



Klimatisering, belysning, bevattning och mekanisering i växthus - *Aktuellt kunskapsläge*

Climatization, lighting, irrigation and mechanization in greenhouses
– *Present knowledge*

Tillväxt Trädgård

Sven Nimmermark

Biosystem och Teknologi, SLU, Alnarp

Jonas Möller Nielsen

Cascade AB, Rolfstorp

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap

Rapport 2014:19

ISBN 978-91-87117-80-0

Alnarp 2014

Landskapsarkitektur, trädgård, växtproduktionsvetenskap
Rapportserie
Rapport 2014:19

Författare:

Sven Nimmermark, Sveriges lantbruksuniversitet, SLU, Institutionen för Biosystem och Teknologi, Box 103, SE-230 53, Alnarp

Jonas Möller Nielsen, Cascada AB, Georgs väg 1, SE-432 97 Rolfstorp

ISBN 978-91-87117-80-0



Klimatisering, belysning, bevattning och mekanisering i växthus - *Aktuellt kunskapsläge*

Climatization, lighting, irrigation and mechanization in greenhouses
– *Present knowledge*

Tillväxt Trädgård

Sven Nimmermark

Biosystem och Teknologi, SLU, Alnarp

Jonas Möller Nielsen

Cascada AB, Rolfstorp

Tillväxt Trädgård

Är ett projekt som syftar till att ge förutsättningar för ökad konkurrenskraft och tillväxt inom trädgårdsnäringen genom nytänkande och samarbete.

Projektet finansieras av Europeiska jordbruksfonden för landsbygdsutveckling: Europa investerar i landsbygdsområden, SLU, LTJ-fakulteten Alnarp, LRF/GRO, Hushållningssällskapen i Malmöhus, Halland och Kristianstad, Lovang Lantbrukskonsult AB, Mäster Grön samt Prysek.



Europeiska jordbruksfonden för
landsbygdsutveckling: Europa
investerar i landsbygdsområden

FÖRORD

Då det gäller växthusteknik finns det ett uppdämt behov att hämta ikapp och redovisa internationella tankegångar som är intressanta för Sverige och för svenska odlare. Det finns idag ingen samlad överblick över vad som skett inom forskningen på senare år och detta är av intresse för näringen såväl som för studenter vid de trädgårdsutbildningar som bedrivs vid Sveriges lantbruksuniversitet, SLU, i Alnarp. En sådan överblick kan stimulera studenter inom hortikultur att fördjupa sig inom området och detta kan på sikt vara en betydande faktor för utvecklingen av svensk växthusodling.

Optimal teknik för framgångsrik odling i växthus involverar ett stort antal faktorer och tekniska system. Tekniken utvecklas ständigt och målet med den aktuella studien har varit att identifiera forskning och utveckling av betydelse avseende tekniska system för växthusens klimatisering, belysning, bevattning och mekanisering. Det övergripande målet har varit att få kunskap över vilka tankegångar som förekommer internationellt och vart utvecklingen är på väg.

Studien som redovisas i rapporten har genomförts inom projektet ”Det aktuella teknik- och kunskapsläget inom växthusteknologi”. Projektet har finansierats av Tillväxt trädgård, Alnarp.

Ett stort tack för att möjligheter getts för genomförande av studien.

Maj 2014

Sven Nimmermark
Docent, Tekn. Dr., Forskare,
SLU, inst. för Biosystem och Teknologi, Alnarp

Jonas Möller Nielsen
MSc i Hortikultur
Cascada AB, Rolfstorp

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	3
SAMMANFATTNING	7
SUMMARY	9
INLEDNING	11
Luftfuktighet - avfuktning	11
Belysning	12
Bevattnings	12
Transporter och mekanisering	12
NYARE STUDIER	13
Avfuktning och fuktstyrning	13
Novarbo systemet	13
Avfuktning med hygroskopisk lösning.....	13
Avfuktning med luftning och olika strategi för styrning.....	14
Avfuktning med flänsade rör kylda med kylvatten	14
Avfuktning med mekanisk ventilation.....	15
Jämförelse av avfuktning på en kall yta, ventilation med värmeväxling och absorption med en hygroskopisk avfuktare	15
Belysning	16
LED belysning och jämförelser med HPS.....	16
Val av belysningstyp med hänsyn till ljusutbyte och ekonomi - LED, HPS, keramiska metallhalogenlampor eller lysrör	18
Belysning i växtmassan - "Inter-Lighting" - i radkulturer	19
Dagens och morgondagens belysning i växthus.....	20
Bevattnings, gödsling och odlingssystem i växthus	20
Odlingssystem med delat rotsystem	20
Bevattningsystem	21
Bevattnings med veke.....	21
Bevattnings med vattenkudde	21
Mät- och reglerteknik för bevattnings.....	21

Mätning av plantstatus.....	21
Viktbaserad mätning och reglering	22
Trådlös mätutrustning.....	23
Mekanisering inom växthus	24
Robotteknologi	24
Skörderobotar	25
Underhåll av plantor.....	25
Skolning av småplantor	26
Sticklingsskördare och –stickare	26
Ympningsrobot	26
Sorterings- och packningsmaskiner.....	26
Smarta transportörer - Automated Guided Vehicles (AGV).....	26
Odlingsmetodik i radgrönsaker	26
Arbetskraftsförsörjning - spelteori	27
SAMMANFATTANDE SLUTSATSER	27
REFERENSER.....	28

SAMMANFATTNING

För en framgångsrik produktion krävs bästa möjliga förhållanden beträffande växtklimat och ljus, rationella system för att hantera växternas vatten- och näringstillförsel och dessutom en begränsning av kostnaderna för produktionen. En ökad mekanisering och en ökad användning av robotar ger möjligheter för reducerade kostnader, bättre konkurrenskraft och en ökad lönsamhet.

I slutna eller halvslutna växthuskoncept finns möjligheter att bibehålla höga CO₂ halter under längre tidsperioder än i konventionella växthus. Dessa slutna eller halvslutna system kräver kylning och avfuktning för att temperatur och luftfuktighet skall kunna hållas på en lämplig nivå. I Finland har man tagit fram ett system (Novarbo) för kylning och fuktstyrning med hjälp av droppgardiner där kylt vatten sprutas in. I Grekland och Italien har försök gjorts att avfukta med hygroskopiska saltlösningar som binder överskottsfukt. En vanlig metod att avfukta luften i växthus med energivävar är att öppna vävarna så att en liten springa uppstår och låta fukt kondensera ut på täckmaterialet (ytterskalet) samtidigt som torrare luft från utrymmet över väven strömmar ner i växthuset. En nackdel med systemet är att okontrollerade luft rörelser kan orsaka ojämn temperaturfördelning i växthuset. I en ny intressant metod som håller på att testas i Nederländerna används rundblåsande fläktar som fördelar och trycker ut luften som en horisontell skärm under vävarna och som utbyter luft med utrymmet ovanför vävarna. Andra studier av energiåtgång och kostnader indikerar att avfuktning med hjälp av ventilation och värmeväxling kan vara ett konkurrenskraftigt system.

Beroende på val av armatur kan kostnaderna för belysningen i ett växthus bli olika höga. I många studier av LED ljus har man studerat hur ljus med olika våglängdssammansättning påverkar växternas utveckling. I USA har man undersökt fotonutbyte och kostnader för olika armaturer med ljuskällor av typerna LED, högtrycksnatriumlampor (HPS), keramisk metallhalogen och lysrör. Man fann i denna studie att ljusutbytet (fotonutbytet) per enhet tillförd elenergi ($\mu\text{mol/J}$) var mycket högre för nyare HPS armaturer ($1,7 \mu\text{mol/J}$) jämfört med typer som idag är vanligt förekommande ($1,02 \mu\text{mol/J}$). Det bästa fotonutbytet för LED armaturer (rött/blått) var $1,66\text{--}1,70 \mu\text{mol/J}$ och alltså av samma storleksordning som för nya HPS armaturer. I studien fann man att kostnaden per foton räknat var högre för LED än för HPS. I takt med att lysdioder (LED) blivit ljusstarkare och kommit ner i pris har intresset för att använda dem för assimilationsbelysning ökat. De små ljuskällorna som dioderna utgör, gör att man kan skapa belysningsarmaturer som möjliggör placering i plantskiktet i raderna ("inter-lighting"). En skillnad mellan HPS och LED är att värmestrålningen från HPS lampor värmer plantmassan, vilket åtminstone ibland kan vara en fördel. För assimilationsbelysning (toppbelysning) anses HPS fortfarande vara det bästa alternativet, medan LED är intressant då det gäller belysning för att erhålla en viss fotoperiod, belysning inuti växtmassan ("inter-lighting") och då det gäller att styra växterna. Energieffektiva plasmalampor kan kanske i framtiden vara ett intressant alternativ även i växthus.

Fokus inom forskningen avseende vatten och näringstillförsel har på senare år varit att minska åtgången av vatten och gödselmedel samt att minska utsläpp av gödselvatten till naturen, dels för att minska slöseriet med vatten och gödselmedel och dels för att förbättra ekonomin för

odlingsföretagen. Ett nyare odlingssystem som har testats vid ett flertal tillfällen och för olika kulturer är odling med delat rotsystem ("Split Root"). I detta system delas rotsystemet upp i två separata behållare med var sitt droppbevattningssystem och varje behållare vattnas varannan gång. Systemet benämns på engelska "PRD – Partial Rootzone Drying" eller "Split Root". Användningen av systemet har testats för flera olika kulturer, bl.a. gurka, där det visat sig att vatten- och näringsåtgången minskade med 35 % utan att skörden påverkades. Med nyare mätteknik kan man mäta små förändringar i plantornas reaktioner bl.a. bladtemperatur, variation i stamdiameter, klyvöppningarnas reaktion och växtsaftsflöde. Tekniken som förfinar befintlig bevattningsteknik används både inom forskning och kommersiellt.

Fokus inom mekaniseringen i växthus har de senaste tio åren främst varit utnyttjande av olika robottekniker. I början på 2000-talet utvecklades och testades en robot för skörd av slanggurka. Roboten tog sig fram själv, hittade plantorna, identifierade frukterna och avgjorde vilka gurkor som var klara för skörd samt skördade gurkan. Robotteknik för avbladning har också testats med utnyttjande av samma NIR våglängder för igenkänning av gurkplantornas olika delar (frukt, blad, stam). Robotar har också testats för skolning av småplantor (under 2,7 minuter skolades 36 tomatplantor om med 100 % framgång) och robotar för sticklingsförökning av rosor har börjat användas kommersiellt. Forskning avseende sensorer kan utnyttjas i en rad tillämpningar och sorterings- och packningsmaskiner som idag är standard i de flesta större företag finns nu även med utrustning för mätning av näringsinnehåll och socker med hjälp av spektral bildbehandling och klorofyllfluorescens.

SUMMARY

Successful production involves best possible conditions concerning plant climate and light conditions, rational systems for supplying the plants with water and nutrients, and in addition to that also limited production costs. Increased mechanization and an increased use of robots may provide possibilities for reduced costs, improved competitiveness and increased profitability.

Closed or semi-closed greenhouse concepts make it possible to keep high concentrations of CO₂ during longer periods of time than in conventional greenhouses. Such closed or semi-closed systems demands cooling and dehumidification for keeping temperatures and humidity at suitable levels. In Finland a system with droplet curtains (Novarbo) where cooled water is sprayed out has been developed for cooling and humidity control. In Greece and Italy dehumidification with hygroscopic salt and water solutions absorbing excess moisture has been studied for dehumidification. A common method to dehumidify the air in greenhouses with thermal screens is to slightly open the screens creating a narrow opening. Humid and warmer air from the greenhouse then passes through the opening and moisture is removed by condensation on the greenhouse cover, while at the same time colder and dryer air leaks in somewhere. A drawback is that uncontrolled air movements cause a non-uniform climate where the climate varies between locations in the house. A new interesting concept being developed in The Netherlands is a system where horizontal blowing fans creates a screening layer of air just below the thermal screens at the same time as they exchange air with the space between the thermal screens and the greenhouse cover. Other studies of energy use and costs indicate that dehumidification by ventilation and heat exchange may be a competitive system.

Depending of choice of light sources and armatures the costs for lighting in greenhouses can vary. In many studies of LED (light emitting diodes) the plant response and development under light with different spectra have been by studied. In a US study the photon flux and costs for different armatures with light sources of the types LED, high pressure sodium (HPS) ceramic metal halide and fluorescent light was studied. It was found in the study that the light output (photon output) per unit electrical input ($\mu\text{mol/J}$) was much higher for new HPS armatures ($1.7 \mu\text{mol/J}$) compared to that of armatures being commonly used today ($1.02 \mu\text{mol/J}$). The best photon exchange for LED armatures (red/blue) was $1.66\text{--}1.70 \mu\text{mol/J}$, which means the same magnitude as for new HPS armatures. It was found that the cost calculated per photon was higher for LED than for HPS. Following increased levels of light from LED and lowered costs, the interest for using them as assimilation light sources has increased. Their small size makes it possible to create armatures possible to place inside the plant canopy in plant rows ("inter-lighting"). A difference between HPS and LED is that the thermal radiation from HPS armatures warms the plant mass, which at least sometimes can be beneficial. For assimilation light (top lighting), HPS is still considered to be the best alternative, while LED is interesting for keeping a certain photo period, for lighting inside the plant canopy ("inter-lighting"), and for plant control. Highly energy efficient plasma lamps can be future interesting light sources also in greenhouses.

Regarding water and nutrient supply the focus in research recent years has been on decreasing the amount of water and fertilizers used and to decrease the nutrient leakage to the environment, partly for avoiding the waste and partly for an improved economic outcome for the crop producers. A newer growing system tested a number of times for different cultures is growing with a split root system ("Split Root"). In this system the root systems of the plants are divided and placed in two separate containers with separate drip irrigation systems and each container is watered every second time. The system is called "PRD – Partial Rootzone Drying" or "Split Root". It has been studied for a number of plant species, e.g. cucumbers, where a 35% decrease in water and nutrient consumption was found without any influence on the crop harvest. Newer measurement technology provide opportunities for measuring small changes in plant reactions, e.g. leaf temperature, variation in stem diameter, stomata reaction and plant water transport. Such measurements fine tuning present irrigation technology is used within science and also commercially.

Regarding mechanization for greenhouses, the focus in research during the recent 10 years has primarily been the use of robot technology. In the beginning of the 2000s a robot for harvesting cucumbers was developed and tested. The robot moved and found its way, found the plants, identified the fruits, identified cucumbers ready for harvesting and then harvested the cucumbers. Also for de-leafing cucumber plants, robot technology has been tested using the same NIR wavelengths as the harvesting robot for identification of the different parts of the cucumber plants (fruit, leaf, and stem). Robots have also been tested for seedlings transplanting (during 2.7 minutes 36 tomato seedlings were transplanted with a 100% success rate) and robots for producing and planting rose cuttings has also started to be used commercially. Research regarding sensors can be utilized in a number of applications and sorting and packaging machines today being standard equipment at most large operations are nowadays also equipped with devices for measuring nutrient and sugar content by the help of spectral image analysis and chlorophyll fluorescence.

INLEDNING

Den ljusberoende fotosyntesen, den process i vilken koldioxid assimileras, bestämmer växtens tillväxt och utveckling. Ljusets intensitet och våglängd påverkar hur växten tillväxer tillsammans med temperatur och tillgång på koldioxid. För god kvalitet och avkastning i en växthuskultur behöver klimatförhållandena vara anpassade till behoven hos den kulturväxt som odlas.

Vad som är ett optimalt växthusklimat varierar över tiden beroende på i vilket stadium växten befinner sig. Tillväxt och utveckling styrs av balansen mellan ljus, temperatur, luftfuktighet och tillgång på koldioxid. Denna balans ser olika ut beroende på vilken typ av utveckling som ska gynnas, t.ex. rotutveckling, tillväxtpunkter eller nya klasar och fruktutveckling.

En viss minimitemperatur krävs såväl dag som natt för att optimera den fotosyntetiska processen. Dagtid behövs värmeenergin för att assimilationen ska äga rum i växten medan det på natten krävs en viss värmeenergi för att den under dagen assimilerade energin ska kunna syntetiseras i växten. I växthusodling eftersträvas därför ofta en optimering av temperaturförhållandena över dygnet för att få önskad tillväxt och utveckling hos växten.

Koldioxid utnyttjas av växten då det i fotosyntesen bildas glukos vilket gör att tillgång på ljus behöver balanseras med en motsvarande koldioxidhalt i luften för att optimera användningen av det fotosyntetiska ljuset. I växthusodling försöker man optimera halten genom att tillföra koldioxid på olika sätt.

För en framgångsrik produktion krävs förutom bästa möjliga förhållanden beträffande växtklimat och ljus också rationella system för att hantera växternas vatten- och näringstillförsel och förutom det också en begränsning av kostnaderna för produktionen. En ökad mekanisering av odlingen och ökad användning av robotar ger möjligheter för reducerade kostnader och bättre konkurrenskraft och lönsamhet.

Projektet "Det aktuella teknik- och kunskapsläget inom växthusteknologi" har genomförts som en litteraturstudie, framförallt för att undersöka vilken forskning avseende växthus som pågår i andra länder. Fokus i studien har varit teknik för klimatisering, dvs. för fukt, fuktstyrning och avfuktning, teknik för belysning, teknik för bevattning och teknik för interna transporter och mekanisering. Ett övergripande mål har varit att ge en god överblick över aktuell forskning inom forskningsområdet. Sådan kunskap är av vital betydelse för bibehållande och utveckling av en konkurrenskraftig svensk växthusproduktion.

LUFTFUKTIGHET - AVFUKTNING

Växten behöver ha tillgång till vatten för sin tillväxt och också luftfuktigheten har stor betydelse. Den relativa luftfuktigheten (RF) i växthuset får inte vara alltför hög eller låg då detta påverkar växten negativt. I växthus strävar man ofta efter att hålla den relativa fuktigheten mellan 70 och 85 % för att gynna växternas behov. Vid låg relativ luftfuktighet kan det uppstå vattenstress som leder till försämrad tillväxt i form av t.ex. mindre blad och

minskad sträckningstillväxt och fruktsättning. Vid en hög relativ luftfuktighet minskar transporten av vatten och näringsämnen i växten pga. den lilla skillnaden i ångtryck mellan omgivningen och växten och processerna i växten saktas ner. En hög relativ luftfuktighet kan också innebära att vattenångan i luften kondenserar på växterna vilket leder till ökad risk för svampangrepp. Värmepumpar för avfuktning studerades i äldre undersökningar, t.ex., Gustafsson & Nimmermark (1991). I dagsläget är en vanlig metod för avfuktning att avlufta och värma alternativt att öppna vävarna. En rad undersökningar av olika tekniker för avfuktning har gjorts på senare år.

BELYSNING

Ljuset är oftast den begränsande tillväxtfaktorn vid odling på nordliga breddgrader. Vid låg tillgång på ljus sker tillväxten långsamt. Eftersom man i växthusproduktion försöker optimera tillväxten tillförs artificiellt ljus när det naturliga ljuset inte räcker till för att skapa optimala ljusförhållanden. Dagslängden är också av betydelse för många växters utveckling och artificiell belysning kan behövas även för detta ändamål. Vid odling under den mörkare årstiden är tillskottsbelysning en förutsättning för en högre produktion. Den förhärskande metoden att kompensera för låga ljusintensiteter har hitintills varit belysning med högtrycksnatriumlampor (HPS). Dock har valet av belysning studerats under senare år och alternativ till HPS lampor och lysrör har börjat undersökas.

BEVATTNING

Traditionellt utförs bevattning i växthus på en rad olika sätt såsom handvattning, droppbevattning med droppslangar, sprinkling och dysbevattning. Recirkulerande system och rännor i vilka ej upptaget vatten återbördas ser till att minska läckaget av näringsämnen. För krukväxtodling och odling på bord finns system med ebb och flod där vatten flödas ut på borden med krukor och överflödet av vatten återbördas och recirkuleras. Motsvarande system finns utvecklade för odling på växthusets golv.

TRANSPORTER OCH MEKANISERING

Då det gäller mekanisering och transporter har en del nyare teknik studerats på senare år och bl.a. har robotteknik för skörd och avbladning studerats

NYARE STUDIER

AVFUKTNING OCH FUKTSTYRNING

I slutna eller halvslutna växthuskoncept finns möjlighet att bibehålla höga CO₂ halter under längre tidsperioder än i konventionella växthus. Om vädringsluckorna öppnas för att ventilera ut fukt omöjliggörs förhöjda halter av koldioxid i växthuset även om detta skulle vara önskvärt.

Novarbo systemet

Företaget Biolan Oy i Finland har utvecklat ett klimatiseringssystem för att kyla växthuset och bibehålla det så stängt som möjligt. Systemet har getts namnet Novarbo och funktionen har studerats i finska försök (Huttunen, 2009). Systemet bygger på kylning av växthuset med hjälp av vattendroppar. Inuti växthuset placeras en öppen droppgardin där vattendroppar sprutas ut med speciellt utformade dysor. Den varma luften i växthuset kyles av vattnet som sprutas ut och beroende av vattnets och luftens temperatur kan vattenånga i växthuset bortföras genom att det kondenseras ut på de kalla vattendropparna (avfuktning) eller tillföras om vattnet som sprutas ut och vattendropparna är varmare (befuktning). Vattnet som sprutas ut i droppgardinen inomhus kyles utomhus med hjälp av evaporativ kylning (kyltornsprincipen); då vattenånga avgår från vattnet till uteluften kyles vattnet p.g.a. ångbildningsvärmens som åtgår. Kylningens funktion är m.a.o. beroende av uteklimatet och hur torr uteluften är. För att möjliggöra klimatisering också t.ex. nattetid använder man sig av ett lager med kallt vatten. I studier av systemet erhöles goda tillväxtbetingelser och vid ljusintensiteten 650 W/m² inuti växthuset kunde temperatur, relativa luftfuktighet (RF) och CO₂-halt inuti det stängda växthuset i försöken hållas vid 26-28 °C, 80-85% och 1000 ppm (Huttunen, 2009). Huttunen (2009) drog slutsatsen att systemet med droppgardinen var effektivt, men att funktionen var väderberoende.

Avfuktning med hygroskopisk lösning

I försök i norra Italien jämfördes energiåtgången för avfuktning i växthus med snittblommor med hjälp av en hygroskopisk lösning bestående av vatten och litiumklorid (H₂O och LiCl) med avfuktning på traditionellt sätt med öppning av ventilationsluckor och tillförsel av värme (Longo & Gasparella, 2012). Det innovativa luftkonditioneringsaggregatet med den hygroskopiska lösningen bestod av en integrerad avfuktningsfunktion och en regenereringsdel. I avfuktningsdelen absorberas fukten i växthusluften p.g.a. den hygroskopiska lösningens starka förmåga att ta upp vatten. I regenereringsdelen tillförs värme som får vatten som är upptaget i lösningen att förångas och avgå från saltlösningen. Regenereringsdelen står via en värmeväxlare i förbindelse med avfuktningsdelen och genom kondensering av förångat vatten på insidan av värmeväxlaren (regenereringsdelen) överförs värme till utsidan av värmeväxlaren (avfuktningsdelen) och till den avfuktade växthusluften som värms, dvs. växthusluften blir torrare och varmare. Eventuellt ytterligare behov av värme till växthuset med avfuktaren tillfördes med hjälp av luftvärmare. I försök med två växthus för

odling av snittblommor var energiåtgången ca. 10% lägre för växthuset där avfuktning skedde med hjälp av systemet med den hygroskopiska lösningen (Longo & Gasparella, 2012).

I ett försök med avfuktning i Grekland användes den hygroskopiska föreningen kalciumklorid, CaCl_2 tillsammans med en värmepump (Lycoskoufis & Mavrogianopoulos, 2008). Två tunnelväxthus med gurkor jämfördes, ett med systemet installerat och ett kontrollväxthus. Man fann att kondenseringen på insidan av växthusets väggar minskade avsevärt och man menade att hybridssystemet är en teknik med låg energianvändning och att systemet kan användas framgångsrikt i lågkostnadsväxthus (Lycoskoufis & Mavrogianopoulos, 2008).

Avfuktning med luftning och olika strategi för styrning

I Kanada har datorsimuleringar med olika strategier för fuktstyrning av klimatet i ett växthus med tomater beläget i Quebec gjorts (de Halleux & Gauthier, 1998). I simuleringarna tog man hänsyn till evapotranspiration, kondensering på växthusets täckmaterial, infiltration och ventilation och man beräknade skillnaderna i energiåtgång mellan att 1) inte avfukta, 2) ventilera on-off med ventilationsmängden 1 (en) luftomsättning i växthuset per timme och att 3) avfukta genom att reglera ventilationsbehovet proportionellt mot avfuktningbehovet. Slutsatserna som gjordes var att den effektivaste metoden att hålla luftfuktighet på en acceptabel nivå (ångtryckdeficit $> 0,5$ kPa – en skillnad i mättnadsångtryck mellan bladyta och luft som är större än $0,5$ kPa) var att reglera ventilationen proportionellt mot avfuktningens behov, men att denna metod ledde till en ökad energianvändning på ca 18% jämfört med att inte avfukta och vidare att metoden med att avfukta ”on-off” ledde till en ca 13 % högre energianvändning jämfört med att inte avfukta (de Halleux & Gauthier, 1998).

Avfuktning med flänsade rör kyllda med kylvatten

I Nederländerna har ett antal studier av avfuktning gjorts på senare år. En av dessa studier redovisar försök i ett Venlo-växthus med gurkor där man kondenserat ut fukt i växthusluften med hjälp av kamflänsrör (Campen & Bot, 2002). Kamflänsrören (ytterdiameter rör $\varnothing 48$ mm, flänsar $\varnothing 103$ mm och 110 st flänsar per m) monterades vid takfoten. Kylvattnet inuti rören kylles med en kylmaskin till olika temperaturer beroende på storleken på skillnaden mellan den absoluta luftfuktigheten som satts som börvärde i växthuset och den aktuella (verkliga) absoluta luftfuktigheten i växthuset (Δx , kg fukt/kg luft). Temperaturen på rör och flänsar var m.a.o. lägre än dagpunkten för växthusluften då avfuktning skedde och ju större behovet av avfuktning var, desto lägre temperatur hade vattnet i kylrören. Man kom fram till att avfuktningskapaciteten för systemet som valts var $40 \text{ g kondensvatten per m}^2 \text{ växthusarea och timme}$ och man menade att denna kapacitet var tillräcklig för perioder då värme behövde tillföras i växthuset (Campen & Bot, 2002). Dock fann man att bara en tredjedel av den värme som avlägsnades från växthuset vid en relativ luftfuktighet på 80% var latent värme (värme bunden i fukt) och att resterande bortförd värme (70%) var sensibel (fri) värme som sänkte temperaturen i växthuset (Campen & Bot, 2002). Förutom avfuktningen erhöles m.a.o. en betydande kylning av växthuset.

Ett motsvarande system med avfuktning med hjälp av kamflänsrör finns i ett försöksväxthus i Berlin, Tyskland (Schmidt *et. al.*, 2012). Växthuset och försöken där ingår i ett projekt, ”Zukunftsinitiative Niedrigenergiegewächshaus“ (ZINEG) där man byggt fyra stycken växthus för att studera möjligheterna att minimera användningen av fossil energi och därmed reducera avgivningen av koldioxid (CO₂) från växthusodling till ett minimum. Växthuset i Berlin är ett solkollektorhus och vid sidan om detta växthus finns också ett växthus utrustat med konventionell teknik. Med hjälp av kamflänsrör monterade undernocken kyls och avfuktas växthuset. Kylningen av kamflänsrören sker med hjälp av en värmepump och energin som återvinns lagras för att användas i värmesystemet under perioder då värme behövs i växthuset. Liksom i försöket i Nederländerna resulterade en stor del av kylningen i bortförande av sensibel värme och energin för bortförande av fukt utgjorde ca 40% av den sensibla, fria, värmen som resulterar i en temperatursänkning (Schmidt *et. al.*, 2012). Avfuktningsmässigt var kapaciteten på systemet 1,2 l per m² och dag och under perioden maj-oktober 2010 var effektiviteten för solfångarsystemet (solfångarväxthuset) 0,55-0,8 och för kylningen hade värmepumpen en effektkvot på 4,9 för kylning och 4,6 för värmning (Schmidt *et. al.*, 2012).

Avfuktning med mekanisk ventilation

En vanlig metod att avfukta luften i växthus med energivävar är att öppna vävarna så att en liten springa uppstår och låta fukt kondensera ut på täckmaterialet (ytterskalet) samtidigt som torrare luft från utrymmet över väven strömmar ner i växthuset (Campen *et al.*, 2009). Denna metod har dock visat på olägenheter i form temperaturskillnader och svårigheter att reglera systemet och för att undvika sådana olägenheter gjorde därför Campen *et.al.* (2009) studier där uteluft mekaniskt trycktes in i växthuset nära golv och tvingade avluften i växthuset att passera genom väven och läcka ut genom otätheter i växthusets skal. Studierna omfattade modellering och validering av modellen i praktiska studier. Studien visade att det var mer energieffektivt att använda sig av systemet med påtvingad tilluft i jämförelse med att öppna vävarna och man fann vidare att klimatet i växthuset blev mer homogent med det studerade systemet (Campen *et al.*, 2009).

En variant på systemet har utvecklats av det Nederländska företaget HINT Installatietechniek BV. I detta system finns fläktar som fördelar och trycker ut luften som en horisontell skärm under vävarna och samtidigt utbyter luft med utrymmet ovanför vävarna (van der Meer, pers. medd, 2014). Systemet håller på att utvecklas och testas bl.a. i en gerberaodling i Nederländerna och resultatet sägs vara gott.

Jämförelse av avfuktning på en kall yta, ventilation med värmeväxling och absorption med en hygroskopisk avfuktare

I en studie i Nederländerna jämfördes metoderna att 1) avfukta på en kall yta, 2) att avfukta med ventilationsluft och återbörda värme med hjälp av en värmeväxlare och 3) att avfukta med hjälp av en hygroskopisk avfuktare som absorberar fukt (Campen *et al.*, 2003). Studien utfördes med hjälp av simuleringar och för två olika växthus i Nederländerna med olika antal skikt i omslutningsarean (enkelt och dubbelt skikt). Beräkningar gjordes för att utröna skillnader i energiåtgång och kostnader. Man fann att metoderna med kondensering på en kall

yta och absorption av vattenånga med hjälp av ett hygroskopiskt material var kostsamma och därför mindre intressanta än konventionell teknik för avfuktning (Campen *et al.*, 2003). Dock fann man att metoden med avfuktning med hjälp av ventilation och värmeväxling kan vara konkurrenskraftig (Campen *et al.*, 2003). Man menade att fördelen med ett sådant system beror av energieffektiviteten och effektiviteten hos värmeväxlaren (Campen *et al.*, 2003).

BELYSNING

Eftersom ljustillgången är en begränsande faktor i odling på våra nordliga breddgrader är det särskilt viktigt att ta vara på det ljus som finns naturligt och komplettera eller i vissa fall helt ersätta det naturliga ljuset med artificiellt ljus för att uppfylla ljuskraven hos de växter som ska produceras i växthuset.

Det anges att rött och blått ljus är basala komponenter i ljusspektrat för tomater, gurka, etc. liksom infrarött ljus med lite högre våglängder än 700 nm (700-800 nm, FR - ”far red”) som påverkar växternas uppbyggnad, men att även grönt och gult ljus kan påverka växternas utveckling (Olle & Virsile, 2013).

Valet av belysning och ljusets våglängd kan påverka innehållet av potentiellt nyttiga ämnen i de grönsaker som produceras. Tomater innehåller höga halter lykopen, som kan vara nyttigt för konsumenten. Lykopen är en karotenoid som förekommer i blodplasman och som betraktas som ett ämne med goda antioxidativa egenskaper. Försök indikerar att halter av olika typer av lykopen i tomater förändras då ljuset förändras (Heymann *et al.*, 2013).

Det ljus som används av växterna vid fotosyntesen sammanfaller ganska väl med det synliga ljuset. Det naturliga solljuset som kan leverera över 100 000 lux en solig sommardag är vintertid betydligt mindre men ändå i storleksordningen 20 000 lux (Lindström, 2007). För tillskottsbelysning i växthus används idag främst högtrycksnatriumlampor (HPS) som kan ge 1500-6300 lux. Då det gäller belysning i växthus har många studier på senare år gjorts av LED (Light Emitting Diode) lampor. Traditionellt är belysning med hjälp av lysrör ett alternativ som kan användas i växthus. En nackdel med LED lampor är att de måste kylas av luft eller på annat sätt, t.ex. med kylvatten, för att bibehålla en lång livslängd hos lamporna (Bergstrand, pers. medd., 2014). HPS lampor avger sin värme med IR strålning vilket samtidigt värmer växterna och kan vara en fördel klimatmässigt.

LED belysning och jämförelser med HPS

Lampor av typen LED (Light Emitting Diode) som av en del tros vara eller tros ha potential att bli ett energisnålare alternativ till HPS är på väg att börja användas i viss utsträckning i växthusodlingen. Dock är ljusutbytet för dagens LED lampor, om man betraktar det fotosyntesaktiva området, av samma storleksordning som det för HPS lampor (Bergstrand, personligt meddelande 2014). LED-lampor är intressanta, men fortfarande finns frågetecken om användbarheten i olika applikationer. Studier med LED-belysning för kortdagsväxter (*Chrysanthemum*, *Kalanchoe* och *Julstjärna*) som fick 8 timmar dagsljus och 8 timmars belysning med LED-ljus) visade på utebliven blomning med färgerna vitt, gult, rött och grönt

ljus medan blått ljus inte stoppade blomningen hos alla plantor. Belysningsintensiteten var i dessa försök 240-2200 lux ($6-39 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{s}$) (Schüssler & Bergstrand, 2009).

LED till belysning har studerats i försök för behandling av kortdagsväxter där LED-ljus av olika färg belyste skott av bl.a. solrosor. Studien visade att olika färger gav olika tillväxt och färskvikt hos skotten. LED-tekniken har stora möjligheter i växtodlingssammanhang genom att ljusets sammansättning kan styras med hjälp av lysdioder med olika färg som kombineras till ett kluster och kan ställas in så att ett specifikt spektrum erhålls och anpassas för en aktuell växt och en speciell situation. Armaturerna för assimilationsbelysning med LED tycks dock ännu vara för kostsamma för att de ska vara kommersiellt intressanta. Ytterligare utveckling av tekniken och forskning kring hur växterna påverkas av olika ljus behövs för att tekniken i framtiden ska bli aktuell i växthusproduktion (Schüssler & Bergstrand, 2009).

I Kanadensiska studier av LED belysning för tomatproduktion jämförde man ett antal försöksled med olika belysning (Deram *et al.*, 2014). Försöksytor i ett växthus avskärmades från ljus utifrån och lamporna i försöket lyste 16 timmar per dygn (06.00 – 22.00). I studierna placerades lampor strax under toppen på tomatplantorna (utom i ett försöksled med rött LED ljus, ”botten”, med placering av lamporna uppåtriktade på första bladets höjd) och man använde sig av tre olika belysningsnivåer (hög: $135 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, medium: $115 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ och låg: $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Försök gjordes med bara rött LED ljus (i topp och botten), med tre olika andelar rött/blått LED ljus (5:1, 10:1 och 19:1) och också med hög belysningsnivå och 50% LED (10:1) + 50% HPS och med 100% HPS. I studierna hade man den högsta biomassaproduktionen för LED lamporna med andelen rött/blått 19:1 och den högsta säljbara produktionen (tomater > 90 g) erhöles för 50% LED (10:1) + 50% HPS. Man menade att en kombination av LED och HPS kan öka produktionen.

Deram *et al.* (2014) menar att det vid användning av LED ljus är viktigt att ha både rött och blått LED ljus och att man i ett antal försök med både rött och blått ljus har erhållit 20% högre mängd biomassa och fruktproduktion jämfört med om enbart en av våglängderna använts.

I svenska försök med julstjärnor (*Euphorbia pulcherrima*) gjordes försök med tillskottsbelysning ($100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) från LED lampor med vitt och rött/blått ljus och från HPS i ett växthus med naturligt dagsljus (Bergstrand & Schüssler, 2012). Den största skotttillväxten och också högst färsk vikt erhöles med HPS. Man fann att lufttemperaturen var högre då HPS lampor användes jämfört med då man använde LED lampor och man menade att denna temperaturskillnad med lägre temperatur för LED ledde till en fördröjd utveckling för de plantor som var belysta med LED ljus jämfört med de som var belysta med HPS.

Utvecklingen av några hortikulturella växter - pelargon, petunia, tomat (*Solanum lycopersicum*) och solros (*Helianthus annuus*) studerades vid belysning med LED ljus med smalt spektra, dels som enda ljuskälla i en odlingskammare och dels som EOD (end-of-day) behandling i växthus (Bergstrand *et al.*, 2014). Solrosplantorna erhöles en bättre skotttillväxt i försöksledet med blått LED-ljus (jämfört med gult, rött, grönt eller vitt LED ljus). Petunia, pelargon och tomat visade upp ett likartat mönster i EOD behandlingar. För tomaterna var skotttillväxten hög även för rött LED ljus. Vid monokromt ljus uppvisade solrosorna högst biomassaproduktion vid rött LED ljus. Studien visade att olika växter reagerade olika på olika

ljusspektra och man menade att EOD behandlingar med ljus med ett smalt spektra kan vara intressant för reglering av planttillväxten.

I Arizona (USA) med gjordes försök med tillskottsbelysning av LED ljus i olika kombinationer, rött/blått (96/4% och 84/16%) och enbart rött, för fröplantor av tomat och gurka (Hernandez & Kubota, 2014). Man erhöll en avsevärt högre planttillväxt då LED ljus användes som tillskott jämfört med att inte ha någon tillskottsbelysning alls. Vidare resulterade belysning i studien med enbart rött LED ljus jämfört med HPS ljus i 25% mindre torr växtmassa för fröplantorna av gurka medan man för fröplantorna av tomat inte erhöll någon signifikant skillnad mellan de båda belysningarna. Man menade att resultatet med olika respons från de olika växtslagen indikerar att valet av typ av belysning bör göras plantspecifikt.

Belysning med LED ljus med infraröda våglängder nära rött (FR, 700-800 nm) kan vara intressant. I försök med FR som EOD (end-of-day) tillskottsbelysning erhölls i försök bättre tillväxt (stam under första paret blad) för tomat och squash för små mängder FR ljus (Kubota et al., 2012).

Val av belysningstyp med hänsyn till ljusutbyte och ekonomi - LED, HPS, keramiska metallhalogenlampor eller lysrör

Beroende på val av armatur kan olika höga kostnader uppstå för belysningen i ett växthus. I USA har man undersökt fotonutbyte och kostnader för olika armaturer med ljuskällor av typerna LED, HPS, keramisk metallhalogen och lysrör (fluorescerande ljus, induktionslampor) som kan användas i växthus (Nelson & Bugbee, 2014). Författarna menar att effekterna av ljusets intensitet är mycket större än effekterna av ljusets kvalitet då det gäller fotosyntes, men att en foton rött ljus generellt anses ha högre påverkan på fotosyntesen än en foton blåare ljus (400-540 nm). Kvaliteten på ljuset kan också påverka plantornas egenskaper och mängden blått ljus kan exempelvis påverka höjden och formen på plantorna. Då det gäller påverkan av ljusets spektra på fotosyntesen menar Nelson & Bugbee (2014) att ljuset från HPS lampor har en gynnsam spektralfördelning med högt fotonutbyte av rött ljus (600 nm) och lågt för blått ljus. Man fann i studien att ljusutbytet (fotonutbytet) per enhet tillförd energi ($\mu\text{mol/J}$) var mycket högre för nyare HPS lampor och armaturer ($1,7 \mu\text{mol/J}$) jämfört med typer av HPS lampor och armaturer som idag är vanligt förekommande ($1,02 \mu\text{mol/J}$). Det bästa fotonutbytet för LED lampor och armaturer (rött/blått) var $1,66-1,70 \mu\text{mol/J}$ och alltså av samma storleksordning som för nya HPS armaturer. De keramiska metallhalogenlamporna hade ett ljusutbyte på $1,25-1,46 \mu\text{mol/J}$, medan lysrörsarmaturerna (induktionslampor) som testades hade ett fotonutbyte på $0,84-0,95 \mu\text{mol/J}$. Man menade vidare att LED armaturerna kostade 5-10 gånger mer per foton räknat. Även armaturerna med halogenlampor och lysrör var dyrare än HPS armaturerna per foton räknat. Placeringen av armaturerna och om ljuset som skickas ut helt och hållet kan fångas av plantmassan påverkar naturligtvis ljusutbytet och egenskapen att LED ljuset kan riktas kan i specifika fall vara till fördel. Författarna menar dock att kostnaden per foton räknat är högre för LED än för HPS.

Belysning i växtmassan - "Inter-Lighting" - i radkulturer

Forskningsinriktningen

I takt med att lysdioder (LED) blivit ljusstarkare och kommit ner i pris, har intresset för att använda dem för assimilationsbelysning ökat i länder där solljuset är för svagt under vinterhalvåret. De små ljuskällorna som dioderna utgör, gör att man kan skapa belysningsarmaturer som har annan form än den som gäller när man använder högtrycksnatriumlampor, t.ex. kan man göra draperier eller placera dem i långa rader så att de påminner om armaturer för lysrör, vilket möjliggör placering i plantskiktet i raderna, på engelska kallad "inter-lighting". Mycket forskning har skett och sker inom området för att utröna hur produktionen påverkas av ljus i raderna.

Ljusforskning - modellering

Att forska på ljus är kostsamt, tar mycket tid och kräver mycket mätningar. En närmast oöverstiglig uppgift med tanke på alla olika möjligheter som finns att placera både ljusarmaturer, växter, samt olika typer av ljuskällor (de Visser *et al.*, 2012; de Visser *et al.*, 2014). Modern datorteknik har det senaste decenniet gjort det möjligt att med vanlig datorutrustning göra tredimensionella datorsimuleringar till en rimlig kostnad (de Visser *et al.*, 2014). Tredimensionella plantmodeller finns nu för flera olika kulturer, såsom tomat, snittrosor, slanggurka och chrystantemum, såväl som för själva växthusbyggnaden. I Nederländerna har man därför skapat en tredimensionell modell av belysning av tomat i ett växthus med assimilationsbelysning i form av högtrycksnatrium- och LED-armaturer. Modelleringsverktyget som man använt sig av är GroIMP som underhålls av Göttingens universitet i Tyskland (de Visser *et al.*, 2012; de Visser *et al.*, 2014). Växterna, i det här fallet tomatodlingen, är uppdelad i moduler, rader, planta, plantsektioner bestående av klasar, blad med internod, där bladen dessutom är uppdelade i olika delar från toppen på plantan till botten. Egenskaperna för de olika delarna och slutligen för hela plantan och odlingen mäts och beräknas. Bland egenskaperna som mäts upp och matas in i modellen är ljusabsorption och reflektion, fotosyntes, bladvinkel och bladstorlek. Den här modellen har sedan använts för att simulera olika placeringar av belysningsarmaturer, som jämförts med faktiskt uppmätt ljusintensitet vid olika nivåer vertikalt i plantskiktet. Överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta värden har varit god ($R^2 = 0,96$) (de Visser *et al.*, 2012; de Visser *et al.*, 2014). Här skall tilläggas att jämförelsen gäller ljusfördelningen och inte hur ljuset har påverkat tillväxt och övrig plantutveckling.

För- och nackdelar med belysning i raderna

Rent generellt visar olika studier med flera olika simuleringar att nyttan med HPS i toppen och LED-baserad radbelysning är tveksam (4,14 g torrsbstans per megajoule PAR) jämfört med att ha enbart högtrycksnatrium HPS (4,22 g torrsbstans per megajoule PAR) monterad ovanför tomatkulturen. Fördelar med den i plantmassan placerade LED belysningen är inte självklar och om det skall ge något positivt utbyte är det av yttersta vikt att lysdioderna placeras korrekt, vilket innebär en bit ovanför de nedersta bladen, och att de är riktade ca 20 % uppåt. Bäst effekt kan erhållas av att bara placera högtrycksnatriumarmaturer ovanför tomatplantorna, utan lysdioder i raderna. Anledningen till detta är att bladen i toppen har

bättre fotosyntesaktivitet än bladen längre ner, samt att HPS ger värmestrålning som ökar på den biokemiska processen, något som man inte får med lysdioder utan att komplettera med extra värme. Vid all montering av assimilationsbelysning är det viktigt att inte få så mycket ljus att fotosyntesmaximum uppnås, vilket inne i raderna innebär 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Något som behöver undersökas ytterligare är bladens förmåga att bibehålla sin höga fotosyntesaktivitet vid kontinuerlig belysning under hela livstiden. Viss forskning indikerar att detta kan vara fallet vilket gör det mer intressant med radbelysning, men mer forskning behövs inom området. Med modern datorteknik är det nu möjligt att betydligt snabbare och till betydligt lägre kostnad utvärdera ny belysningsteknik och hur den skall monteras för bästa utnyttjande (de Visser *et al.*, 2012; de Visser *et al.*, 2014).

Dagens och morgondagens belysning i växthus

För assimilationsbelysning (toppbelysning) anses fortfarande HPS vara det bästa alternativet, medan LED är intressant då det gäller belysning för att erhålla en viss fotoperiod, belysning inuti växtmassan ("inter-lighting") och då det gäller att styra växterna (Bergstrand, pers. medd., 2014). Det pågår idag en utveckling av mycket energieffektiva plasmalampor. Plasmalampor utvecklas även för belysning av växthus och sådana lampor kan kanske vara ett intressant alternativ i växthus i framtiden (Runkle, 2010). Också andra typer av lampor kan vara aktuella i framtiden.

BEVATTNING, GÖDSLING OCH ODLINGSSYSTEM I VÄXTHUS

Forskningsinriktningen inom området

Fokus inom forskningen avseende vatten och näringstillförsel är att minska åtgången av vatten och gödselmedel, samt att minska utsläpp av gödselvatten till naturen, dels för att minska slöseriet med vatten och gödselmedel och dels för att förbättra ekonomin för odlingsföretagen (Dasgan *et al.*, 2006).

Man har på senare år forskat både på nya odlingssystem (Dasgan *et al.*, 2012), på alternativa metoder för vattentillförsel (Ferrarezi & Testezlaf, 2012; Gerçek, 2006) och på alternativa mättekniker för bättre styrning och förståelse (Kopyt *et al.*, 2001; Ton & Kopyt, 2003; Suay *et al.*, 2003; Shelford *et al.*, 2004; Vermeulen *et al.*, 2007; Löfkvist, 2010; Cayanen *et al.*, 2008; Lea-Cox *et al.*, 2009; Dursun & Ozden, 2011).

ODLINGSSYSTEM MED DELAT ROTSYSTEM

Ett nyare odlingssystem som har testats vid ett flertal tillfällen och för olika kulturer är metoden med delat rotsystem ("split root"), där rotsystemet delas upp i två separata behållare med var sitt droppbevattningssystem och där varje behållare vattnas varannan gång. Systemet går på engelska under benämningen "PRD – Partial Rootzone Drying" eller "Split Root". Flera olika kulturer har testats, bl.a. gurka, där det visat sig att vatten- och näringsåtgången minskade med 35 % utan att skörden påverkades (Dasgan *et al.*, 2012).

BEVATTNINGSSYSTEM

Bevattning med veke

I Brasilien har man undersökt hur metoden att vattna sallat med hjälp av kapillära vekar fungerar och jämfört detta med traditionell NFT-teknik ("Nutrient Film Technique"). Substraten som användes i krukorna med vekar var tallbark respektive kokosnötsfiber. Veken var av ett syntetiskt material. Resultaten visade att de två försöksleden med vekar resulterade i högre skörd än NFT-ledet, vilket visar att odlingstekniken med veke är en fungerande och lovande metod för vatten- och näringsförsörjning (Ferrarezi & Testezlaf, 2012).

Bevattning med vattenkudde

Problemet med traditionell droppbevattning är att den behöver ett kontinuerligt pumptryck för att fungera, vilket kräver investering i ett system som klarar av trycksättning samt är energikrävande för att fungera. För att få droppbevattningens fördelar med kanalbevattningens enkelhet, gjordes försök med en nyare bevattningsmetod där man använde en vattenkudde för distribution av vatten och näring (Gerçek, 2006). Metoden som fungerar både i växthus och på friland använder sig av plastfolieslangar, ca 40 cm i diameter, som placeras mellan planträderna. I försök perforerades plastfolieslangar i botten med hål med diametern 1 mm. I ena kortsidan av plastfolieslangarna anslöts en matningsledning och i den andra kortsidan förslöts plastfolieslangen. Vatten fylldes på i slangarna via matningsledningarna vilket kan ske antingen med hjälp av pump eller genom självfall från en högre belägen reservoar. I praktiken tog det 14 min att fylla en 100 m lång slang vid ett flöde på 15 L/s. Försöket visade att vattnet sipprade ut med ett maximalt flöde på 0,001 L/(s × hål), vilket innebär att det tog upp till 24 h för plastfolieslangen att tömmas på vatten. En lång tömningstid säkerställer att vattnet stannar nära rotzonen och inte rinner ner till djupare belägna jordlager eller rinner av som ytvatten. De grova hålen i botten gjorde det möjligt att tillföra både gödselmedel och andra kemikalier till vattnet på samma sätt som för traditionella droppbevattningssystem (Gerçek, 2006).

Metoden borde kunna användas med gott resultat inom den ekologiska växthusodlingen av t.ex. tomat och slanggurka, då de stora hålen med diametern 1 mm gör det möjligt att tillföra de ekologiska gödselmedlen på ett enklare och säkrare sätt än idag, då utrustning och slangar i modern droppbevattningsteknik lätt sätts igen av partiklar.

MÄT- OCH REGLERTEKNIK FÖR BEVATTNING

Mätning av plantstatus

Möjlig mätteknik för att mäta små förändringar i plantornas reaktioner finns nu tillgänglig och man kan bl.a. mäta bladtemperatur, variation i stamdiameter, klyvöppningarnas reaktion och växtsaftsflöde. Tekniken har utvecklats till stor del i Israel, där även en hel del forskning har bedrivits (Kopyt *et al.*, 2001; Ton & Kopyt, 2003). Tekniken används både forskningsmässigt och i kommersiella odlingar, men systemet är inte ett system av typen "den talande plantan" ("speaking plant") för att styra bevattningen, utan en metod för att utvärdera och förfinas den

bevattningsmetodik som redan används. Att mäta på plantan ger egentligen reaktioner alldeles för sent för att fungera optimalt, då vattenbristen redan har uppstått då växterna reagerar, men metoden ger en betydligt snabbare information om hur den aktuella vattningsmetoden fungerar jämfört med den information, som kan iakttas vid en visuell observation av plantans reaktioner. Reaktioner kan vid mätningar observeras inom en tidsperiod på 1-2 dagar jämfört med en tidsperiod på flera dagar eller veckor för den senare metoden med visuell observation (Kopyt *et al.*, 2001).

I mätningar av plantornas reaktioner på bevattning undersöker man hur stamdiametern varierar över tiden genom mätning av daglig maximal stamdiameter och stamdiameter nattetid. På så sätt kan man efter bara några få dagar se om plantan under någon tid på dygnet råkar ut för vattenstress som verkar negativt på plantans tillväxt. I försök gav klyvöppningarnas reaktion tillsammans med mätningarna av växtsaftflödet, fuktdeficiten och ljusintensiteten en god indikering på obegränsad eller begränsad transpiration (Kopyt *et al.*, 2001).

En studie av faktiskt vattenupptag i rosodling jämfört med tillgänglighet vid en traditionell bevattningsmetod där man t.ex. inte vattnar nattetid, visade att vattenupptaget nattetid är så pass stort att en vattning tidigt på morgonen, oftast runt kl. 6 på morgonen, var nödvändig. I försök noterade man dessutom att det var positivt för vattenupptagningen att låta sista vattningen på dagen bestå av vatten utan näringslösning (på engelska kallad "root flushing"), då plantan annars sist på dagen hade svårt att få tillräckligt med vatten (Kopyt *et al.*, 2001).

Viktbaserad mätning och reglering

Jämfört med att mäta plantornas vattenupptag direkt på plantan baseras en annan metod att uppskatta plantornas vattenupptag istället på att mäta vatteninnehållet i substratet (genom att väga det) och tillämpligheten av denna metod har visats för både snittros, tomat och ett flertal krukväxter (Suay *et al.*, 2003; Shelford *et al.*, 2004; Vermeulen *et al.*, 2007; Löfkvist, 2010). Metoden kan användas både för att direkt påverka när bevattning skall ske, men den har kanske sitt främsta användningsområde då det gäller att utvärdera och förfinas de teoretiska modeller och metoder som redan finns (Suay *et al.*, 2003; Shelford *et al.*, 2004; Löfkvist, 2010).

Det har visat sig att de ljussummebaserade beslutssystemen för vattning som används idag, fungerar mycket bra vid ljusintensiteter inom området 100 till 400 W/m² och ganska bra inom området 400 till 600 W/m², men att man vid låga ljusintensiteter, under 100 W/m², och i mörker även måste ta hänsyn till fuktdeficiten för att inte beräkna en för låg transpiration (Suay *et al.*, 2003; Shelford *et al.*, 2004).

Mätningar har visat att det finns stor potential att spara vatten, gödselmedel och pumparbete genom bättre beslutssystem för bevattning (Suay *et al.*, 2003). I försök med rosor uppmättes beroende på beslutssystem en skillnad i erforderlig vattenvolym för en försöksyta på 250 m² på över 1 000 L/dygn en solig dag och så mycket som 1 700 L/dygn en mulen dag. Man upptäckte även att transpirationen nattetid kan utgöra så mycket som 24 till 46 % av den totala

dygnstranspirationen en klar respektive en mulen dag. Följande algoritm för att besluta om bevattning rekommenderades därför (Suay *et al.*, 2003):

$$E = A \cdot [1 - e^{-k \cdot LAI}] \cdot G + B \cdot LAI \cdot VPD$$

Där :

E	=	kulturens transpirationshastighet, $g\ m^{-2}\ h^{-1}$
G	=	solinstrålning ute, $W\ m^{-2}$
VPD	=	ångtrycksdeficit inomhus, kPa
k	=	koefficient för strålningsabsorbtion ("extinction coefficient"), 0,64 (Stanghellini, 1987)
A, B	=	parametrar: $A = 1,379 \cdot 10^{-3}$ (dimensionslös), $B = 0,107\ g\ m^{-2}\ h^{-1}\ kPa^{-1}$
LAI	=	bladyteindex

I tomatodling har man också jämfört befintliga metoder för styrning av bevattningen med bl.a. ljussumma med ett viktbaserat tillvägagångssätt (Shelford *et al.*, 2004). Det visade sig då att mängden överskottsvatten (dränerat vatten) var jämnare mellan vattningarna vid användning av viktbaserad metod jämfört med vattning styrd med ljussumma. Medeltiden mellan vattningarna var densamma för de båda metoderna, men längsta tiden mellan vattningar erhöles med den viktbaserade metoden, främst beroende på att man med ljussummemetoden har en inställd maximal paustid mellan vattningarna. Denna kan visserligen ändras men det kräver då en insats från odlarens sida. Precis som andra också upptäckt, resulterade den viktbaserade vattningsmetoden i en vattning under nattens senare del, oftast runt kl. 6 i samband med soluppgången, något som normalt inte sker med ljussummebaserad vattning. För tomat utgjorde nattvattningen ca 7 % av dygnets totala vattningsvolym. En viktbaserad styrning av bevattningen resulterade i betydande besparing av vatten, 3,78 L/d jämfört med 4,48 L/d för ljussummemetoden (värdena gäller per 3 plantor). Skillnaderna var mindre under soliga perioder och större under mulna perioder, då skillnaden var stor (Shelford *et al.*, 2004). Slutsatsen av den jämförande studien var att man bör använda en kombination av de båda metoderna i praktisk produktion, traditionell ljussummestyrning för småplantor i början av odlingssäsongen och viktbaserad styrning i den mer utvecklade kulturen (Shelford *et al.*, 2004).

Man kan tänka sig att även om vatten återanvänds så är det viktigt att inte ha för mycket returvatten, då det blir ett hinder för att tillföra systemet nytt vatten med balanserad näringssammansättning. Minskad returvolym minskar även belastningen på eventuell annan vattenbehandlingsutrustning, t.ex. sterilisering och långsamfiltrering, samt minskar risken för smittspridning.

Trådlös mätutrustning

En hel del studier har gjorts för att ta fram och undersöka möjligheterna till styrning av bevattningen med hjälp av trådlösa givare placerade ute i odlingen (Cayanan *et al.*, 2008; Lea-Cox *et al.*, 2009; Lea-Cox, 2012; Dursum & Ozden, 2011). Även om flera har forskat på området är det otydligt vad den egentliga föresatsen är med trådlös mätutrustning. Är det ökad flexibilitet och fler mätpunkter som eftersträvas? Oftast verkar det som om man bara vill göra samma sak som man gör med dagens datorsystem med trådbundna givare, fast i helt separata

system. Sannolikt är det så att bevattningssystem som inte är ihopkopplade med befintliga växthusdatorsystem aldrig kommer att accepteras av marknaden.

De givartyper som man främst forskat på när det gäller trådlös kommunikation är givare för mätning av fukthalt samt ledningstal (Cayanan *et al.*, 2008; Lea-Cox *et al.*, 2009), även om det även förekommer system för att bara mäta fukthalten i marken (Dursun & Ozden, 2011). Ett problem som identifierades för trådlösa givare med tillhörande sändare var energiförsörjningen. Batteridrivna system hade i studier en livslängd på så lite som 2 veckor (Cayanan *et al.*, 2008) men också upp till 9 månader (Lea-Cox *et al.*, 2009) beroende på val av givare och system för sändning av data. Även avståndet mellan sändare och mottagare kan vara ett problem, särskilt i växthus med många avdelningar. Ett system som utomhus hade en räckvidd på 1,5 km hade i ett växthus inte längre räckvidd än 100 m (Cayanan *et al.*, 2008). Problem i systemen med dålig räckvidd kan överbryggas genom att använda sig av ett system där givarnas sändare även fungerar som mottagare och på så vis fungerar som förstärkare; signalen hoppar då från givare till givare tills den slutligen kommer fram till den centrala datorn (Lea-Cox *et al.*, 2009).

Ett sätt att komma förbi problem med batteribyte är att använda mätstationer (givare och sändare/förstärkare) som drivs med hjälp av solceller (Dursun & Ozden, 2011).

Mekanisering inom växthus

Fokus inom mekaniseringen i växthus har de senaste tio åren främst legat på olika typer av robottekniker, men förbättringar av etablerad teknik sker kontinuerligt och särskilt då inom områdena för interna transporter, sortering och förpackningsutrustning. Drivkrafterna är flera och det faktum att företagen blir färre och större, möjliggör investering i mer mekanisering. Mellan åren 1990 till 2007 förändrades växthusarealen i Nederländerna inte nämnvärt utan var kvar på 10 000 ha, men antalet företag minskade från 14 000 till 7 000, samtidigt som den genomsnittliga växthusytan ökade från 0,7 till 1,4 ha under samma period. Man räknar med att den genomsnittliga växthusarealen år 2030 kommer att ligga på 5 ha. Ungefär 10 % av företagen har 2,5 ha eller mer och står för 60 % av produktionsarealen (Pekkeriet & van Henten, 2011).

Robotteknologi

Drivkraften för utvecklingen inom robotiken är flera, där några av de viktigare är att 1) det är svårare att få tag på arbetskraft, 2) kostnaden för arbetskraften stiger och priset för produkterna sjunker, 3) det är svårt att få tag på utbildad arbetskraft och 4) den arbetskraft som börjar inom branschen arbetar bara några få år; detta leder till att branschen kontinuerligt dräneras på kompetens. Den moderna odlingstekniken innebär även en alltmer extrem arbetsmiljö vad gäller temperatur, koldioxid, assimilationsbelysning och luftfuktighet. Samtidigt har priserna kontinuerligt sjunkit och prestandan ökat inom robotiken (Pekkeriet & van Henten, 2011).

En typisk robot har en rörlig fysisk struktur, rörelsemekanism, givarsystem, kraftförsörjning och ”intelligens” som styr samtliga ingående komponenter (Shankapal, 2013).

Skörderobotar

I början på 2000-talet utvecklades och testades en robot för skörd av slanggurka. Roboten, som hade sju frihetsgrader (DOF), tog sig fram själv, hittade plantorna, identifierade frukterna och avgjorde vilka gurkor som var klara för skörd, samt skördade de skördeklara slanggurkorna. För att identifiera slanggurkorna användes nära infrarött ljus (NIR) inom våglängderna 850 och 970 nm, då det visat sig att blad reflekterar lika mycket av de båda våglängderna, men frukterna reflekterar mer av strålningen med våglängden 850 nm än av den med våglängden 970 nm. Roboten testades i ett produktionsväxthus i Nederländerna, och den kunde detektera mer än 95 % av frukterna i växthuset och hade framgång i 80 % av fallen. Det tog 45 s att skörda en slanggurka, vilket var långsammare än målet på 10 s. Med en skördehastighet på 10 s räknade man med att det skulle räcka med två robotar per hektar. För att inte sprida sjukdomar kapades gurkstjälkarna med en värmekniv (van Henten et al., 2002).

Det senaste inom robotiken inom trädgård är det som tas fram inom projektet Crops – Clever Robots for Crops (<http://www.crops-robots.eu/> ; (Crop-Robots, 2014) där man under 2014 testat en robot för skörd av paprika. Sluttester och bearbetning av data är ännu inte klara, men på hemsidan går det att se roboten när den är verksam (Crop-Robots, 2014).

Företaget Irmato har även utvecklat en robot för skörd av snittrosor som nu finns till försäljning. Se mer på <http://www.irmato.com/> .

Underhåll av plantor

En stor del av arbetskostnaden i en gurkodling är avbladning av plantorna, som står för 19 % av den totala arbetsinsatsen, vilket motsvarar 1 345 h per 1 000 kvadratmeter och år. Arbetet är den största enskilda kostnadsposten och utgör totalt 30 % av produktionskostnaderna. Förutom den höga kostnaden för arbete är svårigheten att få tag på kvalificerad arbetskraft viktiga drivkrafter för ökad automatisering inom odling av slanggurka.

För att få en fungerande robot för avbladning kan man inte låta roboten arbeta på samma sätt som en människa, där arbetaren direkt lokaliserar bladet som skall tas bort, utan istället måste roboten först hitta plantan, därefter stjälken, följa stjälken uppåt till dess att den hittar ett blad och då avgöra om bladet skall tas bort och slutligen ta bort bladet. Grunden för roboten var den robot som användes för skörd av slanggurka i studier av van Henten *et al.* (2002) (se ovan Skörderobotar), men där själva verktyget och programvaran byttes ut. Roboten styrdes i raden genom att den rullade på rören som ligger i gångarna och som även används av andra vagnar i gångarna. För att hitta stjälken användes samma teknik inom NIR (nära infrarött ljus) som användes av skörderoboten för att hitta slanggurka, då det visar sig att stjälkarna reflekterar olika mycket av våglängderna 850 och 970 nm (mer av 850 nm), till skillnad mot bladen som reflekterar lika mycket av de båda våglängderna. Med hjälp av stjälkars och blads ljusreflektion i kombination med uppmätt geometri och placering, stjälken är ju lång och smal och växer i huvudsak vertikalt, kan roboten avgöra vad som är stjälk. Precis som med skörden av slanggurkan kapades bladen med hjälp av en värmekniv för att minska smittspridning mellan plantorna. Tiden det tog för roboten att ta bort två blad var 140 s i snitt, vilket är 35 gånger långsammare än en människa. I samtliga fall hittade roboten stjälkarna, men däremot misslyckades den ibland med att hitta bladen, eller att kapa bladstjälken. Vissa andra mindre

problem uppstod också, men dessa kunde lösas med den befintliga utrustningen (van Henten et al., 2005).

Skolning av småplantor

I produktion av tomatmåplantor sås tomatfröna först i små kuber, som måste planteras om i större krukor eller stenullskuber efter ungefär 15 dagar. Arbetet sker ofta för hand, men i Tjeckien har man testat ett flertal olika robotar från ABB med gott resultat. Under 2,7 minuter skolades 36 tomatplantor om med 100 % framgång (Hula *et al.*, 2008).

Sticklingsskördare och –stickare

Roboten Robomatic kom ut på marknaden i mitten på 2000-talet, och den klipper till rossticklingar från grundmaterial som matas in för hand i maskinen. Med hjälp av kameror klipps grundmaterialet till så att en lämplig stickling produceras. Sticklingen doppas därefter i ett rottillväxtmedel för att slutligen stickas i jord. Cirka 30 Robomatics fanns i drift 2011 (Pekkeriet & van Henten, 2011). För mer information se <http://www.irmato.com/>.

Ympningsrobot

Redan 1996 utvecklade Nishiura *et al.* (1996) en ympningsrobot för slanggurka, melon, tomat och äggplanta, som finns kommersiellt tillgänglig. Roboten lyckas i 97 % av ympningarna och är med sina 800 ympningar i timmen tio gånger snabbare än mänsklig arbetskraft (Pekkeriet & van Henten, 2011).

Sorterings- och packningsmaskiner

Sorterings- och packningsmaskiner är idag standard i de flesta större företag, där sortering sker efter vikt, diameter och färg (tomat), eller enbart vikt (slanggurka och paprika). Dessa maskiner finns nu även med utrustning för mätning av näringsinnehåll och socker med hjälp av spektral bildbehandling och klorofyllfluorescens (Pekkeriet & van Henten, 2011).

Smarta transportörer - Automated Guided Vehicles (AGV)

Idag används i många företag interna transportsystem för transport av t.ex. skördade produkter från växthus till packhall. Dessa är självgående och styrs via olika tekniska lösningar, ofta med någon form av ledningssystem i golvet, synligt eller osynligt, men hängande monorälsystem finns även (de senare används huvudsakligen i krukväxtodlingar och de förra i grönsaksodlingar). System som nu börjat sitt inträde i företagen är automatiskt styrda fordon (AGV – Automated Guided Vehicles), där fordonen själva håller reda på vart de skall och som anpassar hastigheten automatiskt efter hur fort personalen arbetar. De mer intelligenta systemen samlar dessutom in statistik om de skördade produkterna såsom kvantitet per kvadratmeter, näringsinnehåll och kvalitet i olika delar av företaget. All information samlas i en central databas och samtliga vagnar styrs från ett centralt datorsystem som har överblick över produktionen (Pekkeriet & van Henten, 2011).

Odlingsteknik i radgrönsaker

I moderna radodlingar av grönsaker, t.ex. tomat, slanggurka, paprika och äggplanta, blir det allt vanligare med hängande odlingar, där plantsubstratet hänger i rännor ungefär en meter

ovanför marken (Pekkeriet & van Henten, 2011). Fördelen är bl.a. förbättrad arbetsmiljö och att arbetsmoment nära odlingssubstratet går fortare. Tidstudier i ett företag visar på en tidbesparing för dessa moment på 11 % (Rosendahl, pers. medd., 2014).

ARBETSKRAFTSFÖRSÖRJNING - SPELTEORI

Svårigheten att behålla och att få tag på kvalificerad arbetskraft har identifierats i flera studier. (Pekkeriet, & van Henten, 2011; Pekkeriet & Bruins, 2010, Shankapal, 2013; van Henten, *et al.*, 2005). Ett sätt att öka trivseln och därmed statusen för arbete inom trädgård kan vara att utnyttja de tekniker som används inom datorspelsindustrin för att behålla spelarnas intresse. Grunderna är mycket förenklat att man både på individ- och gruppnivå, utnyttjar sig av olika belöningssystem beroende på hur väl personen eller gruppen presterar avseende i förväg tydliga och fastställda kriterier. Kriterierna bör vara både hårda (kvantitet, kvalitet, förtjänst, etc.) och mjuka (personlig utveckling, hjälpa andra, lära upp ny personal) (Pekkeriet & Bruins, 2010). Belöningen behöver inte vara enbart i pengar, utan kan även bestå i ökat ansvar och fler ansvarsfulla arbetsuppgifter (rapportera sjukdomar, ge instruktioner till andra, arbeta med ny teknik, gå hem tidigare) (Pekkeriet & van Henten, 2011).

SAMMANFATTANDE SLUTSATSER

Följande sammanfattande slutsatser kan göras av studien:

- Beträffande fuktstyrning och avfuktning har system med droppgardiner, saltlösningar, kylning med värmepumpsteknik, fläktventilation och kondensering av fukt på ytterskalet ovanför energivävar studerats. Nyare intressanta tekniker för fuktstyrning är system med horisontella luftfridåer och kontrollerat luftutbyte med utrymmet ovan vävarna, liksom avfuktning med hjälp av fläktar och värmeväxling.
- Nyare armaturer med HPS (högtrycksnatrium) lampor gav i en studie lika stort fotonutbyte per enhet tillförd energi som LED (lysdiod) armaturer och kostnaden för LED blev högre per foton räknat då dessa armaturer var dyrare. HPS tycks fortfarande vara intressantast för assimilationsbelysning uppifrån, medan LED är intressant för belysning integrerad i plantmassan och då det gäller att styra växterna.
- Forskning avseende vatten- och näringstillförsel har på senare år fokuserat på att minska åtgången av vatten och gödselmedel samt att minska utsläpp av gödselvatten till naturen. Studier av odlingsystem med delat rotsystem ("Split Root") gav i försök kraftigt minskad vatten- och näringsåtgång utan att skörden påverkades. En förfining av befintlig bevattningsteknik kan göras med hjälp av sensorer som mäter bladtemperatur, variation i stamdiameter, klyvöppningarnas reaktion och växtsaftsflöde.
- Fokus inom mekaniseringen i växthus har de senaste tio åren främst varit utnyttjande av olika robottekniker. I gurkodling har försök gjorts med robotar för skörd och avbladning. Andra undersökta tillämpningar för robotar är skolning av småplantor av tomat och robotar för sticklingsförökning av rosor. Sensorer för bestämning av socker och näringsinnehåll finns nu också som utrustning i sorterings och packmaskiner.

REFERENSER

- Bergstrand, K.J., & Schüssler, H.K. 2012. Growth and photosynthesis of ornamental plants cultivated under different light sources. In S. Hemming & E. Heuvelink (Eds.), *VII International Symposium on Light in Horticultural Systems*, Wageningen, Netherlands. *Acta Horticulturae*, 956, 141-148.
- Bergstrand, K., Asp, H., & Schüssler, H.K. 2014. Development and Acclimatisation of Horticultural Plants Subjected to Narrow-Band Lighting. *European Journal of Horticultural Science*, 79(2), 45-51.
- Bergstrand, pers. medd., 2014. Personligt meddelande K.J. Bergstrand, Forskare Inst. för Biosystem och Teknologi, SLU, Alnarp.
- Campen, J.B. & Bot, G.P.A. 2002. Dehumidification in greenhouses by condensation on finned pipes. *Biosystems Engineering*, 82(2), 177-185.
- Campen, J.B., Bot, G.P.A. & de Zwart, H.F. 2003. Dehumidification of greenhouses at northern latitudes. *Biosystems Engineering*, 86(4), 487-493.
- Campen, J.B., Kempkes, F.L.K. & Bot, G.P.A. 2009. Mechanically controlled moisture removal from greenhouses. *Biosystems Engineering*, 102(4), 424-432.
- Cayanan, D.F., Dixon, M., & Zheng, Y. 2008. Development of an Automated Irrigation System Using Wireless Technology and Root Zone Environment Sensors. Proceedings of the *International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions*, Tucson, AZ, USA. *Acta Horticulturae*, 797, 167-172.
- Crop-Robots, 2014. WP5: *Sweet pepper – protected cultivation*. <http://www.crop-robots.eu/>
- Dasgan, H.Y., Kusvuran, S., & Kirda, C. 2012. Use of short duration partial root drying (PRD) in soilless grown cucumber by 35% deficit irrigation. *XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on Greenhouse 2010 and Soilless Cultivation*, Lisbon, Portugal. *Acta Horticulturae*, 927, 163-170.
- de Halleux, D. & Gauthier, L. 1998. Energy consumption due to dehumidification of greenhouses under northern latitudes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69(1), 35-42.
- de Visser, P.H.B., Buck-Sorlin, G.H., & van der Heijden, G.W.A.M. 2014. Optimizing illumination in the greenhouse using a 3D model of tomato and a ray tracer. *Frontiers in Plant Science*, 5. Article 48. February 2014.
- de Visser, P.H.B., Buck-Sorlin, G.H., van der Heijden, G.W.A.M., & Marcelis, L.F.M. 2012. A 3D Model of Illumination, Light Distribution and Crop Photosynthesis to Simulate Lighting Strategies in Greenhouses. *7th International Symposium on Light in Horticultural Systems*, Wageningen, Netherlands. *Acta Horticulturae*, 956, 195-200.
- Deram, P., Lefsrud, M.G., & Orsat, V. 2014. Supplemental Lighting Orientation and Red-to-blue Ratio of Light-emitting Diodes for Greenhouse Tomato Production. *Hortscience*, 49(4), 448-452.
- Dursun, M., & Ozden, S. 2011. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors. *Scientific Research and Essays*, 6(7), 1573-1582.
- Ferrarezi, R.S., & Testezlaf, R. 2012. Wick irrigation system using self-compensated benches for lettuce production. *International Conference of Agricultural Engineering - CIGR-AgEng 2012: agriculture and engineering for a healthier life*, Valencia, Spain, 8-12 July 2012, C-1224.
- Gerçek, S. 2006. Water Pillow: a new irrigation method. *Journal of Applied Sciences*, 6(2), 315-317.
- Gustafsson, G. & Nimmermark, S. 1991. *Avfuktning med värmepump i växthus*. Rapport 74. Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik (LBT), Lund.

- Hernandez, R., & Kubota, C. 2014. LEDs supplemental lighting for vegetable transplant production: spectral evaluation and comparisons with HID technology. In J. E. Son, I. B. Lee & M. M. Oh (Eds.), *International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant Factory - Greensys 2013*, Jeju, Korea Republic. *Acta Horticulturae*, 1037, 829-835.
- Heymann, T., Raeke, J., & Glomb, M.A. 2013. Photoinduced Isomerization of Lycopene and Application to Tomato Cultivation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(46), 11133-11139.
- Hula, P., Sindelar, R., & Trinkl, A. 2008. Verification of applicability of ABB robots for transplanting seedlings in greenhouses. *Research in Agricultural Engineering*, 54(3), 155-162.
- Huttunen, J. 2009. Closed Greenhouse Cooling with Water Droplet Curtain. In *International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems: Greensys2009*, Quebec City, Canada, *Acta Horticulturae*, 893, 1043-1047.
- Kopyt, M., Ton, Y., Ben-Ner, Z., & Bachrach, A. 2001. A trial of the phytomonitoring technique for roses. Proceedings of the *Third International Symposium on Rose Research and Cultivation*. Herzliyya, Israel. *Acta Horticulturae*, 547, 205-212.
- Kubota, C., Chia, P., Yang, Z., & Li, Q. 2012. Applications of far-red light emitting diodes in plant production under controlled environments. In C. Kittas, N. Katsoulas & T. Bartzanas (Eds.), *International Symposium on Advanced Technologies and Management Towards Sustainable Greenhouse Ecosystems: Greensys2011*, Athens, Greece. *Acta Horticulturae*, 952, 59-66.
- Lea-Cox, J.D. 2012. Using wireless sensor networks for precision irrigation scheduling,. In M. Kumar (Ed.), *Problems, perspectives and challenges of agricultural water management* (pp. 233–258). Rijeka, Croatia: InTech Press
- Lea-Cox, J.D., Ristvey, A.G., Ross, D.S., & Kantor, G.F. 2009. Deployment of Wireless Sensor Networks for Irrigation and Nutrient Management in Nursery and Greenhouse Operations. Paper presented at *54nd Annual Southern Nursery Association (SNA) Research Conference 2009*, Atlanta, Georgia, USA.
- Lindström, A. 2007. Plantodling från grunden, lektion 1: temperatur och ljus. *PlantAktuellt (utgiven av Högskolan Dalarna, SLU & SKOGFORSK)*, 2007:1, 8-10.
- Longo, G.A. & Gasparella, A. 2012. Comparative experimental analysis and modelling of a flower greenhouse equipped with a desiccant system. *Applied Thermal Engineering*, 47, 54-62.
- Lycoskoufis, I.H. & Mavrogianopoulos, G. 2008. A Hybrid Dehumidification System for Greenhouses. In: *Proceedings of the International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions*, Tucson, AZ, USA. *Acta Horticulturae*, 797, 55-60.
- Löfkvist, K. 2010. *Irrigation and horticultural practices in ornamental greenhouse production. Implementation of scientific knowledge into irrigation practices and methods*. Doctoral Thesis, Department of Horticulture, Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricoltuire Science, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Alnarp, Sverige. (No. 2010:38)
- Nelson, J.A., & Bugbee, B. 2014. Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. *PloS one*, 9(6), e99010-e99010.
- Nishiura, Y., Murase, H., Honami, N., Taira, T. & Wadano, A. 1996. Development of a gripper for a plug-in grafting robot system. In *International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems - Automation, Culture, and Environment*, Narita, Japan. *Acta Horticulturae*, 440, 475-480.
- Olle, M., & Virsile, A. 2013. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, 22(2), 223-234.

- Pekkeriet, E.J., & Bruins, M.A. 2010. Work is Gaming – Motivation factors in greenhouse horticulture. English Summary. *Innovation Network Report No. 10.2.247*. Utrecht. The Netherlands: Wageningen UR Horticulture.
- Pekkeriet, E.J., & van Henten, E.J. 2011. Current Developments of High-Tech Robotic and Mechatronic Systems in Horticulture and Challenges for the Future. In M. Dorais (Ed.), *International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems: Greensys 2009*, Quebec City, Canada. *Acta Horticulturae*, 893, 85-94.
- Rosendahl, pers. medd. 2014. Rosendahl, R. personligt meddelande.
- Runkle, E. 2010. The future of greenhouse lighting. *Greenhouse Product News, gpn*, September 2010, 66.
- Schmidt, U., Schuch, I., Dannehl, D., Rocks, T., Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A. & López-Cruz, I.L. 2012. The Closed Solar Greenhouse Technology and Evaluation of Energy Harvesting under Summer Conditions. *International Symposium on Advanced Technologies and Management Towards Sustainable Greenhouse Ecosystems: Greensys2011*, Athens, Greece. *Acta Horticulturae*, 952, 433-439.
- Schüssler, H.K. & Bergstrand, K.-J. 2009. *Lysdioder - framtidens växthusbelysning?* Fakta från Tillväxt Trädgård, Info nr 7 - 2009. Sveriges lantbruksuniversitet, LTJ-fakulteten, Alnarp.
- Shankapal, S.R. 2013. Multifunktional Autonomous Agrobots for Agricultural Mechanisation. *Technorama*, 63, 23-27.
- Shelford, T.J., Lau, A.K., Ehret, D.L., & Chieng, S.T. 2004. Comparison on a new plant-based irrigation control method with light-based irrigation control for greenhouse tomato production. *Canadian Biosystems Engineering*, 46, 1.1-1.6.
- Stanghellini, C. 1987. *Transpiration of greenhouse crops - an aid to climate management*. Doctoral thesis. IMAG, Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen. Wageningen University. Wageningen, The Netherlands.
- Suay, R., Martinez, P.F., Roca, D., Martinez, M., Herrero, J.M., & Ramos, C. 2003. Measurement and estimation of transpiration of a soilless rose crop and application to irrigation management. In G. LaMalfa, V. Lipari, G. Noto & C. Leonardi (Eds.), *6th International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climate*, Sicily, Italy. *Acta Horticulturae*, 614, 625-630.
- Ton, Y., & Kopyt, M. 2003. Phytomonitoring in Irrigation Scheduling of Horticulture Crops. *Proceedings IV International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops*. September 1-6, 2003, Davis, California, USA.
- van der Meer pers. medd, 2014. Personligt meddelande Henk van der Meer, Hint Installatietechniek BV, Nederländerna.
- van Henten, E.J., van Tuijl, B.A.J., Hoogakker, G.J., van der Weerd, M.J., Hemming, J., Kornet, J.G., & Bontsema, J. 2005. An autonomous robot for de-leafing cucumber plants grown in a high-wire cultivation system. In G. van Straten, G.P.A. Bot, W.T.M. van Meurs & L.M.F. Marcelis (Eds.), *Proceedings of the international conference on sustainable greenhouse systems*, Leuven, Belgium, 12-16 September, 2004. *Acta Horticulturae*, 691(2), 877-884.
- van Henten, E.J., Hemming, J., van Tuijl, B.A.J., Kornet, J.G., Meuleman, J., Bontsema, J., & van Os, E.A. 2002. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses. *Autonomous Robots*, 13(3), 241-258.
- Vermeulen, K., Steppe, K., Janssen, K., Bleyaert, P., Dekock, J., Aerts, J.-M., Berckmans, D. och Lemeur, R., 2007. Solutions to overcome pitfalls of two automated systems for direct measurement of greenhouse tomato water uptake. *Horttechnology*, 17(2), 220-226.