0,47	3,740
Maj/May	0,321	0,54	5,010
Juni/June	0,365	0,53	5,950
Juli/July	0,294	0,52	5,050
Augusti/August	0,363	0,45	4,290
September/September	0,331	0,47	2,840
Oktober/October	0,346	0,33	1,505
November/November	0,386	0,20	0,620
December/December	0,502	0,10	0,360

Transmissionsfaktorn för det diffusa ljuset sattes till 0,6 vilket skulle gälla för ett enkelglasat växthus (Damrath, 1980). För uppskattning av transmissionsvärdet för det direkta ljuset, användes en modell för beräkning av medeltransmission av direkt ljus genom ett växthustak med hänsyn till spröjs mm. (Bot 1983, Nilsson 1988). Transmissionsvärdet beräknades för varje timme och medeltransmissionen (direkt + diffust) för dygnet beräknades sedan enligt följande ekvation;

$$\tau_{\text{med}} = \frac{\sum_i (\tau_{\text{dir},i} I_{\text{dir},i} + 0.60 I_{\text{dif},i})}{I_{\text{tot}}} \quad (12)$$

där I_{tot} beräknas enligt följande

$$I_{\text{tot}} = \sum_i (I_{\text{dir},i} + I_{\text{dif},i}) \quad (13)$$

och

- I_{tot} = total instrålning utomhus (W/m^2)
total radiation outdoor (W/m^2)
- $I_{\text{dir},i}$ = direkt instrålning (W/m^2)
direct radiation (W/m^2)
- $I_{\text{dif},i}$ = diffus instrålning (W/m^2)
diffuse radiation (W/m^2)
- $\tau_{\text{dir},i}$ = transmissionsfaktor för direkt instrålning
transmission factor for direct radiation
- i = timme med instrålning
hour with radiation.

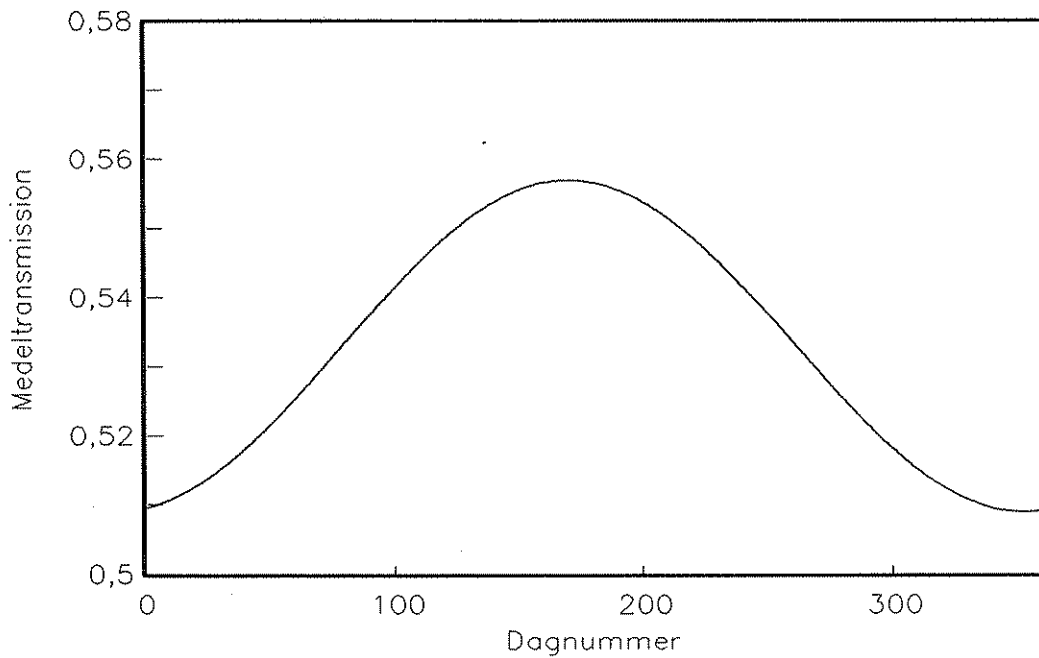
Detta upprepades för den 15:e i varje månad och det erhållna värdet ansågs gälla som ett medelvärde för månaden.

Härefter gjordes en manuell anpassning till en sinusfunktion (figur 7) ur vilken medeltransmissionen kunde beräknas som en funktion av dagnummer enligt ekvationen;

$$\tau_{\text{med}} = 0,533 + 0,024 \sin\left(\frac{(x-79)}{365} 2\pi\right) \quad (14)$$

där

- τ_{med} = medeltransmission
average transmission
- x = dagnummer (1-365)
day number (1-365).



Figur 7. Medeltransmission genom växthuset som funktion av dagnummer (1-365), ekvation 12.

Figure 7. Transmission through the greenhouse roof as function of day number (1-365), equation 12.

Medeltransmission/Average transmission, Dagnummer/day number

Medelinstrålningen in i växthuset beräknas således enligt följande;

$$I = I_0 \tau_{med} \tag{15}$$

där I_0 beräknats ur ekvation 8 och τ_{med} enligt ekvation 14 ovan.

Dagslängden, definierad som tiden mellan solens uppgång och dess nedgång, beräknas enligt följande ekvation (Duffie & Beckman, 1974);

$$L = \frac{2}{15} \arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta)) \tag{16}$$

där

L = dagslängd i timmar
daylength in hours

- n = dagnummer (1-365)
day number (1-365)
 ϕ = latitud (i vårt fall 56°)
latitude (in our case 56°)
 δ = deklination
declination.

Deklinationen δ beräknas enligt ekvationen (Duffie & Beckman, 1874):

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{(284 + n)}{365}\right) \quad (17)$$

I modellen för Cinerarias blomutvecklingshastighet, finns en kritisk dagslängd (ekvation 1). I det fall att den verkliga dagslängden är mindre än 800 minuter, vilket motsvarar den kritiska dagslängden, skall dagslängden sättas till 800 minuter. En dagslängd mindre än 800 minuter råder under vinterhalvåret (1/10-31/3).

REGLEREXPERIMENT

SIMULERING

För att testa de i kapitel "UTVECKLING AV REGLERALGORITM" beskrivna regulatorerna, utvecklades ett datorprogram som både kunde simulera hur växthusets klimat varierade och hur plantans utvecklingshastighet förändras med utgångspunkt från dessa variationer. Klimatvariationerna i växthuset åstadkoms genom att en avvikelse från inställda börvärden skapades med en slumpalgsgenerator. Effekten av dessa variationer på växten simulerades sedan med den tidigare beskrivna Cinerariamodellen. På så sätt erhöles en avvikelse mellan planerad och simulerad utveckling. De två regulatorerna användes sedan för att korrigera den simulerade utvecklingen i förhållande till den planerade. Eftersom avläsningen av ett utvecklingsstadium kan vara förenat med viss osäkerhet, byggdes också möjligheten till att simulera felavläsningar in i modellen.

Följande programparametrar var intressanta att kunna variera;

- initiering av slumpalstabelle för simulering av olika klimat
- utvecklingsstadium då reglering skall börja
- önskat slutligt utvecklingsstadium
- dag på året för processens början
- önskad processtid
- transmissionsfaktor för växthuset

- starttemperatur
- felavläsningar av kulturens utvecklingsstadium
- val av regulator.

Resultatet av simuleringen redovisades i form av diagram över, instrålning, temperatur - erhållen och önskad, utveckling - erhållen och önskad. Dessutom redovisades avvikelser mellan tidpunkten för uppnått utvecklingsstadium och önskad tidpunkt då utvecklingsstadiet skulle inträffa.

För att välja ut den lämpligaste regulatorn, genomfördes en serie simuleringar. Regulatorerna testades dels under olika klimat i kombination med simulerade felavläsningar av utvecklingsstadierna, dels utan felavläsningar.

Simulering av klimat och utveckling

Värden på simulerad temperatur T_s och instrålning I_s beräknades i simuleringsmodellen enligt följande;

$$T_s = T + x T_{std} + T_{offset} \quad (19)$$

$$I_s = I + x I_{std} + I_{offset} \quad (20)$$

där

- x = normalfördelat slumtaltal, $N(0,1)$
normal distributed random number, $N(0,1)$
- T = önskad dygnsmedeltemperatur i växthuset ($^{\circ}C$)
desired daily mean temperature in the greenhouse ($^{\circ}C$)
- T_{std} = önskad standardavvikelse ($^{\circ}C$)
desired standard deviation ($^{\circ}C$)
- T_{offset} = önskad konstant avvikelse ($^{\circ}C$)
desired offset ($^{\circ}C$)
- I = beräknad dygnsmedelinstrålning i växthuset ($kWh/m^2, dag$)
calculated daily mean radiation in the greenhouse ($kWh/m^2, day$)
- I_{std} = önskad standardavvikelse ($kWh/m^2, dag$)
desired standard deviation ($kWh/m^2, day$)
- I_{offset} = önskad konstant avvikelse ($kWh/m^2, dag$)
desired offset ($kWh/m^2, day$).

Temperaturen T motsvarar den inställda temperaturen i växthuset. Denna temperatur bestäms av den utvecklingshastighet som önskas. Instrålningen I beräknas med hjälp av ekvation 15. Genom att variera standardavvikelsen, den konstanta avvikelserna och startvärde för slumtalsdragningen kunde olika klimat simuleras med

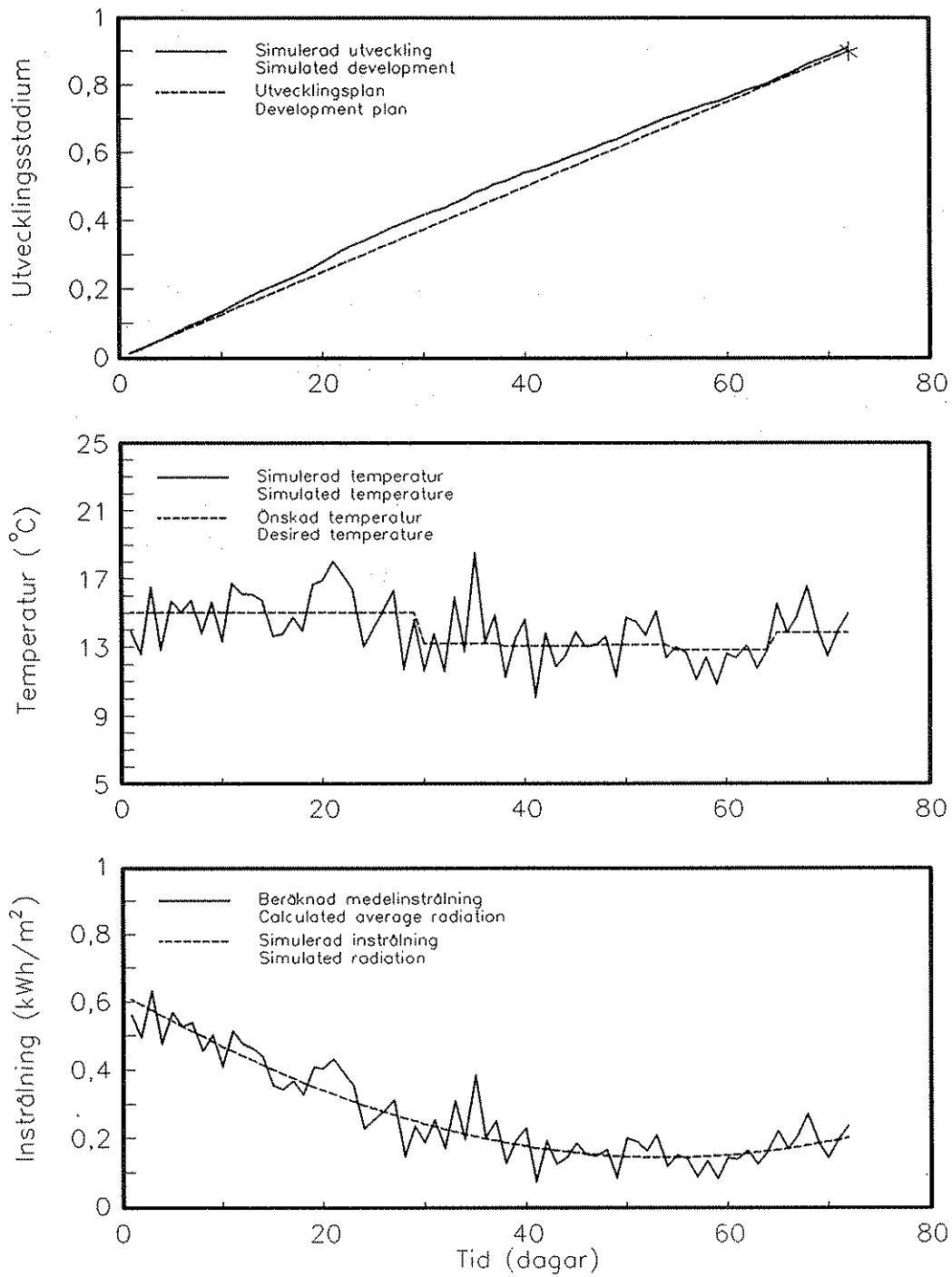
avseende på temperatur och instrålning. Den simulerade temperaturen och instrålningen beräknades med hjälp av samma slumpstal. På detta vis försöktes kopplingen mellan instrålningsnivå och växthustemperatur efterliknas.

Den dagliga blomutvecklingen simulerades genom att sätta in T_s och I_s i ekvationen för beräkning av daglig blomutveckling R (ekvation 1). Dagslängden som också erfordras beräknas enligt ekvation 14.

Exempel på resultat från en simulering

I figur 8 visas ett exempel på resultat av en simulering över reglering av Cinerarias blomutveckling. Den reglerstrategi som här utnyttjades, innebar att korrigeringsarna hela tiden gjordes genom att sikta mot det slutliga utvecklingsstadiet (figur 5b). Övriga förutsättningarna för simuleringen var:

- utvecklingsstadiet i processens början var 0,0 dvs. köldbehandlingen precis avslutad
- kulturen ansågs vara klar då utvecklingsstadiet 0,9 uppnåddes, dvs. kantblommorna hade börjat öppna sig
- dag för processens början sattes till dag nummer 300, dvs. i slutet av oktober
- processens längd bestämdes till 72 dagar
- starttemperaturen sattes till 15 °C (rimligt startvärde).



Figur 8. Resultat från simulering av Cinerarias blomutveckling. (* = mål)

Figure 8. Result from simulation of Cinerarias floral development. (* = target)

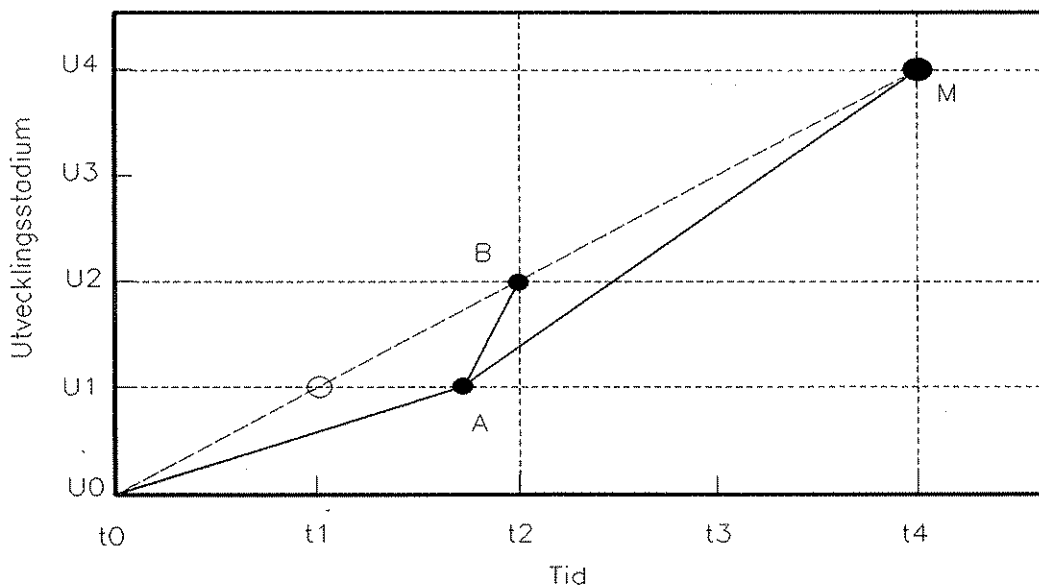
Utvecklingsstadium/development stage, Temperatur/temperature,
Instrålning/radiation, Tid (dagar)/time (days).

Av resultatet framgår, att regulatoren lyckats väl med att styra blomutvecklingen jämfört med den ansatta utvecklingsplanen. Till en början har utvecklingen gått lite för fort vilket senare kompenseras med en sänkning av temperaturen. I detta exempel har det önskade utvecklingsstadiet uppnåtts cirka en dag för tidigt.

Jämförelse och val av regulator

Testet av de två olika strategierna för reglering (figur 5,I-II) visade att strategin enligt 5 (II) var att föredra framför den enligt 5 (I). Strategin enligt 5 (II) innebär att man vid korrigering (dvs. då ett definierat utvecklingsstadium uppnåtts och en ny önskad utvecklingshastighet skall beräknas) utgår ifrån det observerade läge och siktar mot det slutliga målet för processen (anthesis).

Denna regulator gav ett lugnare förlopp på processen jämfört med regulatoren enligt 5 (I) och kulturen utsattes för mindre temperaturvariationer. Med regulatoren 5 (I) erfordrades ibland orimligt höga utvecklingshastigheter och därmed också höga temperaturer. Detta inträffade när processen gick allt för sakta och få dagar återstod till nästa utvecklingsstadium (figur 9).



Figur 9. Utvecklingsstadium som funktion av tiden, visande olika reglerstrategier. Beteckningar enligt tidigare (figur 5).

Figure 9. Development stages as function of ltime, showing different controlling strategies, (figure 5).

Utvecklingsstadium/development stage, Tid/time

Av figuren framgår att en högre utvecklingshastighet krävs för att gå ifrån läge A till B än ifrån läge A till M. Att en stor försening har uppstått kan bland annat bero på avvikelser från det önskade klimatet eller på felavläsning av utvecklingsstadierna.

PRAKTISKA EXPERIMENT

För att testa regleralgoritmen genomfördes försök i tre olika växthusavdelningar. Avdelningarna var helt åtskilda och klimatet i avdelningarna kunde styras oberoende av varandra. I två av avdelningarna genomfördes försöken med att styra kulturens blomutveckling med den tidigare framtagna regleralgoritmen. I den tredje avdelning hölls en konstant temperatur som hade ställts in med utgångspunkt från en traditionellt odlingsprogram. Denna avdelning utgjorde experimentens referensavdelning.

Försöksuppläggning

Genomförda experiment

Målet med experimentet var att studera hur den framtagna regleralgoritmen fungerade och om man kunde nå försäljningsdagen med en högre precision än vid "traditionell" odling. Två försök med att styra utvecklingen genomfördes i två olika avdelningar A och B. Strategin för regleringen i de två avdelningarna var identiska. Med utgångspunkt från modellen för blomutvecklingen och en önskad odlingstemperatur på 15°C, gjordes en prognos över hur många dagar det skulle ta innan det bestämda slutliga utvecklingsstadiet 0,90 uppnåddes, dvs. då kantblommorna börjar öppna sig och man kan se ner på disken. I detta fall, då köldperioden avslutades den 20 november 1989, sattes sluttidpunkten, då utvecklingsstadium 0,90 skulle inträffa, till den 1 februari 1990. Regleringen påbörjades då köldperioden avslutats och den första korrigeringen av temperaturen genomfördes då utvecklingsstadiet 0,35 uppnåts, dvs. blomanlaget var precis synligt för ögat.

Eftersom det kan vara svårt att specificera vad som är precision i "traditionell" odling genomfördes också ett parallellt försök i en ostyrd avdelning (referensavdelning). Temperaturen i denna avdelning hölls konstant vid 15°C.

Antalet plantor som ingick i experimenten framgår av tabell 4.

Tabell 4. Antal plantor som ingick i experimentet.

Table 4. Number of pot plants in the experiment.

Experiment <i>Experiment</i>	Avdelning A <i>Compartment A</i>	Avdelning B <i>Compartment B</i>	Referensavdelning <i>Reference compartment</i>
1	480	480	100

Registrering av data

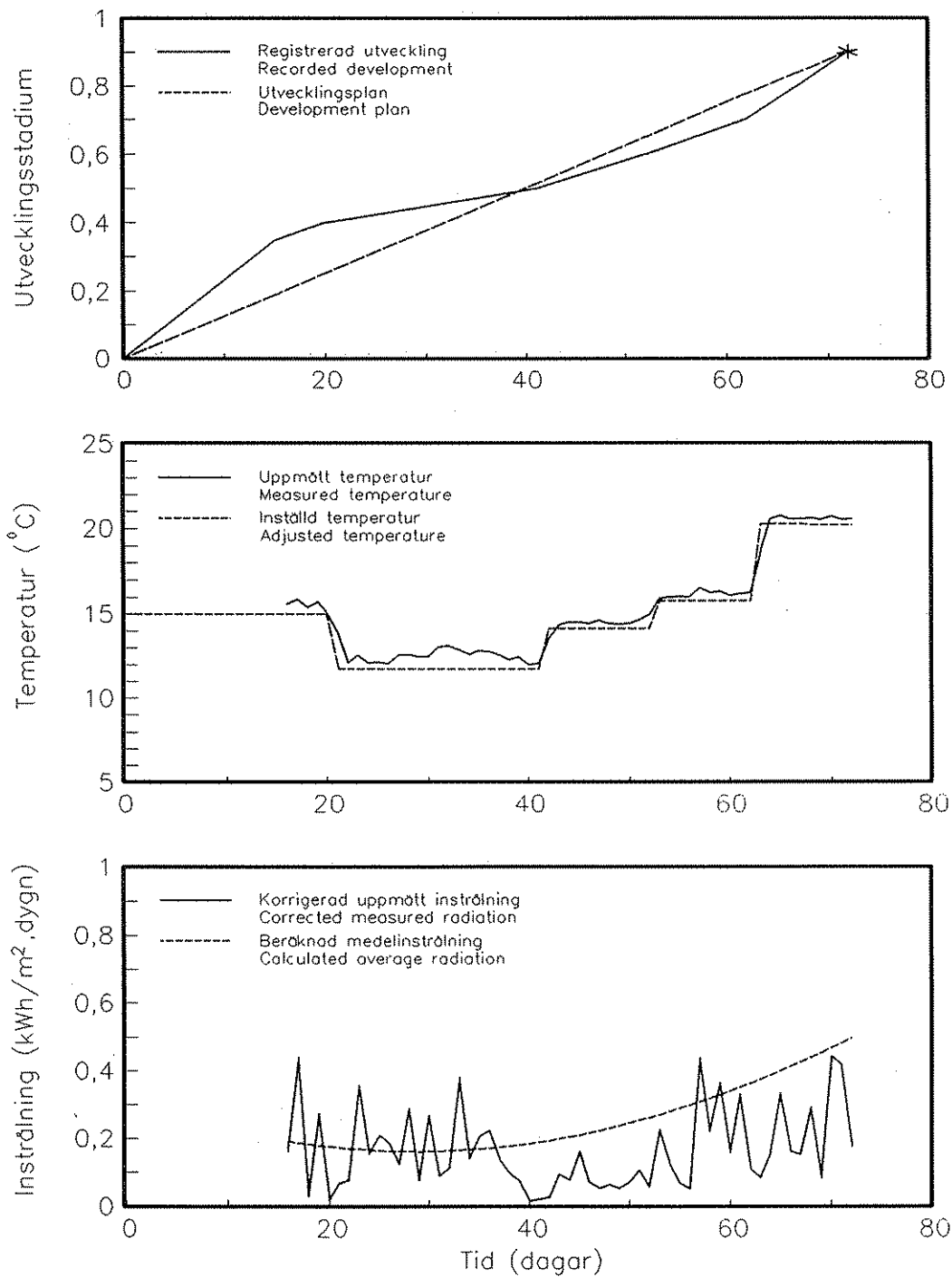
För de olika avdelningarna registrerades temperatur och instrålning förutom utvecklingsstadierna. Temperaturen mättes med hjälp av Pt100-givare och instrålningen med en solarimeter av fabrikat Kipp & Zonen. Eftersom den ursprungliga Cinerariamodeln baserades på mätningar av lufttemperatur i växthuset och instrålningen utomhus, valdes samma placering av givarna för experimentet. Den under dagen instrålade energin i växthuset, beräknades genom att använda sig av en transmissionsfaktor för växthustaket på 53%. Detsamma gjordes vid detta experiment.

Mätintervallet sattes till 2 minuter och efter var 20:e minut gjordes utskrift på datafil. Den utskrivna datan utgjorde således ett medelvärde av de registrerade värdena för den senaste 20-minutersperioden.

För bedömning av kulturens blomutvecklingsstadium, valdes slumpmässigt ett antal plantor ut i de olika avdelningarna. I referensavdelningen bestod denna bedömningsgrupp av 10 stycken plantor. I de andra avdelningarna bestod gruppen av 20 stycken vilka också fick utgöra den grupp av plantor efter vilken regleringen skulle äga rum. Avläsning av utvecklingsstadiet (tabell 1) gjordes 3 gånger i veckan. Vid behov gjordes avläsningar med tätare mellanrum.

Resultat av experiment

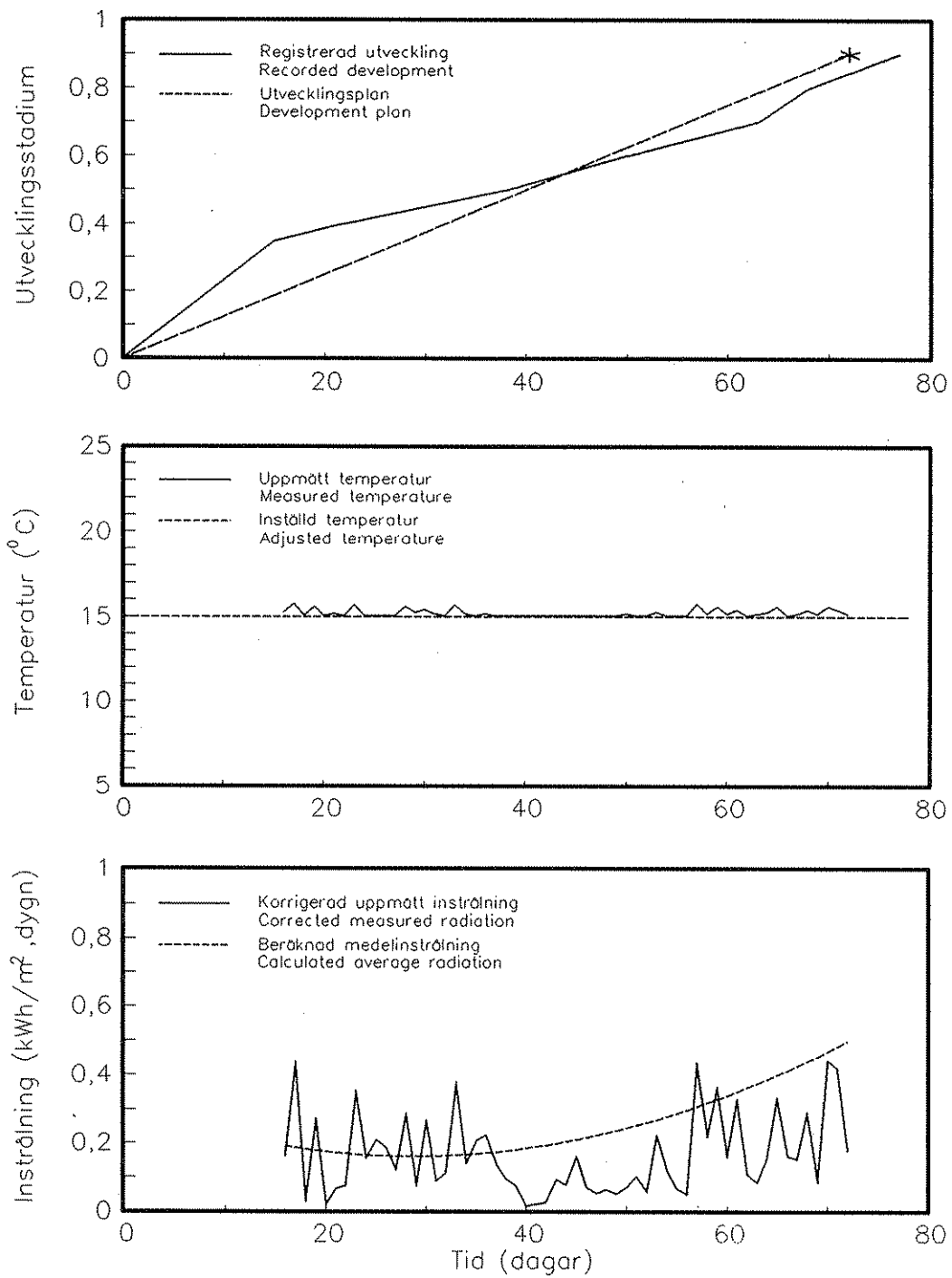
I de styrda avdelningarna gick utvecklingen för fort i början av försöket. När utvecklingsstadiet 0,35 uppnåts gjordes den första korrigeringen. Under den mellersta delen av kulturtiden gick emellertid förloppet för sakta, medan regulatorn under den sista fasen lyckades att styra utvecklingen mot målet (figur 10). I referensavdelningen registrerades samma förlopp i början men i den sista fasen uppkom förseningar i utvecklingen så att målet inte uppnåddes vid rätt tidpunkt (figur 11).



Figur 10. Resultat från försök med styrning av Cinerarias blomutveckling. (* = mål)

Figure 10. Results from trial with controlling Cinerarias floral development. (* = target)

Utvecklingsstadium/development stage, Temperatur/temperature, Instrålning/radiation, Tid (dagar)/time (days).



Figur 11. Resultat från den ostyrda referensavdelningen. (* = mål).

Figure 11. Results from uncontrolled reference compartment. (* = target)

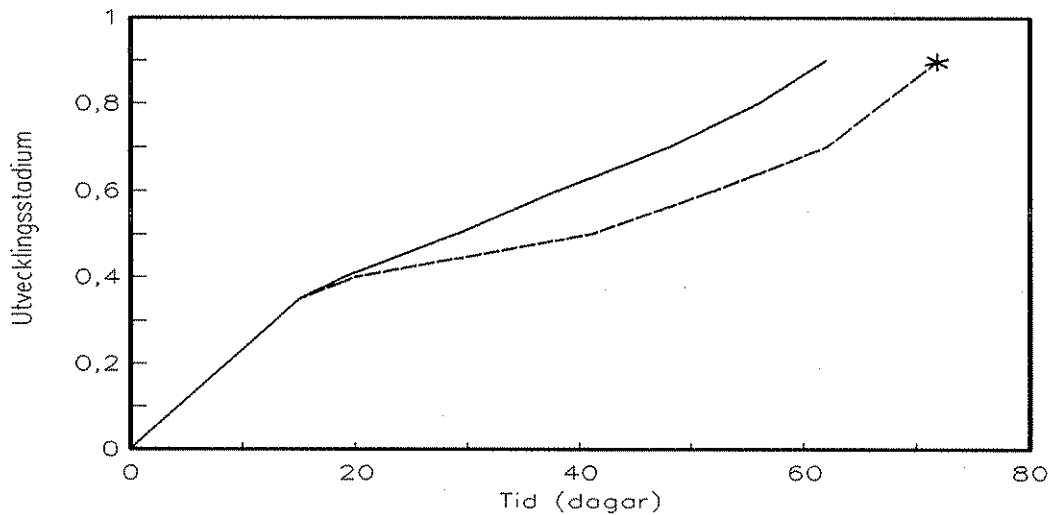
Utvecklingsstadium/development stage, Temperatur/temperature, Instrålning/radiation, Tid (dagar)/time (days).

Utvecklingsförloppen i de två styrda avdelningarna var i princip identiska. Resultaten från experimentet visade att det är möjligt att styra blomutvecklingen av *Cineraria* med hög noggrannhet. I de styrda avdelningarna uppnåddes önskat utvecklingsstadium exakt på den förutbestämda slutdagen. Utvecklingsförloppet i referensavdelningen blev försenat 5-6 dagar.

Att utvecklingen gick för fort i början av processen jämfört med den antagna utvecklingsplanen kan bero på flera orsaker. Det kan det vara så, att utvecklingen går olika fort mellan de olika definierade utvecklingsstadierna även om klimatet är konstant. Vidare kan temperatur och instrålningen ha varit sådan att utvecklingen gått för fort. Eftersom registreringen av klimatdata vid detta experiment ej påbörjades förrän utvecklingsstadiet 0,35 inträffade kan inget sägas härom. En annan förklaring kan vara svårigheten att fastställa när blominitieringen sker. I försöket har förutsatts att stadium 0 gällde då köldperioden var slut. För att fastställa detta utvecklingsstadium med större säkerhet måste ett mikroskop användas. Man kan se att utvecklingen har gått för långsamt från dag 20 till dag 40 av kulturtiden. Detta har skett trots att instrålningen legat kring den prognostiserade medelinstrålningen och temperaturen varit lite högre än den önskade. Detta skulle kunna tyda på att modellen har en tendens till att underskatta effekten av klimatfaktorerna under denna period. Detta skulle tyda på att utvecklingsstadierna i modellen behöver justeras. Att utvecklingen senare går för långsamt kan till viss del förklaras med att instrålningen under motsvarande tid varit mycket lägre än den prognostiserade. Den senare motsvarar den beräknade medelinstrålningen.

Kalibrering av utvecklingsstadier

Med ledning av observationerna att det gick för fort i början, genomfördes en justering av de tre första utvecklingsstadierna efter utvecklingsstadiet 0. För att analysera effekten av en justering användes det framtagna simuleringsprogrammet. Simuleringen gjordes från klimatdata som registrerats under experimentet. Innan justeringen av utvecklingsstadierna genomfördes, gjordes en simulering av utvecklingen och resultatet jämfördes med det verkliga förloppet (figur 12).



Figur 12. Jämförelse mellan simulerad utveckling med verkliga klimatdata (—) och verklig registrerad utveckling (- - -) innan justering av utvecklingsstadierna.

Figure 12. Comparison between simulated development with real climate data (—) and real registered development (- - -) before adjustment of development stages.

Utvecklingsstadium/development stage, Tid (dagar)/time (days).

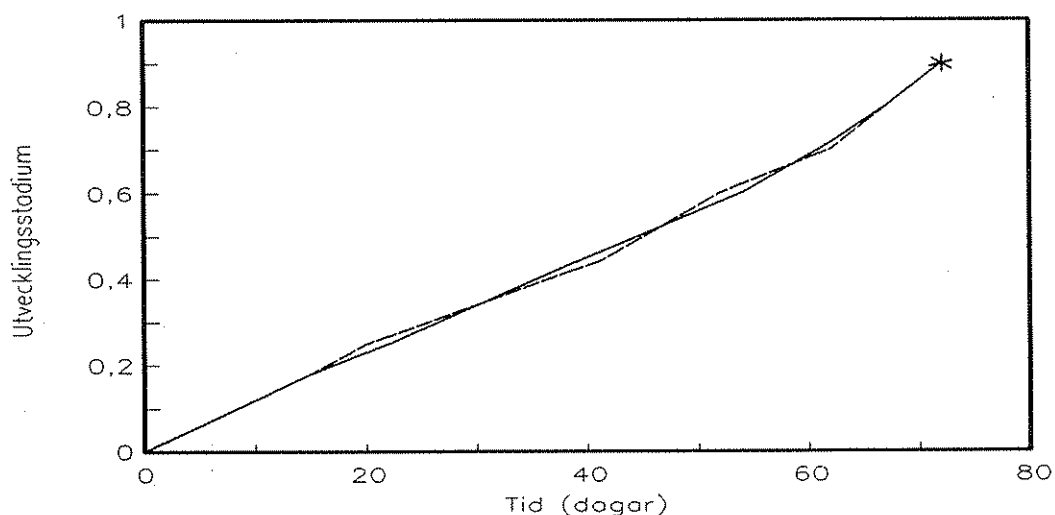
Av resultatet framgår att en stor avvikelse finns mellan modell och verklighet. Man kan dock se att de olika linjerna i stort sett är parallella, varför man kan anta att avvikelsen har initierats i början av utvecklingsförloppet. Genom att justera värdena på de definierade utvecklingsstadierna, skulle denna avvikelse kunna elimineras. De justerade värdena framgår av tabell 5.

Tabell 5. Manuellt kalibrerade utvecklingsstadier i Cinerarias blomutveckling

Table 5. Manual calibrated development stages in Cinerarias flower development

Gammalt värde <i>Old value</i>	Nytt värde <i>New value</i>	Beskrivning <i>Description</i>
0,35	0,18	Blomanlaget synligt för blotta ögat <i>Terminal bud visible to naked eye</i>
0,40	0,25	Sidoknoppar precis synliga <i>Lateral buds just visible</i>
0,50	0,44	Terminalknopp cirka 2,5 mm i diameter <i>Terminal bud approximately 2.5 mm in diameter</i>

Genom att sätta in dessa nya värden på utvecklingsstadierna i simuleringsmodellen och göra om simuleringen, erhöles en mycket bra överensstämmelse mellan simulerad och verklig utveckling, se figur 13.



Figur 13. Jämförelse mellan simulerad utveckling med verkliga klimatdata (—) och verklig registrerad utveckling (- - -) efter justering av utvecklingsstadier.

Figure 13. Comparison between simulated development with real climate data (—) and real registered development (- - -) after adjustment of development stages.

Utvecklingsstadium/development stage, Tid (dagar)/time (days).

Av dessa simuleringar framgår således att man genom en omkalibrering av den ursprungliga modellen har fått en bra överensstämmelse mellan modell och verklighet.

Sammanfattning

Resultatet från experimentet visar att det i en praktisk odling är möjligt att styra Cinerarias blomutveckling med hög noggrannhet. Det bestämda slutliga utvecklingsstadiet inträffade på precis rätt dag i de två avdelningar där styrningen ägde rum. Resultatet från referensavdelningen, den ostyrda avdelningen, blev att blomningen försenades med 5-6 dagar.

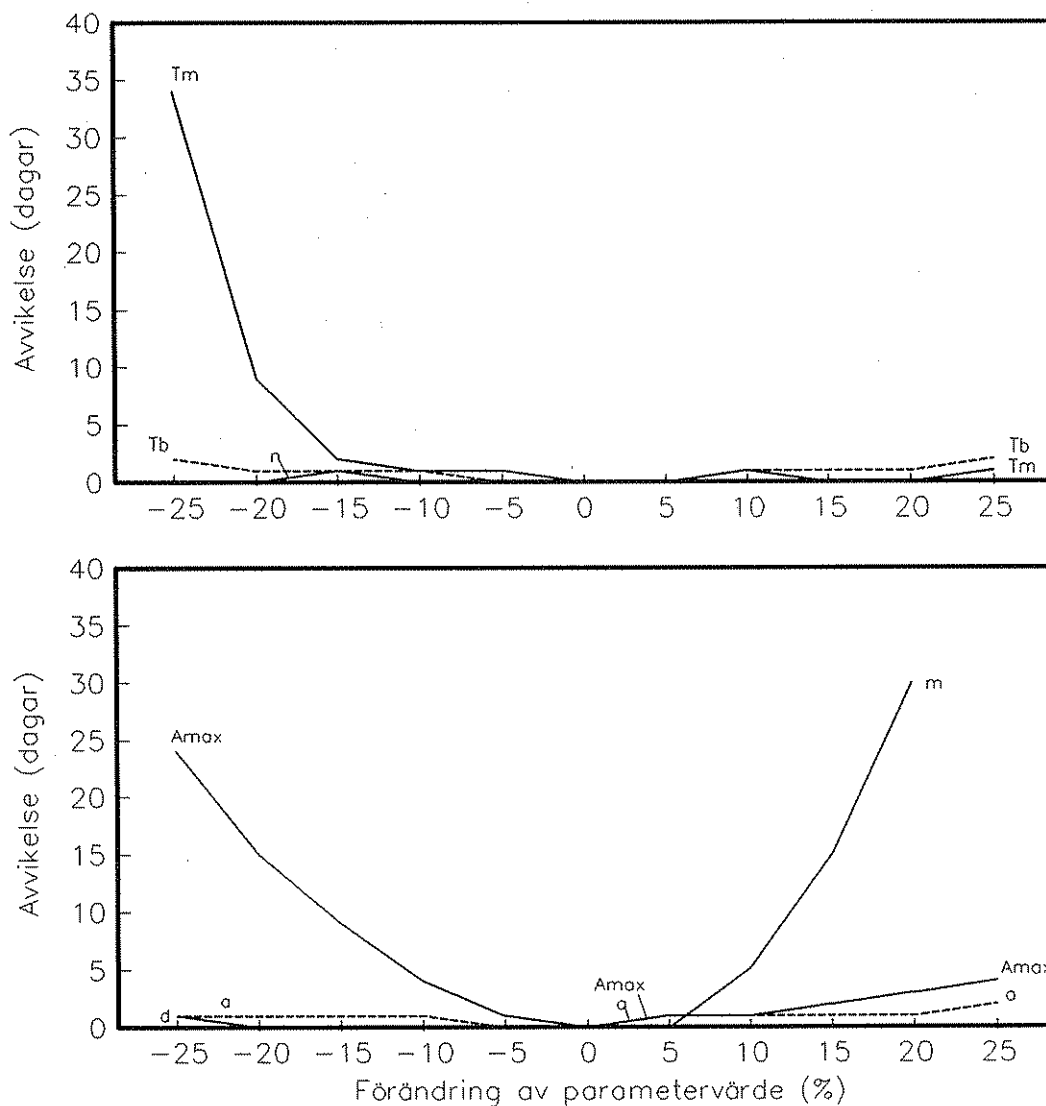
FÖRBEREDANDE STUDIE AV ADAPTIV REGLERING AV BLOM-UTVECKLING

Simuleringsprogrammet utnyttjades även för att göra en känslighetsanalys av de i ekvation 1 ingående parametrarna. Genom att genomföra denna typ av analys, kunde de parametrar bestämmas som var mest känsliga för avvikelser från de ursprungligt skattade. Ur regleringssynpunkt är det viktigt att känna till dessa parametrar för att kunna utveckla självkalibrerande (adaptiva) regulatorer. För att kunna genomföra känslighetsanalysen fanns också möjlighet att i simuleringsprogrammet förändra värdena på ingående parametrar i ekvationen för beräkning av Cinerarias blomutveckling (ekvation 1).

Känslighetsanalysen genomfördes på följande vis. En parameter gavs ett nytt värde med en viss avvikelse från det ursprungligen skattade värdet, medan övriga parametervärden var oförändrade. Härfter genomfördes en simulering där tiden för att uppnå ett bestämt utvecklingsstadium beräknades. Skillnaden mellan denna tid och den tid som fastlagts i odlingsplanen utgjorde ett mått på känsligheten. Ju större differens desto större känslighet. För varje parameter genomfördes en serie beräkningar dels med större värden, dels mindre värden än det ursprungligen skattade värdet. Vid samtliga dessa beräkningar användes samma simulerade växthusklimat. Simuleringen av klimatet genomfördes utan stokastisk variation i klimatet, dvs. *std* och *offset* i ekvationerna 19 och 20 är satta till noll.

RESULTAT AV KÄNSLIGHETSANALYS

Vid känslighetsanalysen användes reglerstrategin att hela tiden sikta mot det slutliga utvecklingsstadiet (figur 5,I). Av denna analys framgick att parametrarna A_{max} , T_m och m var de tre känsligaste eftersom dessa orsakade de största simuleringsavvikelserna (figur 14).



Figur 14. Resultat av känslighetsanalys för de i ekvation 1 ingående parametrarna.

Figure 14.

Results from sensitivity analyses for parameters in equation 1.

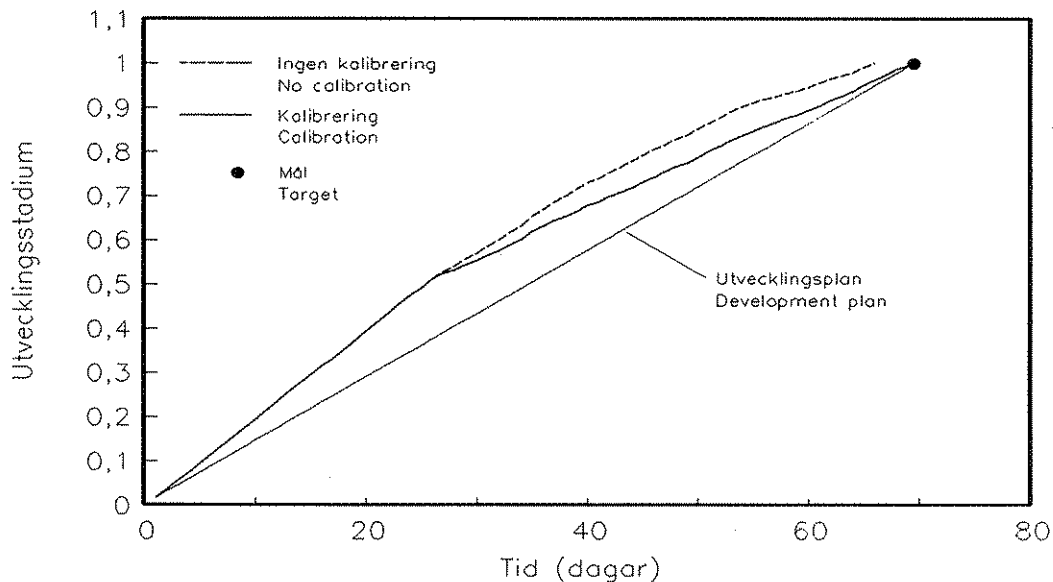
Avvikelse (dagar)/Deviation (days), Parameterförändring/Changes in parameter value.

I det studerade intervallet är modellen mest känslig för en förändring av A_{max} . Ur biologisk synvinkel är det A_{max} som, i modellen, bestämmer den maximala utvecklingshastigheten. Det är också denna parameter som ur biologisk synvinkel bedöms vara mest osäker. Slutsatsen är således att i ett adaptivt regelsystem är det lämpligt att kalibreringen i en adaptiv regulator baseras på A_{max} .

SIMULERING MED ADAPTIV REGLERING

För att visa på möjligheten att använda sig av adaptiv reglering vid styrning av *Cie-*
neraria genomfördes två olika simuleringar. Ett "felaktigt" värde på A_{max} infördes i
regulatorn. I den första simuleringen användes detta felaktiga värde under hela
processtiden medan A_{max} kalibrerades i den andra. Värdet på A_{max} sattes till ett för
lågt värde vilket medförde att regulatorn beräknade en för hög temperatur. Detta
innebar att utvecklingen kom att gå för fort. Värdet på A_{max} minskades med 20%,
från 0,0020 till 0,0016. När utvecklingsstadiet 0,50 inträffade genomfördes kalibrer-
ingen av A_{max} . De båda simuleringarna genomfördes i övrigt under samma villkor.

Resultatet av simuleringarna visade att det är fullt möjligt att kalibrera regulatorn
under pågående odling (figur 15).



Figur 15. Simulerad utveckling med respektive utan kalibrering av regulatorn. Kalibrering gjord vid utvecklingsstadiet 0,50.

Figure 15. Simulated development with and without calibration of the regulator. The calibration was done at development stage 0.50.

Utvecklingsstadium/development stage, Tid (dagar)/time (days).

Då ingen kalibrering genomfördes gick utvecklingen hela tiden för fort gentemot den
önskade. Detta var också det förväntade resultatet. Eftersom värdet på A_{max} under
hela processtiden varit för lågt har regulatorn hela tiden ställt in en för hög tempe-
ratur. I det fall då kalibrering genomfördes av A_{max} , bromsades utvecklingsförloppet
upp och önskat utvecklingsstadium inträffade vid rätt tidpunkt.

BILDANALYS SOM METOD FÖR REGISTRERING AV KULTUR- FÖRLOPPET HOS ETT KRUKVÄXTBESTÅND

En förutsättning för ett helautomatiserat odlingsssystem är att kulturens tillväxt och utveckling kan avläsas och omvandlas till styrimpulser för klimatreglering, glesning och andra skötselåtgärder. I detta sammanhang utgör bildanalys ett potentiellt intressant verktyg för avläsning av tillståndet hos en kultur. Enligt principen för digital bildbehandling uppfångas ett objekts bild med t.ex. en videokamera. Bilden överförs till en dator där den indelas i en serie punkter (pixlar). Varje punkt i bilden innehåller därmed specifik information om intensitet. Med utgångspunkt från detta kan man avgöra hur stor andel av hela bilden som har en viss färg eller gråton. I vissa avancerade system är det även möjligt att identifiera mönster. Med denna metod skulle det eventuellt vara möjligt att registrera utveckling och tillväxt genom att digitalt mäta storlek och färg hos blomknoppar och bladverk. Om man digitalt kan bestämma vid vilket utvecklingsstadium en kultur befinner sig är det möjligt att beräkna hur klimatet bör justeras, samt automatiskt utföra justeringen, så att den specificerade odlingsplanen hålls. Vidare skulle digitala mätningar av plantornas tillväxt på bredden kunna utgöra grunden för beslut rörande behovet av glesning. Mätningar av plantornas tillväxt på höjden skulle kunna kopplas till prognossystem rörande tillväxtretardering. Även här skulle avläsningssystemet, i princip, göra det möjligt att utföra glesningen och retarderingen helt automatiskt. Inom detta projekts ramar, var avsikten främst att undersöka möjligheten att använda bildanalys för identifiering av utvecklingsstadier hos en krukväxt. Då även kulturens behov av utrymme är intressant i ett automatiserat odlingsystem, undersöktes också möjligheten att utnyttja bildanalyssystem för att bestämma när glesning skall ske. Vidare utvecklades en prognosmodell för glesning som kopplad till digital bildanalys, gör det möjligt att automatisera glesningsarbetet.

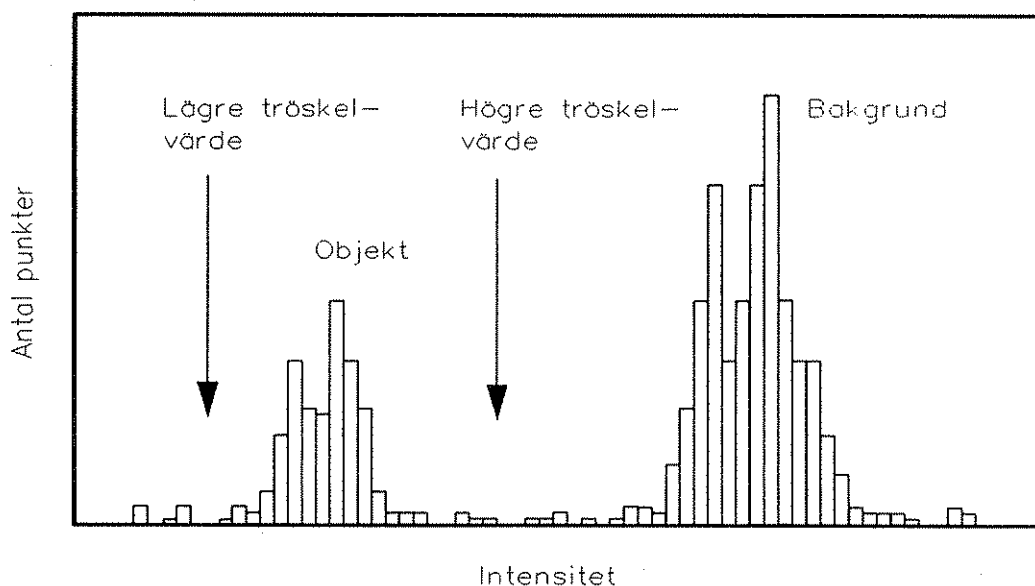
IDENTIFIERING AV BLOMKNOPPENS UTVECKLING MED DIGITAL BILD- ANALYS

Material och metoder

Utrustningen som användes för bildanalysen var av fabrikat Skye SI-745 och användes tillsammans med en AT/386-baserad dator med färggrafik. Upplösningen på systemet var 1/640-del av fältets bredd och areaupplösningen var 1/224000 av det betraktade fältet. Mätnoggrannheten anges till $\pm 1\%$ eller bättre. (Kontrollmätning av en känd ytas area visade på $\pm 1-1,5\%$.)

Den valda utrustningen hade flera olika funktioner inbyggda. För detta projekts genomförande utnyttjades möjligheten till färgidentifikation och areabestämning. Att kunna identifiera olika föremål, t.ex. en blomknopp genom dess form, lät sig dock inte göras med den använda programvaran.

För att mäta t.ex. andelen grönt eller blått i bilden, behandlades bildinformationen på ett sådant sätt att en stor kontrastskillnad uppkom mellan det studerade objektet och bakgrunden. Varje punkt i bilden har en viss intensitetsnivå. Detta utnyttjades för att urskilja objektet. Med bildanalysprogrammet bestämdes antal punkter, pixlar, i bilden med en viss intensitet. För att kunna urskilja objektet från bakgrunden och mäta det, ansattes en lägsta och en högsta intensitet (tröskelvärden) som objektets punkter ansågs ha. På så vis kunde antalet punkter bestämmas inom de satta gränserna och därmed kunde objektets storlek bestämmas i procent av den totala bilden (figur 16).



Figur 16. Princip för att definiera ett objekt i en bild med hjälp av tröskelvärden.

Figure 16. Defining objects in an image by means of threshold values.

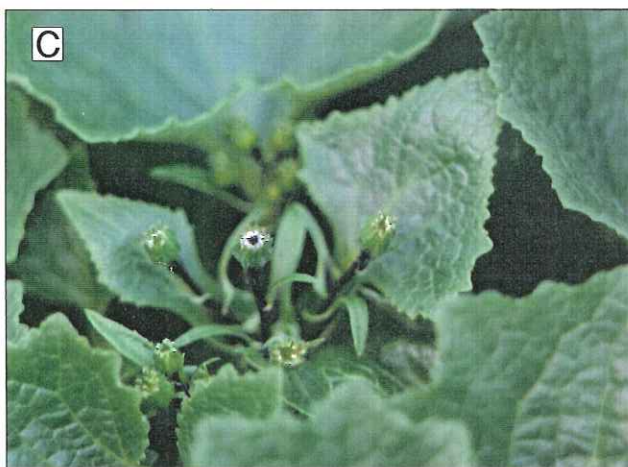
Antal punkter/number of pixels, Intensitet/intensity, Bakgrund/background, Objekt/object, Lägre tröskelvärdet/low threshold value, Högre tröskelvärdet/high threshold value

Den makroskopiska blomutvecklingen hos *Cineraria* börjar med en synlig terminalknopp som tillväxer i storlek, för att sedan mot kulturtidens slut öppna sig, varvid blommans färg (blå) exponeras.

Eftersom den använda utrustningen inte kunde användas för att identifiera knoppens form, undersöktes istället sambandet mellan andel blå färg i bilden och det registrerade utvecklingsstadiet. För *Cineraria* gäller att blomknoppen inte visar någon annan färg än grön förrän utvecklingsstadiet 0,70 inträffat (tabell 1, figur 17). Eftersom blomningen hos *Cineraria* är mycket ojämn inom en hel kulturomgång, existerar emellertid flera olika utvecklingsstadier samtidigt vilket skapar svårigheter då man vill exakt bestämma ett utvecklingsstadium för beståndet. Som följd av detta

borde blå färg vara synlig innan medelutvecklingsstadiet 0,70 inträffar och därmed skulle det eventuellt också vara möjligt att registrera beståndets utvecklingsstadium strax innan stadium 0,70.

All bildanalys gjordes utifrån färgfoton tagna på kulturen i växthuset. En kamera monterades i en fixpunkt ovanför en definierad yta på odlingsbordet under hela odlingsförloppet. Den definierade yta fotograferades kontinuerligt med 1-2 dagars mellanrum. Vid varje fotograferingstillfälle gjordes en manuell observation av det genomsnittliga utvecklingsstadiet på de plantor som fanns på ytan.



Figur 17 Olika stadier på blomutvecklingen hos Cineraria. För bestämning av utvecklingsstadiet studeras endast terminalknoppens utveckling.
 A - stadium 0,50 B - stadium 0,60 C - stadium 0,70 D - stadium 0,80
 E - stadium 0,90 F - stadium 1,00

Figure 17 Stages of floral development of Cineraria. Only terminal bud is studied when the stage of development is determined.
 A - stage 0.50 B - stage 0.60 C - stage 0.70 D - stage 0.80
 E - stage 0.90 F - stage 1.00

Resultat

Resultatet från undersökningen om möjligheten till att identifiera utvecklingsstadi-
er genom att mäta andel blå färg, visade att uppnått utvecklingsstadium kunde stäl-
las upp som funktion av registrerad andel blå färg enligt;

$$U = \frac{aA_b}{b + A_b} + c \quad (21)$$

där

U = utvecklingsstadium
development stage

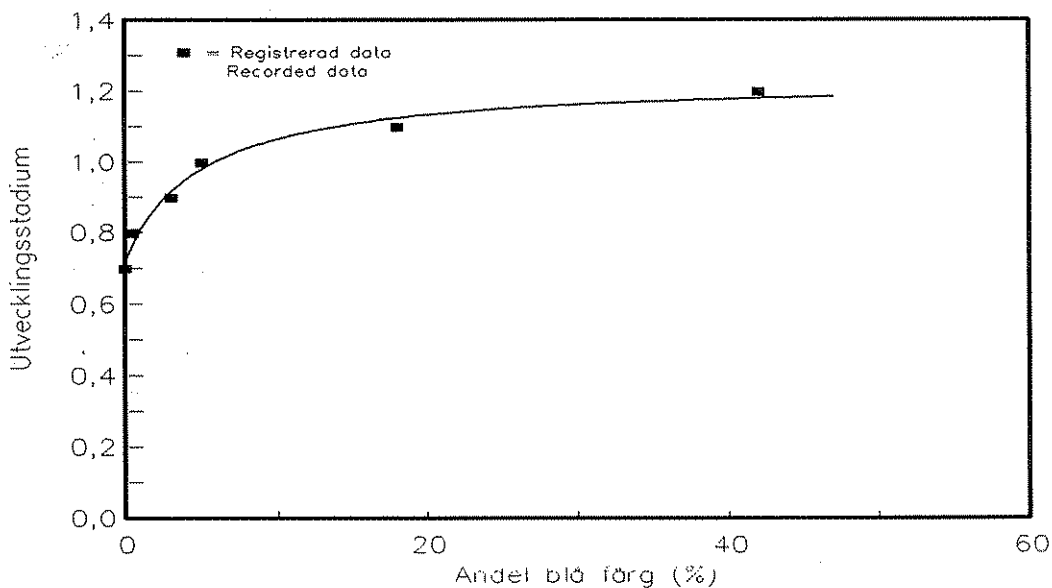
A_b = andel blått (%)
percentage blue (%)

a = 0,514

b = 4,856

c = 0,716.

Regressionsfaktorn r² bestämdes till 0,983 (figur 18).



Figur 18. Cinerarias blomutvecklingsstadium som funktion av den blåa ytans andel av den totala fotograferade ytan, (%).

Figure 18. Stage of floral development as a function of percentage of blue area of total photographed area, (%).

Utvecklingsstadium/development stage, Andel blå färg/percentage of blue colour

Av ekvationen framgår att det första registrerbara utvecklingsstadiet är större än 0,70. När utvecklingsstadiet 0,70 inträffat, är dock utvecklingen så långt framskriden att endast små möjligheter finns för att korrigera för en större avvikelse från en tänkt utvecklingsplan. Eftersom utvecklingsstadiet 0,90 är ett rimligt slutstadium, skulle man endast kunna göra en korrigering (vid stadiet 0,80). Den använda metoden kan därför knappast användas som bas för styrning av produktionsförloppet, men skulle kunna användas för att automatiskt avgöra när kulturen börjar bli klar för försäljning.

Diskussion

Den använda metoden kunde inte identifiera plantbeståndets utveckling innan medelutvecklingsstadiet 0,70 hade inträffat. Detta var ett resultat av flera samverkande faktorer. Andelen blå färg var, som förväntat, mycket liten innan hela plantbeståndet hade nått stadium 0,70. Eftersom beståndet dessutom utgjordes av fröplantor skiftade blommornas blåa färg i många nyanser. Bildanalyssystemet, med sin begränsade upplösningsförmåga, kunde inte uppfatta alla dessa nyanser som en enhetlig blå färg och därför gick viktig information i bilden förlorad. Metoden att analysera beståndet genom fotografier hade fördelen av att bildanalysen kunde utföras utan tidspress i ett datalab. Fotograferingen medförde dock att en del av kontrasten mellan färger och mellan färgnyanser gick förlorad, vilket påverkade exaktheten i den fortsatta bildanalysen. Vid senare tillfällen visade det sig lättare att identifiera andelen blå färg på odlingsytan då systemets videokamera placerades direkt över plantbeståndet.

Det kan diskuteras vilka krav man måste ställa på ett avläsningssystem för att det skall kunna känna igen blomknoppens utveckling innan stadium 0,70 inträffat. Systemet måste antingen kunna identifiera blomknoppens runda form, eller kunna känna igen det mönster som bildas av anhopningen av gröna knoppar (figur 17). Det finns två möjliga lösningar till detta. Antingen används ett bildanalyssystem som har en hög upplösning och en förmåga att känna igen mönster och strukturer, eller också används en laserteknik där tillväxten i terminalknoppens diameter mäts (Walklate, 1989).

BESTÄMNING AV KRUKVÄXTBESTÅNDETS PLANTTÄTHET MED DIGITAL BILDANALYS

För krukväxtföretaget är det viktigt att odlingsytorna utnyttjas optimalt. Plantorna i beståndet bör därför stå relativt tätt men dock ej så tätt att man får en oönskad sträckningstillväxt. Därför krävs återkommande glesningar av plantbeståndet. För att kunna erhålla en automatiskt glesning krävs att man känner sambandet mellan plantstorlek, planttäthet och andelen av odlingsytan som är täckt av bladverket. När

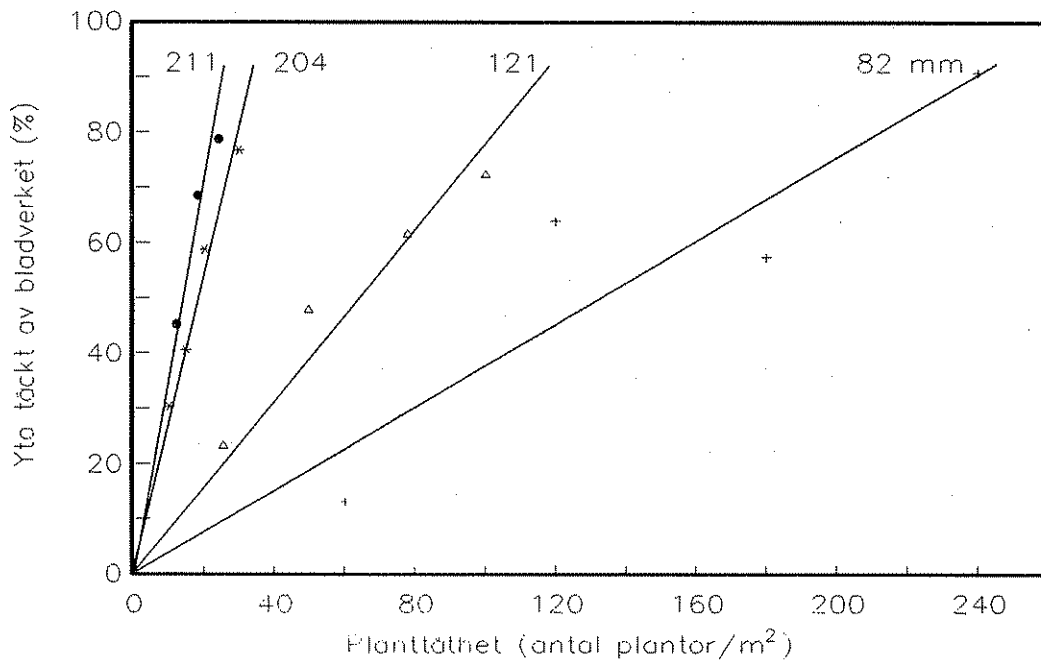
andelen av odlingsytan som är täckt av bladverket överskrider ett bestämt värde, den kritiska gränsen för glesning, genomförs glesningen. Den odlingsyta bladverket upptar kan med fördel bestämmas med hjälp av digital bildanalys.

Material och metoder

I försöket bestämdes sambandet mellan plantstorlek, planttäthet och andelen av odlingsytan som är täckt av bladverket genom att en serie av fotografier togs där plantor av en viss storlek placerades vid olika planttätheter. Genom att med bildanalyssystemet bestämma andelen grön färg i fotografiet, kunde således den andel som bladverket upptog bestämmas vid varje enskild kombination av plantstorlek och planttäthet. Plantans storlek bestämdes genom den största diameter.

Resultat

Undersökningen av samspelet mellan plantdiameter, d_p , planttäthet, n_t , och den andel av odlingsytan som är täckt av bladverket, A_{gp} , visade att det fanns ett linjärt samband mellan planttäthet (antal plantor per m^2) och bladverkets andel av odlingsytan. Lutningen hos denna linje ökar dock med ökad diameter hos plantan (figur 19).



Figur 19. Procentuell andel av odlingsytan som täcks av bladverket, bestämd med bildanalyssystem, som funktion av plantdiameter, mm, och planttäthet, antal plantor/m².

Figure 19. Percentage area covered by crop canopy, determined by image analysis system, as function of plant diameter, mm, and plant density, number of plants/m².

Yta täckt av bladverket/area covered by crop canopy, Planttäthet/plant density

Resultaten från regressionerna är sammanställda i tabell 6. Vid regressionsberäkningen har det förutsatts att linjen skall utgå ifrån origo eftersom ingen yta kan täckas av bladverk om plantor saknas.

Tabell 6. Resultat av linjär regression, $A_{gp} = k n_t$. Ekvationen beskriver procentuell andel av odlingsytan som är täckt av bladverket som funktion av planttäthet, antal plantor per kvadratmeter. Plantans diameter d_p konstant.

Table 6. Results of a linear regression, $A_{gp} = k n_t$. The equation describes percentage area covered by crop canopy as function of plant density, number of plant per square meter. Plant diameter d_p constant.

	Plantdiameter/Plant diameter (mm)			
	82	121	204	211
k	0,376	0,783	2,702	3,513
r ²	0,825	0,905	0,960	0,880

Som tidigare nämnts varierar linjens lutning med plantans diameter. Detta förhållande kan beskrivas med följande uttryck;

$$k = e^{(a+bd_p)} \quad (22)$$

där

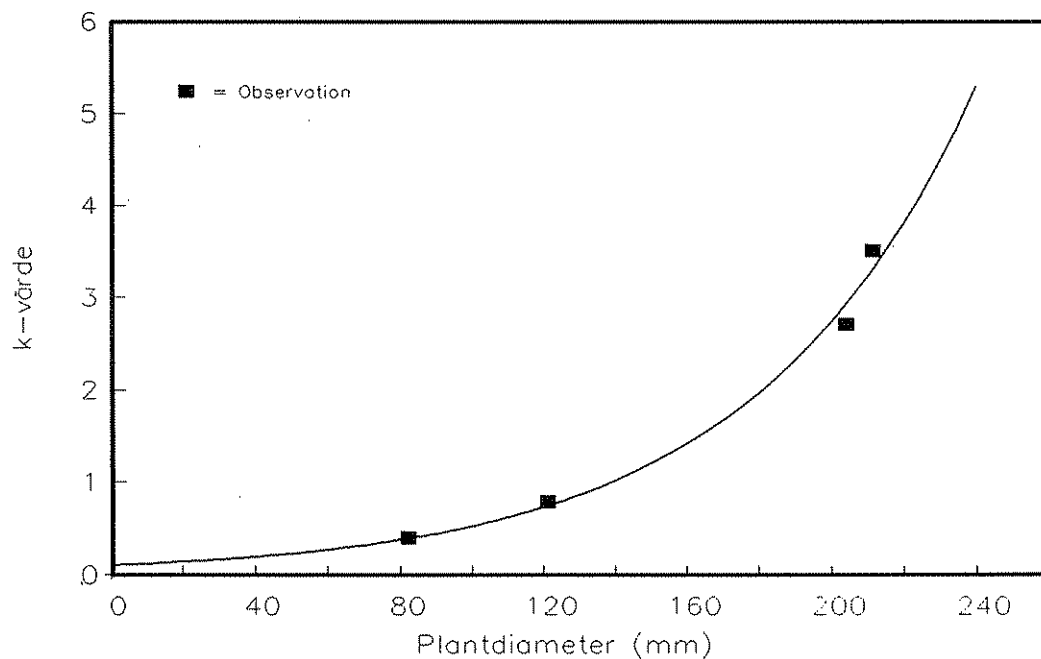
k = k-värde (lutningen)
x-coefficient (slope)

d_p = plantdiameter (mm)
plant diameter (mm)

a = -2,305

b = 0,0166.

Vid regressionsberäkningen erhöles ett r^2 -värde på 0,998 (figur 20).



Figur 20. k-värdet som funktion av plantdiameter.

Figure 20. The x-coefficient as a function of plant diameter.

k-värde/x-coefficient, plantdiameter/plant diameter

Planttätheten kan således beskrivas som en funktion av plantans diameter och andel av odlingsytan som är täckt av bladverket som bestämts med bildanalyssystemet;

$$n_t = A_{gp} e^{-(a+bd_p)} \quad (23)$$

där

- A_{gp} = andel av odlingsytan som är täckt av bladverket (%)
percentage area covered by crop canopy (%)
- d_p = plantans diameter (mm)
plant diameter (mm)
- n_t = planttäthet (antal plantor/m²)
plant density (number of plants/m²)
- a = -2,305
- b = 0,0166.

Diskussion

Undersökningen visar att bildanalys skulle kunna utnyttjas som en metod för att registrera när det är dags att glesa plantorna i ett krukväxtbestånd. Med bildanalys bestäms andelen av odlingsytan som är täckt av bladverket (% grön färg) och när detta närmar sig ett kritiskt värde genomförs glesningen. I försöket skattades detta kritiska värde, vid vilken glesning bör ske, till cirka 80%. Om dessutom den enskilda plantans diameter kunde bestämmas med bildanalyssystemet, vore det möjligt att automatisera glesningen. Genom att i ekvation 23 sätta in värden på plantornas diameter, d_p , och önskad andel av odlingsytan som skall vara täckt efter glesningen, A_{gp} , kan erforderlig planttäthet, n_t , beräknas. Denna information skulle till exempel sedan kunna gå vidare till en robot som genomförde glesningen. Teoretiskt skulle alltså den önskade andelen växyta kunna upprätthållas i varje ögonblick.

Diametern kunde dock inte bestämmas automatiskt med det använda bildanalyssystemet beroende på begränsning i den använda programvaran. Med annan programvara skulle det kunna vara möjligt att åstadkomma detta med existerande bildanalyssystem. Utvecklingen av sådan programvara var dock alldeles för omfattande för att få plats i det föreliggande projektet. En annan teknik skulle också kunna tillgripas, t.ex. laserteknik. Walklate (1989) beskriver ett laserinstrument för att mäta en växts geometri.

Det beskrivna systemet är en förutsättning för "On-line"-styrning av glesningsförloppet. Ur planeringssynpunkt krävs dock att odlaren vet vilka odlingsytor som kommer att vara tillgängliga under säsongens olika delar för att han på ett optimalt sätt skall kunna kombinera sina kulturomgångar. Odlaren måste då ha möjlighet att förutsäga när en glesning skall ske för att han skall kunna ha erforderliga ytor tillgängliga. För att kunna göra detta, krävs en modell som beskriver hur plantans diameter växer i förhållande till tiden och klimatet:

$$d_p = f(\text{tid, klimat}) \quad (24)$$

Dessutom måste modellen kunna beskriva sambandet mellan plantans diameter, planttäthet och andelen av odlingsytan som är täckt av bladverket för att modellen skall kunna kopplas till det automatiskt glesningssystem baserat på digitala bildanalys. Genom att dessutom tillföra en strategi för hur glesningen skall ske, hur plantorna skall placeras på bordet, skulle en hel kulturomgång kunna simuleras med avseende på utrymmesbehov vid olika tidpunkter.

PROGNOSMODELL FÖR GLESNING

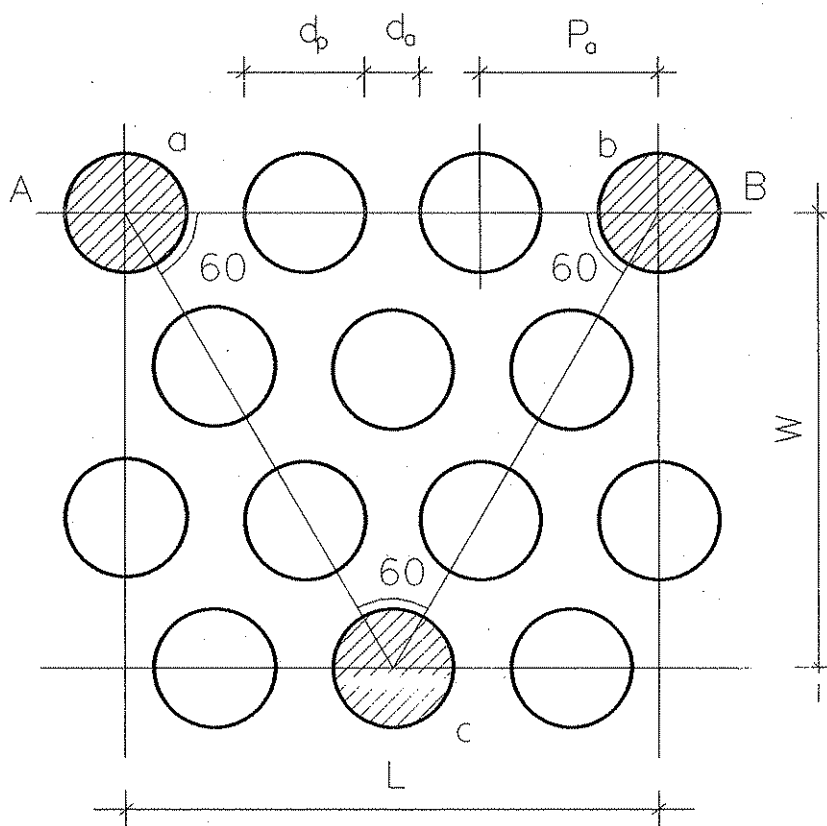
I föregående studie visades att digital bildanalys kunde användas för att bedöma när det var dags att glesa i ett krukväxtbestånd. Vidare underströks betydelsen av att kunna förutsäga när glesningstillfället inträffar så att ytor är disponibla när glesningen sker. För att göra en sådan prognos föreslogs därför att en modell konstruerades som beskrev samspelet mellan tillväxten av plantans diameter, beståndets planttäthet och den yta som är täckt av beståndets bladverk. Syftet med följande undersökning var att utveckla och testa denna modell.

Material och metoder

Modellbeskrivning

För att kunna beräkna den yta av odlingsytan som är täckt av bladverket, har en rad förutsättningar ställts upp (figur 21):

- 1) Krukorna på bordet sätts ut i förband så att alla krukor har lika avstånd till de närmaste krukorna runt omkring. För att uppnå detta krävs att krukorna sätts ut i ett mönster som beskrivs av liksidiga trianglar.
- 2) Minst tre krukor sätts ut på bordet.
- 3) Krukorna sättas ut på bordet så jämt fördelade som möjligt. Genom att ställa ut de två första krukorna på platserna *a* och *b* enligt figur 21 uppfylls detta tredje krav.
- 4) Krukväxtens bladverk täcker en cirkulär yta och kan då symboliseras med en cirkel.
- 5) Alla krukväxter är lika stora.



Figur 21. Geometriska förutsättningar för placering av krukväxter på en definierad bordsyta.

Figure 21. Geometrical conditions for placing pot plants on a defined bench area.

Genom att utnyttja ovanstående förutsättningar kan en funktionen ställas upp för att beräkna storleken på den yta av odlingsytan som är täckt av bladverket. Funktionen kan sammanfattas enligt följande:

$$A_g = \begin{cases} (m - m_k) \pi r^2 & \text{om } 2r \leq P_a \\ A_e - A_h n_h & \text{om } 2r > P_a \text{ och } r < r_{\max} \\ A_e & \text{om } r \geq r_{\max} \end{cases} \quad (25)$$

där

A_g = area av odlingsytan som är täckt av bladverket
area covered by crop canopy

A_e = definierad odlingsyta $W \cdot L$ (figur 21)
defined area $W \cdot L$ (figure 21)

A_h = area som finns mellan tre plantor när bladverken överlappar varandra (se appendix)
area between three pot plants when the foliage overlap each other (see appendix)

- appendix)
- m = antal plantor som står på den definierade ytan A_e
number of pot plants standing in the defined area A_e
- m_k = andel plantor som ligger utanför den definierade ytan A_e
portion of the pot plants outside the defined area A_e
- r = plantans (cirkelns) radie
pot plant (circle) radius
- n_h = antal "hela" hål inom den definierade ytan A_e (se appendix)
number of "whole" holes in the defined area A_e (see appendix)

För härledning av funktionen hänvisas till appendix.

Genom att ställa ut plantorna på odlingsbordet i ett mönster så att liksidiga trianglar bildas, utnyttjas ytan på ett så optimalt sätt som möjligt. Varje planta får lika avstånd till plantorna i sin närmaste omgivning. Den strategi man väljer för utsättning av plantorna, bestämmer hur många plantor, n_p , man skall ställa ut på sträckan L utmed linjen AB inkl. planta a och b (figur 21). Följande metod har här använts:

Först beräknas antalet "hela" plantor genom följande uttryck:

$$n_{pl} = \text{INT} \left(\frac{L}{d_p + d_a} \right) + 1 \quad (26)$$

Beteckningen *INT* anger att endast heltalsdelen av kvoten skall medtagas. Härefter förutsätter vi att det är möjligt att minska avståndet d_a för att kunna göra mindre korrigeringar av antalet plantor. Denna möjlighet införs för att undvika att en planta tas bort pga. att endast en liten sträcka saknas för att den skall få plats. Med hänsyn till eventuell korrigering beräknas antalet plantor enligt följande;

$$n_p = \begin{cases} n_{pl} + 1 & \text{om } n_{pl} (d_p + (1-k)d_a) \leq L \\ n_{pl} & \text{om } n_{pl} (d_p + (1-k)d_a) > L \end{cases} \quad (27)$$

där

- k = faktor för tillåten minskning av avståndet mellan plantorna, d_a , $0 \leq k \leq 1$
factor for allowed decreasing of distance between pot plants, d_a , $0 \leq k \leq 1$.

Plantans diameter kan man beskriva som en funktion av tid och klimat:

$$d_p = f(\text{tid}, \text{klimat}) \quad (28)$$

Eftersom uppgifter saknades om samspelet mellan klimat och tillväxten hos plantans diameter, beskrevs tillväxtförloppet med en logistisk tillväxtekvation;

$$d_p = \frac{A}{(1 + Be^{-ct})} \quad (29)$$

där

d_p = plantans diameter
plant diameter
 t = tid
time.
 A, B, C = parametrar
parameters.

Parameterestimering

För att bestämma värdena på parametrarna A , B och C i ekvation 48, användes data från tidigare experiment. Data om plantans diameter och tidpunkten för bestämning av den, hämtades ifrån experimentet att bestämma en funktion som beskriver sambandet mellan andel av odlingsytan som täcks av bladverket och plantstorlek samt planttäthet. (Kapitel "Bestämning av krukväxtbeståndets planttäthet ...".) Diametern bestämdes med ett antal dagars mellanrum. Den mättes manuellt i mm och utgjordes av den största bredden (diametern). Tiden mättes i dagar. För bestämning av parametervärdena, användes statistikprogrammet NCSS (Number Cruncher Statistical System) som utnyttjar Levenberg-Marquardt icke-linjära minsta kvadrat algoritm.

Validering

För validering jämfördes en beräkning av andelen av odlingsytan som är täckt av bladverket, med hänsyn till glesning, och insamlad data om andelens tillväxt med tiden. Under den aktuella tiden genomfördes en glesning och andelens storlek bestämdes med hjälp av bildanalys. Den insamlade datan låg inte till grund för parameterestimeringen enligt ovan. Som startvärden för beräkningarna användes uppgifter om plantornas genomsnittliga diameter samt avståndet mellan plantorna som gällde då registreringen startade. När kulturen glesades utgjorde ytans storlek 78% av den totala odlingsytan, vilket uppmättes med hjälp av bildanalyssystemet. Detta värdet fick utgöra det kritiska värdet för glesning vid simuleringen.

Följande indata användes vid simuleringen;

- plantornas diameter	120 mm
- avstånd mellan plantorna	50 mm

- odlingsytans bredd 1000 mm
- kritiskt värde för glesning 78 %
- korrigeringsfaktorn k 0,1 (10%).

Resultat

Tillväxten av den enskilda plantans diameter antogs kunna beskrivas med den logistiska tillväxtekvationen;

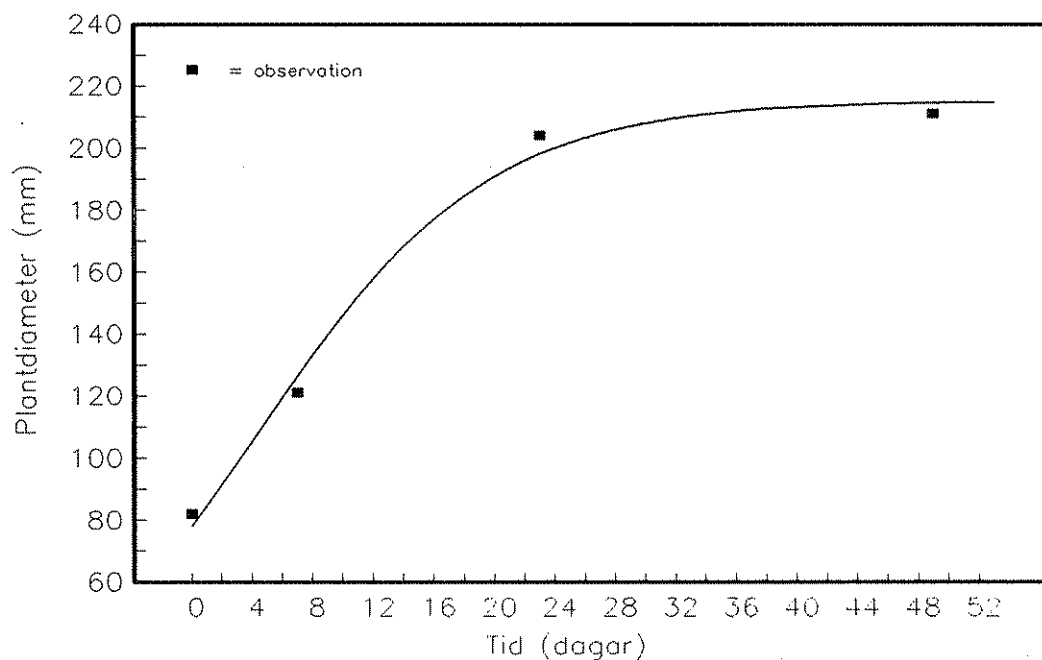
$$d_p = \frac{A}{(1 + Be^{-ct})} \quad (30)$$

där

- d_p = plantans diameter (mm)
plant diameter (mm)
- t = tid (dagar)
time (days).

Vid parameterestimeringen erhöles följande värden på parametrarna och regressionsfaktorn r^2 (figur 22):

- A = 215,2 (mm)
- B = 1,757
- C = 0,131
- r^2 = 0,992



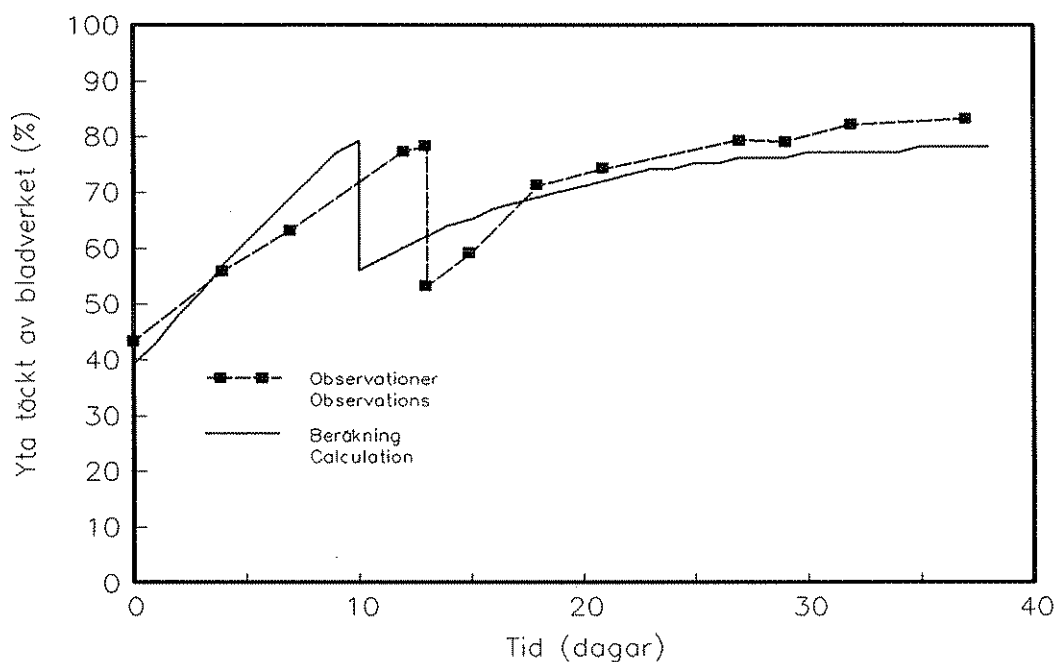
Figur 22. Tillväxt av plantans diameter som funktion av tid.

Figure 22. Growth of plant diameter as function of time.

Plantdiameter/*plant diameter*, Tid (dagar)/*time (days)*

Endast fyra datapunkter kunde erhållas ur datamängden. Detta gör att säkerheten i de skattade parametervärdena jämfört med de "verkliga" parametervärdena blir något osäkra.

Resultatet av jämförelsen mellan den genom simulering beräknade andelen av odlingsytan som täcks av bladverket och verklig registrerad andel, visar att det är fullt möjligt att beräkna tillväxten av den andel av odlingsytan som är täckt av bladverket och på så sätt kunna prognostisera tidpunkten för glesning. Vidare framgick att själva glesningen kan simuleras (figur 23).



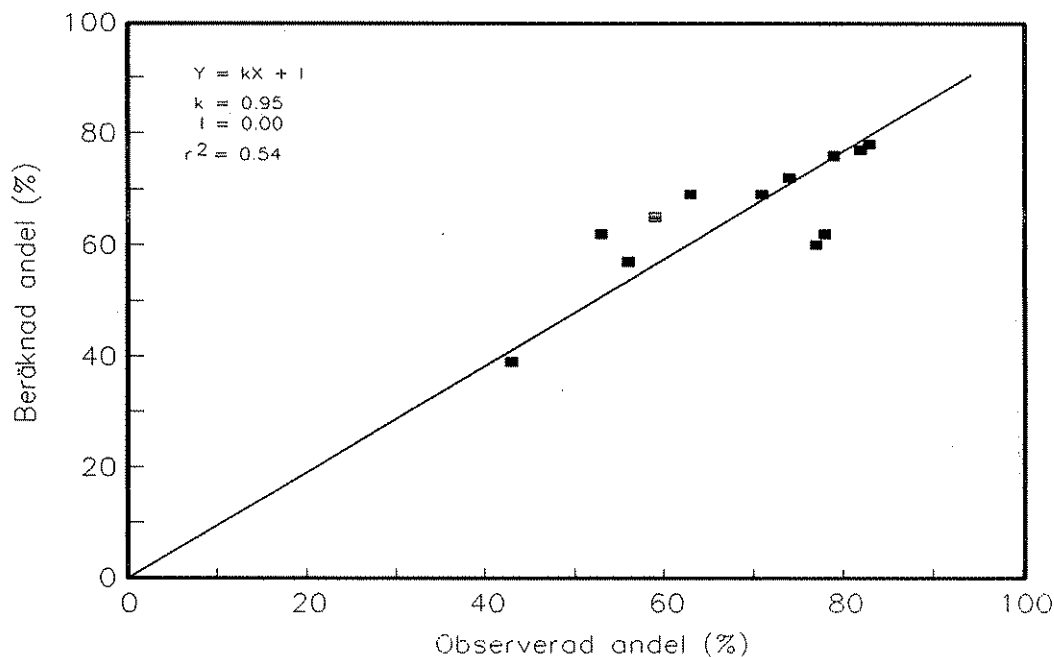
Figur 23. Beräknad och observerad tillväxt av andel av odlingsyta som täcks av bladverket. Glesning gjord en gång.

Figure 23. Calculated and observed growth of area covered by crop canopy. Spacing has been done once.

Yta täckt av bladverket/area covered by crop canopy, Tid (dagar)/time (days)

Den beräknade andelen ökade emellertid betydligt fortare än den registrerade i början av perioden. Detta innebar också att den beräknade glesningen kom att inträffa några dagar tidigare än i verkligheten.

För en jämförelse mellan beräknad och observerad andel genomfördes en linjär regression dem emellan och en r^2 -faktor på 0,54 erhöles (figur 24).



Figur 24. Regression mellan observerad och beräknad tillväxt andel av odlingsytan som täcks av bladverket.

Figure 24. Regression between observed and calculated growth of area covered by crop canopy.

Beräknad andel/calculated percentage, Observerad andel/observed percentage

Det låga värdet på r^2 förklaras framför allt av den stora avvikelser i tidpunkten för glesningen.

Diskussion

Orsakerna till att överensstämmelsen inte blev bättre mellan beräknad och registrerad tillväxt kan vara flera. Detta kan eventuellt förklaras med osäkerheten i de skattade parametervärdena i ekvationen för plantans tillväxt. En annan förklaring kan vara att formen på en Cineraria-planta, sett ovanifrån, är mer triangulär i början för att bli mer och mer cirkulär under växtperioden. Eftersom det i modellen förutsätts cirkulära plantor, beräknas en för stor area av plantan i början av perioden. Detta gör att modellen i början av perioden överskattar tillväxten av den andel som täcks av bladverket. Mot slutet av perioden överensstämmer den beräknade och den observerade tillväxten av andelen. Att modellen överskattar tillväxten i början av perioden innebär också att glesningstillfället kommer att ske på ett tidigare stadium än i verkligheten.

En variabel som inte är medtagen i modellen över tillväxten av plantans diameter är klimatet. Betydande klimatiska skillnader kan ha rått mellan de olika perioderna för insamling av data till dels tillväxtmodellen, dels för valideringen av modellen. Förhållandena kan ha varit mera gynnsam för tillväxten i det ena eller andra fallet. Det som krävs för en bättre överensstämmelse med verkligheten, är en tillväxtmodell i vilken även hänsyn tas till klimatet.

Undersökningen har dock visat att det är fullt möjligt att genom simuleringar kunna beräkna ett krukväxtbestånds tillväxt av bladverket, och att det är fullt möjligt att simulera en glesning, samt att kunna prognostisera tidpunkten för glesningen.

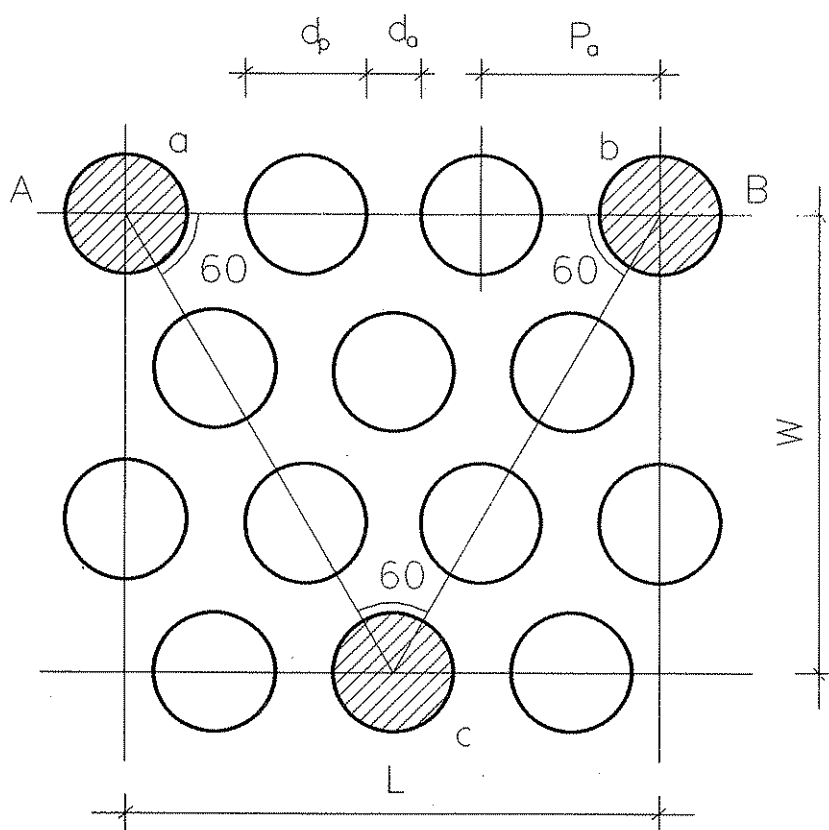
LITTERATURREFERENSER

- Bot, G.P.A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model Wageningen.
- Brown, G. & Isfält, E. 1969. Instrålning från sol och himmel i Svergie under klara dagar. Statens råd för byggforskning. Rapport 19. Stockholm.
- Duffie, V. & Beckman, W. 1974. Solar energy and thermal processes. John Wiley & Sons. New York.
- Kjellström, B. & Eriksson, P., 1988. Linjeproduktion i växthusodlingen. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för lantbruksteknik, Rapport 125. Uppsala.
- Larsen, R., 1988. A dynamic model for prediction of development rate of the pot plant *Senecio x Hybridus* Hyl. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Horticultural Science. Alnarp.
- Larsen, R. 1988. A prediction model for floral development of *Senecio X hybridus* Hyl. 'Molls stam'. Swedish J. Agric. Res. 18:99-103, 1988.
- Nilsson, G. 1983. Qvaxthus - Datormodell för växthusets energibalans. Sveriges lantbruksuniversitet, Inst. för lantbrukets byggnadsteknik. Rapport 37. Lund.
- Nilsson, G. 1988. Växthuskonstruktionens ljusreduktion. Medeltransmissionsfaktor för direkt ljus genom växthustak. Sveriges lantbruksuniversitet, Inst. för lantbrukets byggnadsteknik. Rapport 63. Lund.
- Udink ten Cate, A.J., Bot, G.P.A. & van Dixhoorn, J.J., 1978. Computer control of greenhouse climates. Acta Hort. Int. Soc. Hort. Sci. 87:265-272.
- Walklate, P.J. 1989. A laser scanning instrument for measuring crop geometry. Agric. and Forest Met. 46(1989). Pp. 275-284.

BESKRIVNING AV MODELL FÖR BERÄKNING AV GRÖNMASSA, A_g

För att kunna beräkna den yta av odlingsytan som är täckt av bladverket, har en rad förutsättningar ställts upp (figur A1):

- 1) Krukorna på bordet sätts ut i förband så att alla krukor har lika avstånd till de närmaste krukorna runt omkring. För att uppnå detta krävs att krukorna sätts ut i ett mönster som beskrivs av liksidiga trianglar.
- 2) Minst tre krukor sätts ut på bordet.
- 3) Krukorna sätts ut på bordet så jämt fördelade som möjligt. Genom att ställa ut de två första krukorna på platserna a och b enligt figur A1 uppfylls detta tredje krav.
- 4) Krukväxtens bladverk täcker en cirkulär yta och kan då symboliseras med en cirkel.
- 5) Alla krukväxter är lika stora.



Figur A1. Geometrisk förutsättning för placering av krukväxter på en definierad bordsyta.

Figure A1. Geometrical conditions for placing pot plants on a defined bench area.

Eftersom vinklarna i en liksidig triangel är 60° kan arean, A_e , av den yta som plantorna ställts ut på beräknas enligt följande;

$$A_e = WL = \frac{\sqrt{3}}{2} L^2 \quad (A1)$$

där L är ytans längd. Längden beräknas enligt följande ekvation där W är den definerade ytans bredd (figur A1):

$$L = \frac{2W}{\sqrt{3}} \quad (A2)$$

Centrumavståndet mellan plantorna, P_a , och antalet plantor på ytan, m , bestäms av det antal plantor, n_p , som ställs ut längs linjen AB på sträckan L inkl. planta a och b (figur A1). Plantornas centrumavståndet beräknas enligt;

$$P_a = \frac{1}{n} L \quad (A3)$$

där

$$n = n_p - 1. \quad (A4)$$

Antalet plantor i ytan inkl. de som står på ytans begränsningslinjer beräknas enligt följande:

$$m = (2n+1) \frac{n}{2} + (n+1) = n^2 + \frac{3}{2}n + 1 \quad \text{för } n = 2, 4, 6, 8, \dots \quad (A5)$$

$$m = (2n+1) \frac{n+1}{2} = n^2 + \frac{3}{2}n + \frac{1}{2} \quad \text{för } n = 1, 3, 5, 7, \dots \quad (A6)$$

För att beräkna storleken på den yta av odlingsytan som är täckt av bladverket, A_g , måste hänsyn tas till om växternas blad överlappar varandra eller inte, dvs. i vårt fall, om cirkelarna överlappar varandra eller inte. Överlappning sker om cirkelns diameter, d_p , överstiger plantornas centrumavstånd, P_a . I det fall överlappning ej sker beräknas storleken på den yta av odlingsytan som är täckt av bladverket, A_g , enligt följande (figur A2);

$$A_g = (m - m_k) \pi r^2 \quad \text{om } 2r \leq P_a \quad (A7)$$

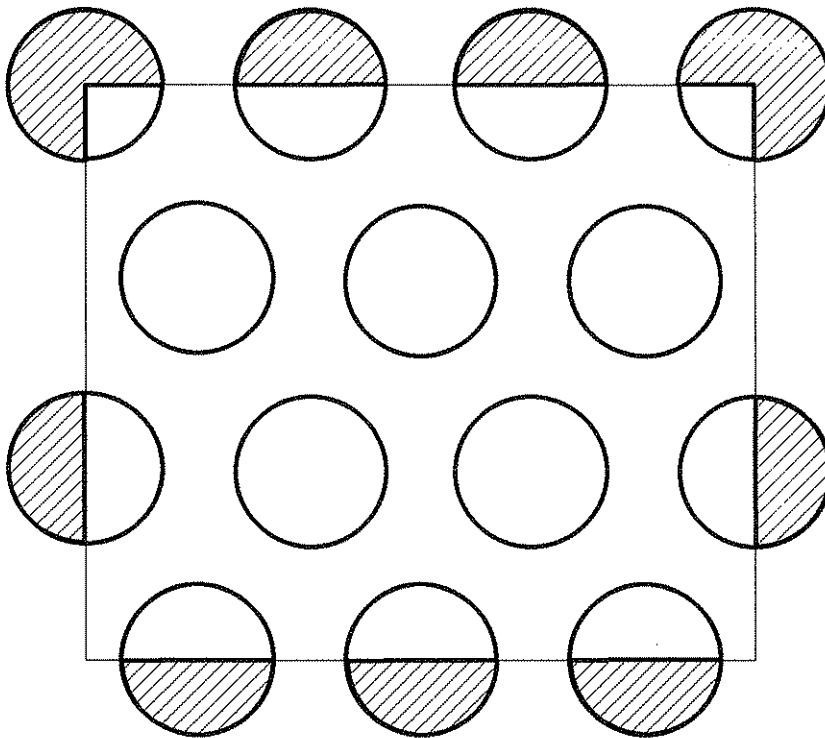
där

- A_g = area av odlingsytan som är täckt av bladverket
area covered by crop canopy
- m = totalt antal plantor, enligt ekvation A5-A6
total number of pot plants, equation A5-A6
- m_k = andel plantor som ligger utanför den definierade ytan
portion of the pot plants outside the defined area
- r = cirkelns radie
circle radius.

Hur stor andel av plantorna som ligger utanför den definierade ytan beräknas enligt följande (figur A2):

$$m_k = 4 + (n-2) \frac{3}{2} \quad \text{om } n=2,4,6,8,\dots \quad (A8)$$

$$m_k = 2 + (n-1) \frac{3}{2} \quad \text{om } n=1,3,5,7,\dots \quad (A9)$$



Figur A2. Andel av plantorna som befinner sig utanför den definierade ytan (///).

Figure A2. Portion of the pot plants outside the defined area (///).

I det fall överlappning sker beräknas A_g enligt följande;

$$A_g = A_e - A_h n_h \quad \text{om } 2r > P_a \text{ och } r < r_{\max} \quad (A10)$$

där

A_g = area av odlingsytan som är täckt av bladverket
area covered by crop canopy

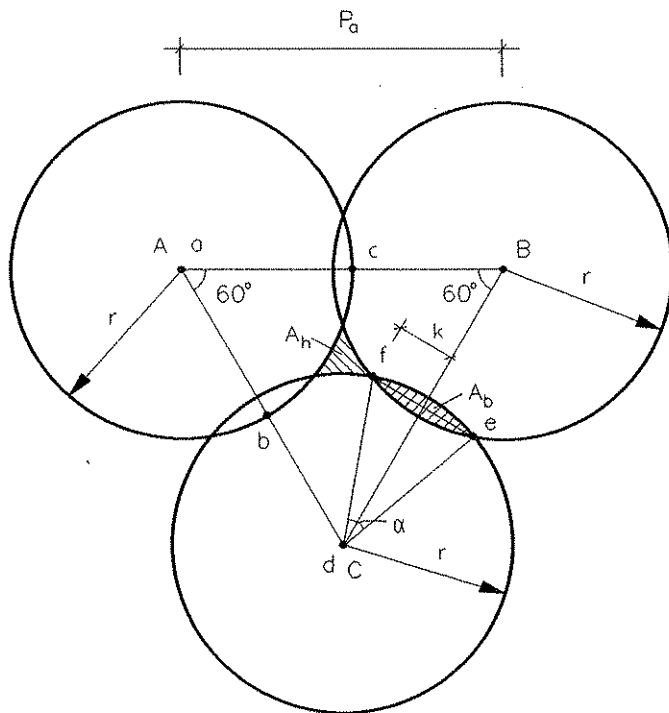
A_e = den definierade ytans area
area of the defined area

A_h = area som finns mellan tre plantor (figur A3)
area between three pot plants (figure A3)

n_h = antal "hela" hål inom den definierade ytan (figur A4)
number of "whole" holes in the defined area (figure A4).

Radien r_{\max} motsvarar radien r då arean A_h är lika med noll och beräknas enligt följande (figur A3):

$$r_{\max} = \frac{1}{\sqrt{3}} P_a \quad (A11)$$



Figur A3. Geometrisk förutsättning för beräkning av arean A_h , (\\\).

Figure A3. Geometrical conditions for calculating the area A_h , (\\\).

För beräkning av hålets area, A_h , införs följande beteckningar (figur A3);

- A_t = arean av triangeln ABC
area of triangle ABC
 S_{abc} = arean av sektorn abc
area of sector abc
 T_{def} = arean av triangeln def
area of triangle def
 S_{def} = arean av sektorn def
area of sector def
 A_b = överlappande area
overlaped area.

Hålets area kan nu beräknas enligt följande;

$$A_h = A_t - S_{abc} - (S_{abc} - \frac{A_b}{2}) - (S_{abc} - \frac{2A_b}{2}) = A_t - 3S_{abc} + \frac{3}{2}A_b \quad (A12)$$

där

$$A_t = \frac{1}{2}P_a^2 \sin(60) = \frac{\sqrt{3}}{4}P_a^2 \quad (A13)$$

$$S_{abc} = \frac{\pi}{6}r^2 \quad (A14)$$

$$A_b = 2(S_{def} - T_{def}) = 2\left(\frac{\alpha}{360}\pi r^2 - \frac{1}{2}r^2 \sin(\alpha)\right) \quad (A15)$$

$$\alpha = 2 \arcsin\left(\frac{k}{r}\right) \quad (A16)$$

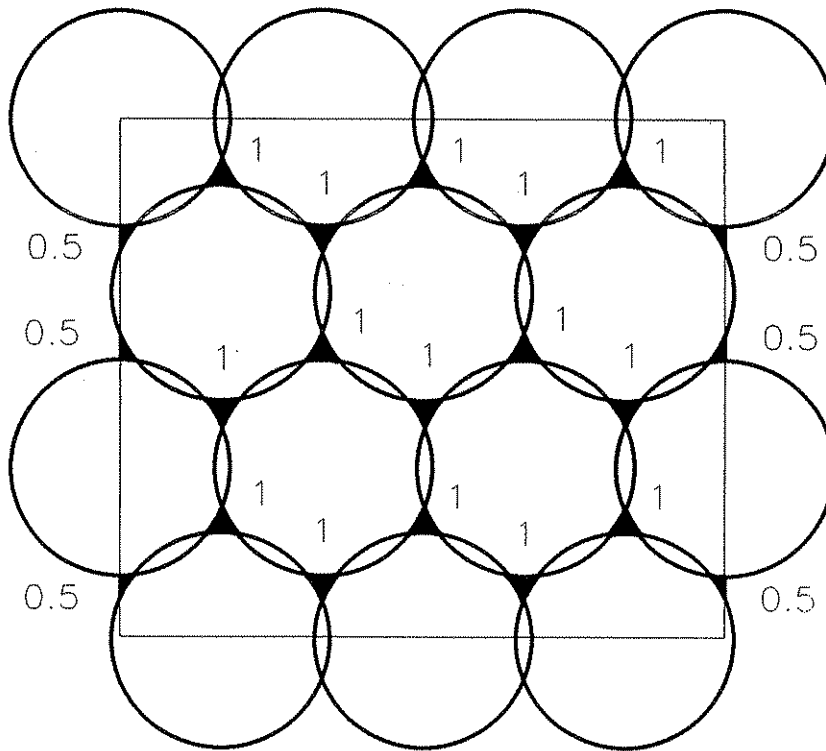
$$k = \sqrt{r^2 - \left(\frac{P_a}{2}\right)^2} \quad (A17)$$

Antalet "hela" hål, n_h , som befinner sig inom den definierade ytan (figur A4) beräknas som;

$$n_h = 2n^2 \quad (A18)$$

där

$$n = n_p - 1. \quad (A19)$$



Figur A4. Antal "hela" hål inom den definierade ytan.

Figure A4. Number of "whole" holes in the defined area.

I det fall att $r > r_{max}$ är arean A_g lika med den definierade ytans area A_e .

Funktionen för att beräkna storleken på den yta av odlingsytan som är täckt av bladverket kan sammanfattas enligt följande:

$$A_g = \begin{cases} (m - m_k) \pi r^2 & \text{om } 2r \leq P_a \\ A_e - A_h n_h & \text{om } 2r > P_a \text{ och } r < r_{max} \\ A_e & \text{om } r \geq r_{max} \end{cases} \quad (A20)$$