



Forskning om
naturresurs- och
bioekonomi 49/2015

LED-mellanbelysningsförsök i ett tomatblockväxthus i Pjelax, Närpes

Daniel Sjöholm, Mats Borg, Kristian Blomqvist, Liisa Särkkä, Kari
Jokinen och Timo Kaukoranta

LED-mellanbelysningsförsök i ett tomatblockväxthus i Pjelax, Närpes

Daniel Sjöholm, Mats Borg, Kristian Blomqvist, Liisa Särkkä, Kari Jokinen och
Timo Kaukoranta



ISBN: 978-952-326-098-6 (Tryckt)

ISBN: 978-952-326-099-3 (Nätpublikation)

ISSN 2342-7647 (Tryckt)

ISSN 2342-7639 (Nätpublikation)

URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-099-3>

Copyright: Naturresursinstitutet (Luke)

Författarna: Daniel Sjöholm, Mats Borg, Kristian Blomqvist, Liisa Särkkä, Kari Jokinen och Timo Kaukoranta

Utgivare och förläggare: Naturresursinstitutet (Luke), Helsingfors 2015

Utgivningsår: 2015

Pärmens bild: Liisa Särkkä

Tryckeri- och publikationsförsäljning: Juvenes Print, <http://luke.juvenesprint.fi>

Abstrakt

LED-mellanbelysningsförsök i ett tomatblockväxthus i Pjelax, Närpes

Daniel Sjöholm¹⁾, Mats Borg¹⁾, Kristian Blomqvist¹⁾, Liisa Särkkä²⁾, Kari Jokinen²⁾ & Timo Kaukoranta³⁾

¹⁾ Yrkeshögskolan Novia, Forskning och utveckling, Bomullgränd 3, 65200 Vasa

²⁾ Naturresursinstitutet (Luke), Skötsel och produktion av förnybara resurser, Toivonlinnantie 518, 21500 Piikkiö

³⁾ Naturresursinstitutet (Luke), Skötsel och produktion av förnybara resurser, Tietotie, 31600 Jokioinen

Växthusnäringen i Finland är energiintensiv och stigande energikostnader äventyrar branschen. Tidigare undersökningar visar att växthusbranschen kräver stora mängder energi gällande både uppvärmning och konstbelysning samtidigt som stora andelar fossila bränslen fortfarande används. Elförbrukningen står idag för ungefär 60 % av den totala energiförbrukningen för åretrunttomatodlarna och den stora konsumtionen gör odlarna väldigt beroende av elbolagen och de varierande priserna på marknaden.

I projektet Växthus-LED (1.12.2012–31.11.2014) har LED-mellanbelysningen Hortishine från företaget Netled Oy installerats som komplement till den traditionella HPS-toppbelysningen (högtrycksnatriumlampor) och testats i ett tomatblockväxthus i Pjelax, Närpes. LED-armaturerna installerades på arealen 484 m² (HPS+LED) i ett blockväxthus med arealen 6300 m². Som referens fungerade ett område i samma växthus med arealen 484 m² (HPS). HPS-lampornas eleffekt vid referensområdet (HPS) sänktes för att motsvara elinstallationseffekten vid hybridområdet (HPS+LED). I den här rapporten presenteras hur LED-försöket har utförts, vilken mätutrustning och hurudant försöksväxthus som använts. Rapporten innehåller även analyser och resultat som berör t.ex. skördeförändring, energifördelning och -förbrukning och strålningsnivåer på olika ställen i försöksväxthuset. I rapporten finns även ett kapitel där olika PAR-mätare och LED-växtbelysningsarmaturer av olika tillverkare utvärderas. I slutet av rapporten diskuteras projektresultaten.

Resultaten visade att skördeskillnaderna mellan HPS+LED (hybridområdet) och HPS (referensområdet) var positiva men små, totalt 2,2 % större skörd under hela odlingssäsongen vid HPS+LED. Största skördeskillnaden var under de mörkaste månaderna med +6,6 % vid HPS+LED. Elförbrukningen [kWh/kg tomat] var ca 5,1 % lägre vid HPS+LED jämfört med HPS under hela säsongen. Vid mätningar på konstljus i laboratorieförhållande konstaterades att skillnaden mellan olika PAR-mätare är stor. Vid mätning av olika LED-växtarmaturer visade det sig att PAR-effektiviteten varierar. Bästa LED-armaturen är ca 25 % effektivare än en HPS-lampa, om man jämför mellanbelysning med toppbelysning.

Slutsatsen är att det krävs bättre LED-teknik innan LED blir ett verkligt konkurrenskraftigt alternativ, men LED-växtbelysning kan mycket väl vara den dominerande ljuskällan i växthus i framtiden. Frågan är om 2,2 % större skörd och 5,1 % lägre elförbrukning per producerat kilogram tomat idag är tillräckligt för att odlarna skall välja LED som mellanbelysning. Varje odlare är unik med unika växthus och det är många faktorer som man måste tänka på vid en investeringskalkyl.

Ämnesord:

Växthus, LED, Mellanbelysning, Tomat, Blockväxthus, Tomatskörd, Energi

Tiivistelmä

Tomaatin LED-välivalotutkimus Närpiössä

Daniel Sjöholm¹⁾, Mats Borg¹⁾, Kristian Blomqvist¹⁾, Liisa Särkkä²⁾, Kari Jokinen²⁾ & Timo Kaukoranta³⁾

¹⁾ Ammattikorkeakoulu Novia, Tutkimus ja kehitys, Puuvillakuja 3, FI-65200 Vaasa

²⁾ Luonnonvarakeskus (Luke), Luonnonvarat ja biotalous, Toivonlinnantie 518, FI-21500 Piikkiö

³⁾ Luonnonvarakeskus (Luke), Luonnonvarat ja biotalous, Tietotie, FI-31600 Jokioinen

Kasvihuone-elinkeino Suomessa kuluttaa paljon energiaa ja nousevat energian hinnat vaikeuttavat alan kannattavuutta. Aikaisempien tutkimusten mukaan kasvihuonetuotanto käyttää suuria energiamääriä sekä lämmitykseen että tekovalotukseen. Suuri osa energiasta tuotetaan edelleen fossiililla polttoaineilla. Sähkönkulutus on tänä päivänä noin 60 % kokonaisenergiasta ympärivuotisella tomaattiviljelmällä. Suuri kulutusmäärä tekee viljelijän hyvin riippuvaiseksi sähköyhtiöistä ja vaihtelevista sähkön hinnoista.

Kasvihuonehankkeessa ”Växthus-LED” (1.12.2012-31.11.2014) Netled Oy:n Hortishine LED-valaisimia asennettiin välivaloiksi HPS (suurpainenatrium) –valaisimien ylävalotuksen lisäksi tomaattihuoneeseen Närpiöön. LED-valaisimet asennettiin 484 m²:n alalle blokkihuoneeseen, jonka kokonaispinta-ala oli 6300 m². Kontrollina ilman välivaloja oli samassa blokkihuoneessa samankokoinen koeala kuin LED valaisimilla. HPS-lamppujen sähkötehoa vähennettiin kontrollialueella vastaamaan koealan HPS+LED sähkötehoa.

Tässä raportissa esitellään LED-kokeen suoritus, mittalaitteet ja niiden käyttö kasvihuoneessa. Raportissa on lisäksi analyysit ja tulokset, mm. sadon määrien erot, energian jakautuminen ja –kulutus sekä valaistusolosuhteita eri puolilla kasvihuonetta. Raportissa on lisäksi kappale, jossa eri PAR-valomittareita ja eri valmistajien LED-valaisimia verrataan. Lopussa tarkastellaan tuloksia.

Satotulos oli 2,2 % suurempi HPS+LED-koejäsenessä kuin kontrollissa. Suurin satoero koejäsen-ten välillä oli pimeimpinä talvikuukausina, 6,6 % suurempi sato HPS+LED-koejäsenessä kuin kontrollissa. Koko viljelyjakson aikana sähkönkulutus kWh/kg tomaatteja oli noin 5,1 % alhaisempi HPS+LED kuin kontrollissa.

Laboratorio-olosuhteissa tehdyt mittaukset osoittivat, että eri valmistajien PAR-valomittarit antoivat hyvin erilaisia lukemia. Eri valmistajien LED-valaisimissa oli eroja PAR-tehokkuuksissa. Paras LED-valaisin oli noin 25 % tehokkaampi kuin HPS.

Loppupäätelmä oli, että LED-tekniikan on kehityttävä tehokkaammaksi, jotta se olisi varteenotettava kilpailija HPS:lle. Tulevaisuudessa LED-valot voivat hyvinkin olla pääasiallinen valon lähde kasvihuonevalaistuksessa. Viljelijän on mietittävä jos 2,2 % korkeampi sato ja 5,5 % alhaisempi sähkönkulutus tuotettua tomaattikiloa kohti tänäpäivänä ovat riittävästi, jotta välivaloksi valitaan LED. Jokaisella viljelijällä on kuitenkin erilaiset olosuhteet ja viljelystrategiat erilaisissa kasvihuoneissa, jotka vaikuttavat investointilaskemiin.

Avainsanat:

Kasvihuone, LED, välivalotus, tomaatti, blokkihuone, sato, energia

Abstract

LED-interlightingtest in a tomato Venlo greenhouse in Pjelas, Närpiö

Daniel Sjöholm¹⁾, Mats Borg¹⁾, Kristian Blomqvist¹⁾, Liisa Särkkä²⁾, Kari Jokinen²⁾ & Timo Kaukoranta³⁾

¹⁾ Novia University of Applied Sciences, Research and development, Puuvillakuja 3, FI-65200 Vaasa

²⁾ Natural Resources Institute Finland (Luke), Management and Production of Renewable Resources, Toivonlinnantie 518, FI-21500 Piikkiö

³⁾ Natural Resources Institute Finland (Luke), Management and Production of Renewable Resources, Tietotie, FI-31600 Jokioinen

The greenhouse industry in Finland is energy intensive and rising energy costs jeopardize the industry. Previous studies show that the greenhouse industry requires large amounts of energy regarding both heating and artificial lighting at the same time as large proportions of fossil fuels are still used. Today electricity consumption stands for about 60 % of the total energy consumption for year round tomato growers and the large consumption makes growers very dependent on the electrical companies and the varying prices in the market.

The Project Växthus-LED has been carried out during 1.12.2012–31.11.2014. Hortishine LED-interlighting from the Finnish company Netled Oy has been installed as a complement to the traditional HPS-toplighting (high pressure sodium lamps) and been tested in a Venlo tomato greenhouse in Pjelas, Närpiö. The LED-lamps were installed on an area of 484 m² (HPS+LED) in a Venlo greenhouse with a total area of 6300 m². In the same greenhouse an area of 484 m² (HPS) worked as a reference.

The electric power of the HPS-lamps were lowered at the reference area (HPS) to equal the electric power at the hybrid area (HPS+LED). This report presents how the LED-experiment was performed, the measuring equipment and the experimental greenhouse. The report also includes analyzes and results concerning e.g. yield variations, energy distribution and consumption and light radiation levels at different points in the experimental greenhouse. Finally the report also includes a chapter in which different PAR-meters and LED plant lighting lamps from different manufacturers are evaluated. The results of the project are discussed at the end of the report.

The results showed that the yield variations between HPS+LED (hybrid area) and HPS (reference area) were positive but small with total of 2.2 % larger yield throughout the growing season at HPS+LED. The largest yield variation was during the darkest months +6.6 % at HPS+LED. The power consumption [kWh/kg tomato] was about 5.1 % lower at HPS+LED compared to HPS throughout the season. Moreover it was determined in laboratory circumstances that the differences between the PAR-meters are large when measuring artificial light. When measuring light from different LED plant lamps it showed that the PAR-efficiency varies. The best LED-lamp is about 25 % more PAR-efficient than a HPS-lamp, when comparing interlighting with toplighting. The conclusion is that better LED technology are needed before LED becomes a truly competitive alternative, but the LED plant lamps may be the dominant light source in greenhouses in the future. The question is if 2.2 % larger yield and 5.1 % lower electricity consumption per produced kilogram of tomatoes is enough for growers to choose LED-lighting today. Each grower is unique with unique greenhouses and there are many factors to consider when making an investment calculus.

Keywords:

Greenhouse, LED, interlighting, Tomato, Venlo greenhouse, Tomato yield, Energy

Förord

Projektet Växthus-LED har pågått under tiden 1.12.2012–31.11.2014. Den övergripande målsättningen har varit att kartlägga och utveckla förutsättningarna för att gynnsamt ta i bruk LED-belysning inom växthusnäringen i Finland. Genom att öka kunskapen om konstbelysning i växthus är det möjligt att aktivt försöka skapa bättre ekonomiska och ekologiska förutsättningar för växthusbranschen. I projektet har LED-mellanbelysning installerats som komplement till de traditionella toppbelysningslamporna (högtrycksnatriumlampa, HPS) och testats i ett tomatblockväxthus i Pjelax, Närpes. I projektet har det bl.a. undersökts vilka effekter LED-belysningen har på skörderesultaten, vilka förändringar LED-belysningen har på energifördelning och -förbrukning i växthuset. MTT har utfört ett liknande försök med gurka och deras resultat presenteras i en annan fristående rapport. I projektet har också en HPS-lampa och några LED-växtbelysningsarmaturer från olika tillverkare testats i Novias laboratorium med hänseende på effektivitet och ljusspridning. Olika PAR-mätare testades även i laboratorieförhållande under lamporna.

Yrkeshögskolan Novia har fungerat som projektägare och MTT (Forskningscentralen för jordbruk och livsmedelsekonomi) i Piki har fungerat som samarbetspartner. Projektet har i huvudsak finansierats med ERUF-medel (europeiska regionala utvecklingsfonden) beviljade av Österbottens förbund. Yrkeshögskolan Novia, MTT, VASEK, Närpes stad och Österbottens svenska producentförbund r.f. (ÖSP) har även deltagit med finansiering. Botnia Grönsaker Ab, LED Finland Oy, Itä-Suomen yliopisto, Helle Oy och Electroteam Oy i Närpes har även varit med och sponsrat projektet. Ett stort tack riktas även till Carolin Nuortila, Hanna Laakso och Johan Westö.

En styrgrupp inrättades för projektet. Som ordförande fungerade Mikael Dahlqvist från Närpes stad (Närpes grönsaker). Kristian Blomqvist forskningsledare vid Yrkeshögskolan Novia fungerade som sekreterare. Övriga medlemmar i styrgruppen var specialforskare Liisa Särkkä och Kari Jokinen från MTT, Niklas Ulfvens från Österbottens förbund, Stefan Råback från VASEK, Bo Linde vikarie för Susanne West från Österbottens Svenska Producentförbund r.f., odlarkårens representant Johanna Smith och projektledare Daniel Sjöholm från Yrkeshögskolan Novia.

MTT (Forskningscentralen för jordbruk och livsmedelsekonomi) fusionerades med andra statliga forskningsinstitut (Metla och VFFI samt statistiktjänsterna vid Tike) den 1.1.2015 och bildade Luke (Luonnonvarakeskus).

Vasa, juni 2015

Författarna



Innehåll

1. Inledning	8
1.1. Växthusbelysning	8
1.1.1. LED-belysning	9
1.1.2. Ljusets inverkan på plantor	9
2. Material och metoder.....	10
2.1. Val av växthusodlare och LED-armaturlverkare	10
2.2. Netled Oy	10
2.3. Försöksväxthuset	10
2.3.1. Åsväxthusen	12
2.4. Belysningstider	13
2.5. Mätutrustning och -system.....	15
3. Resultat och diskussion	20
3.1. Stationära ljussensorer i försöksväxthuset	20
3.1.1. PAR-sensorer och daily light integral (DLI)	20
3.1.2. Pyranometrar – naturligt ljus och ljus från taklampor	22
3.2. Undersökning av temperatur och relativ fuktighet i plantrader med och utan LED-mellanbelysning.....	24
3.3. Värmekameraundersökning i blockväxthus.....	29
3.3.1. Värmekamerafotografering	31
3.3.2. Resultat & analys.....	33
3.3.3. Diskussion.....	40
3.4. Spektroradiometermätningar	41
3.4.1. Försöksupplägg	41
3.4.2. Analys och resultat.....	41
3.5. Uppföljning av tomatskörd	45
4. Energianalys	49
4.1. Elmätning	49
4.1.1. Teoretisk elförbrukning.....	49
4.2. Test av LED-armaturer med blått ljus och kemisk analys av tomater	53
4.2.1. Försöksupplägg	53
4.2.2. Ljutmätning vid LED-armaturer med blått ljus.....	55
4.2.3. Analys av tomatfrukter	56
4.2.4. Färskvikt, torrkvikt, mognadsgrad, brix-mätning och de titrabla syrororna	56
4.2.5. Resultat	57
4.3. Tomatsmaktest	59
4.3.1. Försöket	59

4.3.2. Analyser & resultat.....	60
4.3.3. Diskussion.....	64
4.4. Jämförelse av effektivitet hos LED-armaturer	64
4.4.1. Inledning.....	64
4.4.2. Teori	65
4.4.3. Jämförelse av PAR-mätare	68
4.4.4. Mätmetod för bestämning av strålningsflöde	72
4.4.5. Jämförelse av armaturer	73
4.4.6. Diskussion.....	76
5. Sammanfattning.....	77
5.1. Växthusodlarens kommentarer	77
5.2. Allmän diskussion	77
6. Källförteckning	79

1. Inledning

Projektet Växthus-LED utfördes i samarbete med MTT (Forskningscentralen för jordbruk och livsmedels ekonomi) i Pikis och företaget Handelsträdgård Martin Sigg Ab i Pjelas i Närpes. Yrkeshögskolan Novia testade LED-mellanbelysning för tomat i Närpes och MTT testade LED-belysning för gurka i Pikis. MTTs LED-försök och resultat presenteras i en annan rapport.

I projektet Växthus-LED har Yrkeshögskolan Novia upphandlat LED-mellanbelysning. Företaget Netled Oy valdes och 112 armaturer installerades i ett växthus i Pjelas, Närpes. Försöksväxthuset är ett tomatglasblockhus på 6300 m². LED-försöksområdet har bestått av fyra plantrader, totalt 448 m² samt ett referensområde med samma areal. I LED-försöksområdet har tomatplantorna belysts med HPS-toppbelysning 600 W per armatur med en installationseffekt på 186 W/m² och LED-mellanbelysning 205 W per armatur, installationseffekt 47 W/m². I referensområdet har tomatplantorna belysts med HPS-toppbelysning 600 W per lampa, installationseffekt 185 W/m² och toppbelysning 750 W per lampa, installationseffekt 232 W/m². Försöket har utförts så att installationseffekterna vid LED- respektive referensområdet har varit samma under tiden 1.11.2013–5.3.2014 (233 W/m² och 232 W/m²) medan man 9.9.2013–31.10.2014 och 6.3.2014–30.4.2014 har belyst enligt solinstrålning.

Målet med försöket var bland annat att undersöka om man genom att sänka HPS-toppbelysningseffekten och installera motsvarande effekt som LED-mellanbelysning kan få en högre skörd jämfört med utan LED-mellanbelysning. Det är alltså frågan om samma elförbrukning men med annan typ av ljus och annan ljusspridning. Under försökets gång har temperatur, relativ fuktighet, instrålning, PAR-strålning, bevattning, elförbrukning, belysningstider m.m. samlats in och analyserats. I fortsättningen är HPS+LED förkortning för de fyra LED- och HPS-belysta försöksodlingsraderna och HPS för de fyra referensförsöksodlingsraderna.

Den här rapporten är sammansatt av flera delrapporter, vilka delvis utgör ganska självständiga helheter. Mats Borg (Yrkeshögskolan Novia) har skrivit kapitel 3.2 och 3.9. Övriga kapitel är skrivna av Daniel Sjöholm och Kristian Blomqvist (Yrkeshögskolan Novia) och Liisa Särkkä, Kari Jokinen och Timo Kaukoranta (MTT).

1.1. Växthusbelysning

På grund av de naturljusförhållanden som råder i Finland är det en nödvändighet att belysa med konstljus om man vill odla grönsaker i växthus året runt. Olika växthusodlare har olika synpunkter på konstbelysningen, en del belyser mera och andra mindre. En del odlare anser att belysningen skall placeras ovanför gångarna andra ovanför plantorna. En del menar att det räcker att belysa enbart vid planttopparna medan andra även vill ha mellanbelysning mellan plantorna på en lägre höjd. Belysningstider, lampeffekter, lampposition o.s.v. är beroende av många olika faktorer t.ex. vilken grönsak som odlas, om man är säsongodlare eller åretruntodlare och i hurudant växthus man odlar.

Vid odling av tomat och gurka i Finland används idag i huvudsak högtrycksnatriumlampor, HPS-lampor. De vanligaste HPS-växtlamporna som används idag har eleffekten 250 W, 400 W och 600 W och används vid både topp- och mellanbelysningsinstallationer. Elbelysningsinstallationseffekterna varierar mellan ca 100 och 400 W/m² beroende på vilken växt som odlas men även vilken inställning växthusodlaren har till konstbelysning. Många odlare har som tumregel vid tomat och gurkodling att om man ökar belysningen med 1 % får man även 1 % mera skörd. En del växthusodlare anser att om man belyser med en högre elinstallationseffekt kan man belysa under färre antal timmar per dygn.

Utmärkande för HPS-växtlamporna är att de omvandlar en stor del av den elenergi de använder till värme istället för ljus (ca 35 % ljus). Dessutom är deras ljusspektrum starkast vid de gröna, gula och orangea våglängderna vilka anses som mindre betydelsefulla för grönsakers fotosyntes. Ljusintensiteten från lamporna minskar och ljusspektrum ändrar ju längre lamporna används. Lamptillver-

karna rekommenderar att lampan och reflektorn rengörs årligen och att lampan byts ut efter två år. Tillverkare har dock angett en HPS-lampas livslängd till 10 000–12 000 timmar. (Tuominen, 2008)

I den opublicerade rapporten "Projektet Energieffektiva växthus 2015; Kartläggning av nuläget och utvecklingsmöjligheter inom växthusbranschen", utgiven av Yrkeshögskolan Novia, forskning och utveckling år 2012 finns växthusbelysningen i Finland närmare beskriven. (Borg;Frände;& mfl., 2012)

1.1.1. LED-belysning

LED är en förkortning av Light Emitting Diode, på svenska brukar man prata om en lysdiod, en LED. LED-växtbelysningsarmaturer består oftast av fler än en lysdiod. Lysdioder är ingen ny uppfinning. En LED är en halvledare som endast strålar i ett smalt ljusspektrum när elektricitet ansluts, i motsats till traditionell belysning som innehåller många olika våglängder (bredare ljusspektrum). Lysdioder har länge använts i displayer och indikatorlampor för t.ex. elektroniska apparater. Idag används LED i t.ex. fordonslampor, skyltar och kamerablixtar. Lysdioderna utvecklas kontinuerligt och blir allt effektivare.

Fördelen med LED-växtbelysning är bl.a. att man kan förse växterna med exakt de våglängder som man önskar, för att t.ex. åstadkomma förbättrad tillväxt, växtbiomassa och skörd. LED har en längre livslängd än traditionella HPS-lampor. Tillverkare anger att lysdiodernas livslängd varierar mellan 20 000–100 000 timmar jämfört med HPS 10 000–12 000 timmar. Nackdelen med dagens LED-växtbelysning är att investeringskostnaden är högre jämfört med HPS-växtbelysning. Beroende av vilken LED-belysningslösning man väljer kan det innebära att man måste göra strukturella förändringar i växthusen, t.ex. förflyttning av värmerör.

I den opublicerade rapporten "Projektet Energieffektiva växthus 2015; Kartläggning av nuläget och utvecklingsmöjligheter inom växthusbranschen", utgiven av Yrkeshögskolan Novia, forskning och utveckling år 2012 finns LED-växtbelysningen närmare beskriven. (Borg;Frände;& mfl., 2012)

1.1.2. Ljusets inverkan på plantor

Strålning (ljus) kan ha olika våglängder d.v.s. fotoner (ljuspartiklar) med olika energi. Ett ljusspektrum visar ljusintensiteten vid olika våglängder. Det ljus som ett mänskoöga uppfattar d.v.s. synligt ljus är våglängderna 380–760 nm. Mänskoögat uppfattar de olika våglängderna som olika färger. Den del av ljuset som plantor använder för fotosyntes kallas för fotosyntetiskt aktiv strålning och förkortas PAR [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] och har våglängdsområdet 400–700 nm. Den del av det infraröda området (NIR) som ligger närmast det synliga området är våglängderna 760–2500 nm. T.ex. glödtråden i en glödlampa strålar huvudsakligen inom detta område. (Treiman, 2005)

Olika typer av plantor har olika ljusabsorptionsförmågor, dessutom kan den variera med växtens tillstånd. Klorofyll a och b är de vanligaste och viktigaste pigmenten och de har sitt absorptionsmaximum vid de röda och blåa våglängderna. Plantorna absorberar också andra våglängder men inte lika effektivt. (Singhal, 1999)

I den opublicerade rapporten "Projektet Energieffektiva växthus 2015; Kartläggning av nuläget och utvecklingsmöjligheter inom växthusbranschen", utgiven av Yrkeshögskolan Novia, forskning och utveckling år 2012 finns ljusets inverkan på plantor och strålningsenheter närmare beskriven. (Borg;Frände;& mfl., 2012)

2. Material och metoder

2.1. Val av växthusodlare och LED-armaturtillverkare

Projektet Växthus-LED inleddes med att söka ett lämpligt försöksväxthus. Närpes stad hade som krav för medfinansiering av projektet att försöksväxthuset skulle vara beläget i Närpes. Ett informations- och diskussionstillfälle arrangerades i Yttermark där alla växthusodlare var välkomna att diskutera projektet Växthus-LED och LED-växtbelysning. En förfrågan om samarbete angående ett LED-försök skickades ut till samtliga växthusodlare i Närpes. Totalt visade fem växthusodlare intresse för projektet, samtliga intervjuades. Martin Sigg i Pjelax, Närpes ansågs ha det mest lämpade växthuset för försöksverksamhet.

Samtidigt som ett lämpligt försöksväxthus söktes undersöktes vilka olika LED-växtarmaturer, -tillverkare och -återförsäljare som fanns på marknaden i Finland och övriga världen. Yrkeshögskolan Novia upphandlade LED-växtbelysning till försöksväxthuset via HILMA. Information om bl.a. försöksväxthuset och lampbudget presenterades i annonsen. Alla kända LED-växtarmaturtillverkare informerades om upphandlingen och ombads ge offert på LED-belysning. Fem offerter erhöles och utvärderades. Slutligen valdes Netled Oy offert med 112 LED-mellanbelysningsarmaturer av modellen Hortishine med eleffekten 205 W per armatur. Antalet offerterade armaturer kunde belysa en växthusareal på 448 m² (exklusive servicegång). Netled Oy offert valdes p.g.a. att deras armatur enligt i offerterna angivna data hade den högsta verkningsgraden (PPF/W), högsta fotonflödet (μmol/s) och offerterat den lägsta lampkostnaden per fotonflöde (euro per μmol/s).

2.2. Netled Oy

Företaget Netled Oy är ett finskt företag i Tammerfors grundat år 2007. År 2011 lanserade de sin första LED-växtbelysningsprodukt OptoGrowia vilket var en gardin med lysdioder främst ämnad som mellanbelysning i växthus. År 2012 lanserade de sin första LED-armatur för växthus med namnet Hortishine. Netled Oy har flertalet referensväxthus i Finland. Mer information om företaget och deras produkter finns på deras hemsida www.netled.fi

2.3. Försöksväxthuset

Martin Sigg i Pjelax, Närpes odlar tomat i tre växthus, ett blockväxthus och två åsväxthus. Sigg är en året runt odlare och odlar vanligtvis augusti till juli. LED-försöket har utförts i ett blockväxthus. Blockväxthuset är byggt år 2005 och har 4 mm enkelglas som täckmaterial. Växthusets totala areal är 6300 m² och det är indelat i två avdelningar, dock inte avskilda med vägg. I växthuset finns traditionell toppbelysning, s.k. högtrycksnatriumlampor (HPS). Växthusodlaren har möjlighet att justera lampornas eleffekt till 600 W eller 750 W (exklusive drossel). Armaturerna är placerade ovanför gångarna i blockväxthuset. Planttätheten är 2,5 plantor per m². Hela växthuset består av 52 odlingsbäddar var och en 56 m lång. Nedsläppning och bladning av plantor varierar något, som regel bladlar man en gång per vecka och släpper ner plantorna varannan vecka.

I mitten av blockväxthuset, på ca 448 m² exklusive servicegång (484 m² inklusive servicegång) installerades Netled Oy mellanbelysningsarmatur Hortishine (205 W). Växthusarealen motsvarar fyra odlingsbäddsrader i växthuset. Vid HPS+LED raderna fanns HPS-toppbelysning i taket med eleffekten 600 W (exklusive drossel) per armatur. I en annan del av samma växthus fanns referensraderna vilka även var fyra till antalet. Vid referensraderna fanns enbart HPS-toppbelysning med eleffekten 600 W och 750 W (exklusive drossel). I försöksväxthuset användes odlingsbäddarna mellan lampraderna 17 och 18, 18 och 19, 19 och 20, 20 och 21 för HPS+LED och odlingsbäddarna mellan lampraderna 11

och 12, 12 och 13, 13 och 14, 14 och 15 för HPS (referens). I Bild 1 presenteras en skiss över försöksväxthuset i Pjelas.

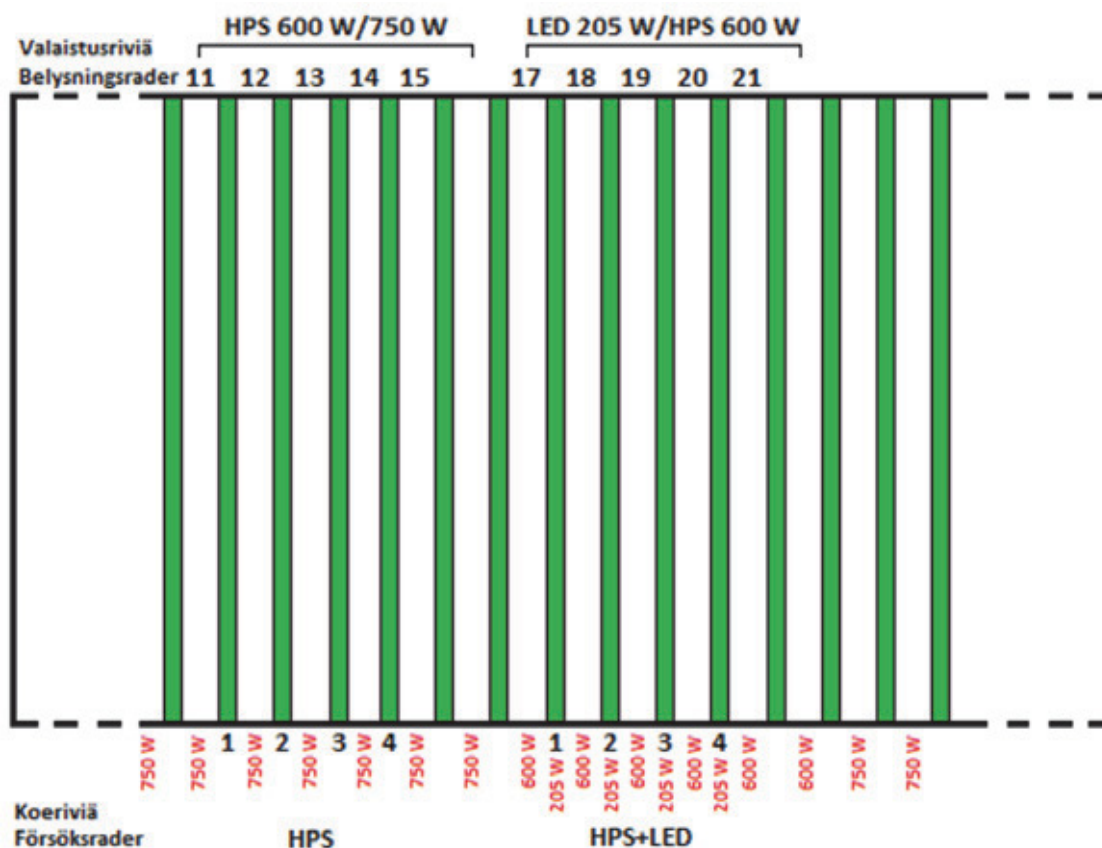


Bild 1. Skiss över försöksrader och odlarens egen numrering av belysningsrader i blockväxthuset i Pjelas. Gröna linjer är odlingsbäddar och vita linjer är gångar (belysningsrader). Röd text visar vilka lampeffekter som används vid de olika raderna.

Den totala elinstallationseffekten vid HPS+LED var 233 W/m^2 , varav 186 W/m^2 HPS och 47 W/m^2 LED. Den totala elinstallationseffekten vid HPS uppgick till 232 W/m^2 (baserat på 750 W). Alla elinstallationseffekter har beräknats inkluderande servicegångens areal, d.v.s. 484 m^2 , drossel samt övriga förluster. Vid varje belysningsrad finns totalt 34 HPS-lampor och vid HPS+LED totalt 28 LED-armaturer. Avståndet mellan LED-armaturerna och växthusgolvet var tre meter och avståndet mellan golv och plantornas topp var cirka fyra meter. Plantorna växer på en odlingsbädd som finns på ett avstånd av en meter från golvet. Plantorna växer i en kub som är placerad ovanpå en odlingspåse (stenu) som finns ovanpå odlingsbädden. Avståndet mellan HPS-lampornas nedre del och golvet är $4,6 \text{ m}$. I blockväxthuset finns mellanvärmerör installerade vid varje odlingsbädd. Avståndet mellan golv och mellanvärmerör är $1,5 \text{ m}$. Se Bild 2 för bild från en av HPS+LED raderna.



Bild 2. Visar en HPS+LED rad i försöksväxthuset. På bilden kan man se Netled Oy LED-mellanbelysningsarmatur Hortishine. (Foto Daniel Sjöholm, 10.3.2014)

2.3.1. Åsväxthuset

Växthusodlarens två övriga växthus är äldre glasväxthus (4 mm glas), vardera 1500 m². Planttätheten är 2,5 plantor per m². Tomatplantornas odlingskuber finns placerade på golvet. I huset finns traditionell HPS-toppbelysning med lampeffekten 400 W (exklusive drossel). Lamporna är placerade ovanför gångarna i åsväxthuset. I ett av växthusen har växthusodlaren installerat Philips GreenPower LED-mellanbelysning, 115 W per armatur. Philips LED-mellanbelysning är installerad som dubbelradsinstallation, d.v.s. 115 W x2, en armatur ovanför den andra (se Bild 3). Total elinstallationseffekt är 259 W/m² (inklusive drosslar, HPS). Avståndet mellan nedersta LED-armatur och golv är 1,5 m och avståndet mellan nedersta och översta LED-armatur är 0,5 m. Avståndet mellan golv och plantopparna är ca 2,8 m. Avståndet mellan HPS-lampornas nedre del och golvet är 3,2 m. I åsväxthuset finns inte mellanvärmare installerade.



Bild 3. Philips GreenPower LED (dubbelinstallation) och HPS-toppbelysning (400 W per armatur). Bilden är fotograferad i ett av växthusodlarens åsväxthus. (Foto Daniel Sjöholm, 10.3.2014)

2.4. Belysningstider

LED-armaturerna installerades i försöksväxthuset i början av augusti 2013 och tomatplantor (sorten Encore) planterades i mitten av augusti. Alla HPS-lampor i blockväxthuset byttes ut mot nya före tomatplantorna började belysas. Alla tomatplantor började belysas med HPS-toppbelysning (600 W, 186 W/m²) den 11.9.2013. På grund av problem med LED-armatursstyrningen tändes LED-armaturerna (205 W, 47 W/m²) vid HPS+LED först den 25.9.2013. Från och med den 26.9.2013 började även HPS 750 W, s.k. helljus att användas beroende av uppmätta solinstrålningen vid HPS (referens). Belysningstiderna fram till 31.10 har baserats på uppmätt solinstrålning.

Under perioden 1.11.2013–5.3.2014 har följande belysningsschema använts vid försöksraderna: HPS-lamporna (600 W) vid HPS+LED har varit tända klockan 23.30–16.30 varje dygn d.v.s. totalt 17 h/dygn. LED-armaturerna (205 W) har varit tända klockan 23.00–17.00 varje dygn d.v.s. totalt 18 h/dygn. Vid HPS (referens) och resterande övriga delar av blockväxthuset har plantorna belysts med HPS 600 W klockan 23.00–23.30 och klockan 16.30–17.00, d.v.s. 1 h/dygn + HPS 750 W klockan 23.30–16.30 d.v.s. totalt 18 h/dygn. I Bild 4 finns ett exempel på hur blockväxthuset har belysts den 29.1.2014, d.v.s. under den tid då plantorna belysts med regelbundna tider. Den 29.1.2014 var elförbrukningen vid HPS+LED ca 3 % lägre jämfört med HPS. Vid HPS+LED var HPS tända 17 h och LED 18 h. Vid HPS (referens) var HPS 600 W tända 1 h och HPS 750 W 17 h.

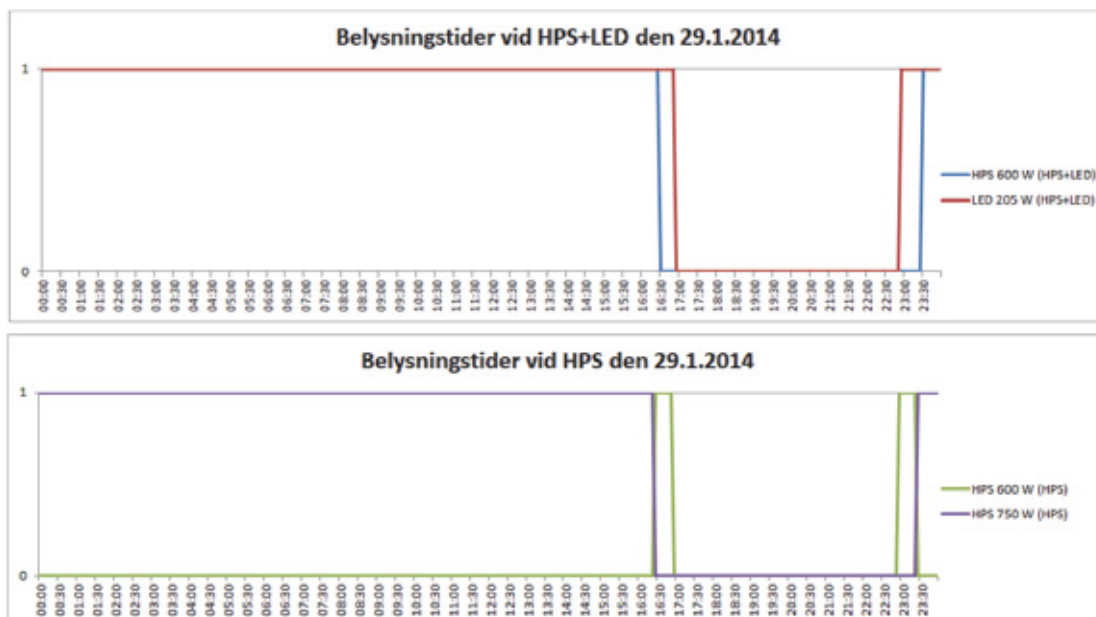


Bild 4. Bild visar hur tomatplantorna har belysts med konstbelysning den 29.1.2014 vid HPS+LED respektive HPS. När värdet på y-axeln är noll är lamporna släckta och när värdet är ett är de tända. Detta belysningsschema har använts under perioden 1.11.2013–5.3.2014.

Från och med den 6.3.2014 började plantorna belysas utgående från solinstrålningen, d.v.s. lamporna har varit tända färre timmar per dygn (se Bild 5 för exempeldag den 29.3.2014). Elförbrukningen var den 29.3.2014 vid HPS+LED ca 3 % lägre jämfört med HPS. Under denna dag vid HPS+LED var HPS tända 4 h och LED 12 h jämfört vid HPS (referens) där HPS 600 W var tända 4 h och HPS 750 W 3 h. Dygnsvariationer i belysningstiderna förekommer mellan HPS+LED och HPS under de tider när växthusodlaren belyst enligt instrålning. Detta beror på att odlaren haft skilda ljusnivågränser i automationssystemet vid HPS+LED och HPS.

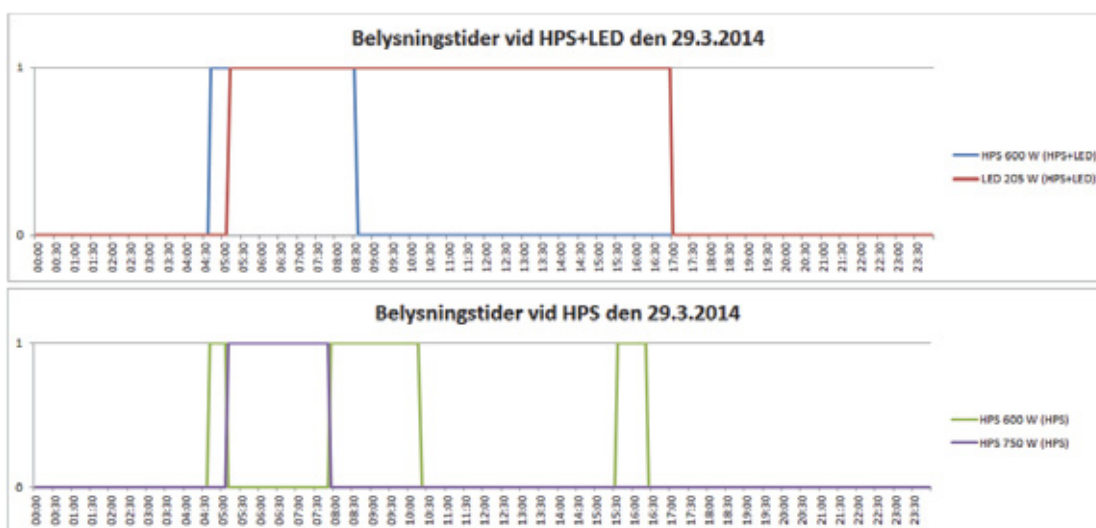


Bild 5. Ett exempel på när konstbelysningen varit tänd respektive släckt utgående från solinstrålning på våren den 29.3.2014. När värdet på y-axeln är noll är lamporna släckta och när värdet är ett är de tända.

Alla lampor i växthuset stängdes av vecka 18 (30.4.2014). I Bild 6 presenteras antalet belysningstimmar per vecka i försöksväxthuset. I Bilden kan man se hur belysningstimmar varierar per vecka när växthusodlaren belyser plantorna utgående från solinstrålningen d.v.s. under veckorna 39–44

och veckorna 11–18. Under perioden vecka 44–11 ser man att antalet belysningstimmar har varit konstant, förutom vid HPS 750 W (referens + övriga) där antalet varierar något under vecka 2 och 11. Odlaren har redan i vecka 2 börjat justera belysningstiderna enligt instrålning, dock enbart HPS 750 W. Under den konstanta belysningstiden (vecka 44–11) är medelbelysningstimmarna för LED 205 W (vid HPS+LED) och HPS 600 W (referens + övriga) ca 126 h/vecka, för HPS 600 W (vid HPS+LED) och HPS 750 W (referens + övrigt) ca 119 h/vecka. Antalet belysningstimmar och hur lamporna i växthuset varit tända och släckta har registrerats av växthusodlaren's eget växthusautomationssystem, Priva.

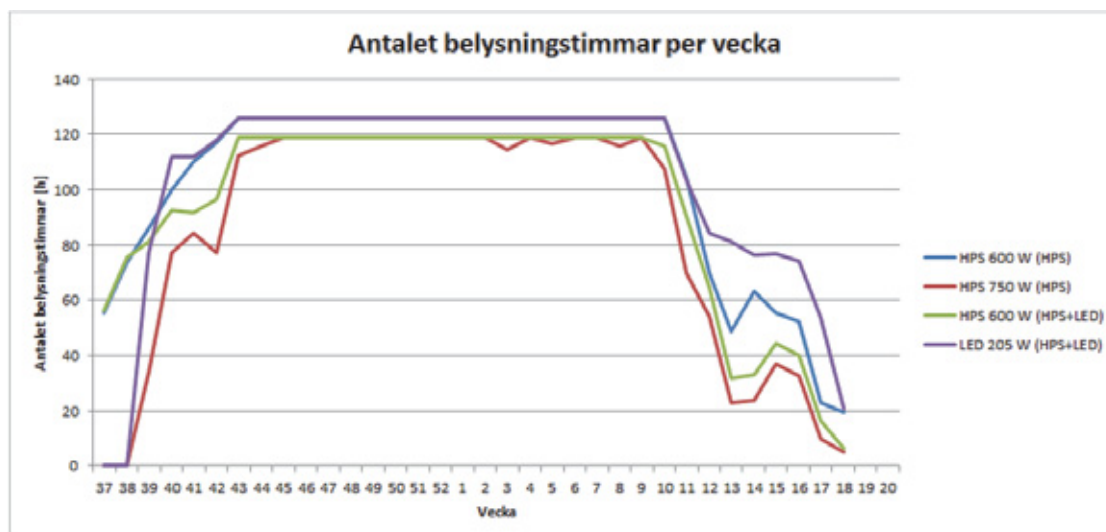


Bild 6. Antalet belysningstimmar per vecka för de olika lampeffekterna vid HPS+LED respektive HPS i blockväxthuset.

2.5. Mätutrustning och -system

Växthusodlaren använder sig av Priva automationssystem för styrning i samtliga växthus. Växthusodlaren mäter och loggar bl.a. följande i blockväxthuset och utomhus:

- inomhustemperatur [°C], (två sensorer per avdelning)
- relativa fuktigheten (RF) inomhus [%], (en elektronisk fuktgivare per avdelning)
- koldioxidhalt inomhus [ppm], (en per avdelning)
- bevattningsmängder, returvattenmängder
- belysningstider
- utomhustemperaturen [°C]
- relativa fuktigheten utomhus [%]
- instrålning [W/m^2]
- vindhastighet [m/s]

För att kunna mäta mera specifikt i växthuset och göra jämförelser mellan HPS+LED och HPS installerade Yrkeshögskolan Novia även egen mätutrustning i blockväxthuset. Mätutrustningen installerades i slutet av augusti och under september månad. Mätdata har samlats in fram till projektets slut.

För att följa med luftens temperatur och relativa fuktighet vid försöksområdena installerades mätboxar i totalt sex punkter i blockväxthuset. Tre mätboxar vid HPS+LED (mellan belysningsrad 19 och 20) och tre mätboxar vid HPS (mellan belysningsrad 14 och 15), vid samma avstånd från servicegången men på olika höjd (Bild 7). Mätboxarna placerades ca 28 m från servicegången in längs med odlingsraderna. Mätboxarna var gjorda av rostfri plåt och innehöll en kombinerad temperatur- och

fuktsensor med namnet Rotronic HF43 (Bild 8). Fuktsensorn var av kapacitiv typ. Mätboxarna innehöll också en fläkt som blåste luft genom boxen för att luften i den inte skulle värmas upp p.g.a. strålning.

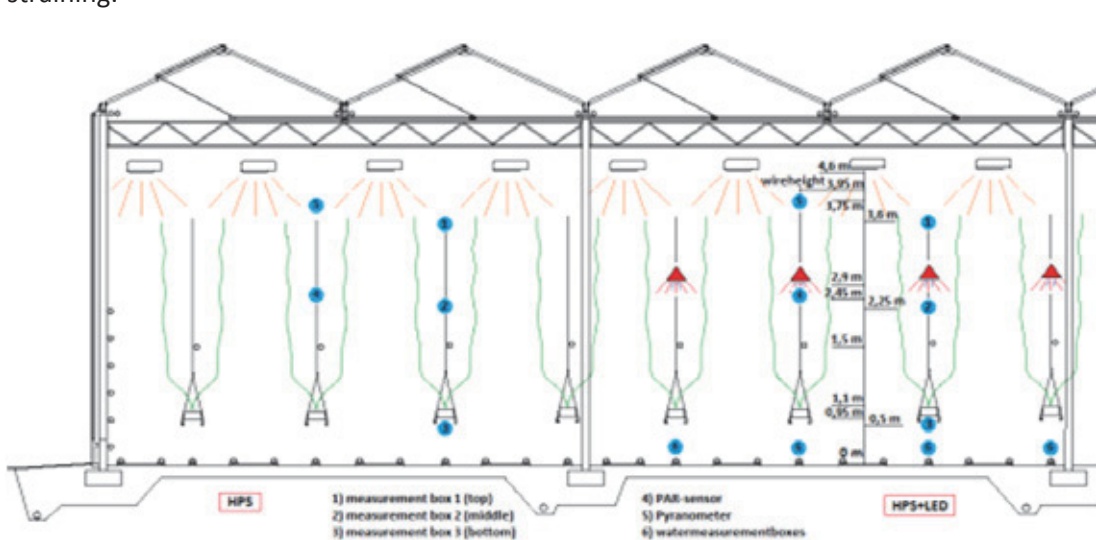


Bild 7. Skiss av försöksväxthuset där bl.a. mätutrustningens placering med avstånd från golvet presenteras.



Bild 8. Visar den mittersta mätboxen vid HPS+LED området i blockväxthuset. I ändan av mätboxen kan man se temperatur och relativa fuktighet sensorn samt fläkten. Den mittersta mätboxen placerades något åt ena sidan och inte rakt under LED-armaturen. De övriga två mätboxarna placerades mitt mellan planraderna. (Foto Daniel Sjöholm, 10.3.2014)

Strålningen (ljuset) i växthuset uppmättes vid HPS+LED (mellan belysningsrad 11 och 12) och HPS (mellan belysningsrad 19 och 20). Två pyranometrar av modellen Hukseflux LP02-TR-05, mätområdet (0...1600 ± 5) W/m², våglängdsområdet 285–3000 nm och två PAR-sensorer av modellen LI-COR LI-190, mätområdet (0...2000 ± 5) μmolm⁻²s⁻¹, våglängdsområdet 400–700 nm användes. Se Bild 7 för sensorernas position och Bild 9 för bild av sensorerna innuti växthuset. PAR-sensornerna och pyranometrarna var placerade ca 15 m från servicegången in längs med plantraderna, exklusive servicegångens bredd.

PAR-sensornerna placerades på avståndet 2,45 m från golvet, en vid HPS+LED och en vid HPS. Avståndet mellan PAR-sensorn och LED-armaturen blev då 0,45 m vid HPS+LED. Syftet med mätningen var att undersöka PAR-intensiteten vid ca 0,5 m under LED och jämföra ljusintensiteten på samma höjd vid HPS. PAR-sensornerna monterades på en kedja som höll upp odlingsbädden, kedjan skuggade sensorn från nord. Sensorerna registrerade alltså strålning från LED-armaturerna, HPS-lampor och det naturliga ljuset.

Pyranometrarna placerades på ett avstånd av 3,75 m från golvet, en vid HPS+LED och en vid HPS. Sensorerna placerades så att de var under HPS-lamporna men ovanför LED-nivån, vilket innebar att de registrerade HPS-lampornas strålning samt solens strålning. Den ena pyranometern fungerade som kontrollsensor, d.v.s. båda pyranometrarna skulle i princip registrera samma värde. Pyranometrarna monterades på en kedja som höll upp odlingsbädden, kedjan skuggade sensorn från syd.

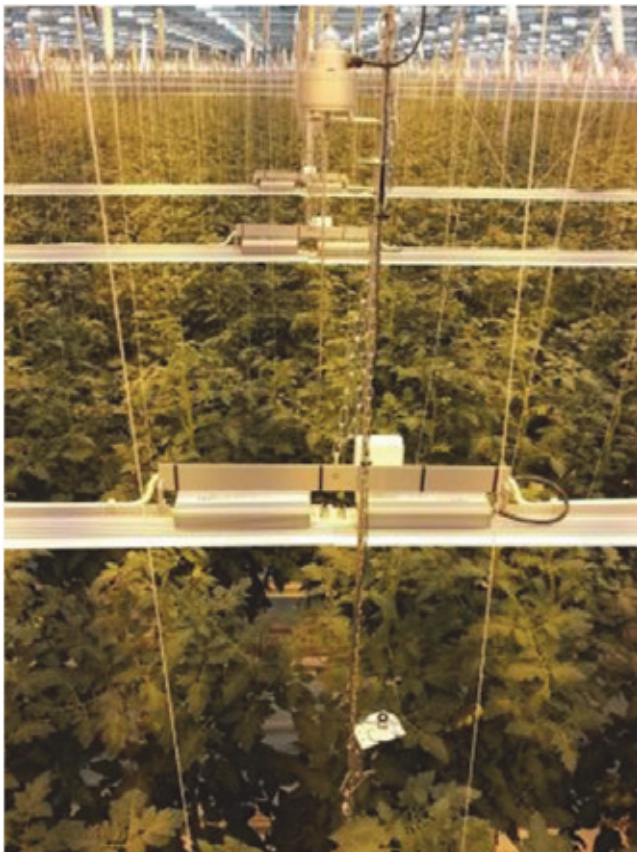


Bild 9. PAR-sensorn (nederst) och pyranometern (överst) placerades på samma position vid HPS+LED och HPS. Bilden är fotograferad vid HPS+LED. (Foto Daniel Sjöholm)

Utöver ovanstående sensorer tillverkades fyra identiska vattenmätningsslådor som skulle registrera mängden returvatten (överninningsvatten) från vardera HPS+LED rad (Bild 7 och Bild 10). Tomatplantorna bevattnas något mera än de upptar (överbevattning) och denna mängd vatten rinner längs med odlingsbäddens ränna ut till radens ända där vattnet rinner ner i en golvbrunn. Med hjälp av vattenmätningsslådorna kunde mängden returvatten per HPS+LED rad registreras.

Växthusautomationssystemet Priva registrerade den totala bevattningsmängden samt totala mängden returvatten i hela försöksväxthuset. Med hjälp av dessa data skulle det vara möjligt att beräkna returvattenmängden även för HPS-raderna. Tanken var att undersöka om plantor belysta med HPS+LED upptar mer/mindre alternativt samma mängd vatten jämfört med plantor belysta med HPS.



Bild 10. Vattenmätningsslådornas placering. (Foto Daniel Sjöholm)

Bild 11 visar en bild av en vattenmätningsslåda. Genom den svarta slangen rinner returvattnet från plantraden ner i mätlådan. I botten av lådan finns en sänkpump och två flottörer. På en flottör har en styroxbit fäst för att hålla lämplig vattennivå i lådan, flottören ger en signal till pumpen när lådan behöver tömmas. Den andra flottören ger en signal till mätsystemet att lådan har tömts. Vattnet pumpas till växthusets returvattenrör i golvet, returvattnet återanvänds inte. Vattenmängden per pumpning har uppmätts för hand med ett litermått för vardera vattenmätningsslådan med totalt fem upprepningar.



Bild 11. Komponenterna i en vattenmätningsslåda. (Foto Daniel Sjöholm)

För uppbyggnaden av mätsystemet användes mät- och reglerenheten EXOFLEX från det svenska företaget REGIN. För övervakning och datalagring användes en fläktlös mini-PC med programvaran EXO4. EXO4 hade ingen kontakt med växthusets automationssystem PRIVA. EXO4 loggade och lagrade mätvärden från PAR-sensorer, pyranometrar, mätboxarna (temp. och RF) med fem minuters intervall. Mätvärdena som lagrades var medelvärden som beräknats över fem minuter. EXO4 registrerade även antalet pumpningar från vardera returvattenmätningsslådan.

I blockväxthuset installerades också två elmätare. Vardera elmätaren mätte elförbrukningen för sex belysningsrader (en elcentral). Den ena installerades vid elcentralen vid HPS+LED området och den andra vid elcentralen vid HPS området. Tyvärr kunde elförbrukningen inte mätas enbart vid de fyra försöksraderna, utan man måste mäta över sex rader (en elcentral). Därför mättes fyra rader med lampeffekten HPS 600 W + LED 205 W och två rader med lampeffekten HPS 600 W vid HPS+LED. Vid HPS mättes elförbrukningen vid sex rader med lampeffekten 600 W/750 W.

3. Resultat och diskussion

3.1. Stationära ljussensorer i försöksväxthuset

I försöksväxthuset vid HPS+LED och HPS uppmättes strålningen (ljuset) med två pyranometrar [W/m^2] och två PAR-sensorer [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$]. Sensorernas specifikationer och placering i växthuset har redan presenterats i kapitel 2.5, Bild 7 och Bild 9. Sensorerna var placerade vid samma position under hela försöket. Sensorerna loggades m.h.a. EXOFLEX. Förutom Novias sensorer har växthusodlaren en egen ljusmätare, en light linear sensor (levererad av Priva) ansluten till växthusautomationssystemet Priva. Odlarens ljusmätare mäter kontinuerligt instrålningen i enheten lux på kontorsbyggnadens tak intill växthuset. Sensorn mäter inom spektrumområdet 525–1100 nm och mätområdet är 0–160 klux. Priva omvandlar uppmätta luxvärden till enheten W/m^2 , omvandlade mätvärden loggas kontinuerligt med fem minuters intervall. Observera att våglängdsområde och mätområde inte är likadana för Novias sensorer som för odlarens sensor. Detta medför att ljusintensiteterna inte är jämförbara med varandra.

3.1.1. PAR-sensorer och daily light integral (DLI)

PAR-sensorerna registrerade kontinuerligt PAR-intensiteterna vid HPS+LED och HPS. Mätdata som presenteras nedan berör endast den mätpunkt som sensorerna befunnit sig och representerar inte den strålningsmängd som hela plantan får. När HPS- och LED-belysningen var tänd visade sensorn vid HPS+LED ett högre mätvärde än vid HPS. När LED-belysningen var släckt och enbart toppbelysningen (HPS) och naturliga ljuset (solinstrålning) fanns till förfogande visade sensorn vid HPS+LED oftast ett lägre PAR-värde. Detta berodde delvis på att toppbelysningseffekten sänkts vid HPS+LED och delvis av att sensorn som var placerad ca 0,5 m under LED-armaturen vid HPS+LED skuggades av LED-armaturen. LED-armaturen skuggade även i viss mån tomatplantorna.

Daily light integral (DLI) är ett mått på den mängd ljus som tas emot under en enda dag i ett specifikt område. Till exempel hur många mol av fotosyntetiskt aktiv strålning (PAR), fotoner, som mottas under en enda dag på en kvadratmeter [$\text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$]. Beroende av forskningstillämpning eller -syfte kan daily light integral vara en mer användbar metod än att analysera den momentana ljusinstrålningen. DLI varierar beroende på breddgrad, årstid och molntäcke. (LI-COR Biosciences, 2013)

DLI har beräknats för uppmätt PAR-data. DLI under tiden då plantorna belysts med regelbundna tider (1.11.2013–5.3.2014) har vid HPS+LED i medeltal varit ($16,7 \pm 3,3$) $\text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$ och vid HPS ($8,4 \pm 4,1$) $\text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$ d.v.s. plantorna vid HPS+LED (hybrid) får mera PAR (faktorn 2) jämfört med plantorna vid HPS (referens).

I Bild 12 presenteras genomsnittlig DLI per månad för månaderna oktober 2013 till juni 2014. I Bilden kan man se att den stationära PAR-sensorn vid HPS+LED har uppmätt ca hälften mera PAR jämfört med HPS PAR-sensorn i månaderna oktober till januari. Därefter minskar skillnaderna mellan HPS+LED och HPS p.g.a. att dagarna blir ljusare, alltså förekomsten av naturligt ljus ökar. Under månaderna maj och juni får PAR-sensorn vid HPS något mera ljus (ca 10 %) jämfört med HPS+LED detta beror på att all belysning stängts av den sista april samt att LED-armaturen skuggar sensorn något.

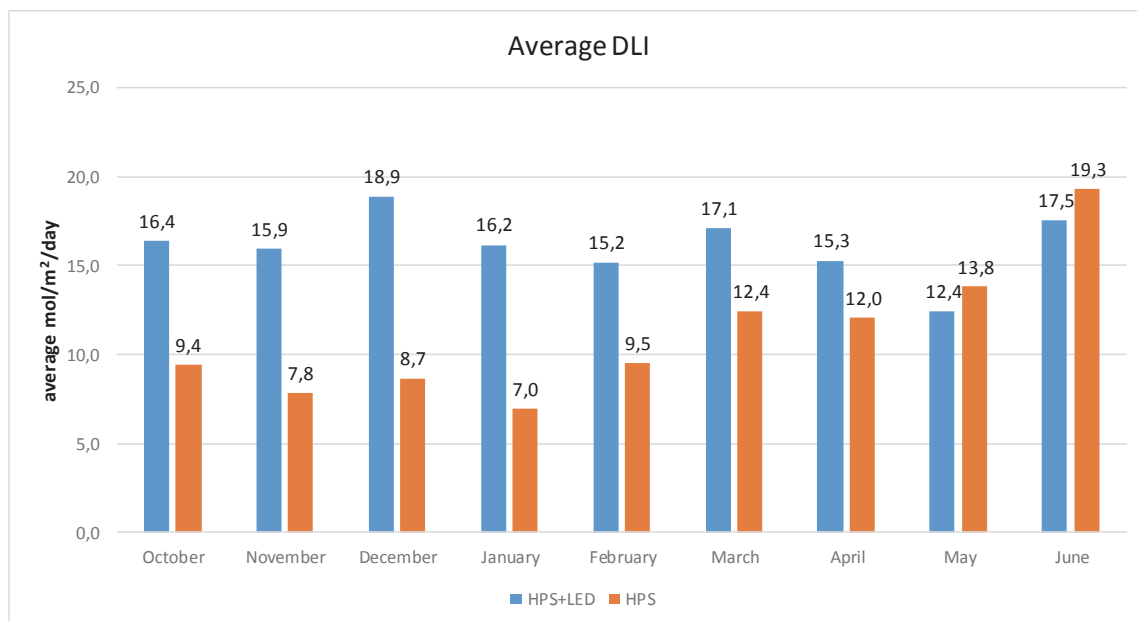


Bild 12. DLI (daily light integral) månadsmedeltal från oktober till juni vid HPS+LED respektive HPS.

DLI har beräknats för varje dag i oktober, december, april och juni. Bild 13 A, B, C, D visar hur DLI varierar i **A** oktober 2013 (belysning enligt instrålning), **B** december 2013 (regelbundna belysningstider), **C** april 2014 (belysning enligt instrålning) och slutligen **D** juni 2014 (all belysning avstängd). I graferna kan man se att DLI-nivåerna är olika i månaderna. Gemensamt för graf A, B, C är att man kan se en ganska tydlig ökning ungefär i mitten av månaderna. Ökningen av DLI antas bero på att växt-husarbetarna har släppt ner plantorna. Tomatplantorna växer och börjar skugga sensorerna och när man släppt ner plantorna har sensorn registrerat ett högre värde. I graferna A, B, C kan man även se att DLI-värdena vid HPS+LED är högre än vid HPS.

I grafen D juni 2014 är värdena vid HPS högre jämfört med HPS+LED på grund av att belysningen varit avstängd och att LED-armaturerna skuggar sensorn. I juni visar grafen att DLI-nivåerna varierar mera mellan dagarna än i de övriga månaderna. Detta beror antagligen på att sensorerna registrerar enbart solinstrålningsnivåerna som varierar mellan en solig respektive en mulen dag. I de övriga graferna har konstbelysningen jämnat ut topparna.

Jämför man DLI i december 2013 med april 2014 kan man konstatera att skillnaderna mellan HPS+LED och HPS är större i december jämfört med april, vilket beror på att dagarna har blivit längre och soltimmarna per dag ökar. Detta fenomen kan man även se i graf A oktober.

Beräknar man medel DLI per månad och jämför HPS+LED och HPS, är DLI i oktober 2013 43 % högre vid HPS+LED än vid HPS. I december 2013 (i regel den mörkaste månaden under hela året) när regelbundna belysningstider använts är DLI 54 % högre vid HPS+LED jämfört med HPS. I april 2014 avtar skillnaden och DLI är 21 % högre vid HPS+LED jämfört med HPS. I juni är DLI 10 % lägre vid HPS+LED jämfört med HPS.

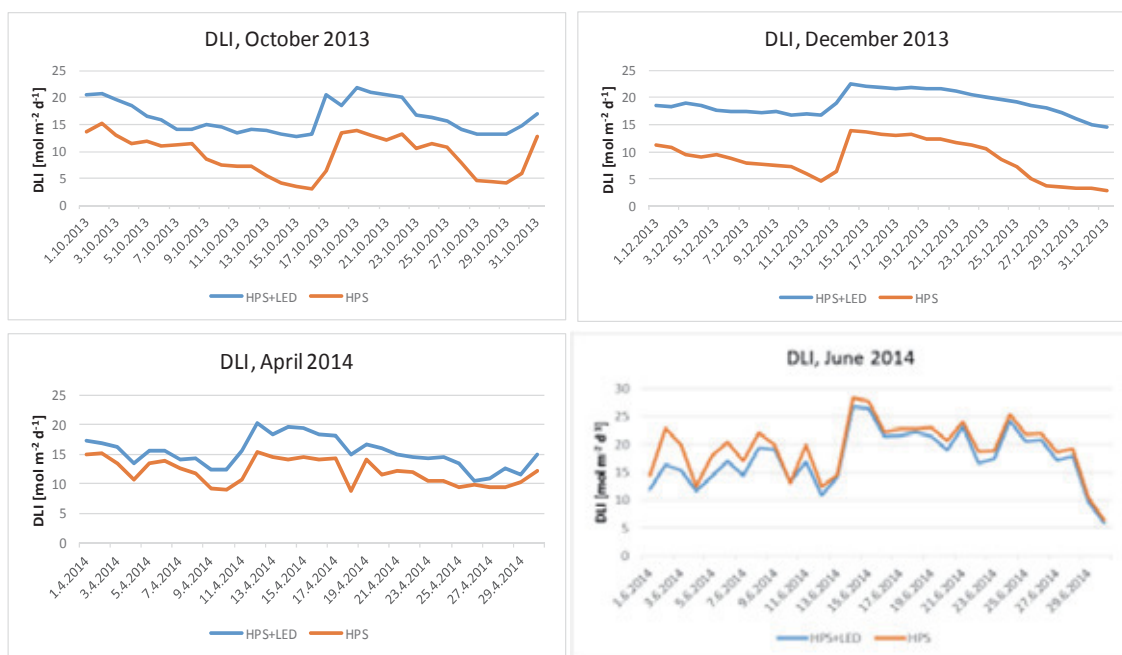


Bild 13. A, B, C, D visar hur daily light integral [$\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$] varierar på nivån ca 50 cm under LED-armaturerna vid HPS+LED respektive HPS i månaderna oktober 2013 (A), december 2013 (B), april 2014 (C) och juni 2014 (D).

3.1.2. Pyranometrar – naturligt ljus och ljus från taklampor

Pyranometrarna registrerade kontinuerligt instrålningen [W/m^2] vid HPS+LED och HPS. Mätdata som presenteras nedan berör endast den mätpunkt som sensorerna befunnit sig och representerar inte den strålmängd som hela plantan får. Sensorerna placerades ovanför LED-armaturerna men under HPS-taklamporna, d.v.s. ungefär vid planttopparnas nivå. Sensorerna registrerade allt naturligt ljus, samt strålning från HPS-taklamporna. Tanken var bl.a. att undersöka om pyranometrarna skulle visa någorlunda samma mätvärden vid HPS+LED som vid HPS. Genom att placera sensorerna under taklamporna kan man verifiera när taklamporna varit tända respektive släckta och jämföra data med Priva-data. Pyranometrarna har också gett vetskap om vilken mängd strålning [W/m^2] som plantorna fått i dess toppar under en odlingssäsong. Växthusets takkonstruktion har medfört att sensorerna visar olika vid vissa tidpunkter (skuggningseffekt). Plantornas blad har dock inte stört pyranometrarna på samma sätt som vid PAR-sensorerna.

Mätvärden från växthusodlaren egen ljusmätare (lux omvandlat till W/m^2) på taket loggades kontinuerligt med Priva. Sensorn är inte uppvärmd, vilket kan innebära att den inte varit frostfri när det har varit minusgrader utomhus, vilket i sin tur kan leda till felaktiga mätvärden. Detta är ett antagande som inte har verifierats under vintern. Eftersom växthusodlarna inte styr belysningstiderna enligt instrålning under vintern borde frost på sensorn inte medföra några direkta problem för odlaren, enbart ett felaktigt strålningsvärde som inte används.

För att lättare få ett mått på hur mycket ljusenergi som fås på en m^2 under ett dygn har samtliga uppmätta [W/m^2] värden omvandlats till enheten [$\text{MJm}^{-2} \text{d}^{-1}$]. Vid omvandling har alla W/m^2 värden under ett dygn summerats och omvandlats till rätt enhet.

Bild 14 visar månadsmedeltal för strålningen [$\text{MJm}^{-2} \text{d}^{-1}$] uppmätt vid tomatplantornas toppar från oktober 2013 till juni 2014 vid HPS+LED och HPS. I bilden kan man se att den stationära pyranometern vid HPS+LED har uppmätt något lägre värden jämfört med sensorn vid HPS. Detta beror på att HPS-eleffekten vid HPS+LED sänkts från 750 W till 600 W medan den vid HPS (referens) bibehålls vid 750 W. De lägre värdena (ca 20–25 %) vid HPS+LED förekommer mellan oktober 2013 och febru-

ari 2014. I mars och april minskar skillnaderna p.g.a. att det naturliga ljuset ökar. I maj och juni finns det inte längre någon skillnad mellan HPS+LED och HPS (referens).

De gråa staplarna i Bild 14 visar månadsmedeltal för strålningen [$\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$] uppmätt med odlarens egen ljusmätare. Odlarens ljusmätare visar ett lägre värde från november till februari. Från mars till juni visar den ett högre värde än vid HPS+LED och HPS. December är alltså den mörkaste månaden med tanke på den naturliga solinstrålningen. Viktigt att komma ihåg är att odlarens mätare inte mäter inom samma våglängdsområde som Hukseflux pyranometrarna och att odlarens ljusmätare egentligen är en luxmätare vars mätvärden Priva omvandlar till W/m^2 . Eftersom Priva ljusmätaren finns utomhus och inte är uppvärmd kan mätvärdena under vintermånaderna vara missvisande p.g.a. att mätaren kan vara täckt av snö eller frost.

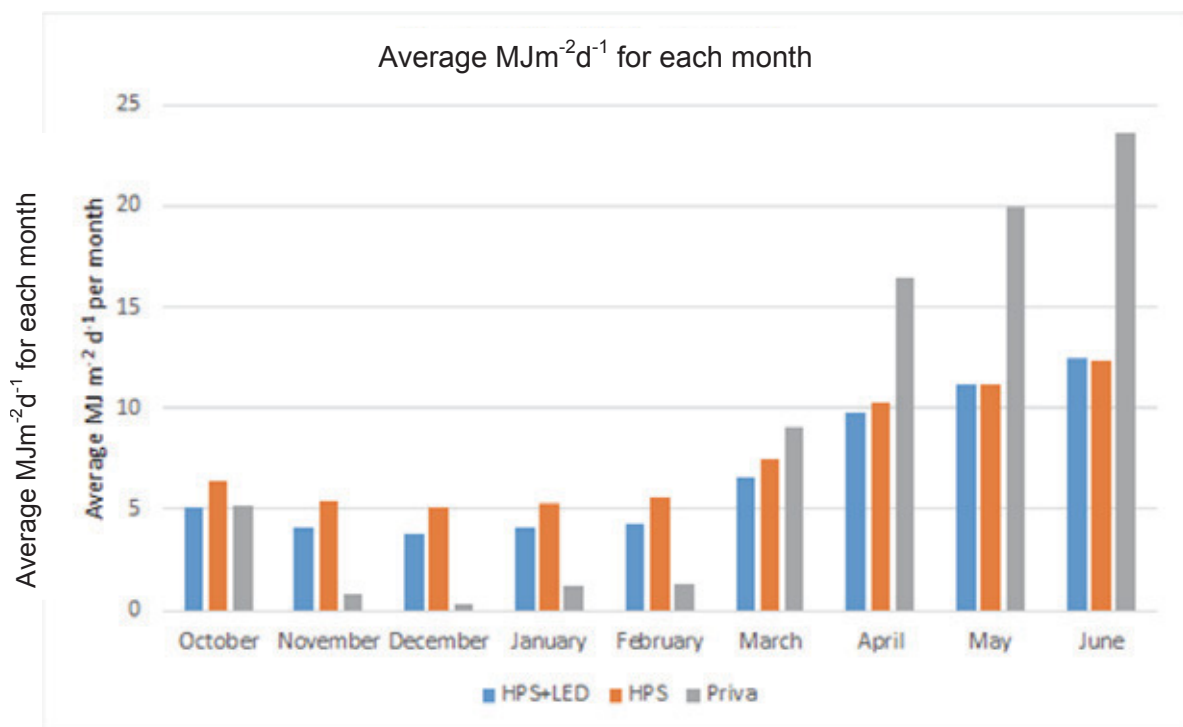


Bild 14. Strålningsmånadsmedeltal [$\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$] uppmätt vid tomatplantornas toppar från oktober till juni vid HPS+LED och HPS.

Strålningen [$\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$] vid tomatplantornas toppar har beräknats för varje dag i några månader vid HPS+LED och HPS. Bild 15 A, B, C, D visar hur strålningen varierar i oktober 2013 (A) belysning enligt instrålning, december 2013 (B) regelbundna belysningstider, april 2014 (C) belysning enligt instrålning och juni 2014 (D) all belysning avstängd. I graferna A och B är strålningen [$\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$] vid HPS högre än vid HPS+LED p.g.a. HPS-eleffekten sänkts vid HPS+LED. I april (C) och juni (D) är strålningsnivåerna samma vid HPS+LED och HPS (referens), det naturliga ljuset har ökat.

I graferna oktober (A), april (C) och juni (D) kan man urskilja vilka dagar det varit soligt, mulet och halvmulet. I december (B) är naturljusnivåerna så låga att lamporna dominerar, man kan ändå urskilja några dagar med mera solljus och mindre solljus.

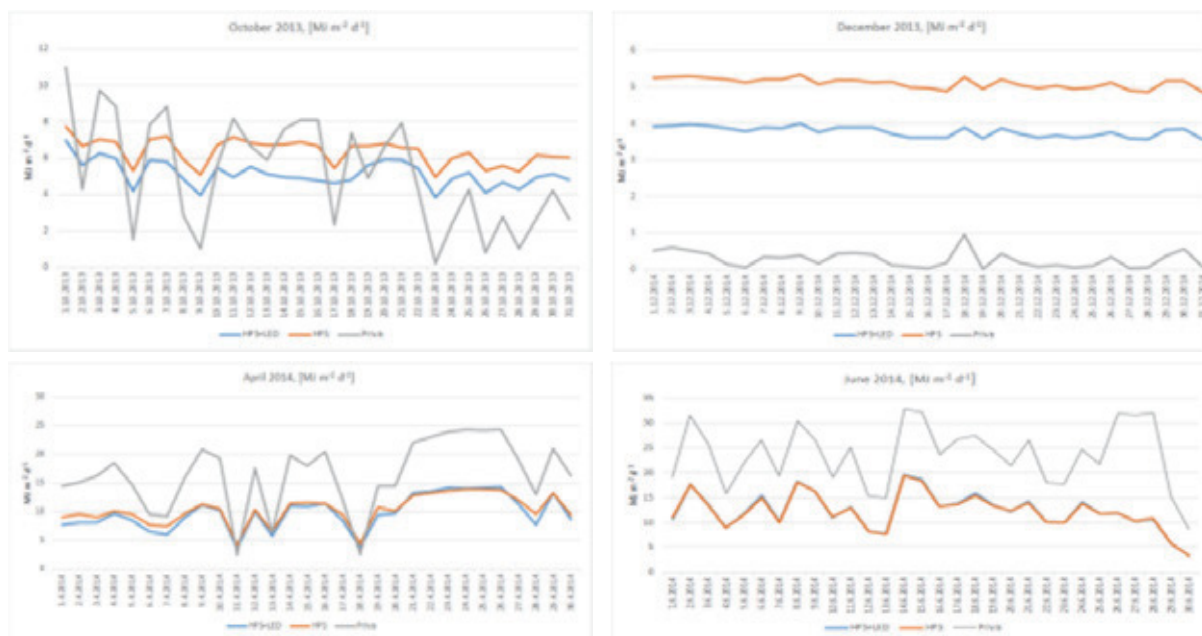


Bild 15. A, B, C, D visar hur strålningen [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$] varierar vid tomatplantornas toppar i månaderna oktober 2013 (A), december 2013 (B), april 2014 (C) och juni 2014 (D).

3.2. Undersökning av temperatur och relativ fuktighet i plantrader med och utan LED-mellanbelysning

I den delstudie som här presenteras undersöks om det finns signifikanta skillnader i den vertikala temperaturprofilen och fuktighetsprofilen mellan plantrader med enbart toppbelysning och plantrader med både toppbelysning och LED-mellanbelysning.

Under försöksperioden som varade ett knappt år uppmättes temperatur och relativ fuktighet i tre punkter på olika höjd i plantraden. Det här gjordes både i en plantrad med LED-mellanbelysning och i en referensplantrad utan mellanbelysning. Mätpunkterna låg under odlingsbädden, ovanför planttoppen (något under toppbelysningen) och ungefär på mitten av plantans höjd (under mellanbelysningen), se Bild 38. Sensorn för temperatur och relativ fuktighet fanns i en ventilerad mätlåda.

Referensraderna belystes mellan klockan 23.30 och 16.30 med 232 W/m^2 samt under en halvtimme före och efter denna period med en lägre effekt om 186 W/m^2 . LED-raderna belystes mellan klockan 23.30 och 16.30 med 233 W/m^2 (varav 186 W/m^2 HPS och 47 W/m^2 LED) samt under en halvtimme före och efter denna period med 47 W/m^2 (enbart LED). Det här innebär att den tillförda effekten i de båda raderna var praktiskt taget lika stor under största delen av dygnet, men under första och sista halvtimmen av den belysta perioden var effekten i referensraden betydligt högre än i LED-raderna (186 W/m^2 mot 47 W/m^2).

Under försöksperioden loggades mätdata med 5-minuters intervall dygnet runt. Bild 17 visar ett exempel på hur temperaturerna i de sex mätpunkterna varierade under en tre dygn lång period.



Bild 16. Mätlådnans placering. Vänster ovan: översta mätlådan och toppbelysning, vänster nedan: nedersta mätlådan och odlingsränna, höger: mellersta mätlådan och mellanbelysning. På dessa fotografier är plantorna inte fullt utväxta. Fullt utväxta når plantorna nästan upp till översta mätlådan. Foton Daniel Sjöholm.

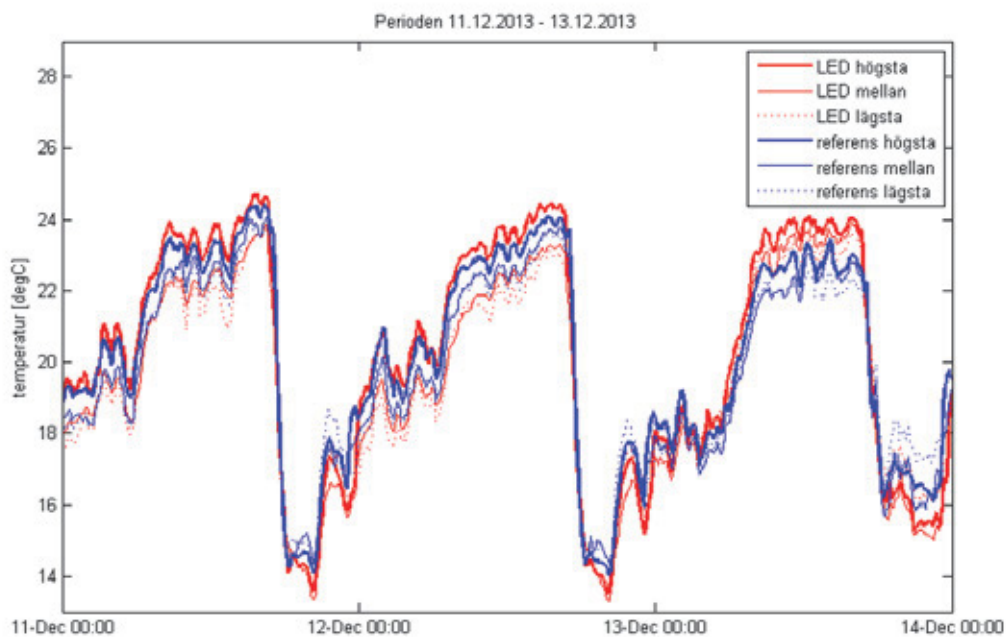


Bild 17. Temperaturen i de sex mätpunkterna under en period om tre dygn. Horisontella axeln anger tid. Enheten är data.

Bild 17 visar betydande variationer i temperaturerna. Dessa kan delvis härröra från systematiska svängningar i reglersystemet och delvis vara av mer slumpmässig natur och bero på vindvariationer och hur ventilationsluften från takluckorna sprider sig i växthuset. Trots variationerna över tid följs de olika mätpunkterna rätt väl åt. Växthusets medeltemperatur varierar alltså i högre grad än temperaturskillnaden mellan olika mätpunkter.

Ett noggrannare studium av mätdata uppvisar en del mätpunkter med kraftigt avvikande temperaturer. Dessa förefaller vara mätfel. Tidpunkter då någon av mätpunkterna avviker mer än fem grader från de övriga elimineras därför ur den fortsatta analysen.

Eftersom syftet med temperaturundersökningen är att identifiera eventuella skillnader i temperaturprofil mellan LED-rader och referensrader utväljs ett tidsintervall med konstant tidsprofil på belysningen och med ringa solinstrålning. De datapunkter som används är perioden 1.11.2013–28.2.2014. För denna period beräknas ett genomsnittsdyn, där temperaturen vid varje klockslag utgör medeltalet av temperaturerna vid detta klockslag under hela perioden (Bild 17).

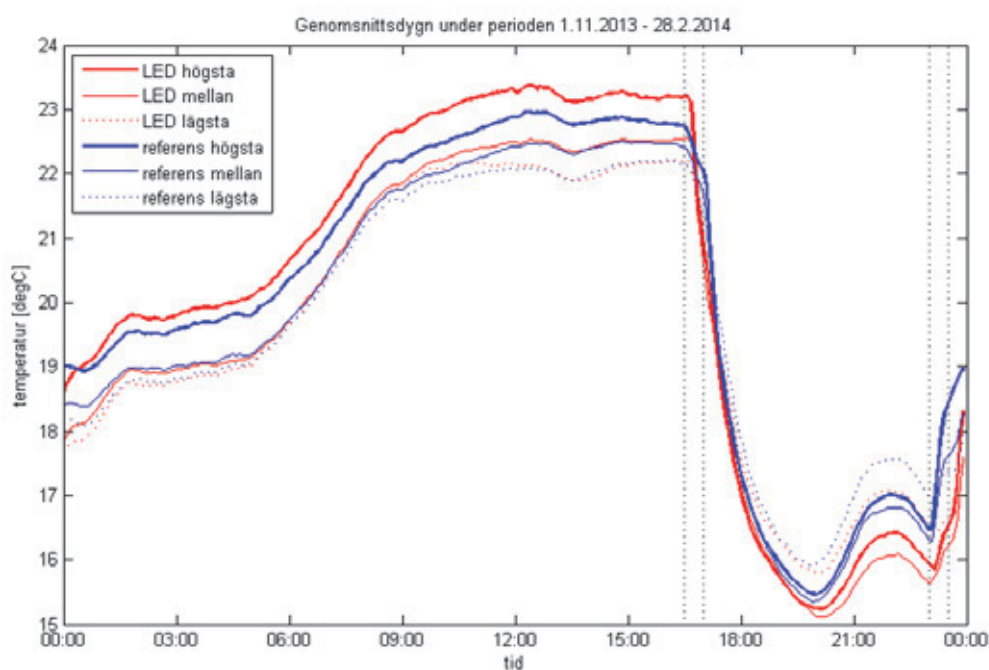


Bild 18. Temperaturen i de sex mätpunkterna för ett genomsnittsdyn under perioden 1.11.2013–28.2.2014. Tidpunkterna för inkoppling och urkoppling av belysning (i två steg) är indikerade med vertikala streckade linjer.

Bild 18 uppvisar en tydlig dygnsperiodicitet med en gradvis temperaturökning som startar ungefär samtidigt som belysningen slår på i två steg klockan 23.00 respektive 23.30. Denna temperaturökning följs av en period med ganska konstant "dagtemperatur" varefter, när belysningen släcks i två steg klockan 16.30 respektive 17.00 följer en snabb nedgång till "nattemperatur". Vid en enskild tidpunkt är skillnaden mellan mätpunkter på olika höjd i samma rad som högst cirka 1,3 grader. Under den belysta perioden är det den högsta punkten som är varmest medan det under den mörka perioden är den lägsta punkten som är varmest.

Bild 19 visar skillnaderna mellan LED-rad och referensrad för de olika mätnivåerna under genomsnittsdygnet. Under den belysta delen av dygnet skiljer sig temperaturerna i LED-raden och referensraden knappast alls åt vad gäller lägsta nivå och mellannivå. För den högsta nivån är temperaturerna i LED-raderna högre än i referensraderna. Skillnaden är inte stor och endast under delar av dygnet signifikant. Som högst är skillnaden 0,5 °C och i medeltal 0,3 °C. Till den del det finns en signifikant skillnad kan den bero på att LED-armaturens värme transporteras konvektivt uppåt och då registreras som en lite högre temperatur vid översta mätnivån. De extra 46 W/m² HPS-belysning i

referensraden strålar till en del ut som värme mot plantorna där strålningen kan generera något högre bladtemperatur och högre evaporation. Energin återfinns då endast delvis som sensibelt värme i luften. En annan del av den extra effekten avges konvektivt uppåt. Eftersom toppbelysningen ligger ovan om alla tre mätlådorna fångas temperaturökningen inte upp av någon av temperatur-sensorerna.

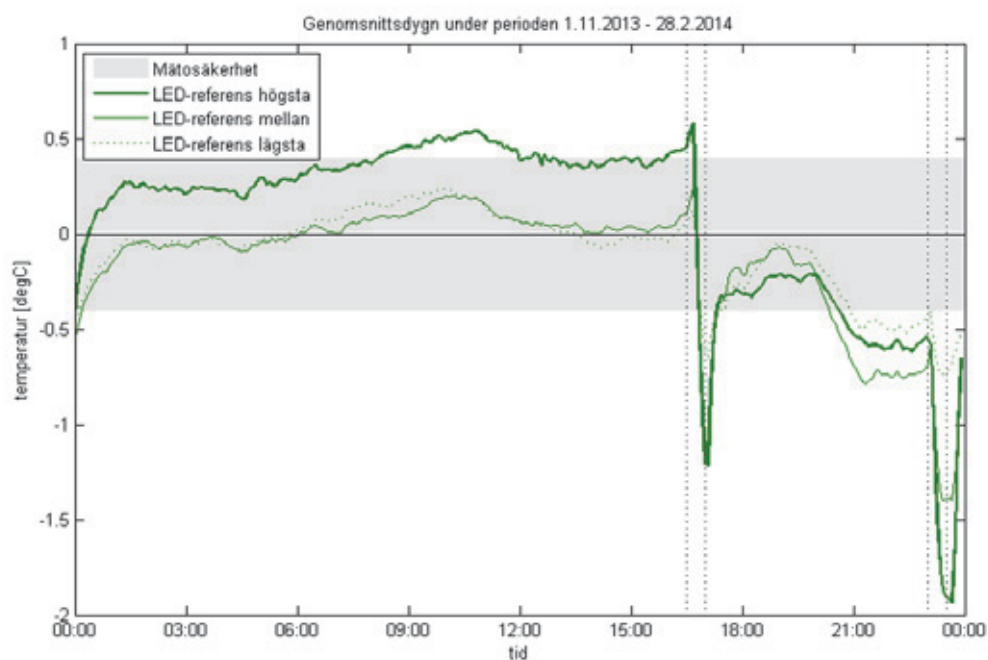


Bild 19. Skillnad i temperatur mellan LED-rad och referensrad vid de olika mät höjderna under ett genomsnittsdrygn under perioden 1.11.2013–28.2.2014. Tidpunkterna för inkoppling och urkoppling av belysning (i två steg) är indikerade med vertikala streckade linjer.

Under den senare delen av den mörka perioden är LED-raden signifikant kallare än referensraden. Skillnaden är störst, kring 0,7 °C, på mellannivå. Eftersom belysningen är avstängd bör förklaringen till skillnaden mellan LED-rad och referensrad sökas på annat håll. Den troligaste orsaken är att rörtemperaturen under de två raderna är olika. När belysningen är påslagen tillförs betydligt mindre värme via golvrören och inverkan från dessa syns kanske inte då.

När belysningen är bara delvis påslagen, d.v.s. klockan 16.30–17.00 och 23.00–23.30 är effekten i referensraden betydligt större än i LED-raden. Detta ses i Bild 18 som att temperaturen sjunker tidigare och stiger senare i LED-raden. I Bild 19 syns motsvarande sak genom att temperaturskillnaden under dessa båda intervall går mot ett relativt stort negativt värde, d.v.s. ett värde där LED-raden är kallare än referensraden. Som störst är skillnaden knappa 2 °C.

En motsvarande analys av den relativa luftfuktigheten för ett genomsnittsdrygn ses i Bild 20 och Bild 21. Av Bild 20 framgår att luftfuktigheten är som högst under den mörka perioden då även temperaturen är låg. Luftfuktigheten är ganska långt omvänd mot temperaturen, så att fuktigheten är låg då temperaturen är hög och vice versa. Perioden mellan klockan 2.00 och 8.00 är ett undantag. Trots stigande temperatur ökar då också luftfuktigheten. Det kan eventuellt bero på en kraftig transpiration under denna fas av plantans dygnsrytm. Under den belysta perioden är luftfuktigheten högst på mellannivå både i LED-raderna och referensraderna.

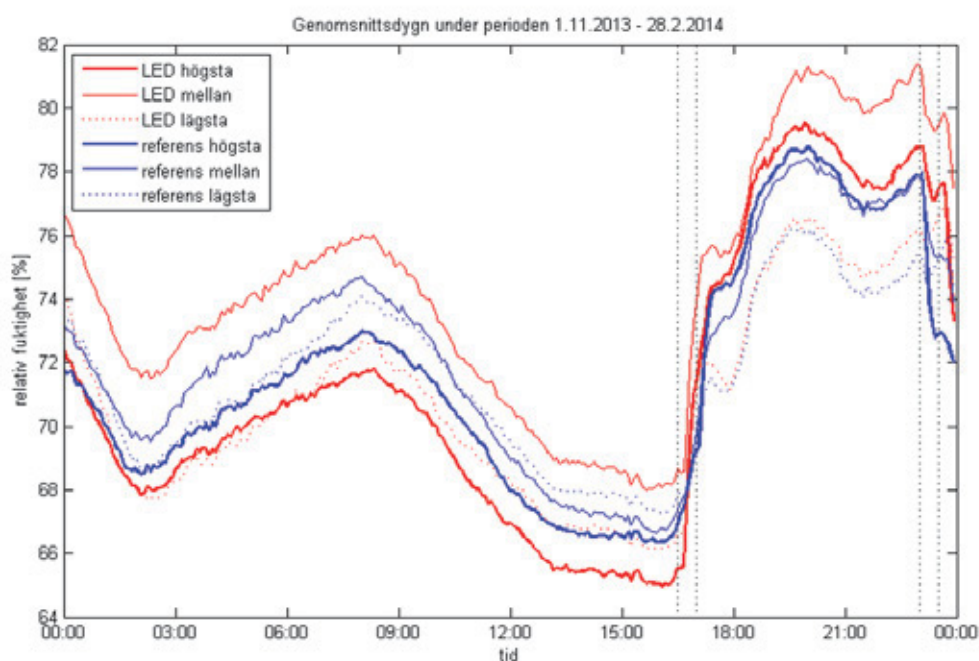


Bild 20. Relativa fuktigheten i de sex mätpunkterna för ett genomsnittsdyn under perioden 1.11.2013–28.2.2014. Tidpunkterna för inkoppling och urkoppling av belysning (i två steg) är indikerade med vertikala streckade linjer.

Skillnaderna i relativ fuktighet ses i Bild 21. På översta och nedersta nivån är relativa fuktigheten enligt Bilden högre i referensraden än i LED-raden under den belysta perioden och omvänt under den mörka perioden. Skillnaderna är dock inte signifikanta.

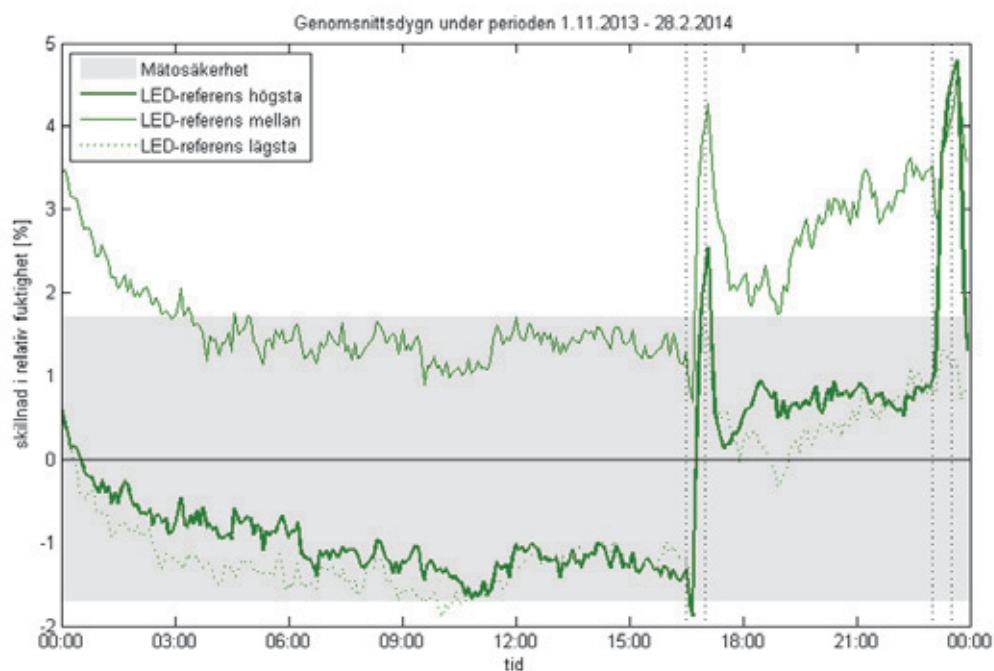


Bild 21. Skillnader i relativ fuktighet mellan LED-rad och referensrad vid de olika mät höjderna under ett genomsnittsdyn under perioden 1.11.2013–28.2.2014. Tidpunkterna för inkoppling och urkoppling av belysning (i två steg) är indikerade med vertikala streckade linjer.

På mellannivån är luftfuktigheten i LED-raden högre än i referensraden både under den belysta perioden och under den mörka perioden. Skillnaden är inte stor, några % RF, men under delar av dygnet signifikant. Under den mörka perioden förklaras den högre luftfuktigheten i LED-raden i hög grad av den lägre temperaturen där. (Vid samma fukthalt genererar 0,6 °C temperaturskillnad 3 % skillnad i relativ fuktighet.) När luftfuktigheten är högre i LED-raden under den belysta delen av dygnet, trots att det inte finns någon signifikant temperaturskillnad, kan det eventuellt bero på att mellanbelysningen ger upphov till högre transpiration på mellannivå i LED-raden.

Under de båda halvtimmar då referensraden belyses med 186 W/m² och LED-raden med 47 W/m² stiger luftfuktigheten snabbt i på alla tre nivåerna i LED-raden. På mellannivå och högsta nivå uppnås då signifikanta skillnader (2–5 %) gentemot referensraderna. Dessa skillnader motsvaras av en samtidig skillnad i temperatur. Den högre fuktigheten i LED-raden förklaras till ungefär hälften av den lägre temperaturen och till andra hälften av en lägre absolut fukthalt i luften. Det senare är naturligt eftersom transpirationen i LED-raderna kan förväntas vara lägre p.g.a. den väsentligt lägre strålningsnivån.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att de uppmätta skillnaderna mellan LED-raden och referensraden är små. De skillnader under den fullt belysta perioden som är signifikanta är en högre temperatur (som högst 0,5 °C) på högsta mätnivån i LED-raden och en högre relativ luftfuktighet (som högst 3 %) på mellannivå i LED-raden. Under den halvtimme i början och slutet av den belysta perioden då den tillförda belysningseffekten i LED-raden är bara 25 % av vad den är i referensraden uppmäts naturligt nog signifikanta skillnader både för temperatur och relativ fuktighet.

3.3. Värmekameraundersökning i blockväxthus

I den här studien undersöktes om tomatplantans temperatur varierar vid traditionell toppbelysning (HPS, högtrycksnatriumlampa) jämfört med en hybridlösning HPS-toppbelysning och LED mellanbelysning (LED, Light Emitting Diode). Temperaturen vid tomatplantans blad och frukt (tomat) har bestämts med en värmekamera, FLIR T640 vid flertalet mätpunkter i ett blockväxthus och ett åsväxthus. I denna undersökning fanns tyvärr inte möjlighet att jämföra HPS-mellanbelysning med LED-mellanbelysning. Värmekamerafotograferingen av tomatplantorna utfördes av Ronald Pått vid Yrkes-högskolan Novia i Vasa, Brändö. Tomatplantorna fotograferades den 5.2.2014 i Martin Siggs växthus i Pjelax, Närpes klockan 7.00–9.00 och 10.30–12.00. Till följande beskrivs utförande av värmekameraundersökning, presentation av resultat och diskussion.

Försöket

Växthus

Värmekameraundersökningen utfördes vid Handelsträdgård Martin Sigg i Pjelax, Närpes i ett blockväxthus och i ett åsväxthus. I kapitel 2.3 har båda försöksväxthusen redan presenterats.

Försöksupplägg

Värmekamerafotograferingen utfördes den 5.2.2014, klockan 7.00–9.00, medan det ännu var mörkt ute för att minimera inverkan av solens strålning. På morgonen fotograferades tomatplantornas blad och tomater vid HPS+LED och HPS i blockväxthuset samt HPS+LED i åsväxthuset. Alla lampor lyste under fotograferingstillfället. Utomhustemperaturen var vid tillfället 0 °C och det var mörkt utomhus. Inne i blockväxthuset var temperaturen 21 °C och relativa fuktigheten 79 % på ett avstånd av 1,5 m ovanför golvet. Energigardinerna vid alla väggar var utrullade. Inne i åsväxthuset var temperaturen 23 °C och relativa fuktigheten 77 % på en höjd av 1,5 m från golvet. Inga gardiner finns i åsväxthuset. Emmissiviteitsfaktorn 0,95 användes i kameran under all fotografering.

Tomatplantornas blad fotograferades igen på samma position som tidigare i block- och åsväxthus men mellan klockan 10.30 och 12.00. Utomhustemperaturen var vid tillfället -1 °C och vädret var mulet. Inne i blockväxthuset var temperaturen 22 °C och relativa fuktigheten 76 % på en höjd av 1,5 m från golvet. Inuti i åsväxthuset var temperaturen 23 °C och relativa fuktigheten 77 % på en höjd av

1,5 m från golvet. Inga gardiner användes vid tillfället och emmissivitetfaktorn 0,95 användes i värmekameran.

För att undersöka om det finns blad- och tomattemperaturskillnader mellan HPS+LED och HPS i blockväxthuset valdes godtyckliga fotograferingspunkter och mätpunkter för värmekameraundersökningen. Bild 22 visar en skiss över var fotograferingspunkterna valdes i blockväxthuset (ljusblåa cirklar med svart siffra inuti). Vid punkterna 1–3 fotograferades tomatblad och vid punkterna 4–6 fotograferades tomater. Punkterna 1–3 upprepades sex gånger i samma gång, d.v.s. 18 foton av blad vid HPS+LED vid gång 19 och 18 foton av blad vid HPS vid gång 11. Tomatbladen valdes godtyckligt längs med hela gången vid sidan mot väst. Punkterna 4–6 upprepades tre gånger vid samma gång, d.v.s. 9 foton av tomater vid HPS+LED vid gång 19 och 9 foton av tomater vid HPS vid gång 11. Tomaterna valdes godtyckligt längs med hela gången vid sidan mot väst.

Punkterna (2, 3, 4 och 6) valdes vid gångsidan d.v.s. den sida av plantan som är mot gången och plantsidan punkterna (1 och 5) d.v.s. vid odlingsraden mellan plantor där mellanvärmeröret finns. Punkt 1 är vid plantsidan inne i vegetationen, 2,7 m från golv. Punkt 2 är vid gångsidan utanför vegetation, 2,7 m från golv och punkt 3 vid gångsidan utanför vegetation vid plantopparna, 3,2 m från golv. Punkt 4 är vid gångsidan utanför vegetation, 2,5 m från golv. Punkt 5 är vid plantsidan inne i vegetation, 2,5 m från golv och punkt 6 är vid gångsidan utanför vegetation, 1,2 m från golv.

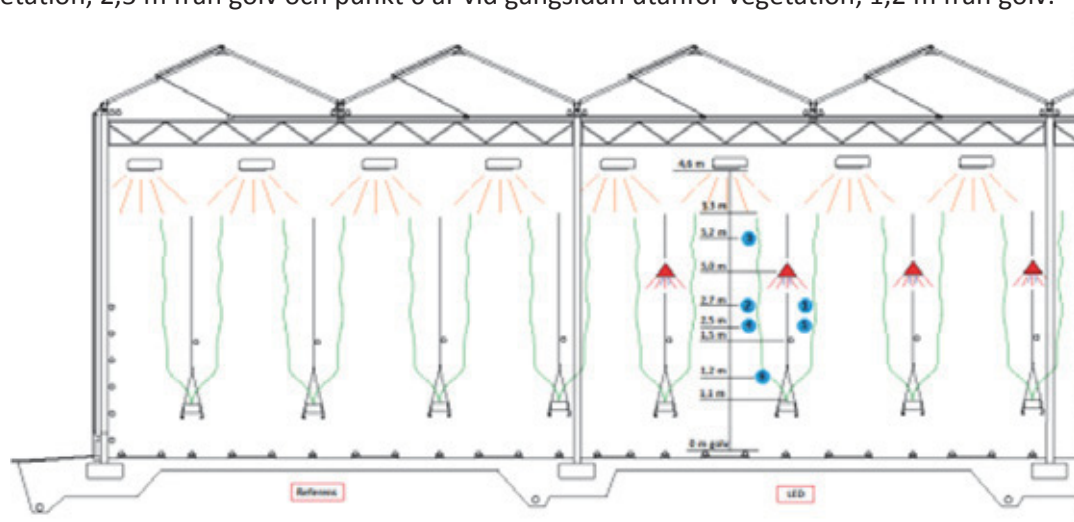


Bild 22. Skiss över de godtyckligt valda värmekamerafotograferingspunkterna i blockväxthuset vid HPS+LED och HPS.

Utöver värmekamerafotograferingen i blockväxthuset fotograferades tomatplantornas blad och tomater i åsväxthuset (HPS+LED). Eftersom blockväxthuset och åsväxthuset skiljer sig från varandra i många avseenden t.ex. växthuskonstruktion, klimat och tomatkubernas placering är resultaten inte jämförbara med varandra. Man får dock en uppfattning om bladens och tomaternas temperaturer. Tomatsorten i båda växthusen var Encore.

I åsväxthuset valdes även godtyckliga fotograferingspunkter för värmekameraundersökningen. Bild 23 visar en skiss över var fotograferingspunkterna valdes i åsväxthuset (ljusblåa cirklar med svart siffra inuti). Punkterna 1–3 fotograferades vid tomatblad och punkterna 1 och 4 fotograferades vid tomater. Punkterna 1–3 upprepades fyra gånger vid samma gång, d.v.s. 12 foton av blad vid HPS+LED vid gång 7 vid sidan mot väst. Punkterna 1 och 4 upprepades tre gånger vid samma gång, d.v.s. 6 foton av tomater vid HPS+LED vid gång 7. Tomatbladen och tomaterna valdes godtyckligt längs med hela gången vid sidan mot väst.

Punkterna 2, 3 och 4 valdes vid gångsidan, d.v.s. den sida av plantan som är vid gången. Punkt 1 valdes mellan plantor inne i vegetationen, 1,75 m från golv. Punkt 2 är vid gångsidan utanför vegetation, 1,75 m från golv och punkt 3 vid gångsidan utanför vegetation vid plantopparna, 2,7 m från golv. Punkt 4 är vid gångsidan utanför vegetation, 0,75 m från golv.

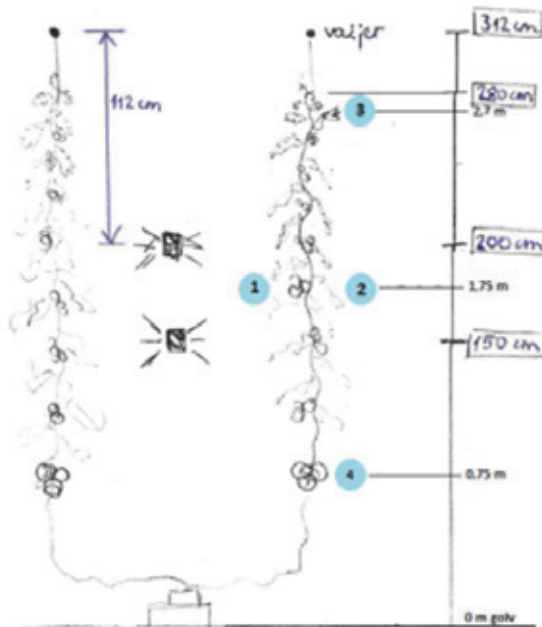


Bild 23. Skiss över de godtyckligt valda värmekamerafotograferingspunkterna i åsväxthuset.

3.3.1. Värmekamerafotografering

Ronald Pått vid Yrkeshögskolan Novia fotograferade tomatblad och tomater med en värmekamera av modellen FLIR T640, serienummer 55903051. Bilderna lagrades i kameran och överfördes sedan till en dator där ett textdokument i rapportform skapades. Rapporten består av alla foton som fotograferats och med bl.a. information om fotograferingsplats, uppmätta temperaturer [°C] och de kameraparametrar som använts. Med hjälp av FLIR programvara är det möjligt att göra ändringar i rapporten. Ändringar som kan utföras efter fotografering är t.ex. att justera temperaturskalan och välja en punkttemperatur i fotot. Vid fotografering kan man få ett foto föreställande både blad och tomater. För att lättast bestämma tomatens temperatur användes punktmättningsverktyget i programmet. Det är även möjligt att avläsa tomatens temperatur direkt ur fotot m.h.a. en färgskala, detta är dock mera arbetstidskrävande och inexact.

Bild 24 och Bild 25 visar ett utdrag ur fotograferingsrapporten. Bild 24 föreställer blad i toppen på en tomatplanta fotograferade mellan klockan 7.00–9.00 i blockväxthuset vid HPS (referens), gång 11, punkt 3 vid gångsidan utanför vegetation vid plantopparna, 3,2 m från golv. Bild 25 föreställer tomater i blockväxthuset vid HPS+LED fotograferade mellan klockan 7.00–9.00, gång 19, punkt 4, vid gångsidan utanför vegetation, 2,5 m från golv. Bilderna till vänster är en värmebild med färgskala och till höger ett helt vanligt fotografi av vad som fotograferats. I Bild 24 och Bild 25 kan man också se vilka olika mätparametrar som använts vid fotograferingen.

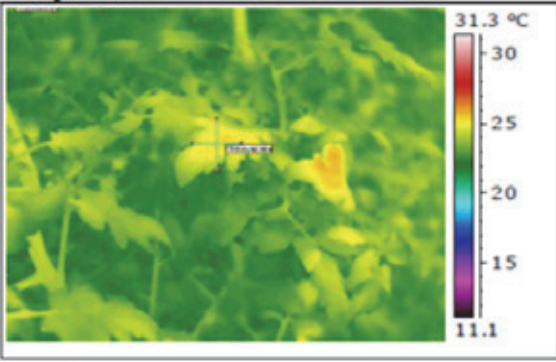

Kuvauspaikka: 466		Kuvauspäivämäärä: 5.2.2014	
Lämpökuva		Valokuva	
			
Nro 21.		Mittausparametrit	
Mittauspisteen lämpötila	25.3 °C	Emissiivisyys (Lämpökuvasta)	0.95
Mittausalue maks. lämpötila	25.8 °C	Heijastuva lämpötila (LHei lämpökuvasta)	22.0 °C
Mittausalue min. lämpötila	21.9 °C	Etäisyys (Lämpökuvasta)	1.0 m
Lämpötilaindeksi mitatun alueen minimilämpötilasta	105	Kameratyyppi	FLIR T640
Lämpötilaindeksi mitatusta pistelämpötilasta	123	Kameran sarjanumero	55903051
Ulkoilman olosuhteet		Sisäilman olosuhteet	
Tuulen nopeus/tuulen suunta	2 m/s	Sisäilman suhteellinen kosteus	79.0 %
Pilvisyys	Puolipilvinen	Paine-ero rakenteen yli (negatiivinen = alipaine sisällä)	
Ulkoilman lämpötila (vertailulämpö lämpökuvasta)	2.00	Sisäilman lämpötila (Ilman lämpötila lämpökuvasta)	21.0 °C

Bild 24. Ett exempel ur värmekamerafotograferingsrapporten. Bilderna visar tomatblad i toppen på en planta i blockväxthuset vid referensrader (HPS). Bild Ronald Pått.

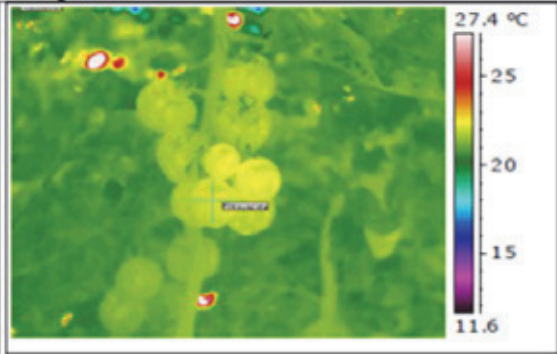

Kohdetiedot: Martin Siggs växthus i Pjälax, Närpes			
Kuvauspaikka: 574		Kuvauspäivämäärä: 5.2.2014	
Lämpökuva		Valokuva	
			
Nro 75.		Mittausparametrit	
Mittauspisteen lämpötila	22.2 °C	Emissiivisyys (Lämpökuvasta)	0.95
Mittausalue maks. lämpötila	35.3 °C	Heijastuva lämpötila (LHei lämpökuvasta)	22.0 °C
Mittausalue min. lämpötila	15.6 °C	Etäisyys (Lämpökuvasta)	1.0 m
Lämpötilaindeksi mitatun alueen minimilämpötilasta	65	Kameratyyppe	FLIR T640
Lämpötilaindeksi mitatusta pistelämpötilasta	96	Kameran sarjanumero	55903051
Ulkoilman olosuhteet		Sisäilman olosuhteet	
Tuulen nopeus/tuulen suunta	2 m/s	Sisäilman suhteellinen kosteus	77.0 %
Pilvisyys	Puolipilvinen	Paine-ero rakenteen yli (negatiivinen = alipaine sisällä)	
Ulkoilman lämpötila (vertailulämpö lämpökuvasta)	2.00	Sisäilman lämpötila (Ilman lämpötila lämpökuvasta)	23.0 °C

Bild 25. Ett exempel ur värmekamerafotograferingsrapporten. Bilderna visar tomater i blockväxthuset vid HPS+LED, punkt 4, vid gångsidan utanför vegetation, 2,5 m från golv. Bild Ronald Pått.

3.3.2. Resultat & analys

Tomatbladens temperatur – mörkt utomhus

Tomatbladen fotograferades mellan klockan 7.00–9.00 den 5.2.2014. Det var mörkt utomhus, solens strålning antas inte ha påverkat tomatbladens temperatur. Sex mätpunkter valdes längs med gång 19, HPS+LED i blockväxthuset. I Tabell 1 finns de uppmätta bladtemperaturerna presenterade.

Tabell 1. Uppmätta bladtemperaturer vid HPS+LED (Netled Oy) i mörkt blockväxthus (temp 21 °C, RF 79%, emmissiviteetsfaktor 0,95, gång 19, sidogardiner utrullade vid väggar, inga utrullade i taket, utomhus temp 0 °C), fotografering mellan kl. 7:00-9:00.

Mät punkt	MP 1 °C	MP 2 °C	MP 3 °C	MP 4 °C	MP 5 °C	MP 6 °C
1. Tomatblad, plantsida, 2,7 m från golv	21,1	21,3	22,4	21,5	21,9	21,7
2. Tomatblad, gångsida, 2,7 m från golv	21,0	21,5	22,0	22,0	21,9	21,1
3. Tomatblad, gångsida (toppen), 3,2 m från golv	21,3	22,3	22,8	22,7	22,9	21,6
Mät punkt position: mellan bak nummer	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13
Fotograferat blad	Under lampa	Mellan lampor	Under lampa	Mellan lampor	Under lampa	Mellan lampor

Sex mätpunkter valdes vid gång 11, HPS (referens) i blockväxthuset. I Tabell 2 finns de uppmätta bladtemperaturerna presenterade.

Tabell 2. Uppmätta bladtemperaturer vid HPS (referens) i blockväxthuset, mörkt utomhus, blockväxthuset (temp 21 °C, RF 79%, emmissiviteetsfaktor 0,95, gång 11, sidogardiner utrullade vid väggar, inga utrullade i taket, utomhus temp 0 °C), fotografering mellan kl. 7:00-9:00.

Mät punkt	MP 1 °C	MP 2 °C	MP 3 °C	MP 4 °C	MP 5 °C	MP 6 °C
1. Tomatblad, plantsida, 2,7 m från golv	22,6	22,2	21,8	21,2	19,9	20,3
2. Tomatblad, gångsida, 2,7 m från golv	22,7	22,8	22,3	21,8	21,0	21,6
3. Tomatblad, gångsida (toppen), 3,2 m från golv	25,3	23,9	23,0	22,0	22,6	21,7
Mät punkt position: mellan bak nummer	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13
Fotograferat blad	Under lampa	Under lampa	Mellan lampor	Mellan lampor	Mellan lampor	Mellan lampor

Fyra mätpunkter valdes vid gång 7, HPS+LED i åsväxthuset. I Tabell 3 finns de uppmätta bladtemperaturerna presenterade.

Tabell 3. Uppmätta bladtemperaturer vid HPS+LED (Philips) i åsväxthuset, mörkt utomhus, åsväxthuset (temp 23 °C, RF 77%, emmissiviteetsfaktor 0,95, gång 7, inga gardiner vid väggar eller i taket, utomhus temp 0 °C), fotografering mellan kl. 7:00-9:00.

Mät punkt	MP 1 °C	MP 2 °C	MP 3 °C	MP 4 °C
1. Tomatblad, plantsida, 1,75 m från golv	22,3	23,6	23,4	23,6
2. Tomatblad, gångsida, 1,75 m från golv	23,4	23,1	23,4	23,4
3. Tomatblad, gångsida (toppen), 3,2 m från golv	23,9	23,4	23,6	22,9
Mät punkt position	Vid lampa 10	Vid lampa 20	Vid lampa 30	Vid lampa 40

Medelvärden har beräknats för mätvärden uppmätta vid mätpunkterna 1–3. Tomatbladens medeltemperaturer i mätpunkterna 1–3 (blockhuset) vid HPS+LED och HPS (referens) presenteras i Bild 26. I mätpunkt 1 vid plantsidan, 2,7 m från golv är medeltemperaturen något högre vid HPS+LED (0,3 °C) jämfört med HPS. I mätpunkt 2 vid gångsidan, 2,7 m från golv är bladmedeltemperaturen 0,4 °C lägre vid HPS+LED jämfört med HPS. Vid mätpunkt 3 vid gångsidan (plantopparna), 3,2 m från golv är bladmedeltemperaturen 0,8 °C lägre vid HPS+LED jämfört med HPS. Denna bladtemperaturskillnad kan bero på att toppbelysningslamporna vid referensen (HPS) har effekten 750 W och vid HPS+LED har HPS-lamporna effekten 600 W. HPS-lamporna vid HPS+LED avger alltså mindre strålningsvärme. Slutsatsen är att bladtemperaturskillnaderna är små vid mätpunkterna 1 och 2 medan man vid plantopp höjd kan se en lite lägre temperatur vid HPS+LED än vid HPS (referens).

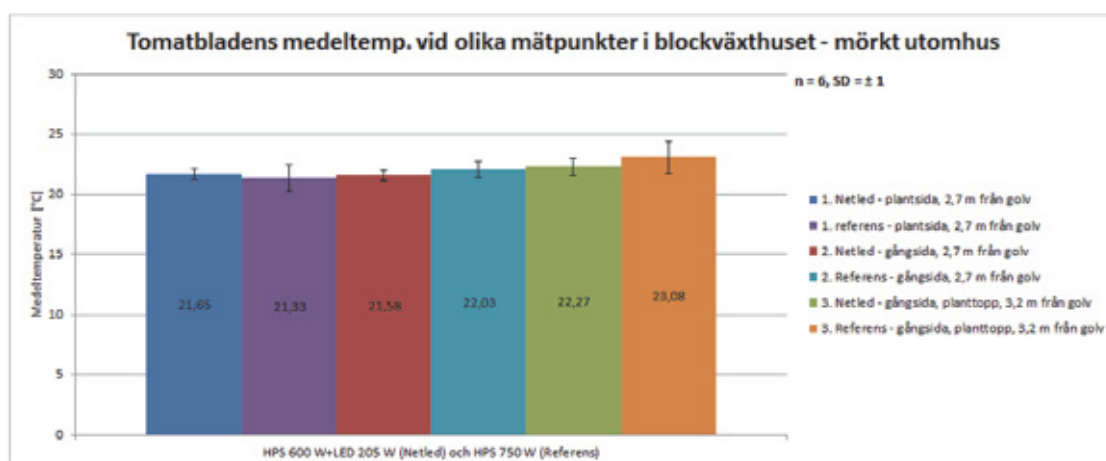


Bild 26. Tomatbladens medeltemperatur vid mätpunkterna 1–3 i blockväxthuset, mörkt utomhus.

I åsväxthuset, HPS+LED fotograferades samma mätpunkter som i blockväxthuset men endast vid fyra olika ställen längs med gång 7. I Bild 27 presenteras en graf över tomatbladens medeltemperaturer vid punkterna 1–3 i åsväxthuset, mörkt utomhus. Slutsatsen är att tomatbladens temperatur är ungefär samma i punkterna 1–3 (ca 23,4 °C). Bladens temperaturer varierar inte mycket vid de uppmätta punkterna.

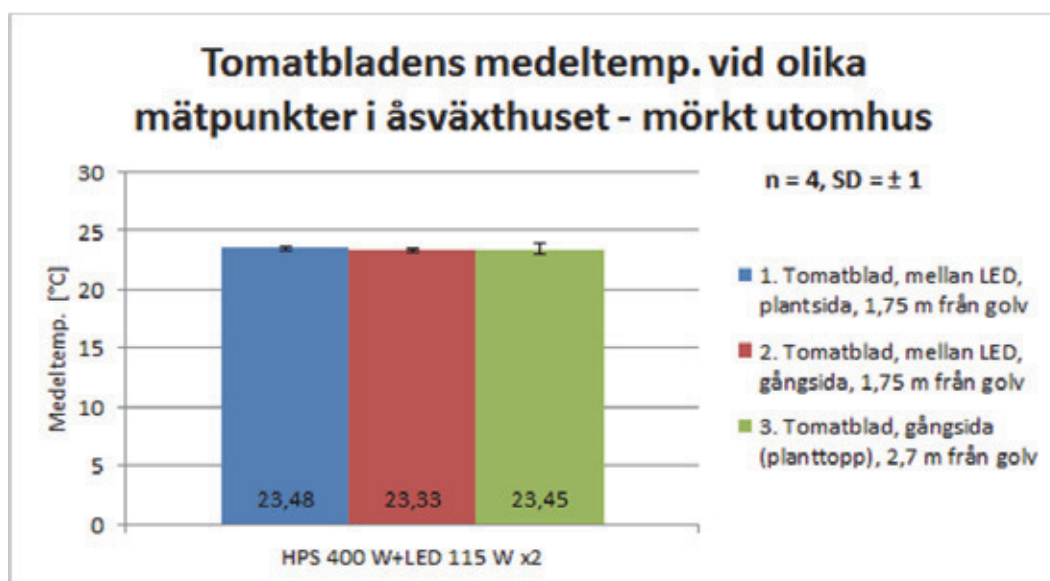


Bild 27. Visar tomatbladens medeltemperatur vid mätpunkterna 1–3 i åsväxthuset, mörkt utomhus.

Tomatbladens temperatur – ljust utomhus

Tomatbladen fotograferades på förmiddagen mellan klockan 10.30 och 12.00 den 5.2.2014. Det var ljust utomhus men mulet. Sex mätpunkter valdes längs med gång 19, HPS+LED i blockväxthuset. I Tabell 4 finns de uppmätta bladtemperaturerna presenterade.

Tabell 4. Uppmätta bladtemperaturer vid HPS+LED (Netled Oy) i blockväxthuset, ljust utomhus, blockväxthuset (temp 22 °C, RF 76%, emmissiviteitsfaktor 0,95, gång 11, utomhus temp -1 °C), fotografering mellan kl. 10:30-12:00 vädret mulet.

Mät punkt	MP 1 °C	MP 2 °C	MP 3 °C	MP 4 °C	MP 5 °C	MP 6 °C
1. Tomatblad, plantsida, 2,7 m från golv	21,9	22,7	22,3	21,4	21,3	20,9
2. Tomatblad, gångsida, 2,7 m från golv	22,3	22,4	21,8	21,6	21,2	20,7
3. Tomatblad, gångsida (toppen), 3,2 m från golv	21,8	22,7	22,1	22,3	22,7	21,2
Mät punkt position: mellan bak nummer	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13
Fotograferat blad	Under lampa	Under lampa	Mellan lampor	Under lampa	Under lampa	Mellan lampor

Sex mätpunkter valdes vid gång 11, HPS (referens) i blockväxthuset. I Tabell 5 finns de uppmätta bladtemperaturerna presenterade.

Tabell 5. Uppmätta bladtemperaturer vid HPS (referens) i blockväxthuset, ljust utomhus. (temp 22 °C, RF 76%, emmissiviteitsfaktor 0,95, gång 11, inga gardiner utrullade vid väggar, utrullade i taket, utomhus temp -1 °C), fotografering mellan kl. 10:30-12:00 vädret mulet.

Mät punkt	MP 1 °C	MP 2 °C	MP 3 °C	MP 4 °C	MP 5 °C	MP 6 °C
1. Tomatblad, plantsida, 2,7 m från golv	23,2	23,2	23,0	21,6	21,0	20,7
2. Tomatblad, gångsida, 2,7 m från golv	23,3	23,6	22,7	21,9	21,9	21,0
3. Tomatblad, gångsida (toppen), 3,2 m från golv	24,0	23,6	23,0	22,6	21,9	22,9
Mät punkt position: mellan bak nummer	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13
Fotograferat blad	Under lampa	Under lampa	Mellan lampor	Mellan lampor	Mellan lampor	Mellan lampor

Fyra mätpunkter valdes vid gång 7, HPS+LED i åsväxthuset. I Tabell 6 finns de uppmätta bladtemperaturerna presenterade.

Tabell 6. Uppmätta bladtemperaturer vid HPS+LED (Philips) i åsväxthuset, ljust utomhus. (temp 23 °C, RF 77%, emmissiviteitsfaktor 0,95, gång 7, inga gardiner vid väggar eller i taket, utomhus temp 0 °C), fotografering mellan kl. 10:30-12:00 vädret mulet.

Mät punkt	MP 1 °C	MP 2 °C	MP 3 °C	MP 4 °C
1. Tomatblad, plantsida, 1,75 m från golv	24,2	24,3	22,2	23,4
2. Tomatblad, gångsida, 1,75 m från golv	23,7	24,2	24,5	23,4
3. Tomatblad, gångsida (toppen), 2,7 m från golv	24,0	25,4	24,9	24,3
Mät punkt position	Vid lampa 10	Vid lampa 20	Vid lampa 30	Vid lampa 40

Medelvärden har beräknats för mätvärden uppmätta vid mätpunkterna 1–3. Tomatbladens medeltemperaturer i mätpunkterna 1–3 (blockhuset) vid HPS+LED och HPS (referens) presenteras i Bild 28. I mät punkt 1 vid plantsidan, 2,7 m från golv är medeltemperaturen något lägre vid HPS+LED (0,4 °C) jämfört med HPS. Vid mät punkt 2 vid gångsidan, 2,7 m från golv är bladmedeltemperaturen 0,7

°C lägre vid HPS+LED jämfört med HPS. Vid mätpunkt 3 vid gångsidan (planttopparna), 3,2 m från golv är bladmedeltemperaturen 0,9 °C lägre vid HPS+LED jämfört med HPS.

Denna bladtemperturförändring kan bl.a. bero på att toppbelysningslamporna vid referensen (HPS) har eleffekten 750 W och vid HPS+LED har HPS-lamporna eleffekten 600 W. HPS-lamporna vid HPS+LED avger något mindre strålningsvärme. Slutsatsen är att bladtemperaturskillnaderna är små vid mätpunkterna 1 och 2 medan man vid planttopphöjd kan se en liten lägre temperatur vid HPS+LED än vid HPS (referens).

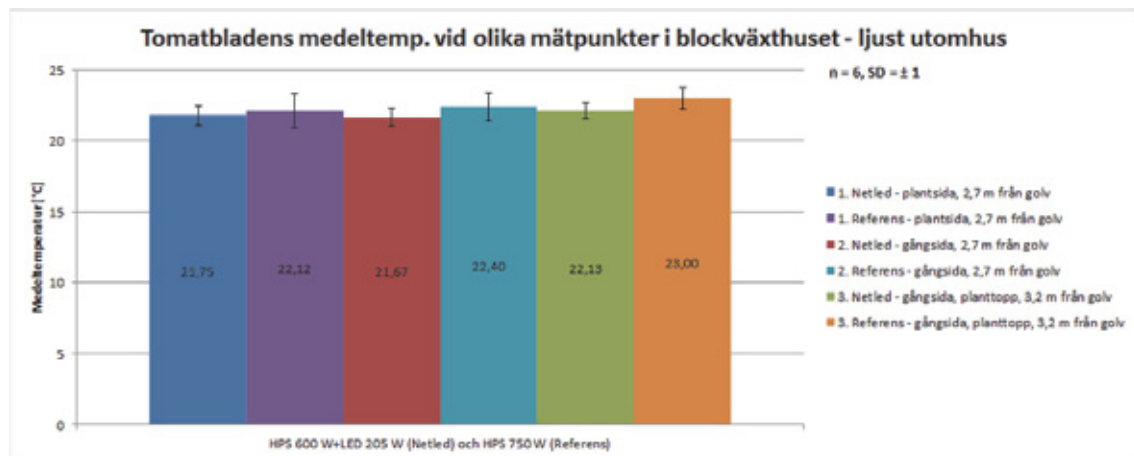


Bild 28. Tomatbladens medeltemperatur vid mätpunkterna 1–3 i blockväxthuset, ljust utomhus.

Jämför man medelvärden från mätningarna i blockhuset mörkt utomhus och ljust utomhus kan man konstatera att temperaturskillnaderna är något större mellan HPS+LED och HPS när det ljusnat utomhus, men skillnaderna är mycket små. Bladtemperaturskillnaderna vid HPS (referens) är något större jämfört med HPS+LED och varierar mellan 0,4 och 0,9 °C. Solljuset antas ha en liten inverkan på tomatbladens temperatur vid undersökningens tidpunkt.

I åsväxthuset (HPS+LED) fotograferades samma mätpunkter som tidigare. I Bild 29 presenteras en graf över tomatbladens medeltemperaturer vid punkterna 1–3 i åsväxthuset, ljust utomhus. Samtliga medeltemperaturer är aningen högre än vid fotografering när det är mörkt utomhus. Detta kan bl.a. bero på att solen börjat värma bladen något, största skillnaden (1,2 °C) kan ses i punkt 3 vid planttopparna.

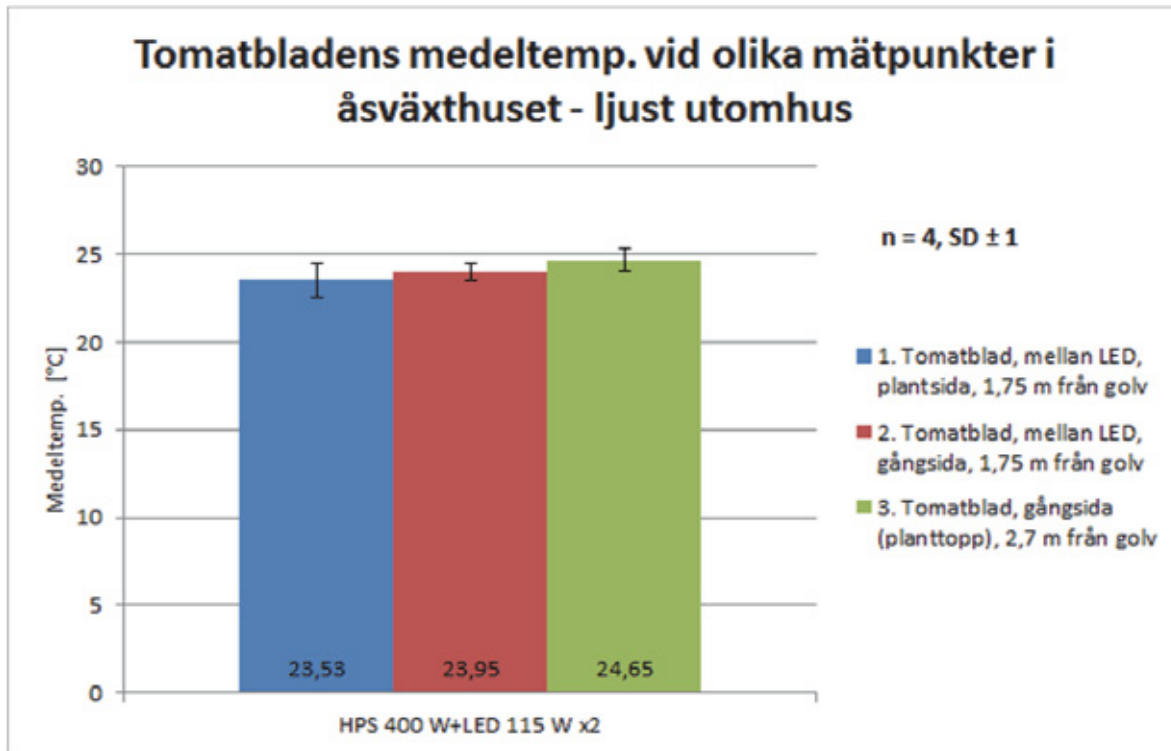


Bild 29. Tomatbladens medeltemperatur vid mätpunkterna 1–3 i åsväxthuset, ljust utomhus.

Tomaternas temperatur

Tomater fotograferades mellan klockan 7.00 och 9.00 den 5.2.2014. Det var mörkt utomhus, solens strålning antas inte ha påverkat tomaternas temperatur. Tomaterna fotograferades i blockväxthuset vid HPS+LED och HPS samt i åsväxthuset HPS+LED. Vid fotografering i blockväxthuset var förhållandena följande: utomhustemperaturen 0 °C, inomhustemperaturen 22 °C, relativa fuktigheten inomhus 76 %. Vid fotografering i åsväxthuset var förhållandena: utomhustemperaturen 0 °C, inomhustemperaturen 23 °C, relativa fuktigheten inomhus 77 %.

Tre fotograferingspunkter valdes längs med gång 19 (HPS+LED) och samma punkter valdes vid gång 11 (HPS) i blockväxthuset. Vid varje fotograferingspunkt fotograferades tomater vid tre olika mätpunkter, i blockväxthuset punkterna 4–6. Därefter fotograferades tomater i åsväxthuset vid tre punkter längs med rad 7 (HPS+LED). Vid varje fotograferingspunkt fotograferades tomater vid två olika mätpunkter, i åsväxthuset punkterna 1 och 4. Eftersom blockväxthuset och åsväxthuset är två olika hus med bl.a. olika klimat och konstruktion kan man inte jämföra tomaternas temperaturer sinsemellan. I Bild 30 presenteras de beräknade tomatmedeltemperaturerna i blockväxthuset.

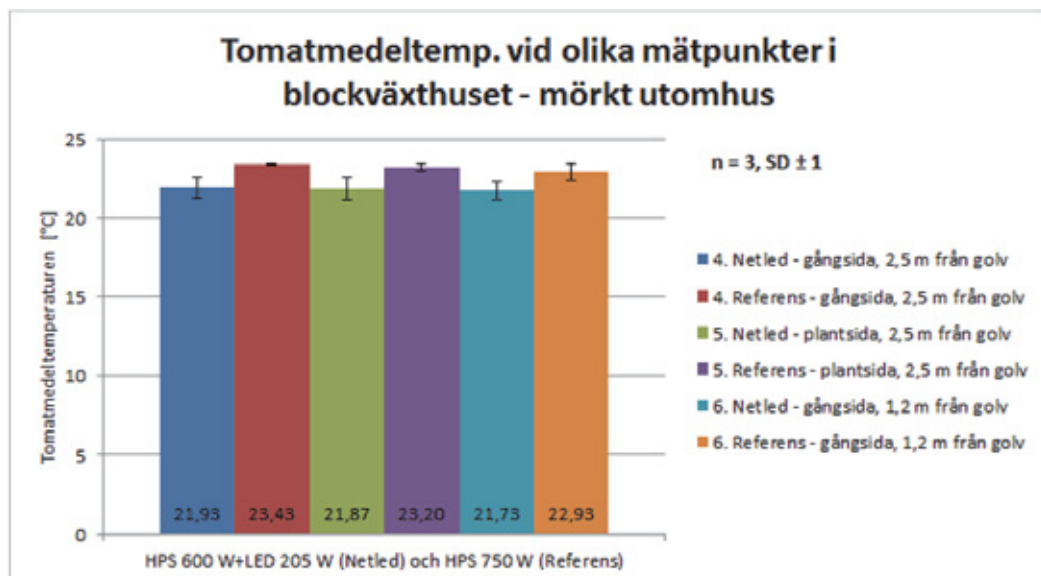


Bild 30. Tomaternas medeltemperatur vid mätpunkterna 4–6 i blockväxthuset, mörkt utomhus.

Ur Bild 30 kan man se att tomatmedeltemperaturerna är något större vid referensen (HPS) jämfört med Netled (HPS+LED) vid samtliga mätpunkter. Temperaturskillnaderna varierar mellan 1,2 och 1,5 °C. Temperaturskillnaderna kan bero på att toppbelysningseffekten vid HPS är högre än vid HPS+LED, d.v.s. lägre lampeffekt ger lägre strålningsvärme. LED-mellanbelysningen avger dock inte tillräckligt med värme för att kompensera en lägre HPS-lampeffekt. Samtliga temperaturer vid HPS+LED mätpunkter är ungefär på samma nivå, d.v.s. tomaternas temperatur varierar mycket lite om man mäter dem 1,2 m från golv eller 2,5 m från golv, oberoende av plantsida eller gångsida. Tomattemperaturerna vid HPS-mätpunkterna varierar också mycket lite beroende på vilket avstånd från golvet man mäter. Man bör ha i åtanke att varje tomatmedeltemperatur som har bestämts är baserad enbart på tre mätvärden.

I Bild 31 kan man se tomaternas medeltemperatur i mätpunkt 1 och 4 i åsväxthuset (mörkt utomhus). I punkt 1 är medeltemperaturen 24,2 °C och i punkt 2 medeltemperaturen 22,9 °C, d.v.s. en differens på 1,3 °C. Temperaturen är högre vid tomaterna som befinner sig 1,75 m från golvet vid plantsidan jämfört med tomaterna 0,75 m från golvet vid gångsidan. Detta kan bero på att LED-mellanbelysningen avger något mera värme till de tomater som befinner sig närmast armaturerna. Tomatmedeltemperaturer som beräknats har baserats endast på tre mätvärden.

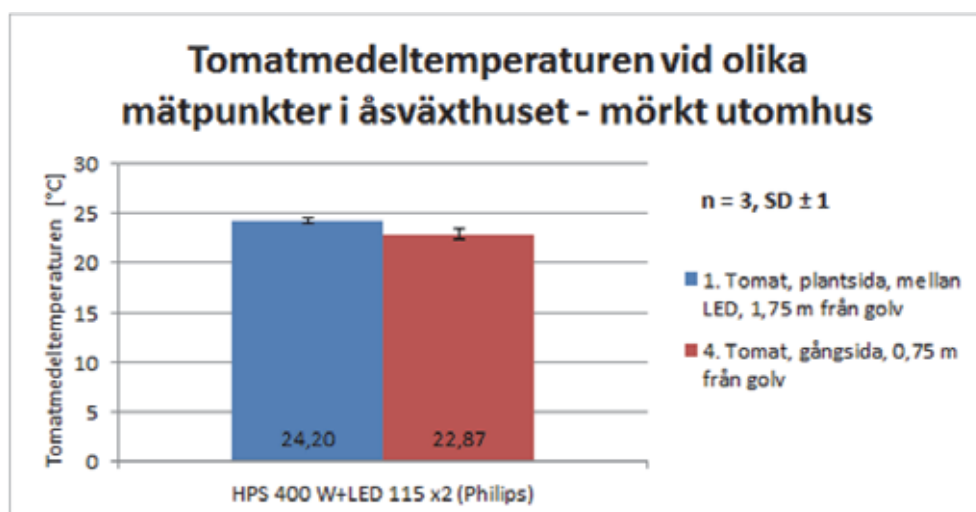


Bild 31. Tomaternas medeltemperatur vid mätpunkterna 1 och 4 i blockväxthuset, mörkt utomhus.

3.3.3. Diskussion

Vid undersökning av tomatbladens temperatur på morgonen kl. 7.00–9.00 och förmiddagen kl. 10.30–12.00 är slutsatsen att det finns en liten bladtemperaturskillnad mellan HPS+LED och HPS vid samtliga mätpunkter i blockväxthuset, skillnaderna är dock inte signifikanta. Gemensamt för båda mätningarna på morgonen och förmiddagen är att bladtemperaturskillnaden är något högre (0,5–0,9 °C) vid HPS jämfört med HPS+LED i mätpunkt 2 och 3. Detta kan bero på att HPS-lampornas eleffekt vid LED har sänkts från 750 W till 600 W jämfört med HPS-lamporna eleffekt 750 W vid referens. HPS-lamporna vid LED avger lägre värmestrålning. Vid mätpunkt 1 på morgonen är temperaturskillnaden endast 0,3 °C högre vid HPS+LED än vid HPS. Däremot på förmiddagen är temperaturskillnaden ca 0,4 °C högre vid HPS än vid HPS+LED, skillnaderna är mycket små.

Tomatbladens temperatur i åsväxthuset (HPS+LED) har bestämts men kan inte jämföras med blockväxthusets bladtemperaturer eftersom det är fråga om två olika växthus med bl.a. olika klimat och konstruktioner. Det man kan konstatera är att bladmedeltemperaturerna är aningen högre vid fotograferingen ljust utomhus jämfört med mörkt utomhus. Detta kan bero på att solen börjat värma tomatbladen och växthuset något, största temperaturskillnaden (1,2 °C) kan ses i punkt 3 vid planttopparna.

Vid undersökning av tomaternas yttemperatur på morgonen kl. 7.00–9.00 i blockväxthuset är slutsatsen att tomaterna har något lägre medeltemperatur (1,3 °C) i alla mätpunkterna vid HPS+LED jämfört med HPS. Detta kan bero på att toppbelysningsseffekten sänkts med 150 W per armatur vid HPS+LED och att LED-mellanbelysningen avger mindre värme än HPS. De temperaturer som uppmätts vid mätpunkterna 4–6 vid HPS+LED varierar sinsemellan mycket lite, d.v.s. ingen temperaturskillnad mellan tomat 2,5 m från golv jämfört med tomat 1,2 m från golv. Detta gäller även de tomattemperaturer som uppmätts vid HPS vid samma mätpunkter som vid HPS+LED.

Vid bestämning av tomaternas yttemperatur i åsväxthuset kan man konstatera att tomaterna i punkt 1, 1,75 m från golv, mellan LED, plantsida är 1,3 °C varmare än de tomat som finns vid punkt 4, 0,75 m från golv vid gångsidan. Temperaturskillnaden kan bero på att tomaterna högre upp befinner sig närmare belysningen som avger värme.

Denna värmekameraundersökning utfördes enbart en gång under våren 2014. För att ännu verifiera erhållen data borde man upprepa mätningarna flera gånger. Man skulle även behöva basera tomaternas medelyttemperatur på fler än bara tre mätvärden. Man kunde även utföra mätningar i andra månader än februari för att se om temperaturerna varierar. Intressant vore även att fotografera med värmekameran under en riktigt kall dag för att ta reda på om plantornas temperatur förändras väsentligt jämfört med en varmare dag.

3.4. Spektroradiometermätningar

3.4.1. Försöksupplägg

Datinsamling, -analys och text till detta kapitel har gjorts i nära samarbete med projektet **Heijastus**. Heijastus beviljades EU-finansiering av Österbottens och Södra Österbottens Närings-, Trafik- och Miljöcentral. Vasa universitet har fungerat som projektägare och Carolin Nuortila som projektchef.

Den 24.2.2014, klockan 6.00–9.00 mättes ljusspektrum och -intensiteter i försöksväxthuset i Pjellax. Under denna tidpunkt var det fortfarande mörkt utomhus d.v.s. solinstrålningen antas inte ha påverkat mätresultaten. Vid mätningarna användes Yrkeshögskolan Novias spektroradiometer Apogee PS-100 (kalibreringsosäkerhet $\pm 10\%$). Under mätningarna vid HPS+LED rader var växthusets sidoenergigardiner utrullade men i taket rullades de in under mätningen. Under mätning vid HPS rader var inga gardiner utrullade. Under mätning vid HPS+LED var LED-mellanbelysning och HPS-toppbelysning tänd (total elinstallationseffekt 233 W/m²). Under mätningen vid HPS var HPS-toppbelysningen tänd (elinstallationseffekt 232 W/m²). Vid samtliga mätpunkter uppmättes strål-

ningen och spektrum inom våglängdsområdet 350–1000 nm sparades, enheterna $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ och W/m^2 användes. Mätningarna utfördes av Carolin Nuortila (Vasa universitet) och Daniel Sjöholm (Yrkes högskolan Novia).

Vid HPS-lamporna 400 W, 600 W och 750 W uppmättes ljusspektra och -intensitet på ca en halv meters avstånd mitt under brännaren. Samtliga brännare var gjorda av samma tillverkare (GE) men lampskärmen vid HPS 400 W var av annan modell. HPS 600 W och HPS 750 W är samma brännare (600 W) men växthusodlaren reglerar eleffekten mellan 600 W och 750 W. Mätningarna upprepades vid tre olika mätpunkter längs med samma plantrad. HPS 600 W och HPS 750 W uppmättes i blockväxthuset och HPS 400 W uppmättes i ett av åsväxthuset. Samtliga brännare hade förnyats i augusti, före säsongens tomatplantor började belysas. Målet var att undersöka HPS-lampornas spektrum och om spektrum ändrar vid olika eleffekter. Målet var även att mäta ljusintensiteter på ca en halv meters avstånd under lamporna (brännaren) och jämföra dem sinsemellan.

3.4.2. Analys och resultat

I Bild 32 presenteras uppmätta ljusspektrum under HPS-lamporna och ljusspektrum för Netleds LED-armaturen Hortishine 205 W. OBS! Hortishine har mätts på annat avstånd och i andra förhållanden än HPS-lamporna och finns med endast för att få en uppfattning om hur dess ljusspektrum ser ut. Man kan se att samtliga tre HPS-lampors spektra ser likadana ut, enbart intensiteten varierar. Hortishine har högsta intensitetstopparna vid ca 443 nm (blått) och vid ca 661 nm (rött) medan HPS-lamporna har topparna vid ca 498 nm, 568 nm, 585 nm, 593 nm och 615 nm d.v.s. grönt och gult ljus. Gemensamt för HPS-lamporna är att de har en topp vid ca 819 nm vilket är infrarödstrålning d.v.s. värmestrålning. LED-armaturen har däremot ingen topp vid det infraröda området. Medel PAR-intensiteten (400–700 nm) vid HPS 400 W är $(182,9 \pm 6,8) \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, vid HPS 600 W är den $(318,0 \pm 83,9) \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ och vid HPS 750 W är den $(358,7 \pm 40,3) \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Intensiteten är beräknad utgående från tre mätvärden under vardera armaturen med standardavvikelse. Eftersom Hortishine har mätts på annat sätt kan man inte jämföra dess uppmätta intensitet med HPS-lampornas.

Med spektrometern undersöktes också om det finns skillnader i ljusspektra och -intensiteter vid HPS jämfört med HPS+LED under och ovanpå tomatplantornas blad, mellan plantraderna och vid gångarna. Mätningarna upprepades vid tre olika mätpunkter längs med samma plantrad. Mätningarna gjordes på avståndet 2,7 m från växthusets golv, vilket motsvarar blad på ca 20–30 cm avstånd snett neråt från LED-armaturen. Bladen valdes godtyckligt. Vid jämförelse av spektrum mellan plantraderna, ovanpå bladen vid HPS+LED och HPS kan man se att spektra varierar (Bild 33).

PAR-medelintensiteten vid HPS+LED är $(258,8 \pm 36,0) \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ och vid HPS $(113,3 \pm 4,6) \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, d.v.s. 228 % av intensiteten som uppmätts vid HPS. Intensiteten är beräknad utgående från tre mätvärden för vardera positionen och med standardavvikelse. Slutsatsen är att ljusintensiteten är högre vid HPS+LED än vid HPS och att ljusspektrum är olika.

Vid jämförelse av spektrum vid plantor, vid gången, ovanpå bladen vid HPS+LED och HPS, på avståndet 2,7 m från växthusets golv kan man se att det inte finns några skillnader (Bild 34). Ljuset från LED-mellanbelysningen når inte bladen vid gången och får därför enbart ljus inom HPS-spektrum. PAR-medelintensiteten vid HPS+LED är $(143,2 \pm 10,1) \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ och vid HPS $(168,5 \pm 30,5) \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, d.v.s. 118 % av intensiteten som uppmätts vid HPS+LED. Intensiteten är beräknad utgående från tre mätvärden för vardera positionen och med standardavvikelse. Slutsatsen är att ljusintensiteten är högre vid HPS än vid HPS+LED och att det inte finns variationer i spektra.

Vid jämförelse av spektrum mellan plantraderna, under bladen vid HPS+LED och HPS på avståndet 2,7 m från växthusets golv kan man se att HPS+LED spektrumet vid ca 635–680 nm är annorlunda jämfört med HPS-spektrum (Bild 35). Det verkar som att plantans blad inte absorberar allt rött ljus från LED-armaturerna. PAR-medelintensiteten vid HPS+LED är $(8,1 \pm 6,8) \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ och vid HPS är $(5,4 \pm 1,7) \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, d.v.s. 150 % av intensiteten som uppmätts vid HPS. Intensiteten är beräknad utgående från tre mätvärden för vardera positionen och med standardavvikelse. Slutsatsen är att

ljusintensiteten är högre vid HPS+LED än vid HPS och att tomatbladen inte verkar absorbera allt rött ljus från LED-armaturerna.

Vid jämförelse av spektrum vid plantor, vid gången, under bladen, vid HPS+LED och HPS är spektra identiska (Bild 36). PAR-medelintensiteten vid HPS+LED är $(5,4 \pm 1,7) \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ och vid HPS är $(4,9 \pm 1,5) \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, d.v.s. 110 % av intensiteten som uppmätts vid HPS. Intensiteten är beräknad utgående från tre mätvärden för vardera positionen och med standardavvikelse.

Vid HPS+LED, mellan plantor har ca 3,2 % av PAR-strålningen transmitterats genom tomatplantans blad. Vid HPS+LED, vid gången har ca 3,8 % av PAR-strålningen transmitterats genom tomatplantans blad. Vid HPS, mellan plantor har ca 4,8 % av PAR-strålningen transmitterats genom tomatplantans blad och vid HPS, vid gången är andelen ca 3,9 %. Transmittansen har beräknats av medelvärdet av tre uppmätta värden. Något större andel PAR-strålning transmitteras genom bladen vid HPS. Tomatbladen kanske absorberar något högre andel av LED-ljuset än HPS-ljuset eller så beror det på att HPS-effekten sänkts vid HPS+LED. Osäkerheten är att intensiteten endast uppmätts vid tre mätpunkter vid varje mätplats. Fler mätningar kunde utföras för att verifiera resultaten.

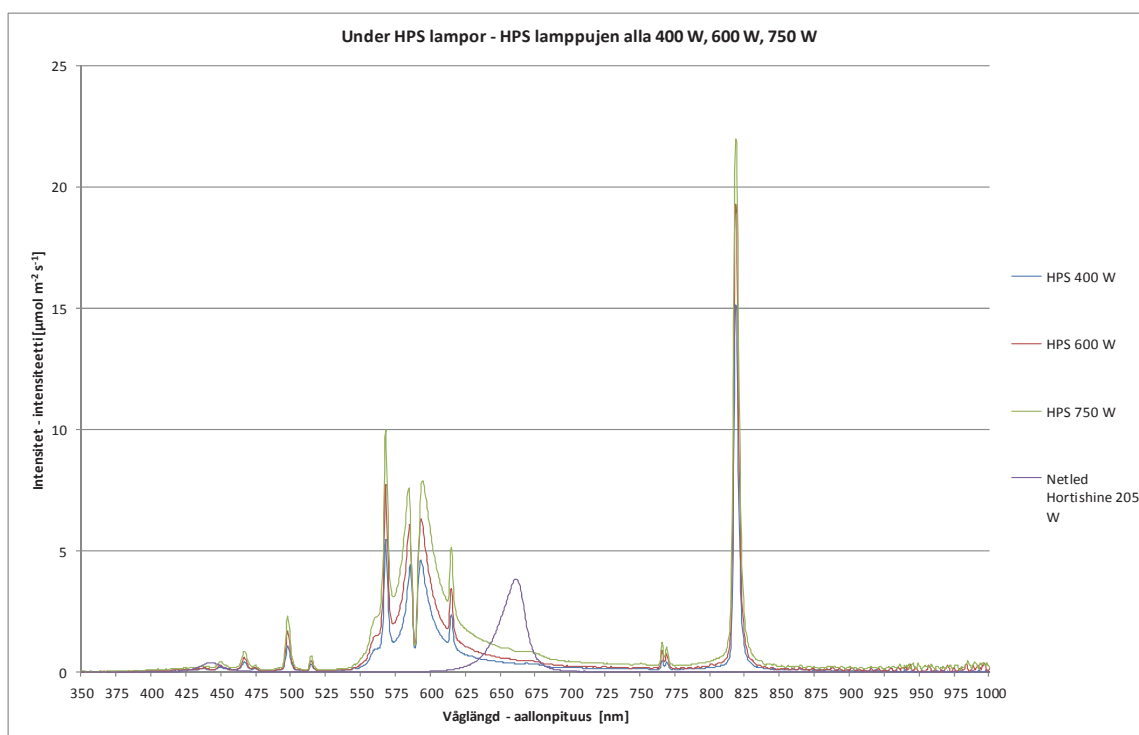


Bild 32. Lampspektrum för HPS 400 W, 600 W och 750 W ca 0,5 m rakt under brännaren. OBS! Netled LED-armaturen Hortishine uppmätt på annat avstånd och i andra förhållanden.

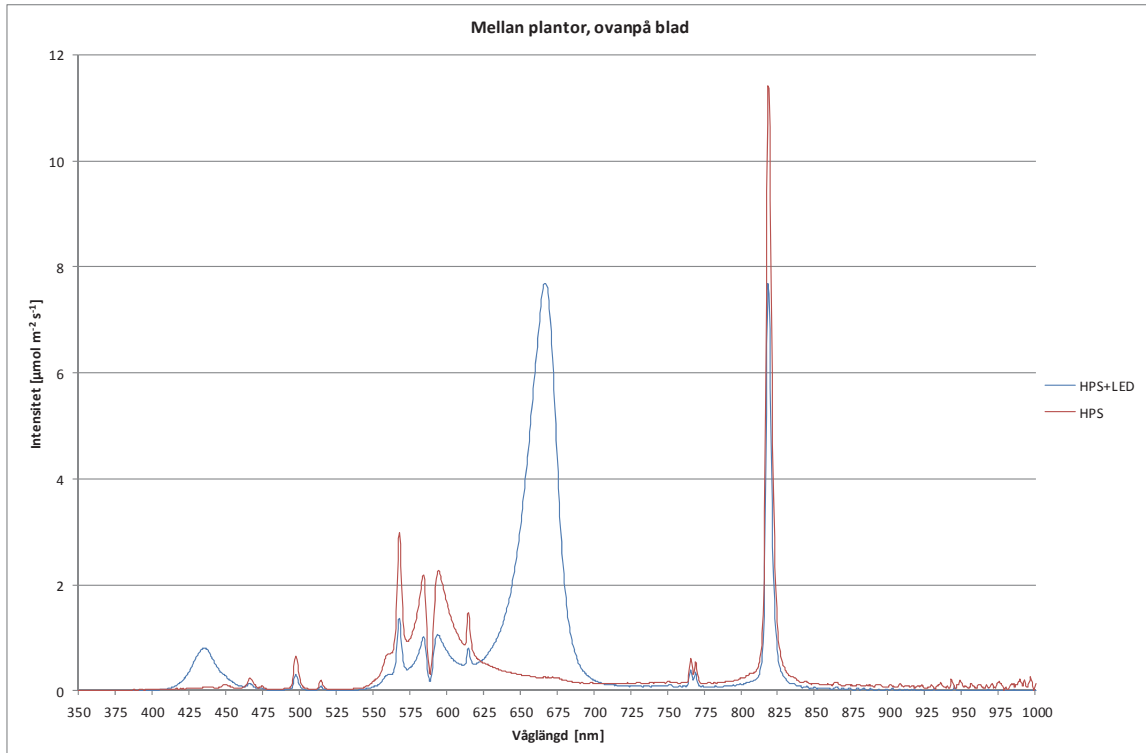


Bild 33. Spektrum vid HPS+LED och vid HPS, uppmätt ovanpå blad, mellan plantor på avståndet 2,7 m från växthusets golv, vilket motsvarar blad på ca 20–30 cm avstånd snett neråt från LED-armaturen.

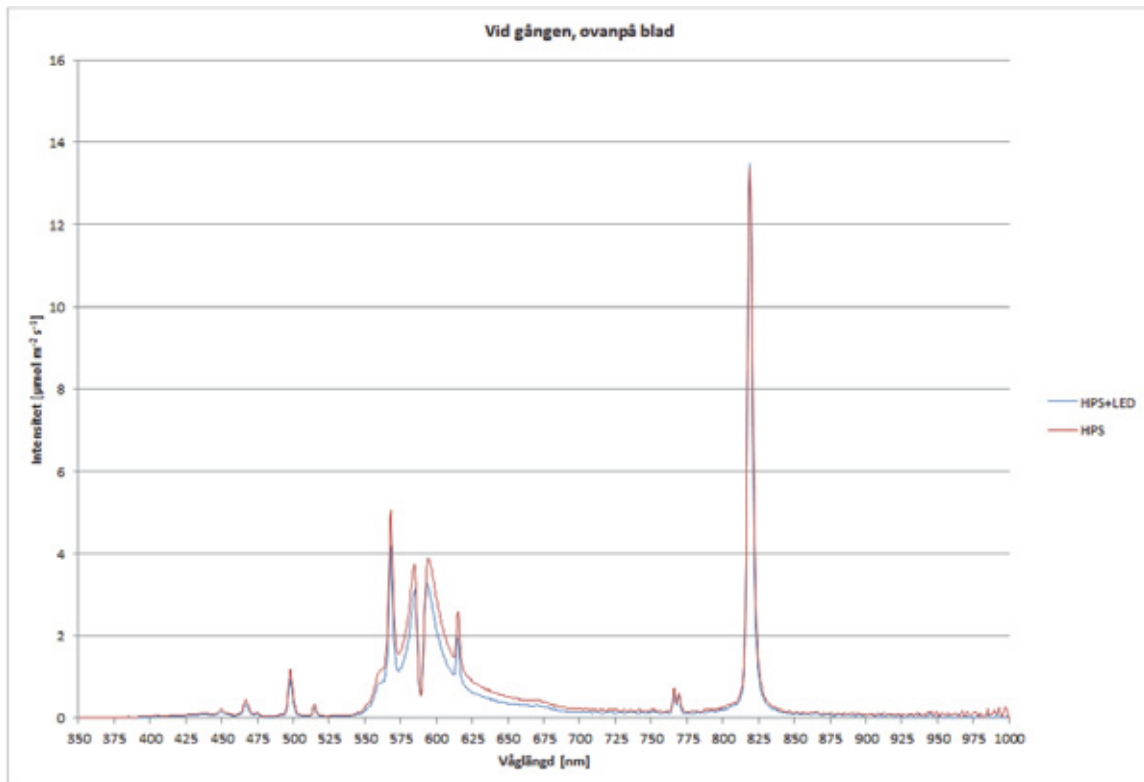


Bild 34. Spektrum vid HPS+LED och vid HPS uppmätt ovanpå blad, vid plantorna, vid gången på avståndet 2,7 m från växthusets golv.

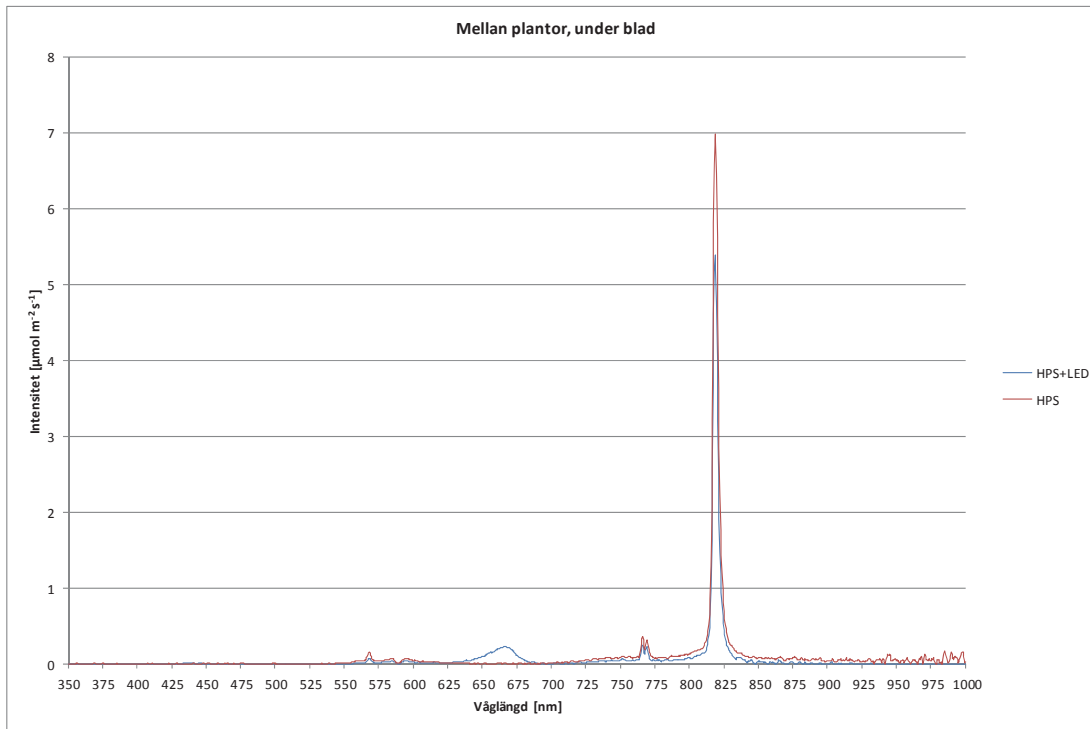


Bild 35. Spektrum vid HPS+LED och vid HPS uppmätt under blad, mellan plantor på avståndet 2,7 m från växthusets golv.

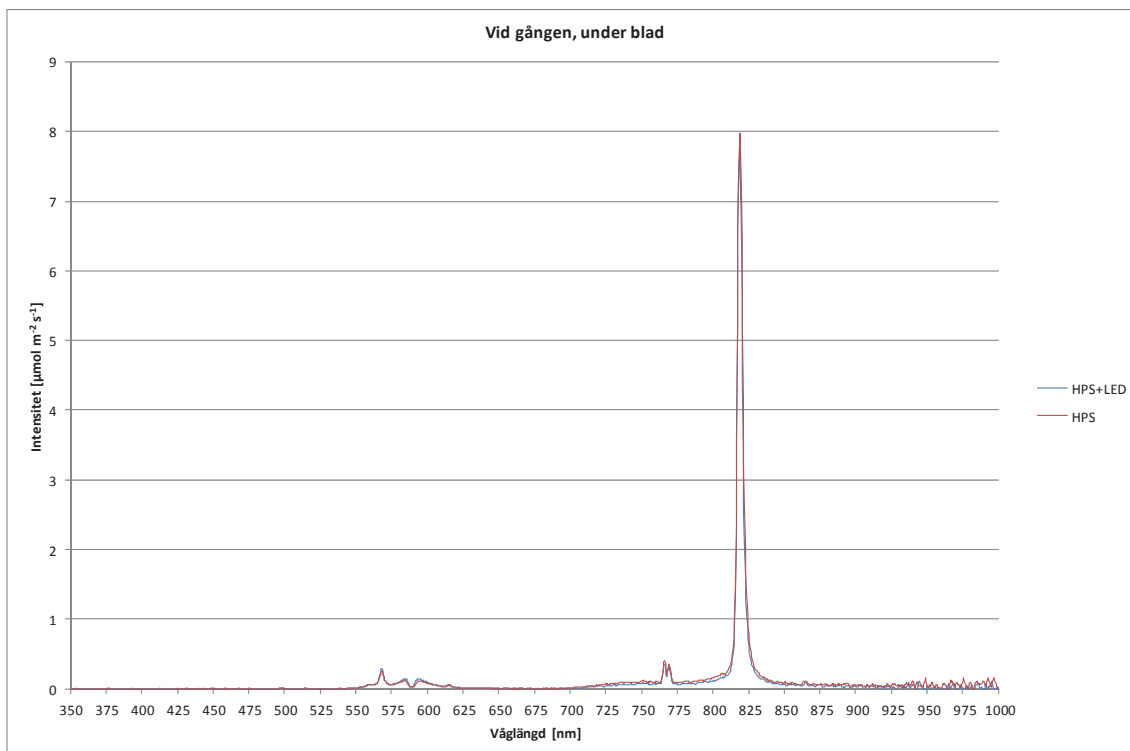


Bild 36. Visar spektrum vid HPS+LED och vid HPS uppmätt under blad, vid plantorna, vid gången på avståndet 2,7 m från växthusets golv.

3.5. Uppföljning av tomatskörd

Tomatskörden vid HPS+LED och HPS har kontinuerligt följts upp. De första tomaterna plockades 3.10.2013 och de sista 3.7.2014. Tomaterna har i regel plockats två gånger i veckan på måndagar och torsdagar av växthusodlaren anställda. Plockarna har inte haft några specifika plockningsområden, d.v.s. det kan ha förekommit olika plockare vid HPS+LED och HPS. Växthusodlaren säljer tomaterna till Botnia Grönsaker Ab i Närpes där man väger in, sorterar och förmedlar vidare tomaterna. Botnia Grönsaker Ab har för projektet Växthus-LED avgiftsfritt delat ut extra uppföljningsnummer för HPS+LED och för HPS områdena. De har vägt in och sorterat tomaterna från de olika försöksområdena. Botnia Grönsaker har skickat uppgifter om skörden till Martin Sigg som senare förmedlat dem till Yrkehögskolan Novia. Tomatsorten i blockväxthuset har varit Encore.

I Bild 37 presenteras en månadsvis skördjämförelse från första till sista plockningsdag, endast klass 1 tomater har beaktats. Grafen visar att det vid HPS+LED under oktober–november varit något lägre skörd än vid referensen (HPS). Skillnaden är dock så liten att den inte anses vara signifikant. Under de följande fem månaderna har skörden varit något större vid HPS+LED än vid HPS, som högst 14,3 % i januari 2014, när det var som mörkast utomhus. Därefter har skördemängderna vid HPS+LED långsamt blivit lägre. I månaderna februari, mars och april är skördeökningen vid HPS+LED samma d.v.s. i medeltal 5,9 %. All belysning stängdes av den sista april 2014. I maj är det ingen skillnad i skördemängden mellan HPS+LED och HPS. Däremot i juni har skördemängden minskat 8,9 % vid HPS+LED jämfört med HPS och i juli (obs. endast en plockning) en minskning med 32,3 % vid HPS+LED. I och med att andelen naturligt ljus ökar under våren minskar mängden skörd i juni och juli vid HPS+LED jämfört med HPS. Man bör också komma ihåg att LED-armaturen skuggar plantorna något, men det förklarar inte ensamt varför skörden är lägre vid HPS+LED.

Man bör ha i åtanke att plantorna började belysas vecka 39. Belysningstimmarna justerades enligt solens instrålning veckorna 39–44. Från och med vecka 44, den 1.11 började plantorna belysas med regelbundna tider d.v.s. 18 h/dygn. Från vecka 11 (med början från 6 mars) började växthusodlaren igen belysa enligt uppmätt solinstrålning. All belysning i blockväxthuset stängdes av vecka 18 (med början från 1 maj).

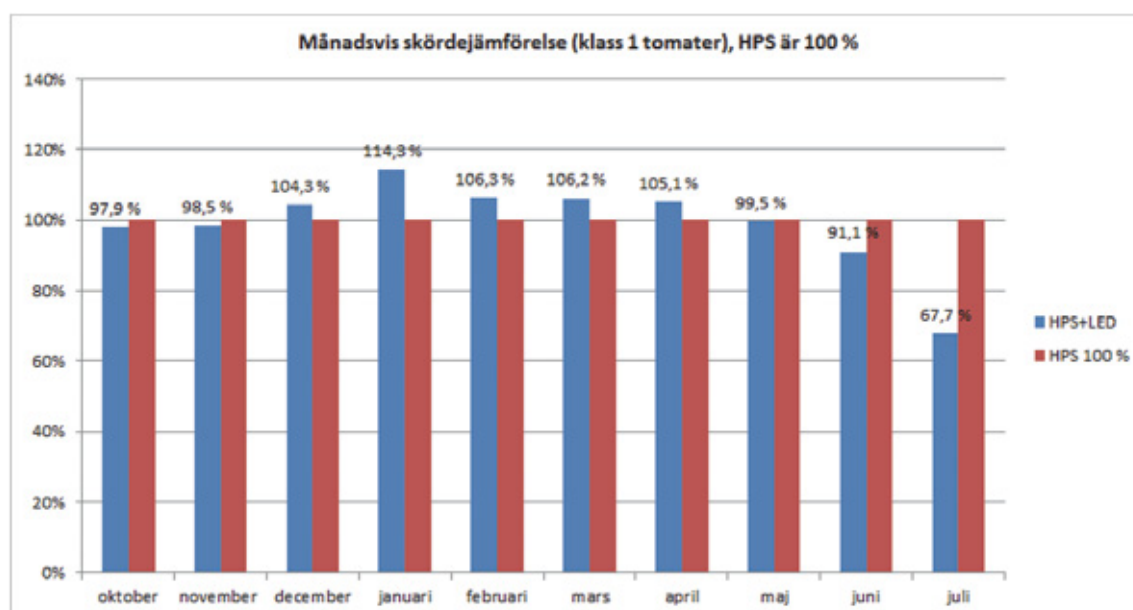


Bild 37. Månadsvis totalskördejämförelse (klass 1 tomater) vid HPS+LED, HPS (referens) är 100 %.

Bild 38 visar den kumulativa tomatskördsandelen med hänseende på hur plantorna har belysts. HPS (referens) är 100 %. De första två staplarna visar skörden för tiden 3.10–3.7.2014, d.v.s. hela skördeperioden med och utan belysning. LED-mellanbelysningen vid HPS+LED har bidragit till en skördeökning på totalt 2,2 % jämfört med referensområdet (HPS).

De följande två staplarna ”belysning på” är den skörd som plockats när all belysning varit tänd (d.v.s. enligt instrålning och regelbundna belysningstider), 5,1 % mera skörd vid HPS+LED än vid HPS.

Staplarna ”belysning på, enligt instrålning (höst)” är den skörd som plockats när belysning varit på baserat på uppmätt solinstrålning. Odlaren har angett ett gränsvärde i Priva och om solinstrålningen går över värdet slöcknar automatiskt belysningen i växthuset och tänds igen när det uppmätta gränsvärdet understigs. Under denna period har skörden varit 2,1 % lägre vid HPS+LED jämfört med HPS. Den lägre skörden här kan bero på att växthusodlaren använt sig av olika ljusinstrålningsgränsvärden i Priva för HPS+LED och HPS. En annan tänkbar förklaring kunde vara att tomatplantorna belyst med HPS vid uppdrivning och vant sig med det ljuset. När plantorna sedan belyses med LED och HPS ger tomatplantorna något lägre skörd innan de vant sig vid det annorlunda ljuset.

Under tiden 4.11.2013–3.3.2014 har odlaren använt sig av regelbundna belysningstider, d.v.s. 18 h/dygn och 17 h/dygn. Resultatet blev att det är totalt 6,6 % mera skörd vid HPS+LED jämfört med HPS. Följande staplar anger skörden när belysningen varit på men enligt solinstrålningen (vår), här är det totalt 4,8 % mera skörd vid HPS+LED jämfört med HPS.

De två sista staplarna i Bilden visar att det var 6,2 % lägre skörd vid HPS+LED jämfört med HPS när all belysning varit avstängd på våren. En orsak till det lägre skörderesultatet kan ha berott på att LED-mellanbelysningsarmaturerna skuggar en del av plantan, vilket medför att något mindre naturligt ljus och konstljus från HPS-lamporna når fram till plantorna vid HPS+LED. En annan teori är att tomatplantorna vant sig vid LED-armaturernas blåa och röda ljus och ca 8 veckor efter lamporna stängts av visar det sig i lägre skörd. Tidsperioden från tomatblomma till mogen tomatfrukt är ca 8 veckor.

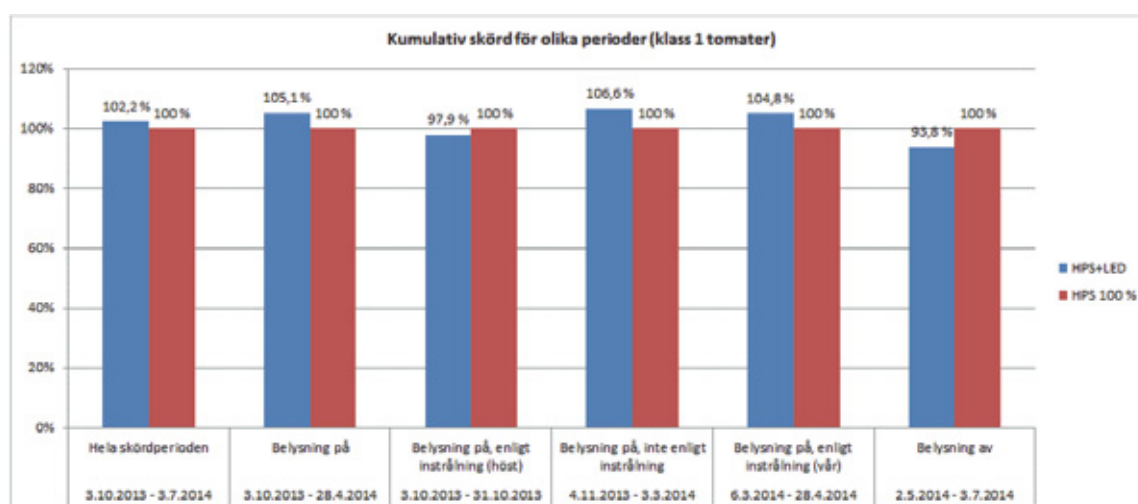


Bild 38. Kumulativ skörd (klass 1 tomater) med hänseende på olika belysningsperioder. HPS (referens) är 100 %.

Tomatmedelvikten har beräknats för varje plockningsdag och presenteras i Bild 39. Tomatmedelvikten varierar mellan 75 och 103 gram. Över hela skördeperioden d.v.s. 3.10.2013–3.7.2014 har tomatmedelvikten varit 0,2 % högre vid HPS+LED än vid HPS, d.v.s. det finns ingen signifikant skillnad. Under den tid då regelbundna belysningstider använts (1.11.2013–5.3.2014) så är tomatmedelvikten 0,6 % lägre vid HPS+LED jämfört med HPS. Under den tid då all belysning varit av så har tomatmedelvikten varit 0,4 % högre vid HPS+LED jämfört med HPS (referens).

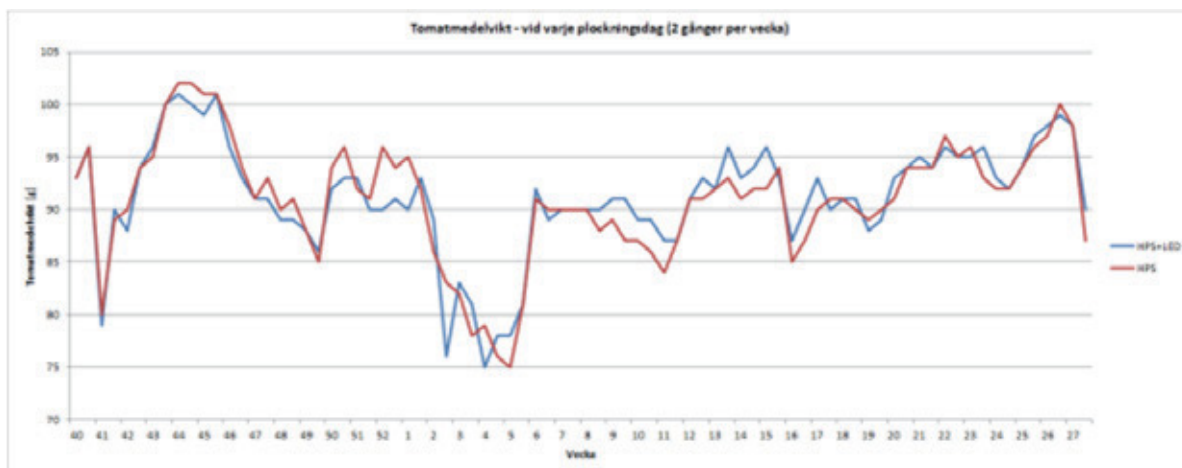


Bild 39. Beräknad tomatmedelvikt för plockningsdagar, två gånger per vecka. Enheten för tomatmedelvikt är gram.

Tomatskördens förändring per m^2 veckovis presenteras i Bild 40. HPS+LED och HPS (övriga) jämförs med HPS (referens) som är 100 %. HPS (övriga) anger det resterande området av blockväxthus som inte ingått i belysningsförsöket. Ur Bilden kan man bl.a. se att skörden per m^2 har som mest varit 23 % större (vecka 16) jämfört med HPS (referens). Skörden per m^2 har vid HPS (övriga) varit 4,1 % lägre jämfört med HPS (referens) under hela plockningsperioden, medan den vid HPS+LED varit 2,2 % högre jämfört med HPS (referens).

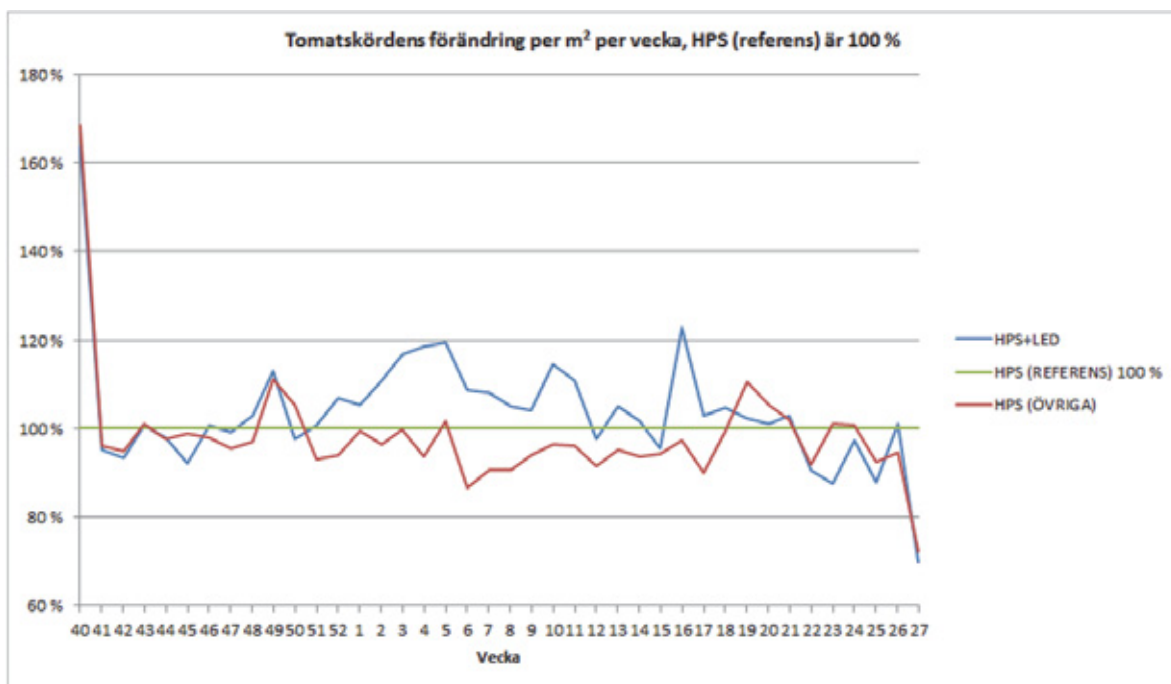


Bild 40. Tomatskördens veckoförändring per m^2 där HPS (referens) är 100 %. HPS (övriga) är det resterande området av blockväxthus som inte har ingått i belysningsförsöket.

4. Energianalys

4.1. Elmätning

Två identiska elmätare installerades vid HPS+LED och HPS. Tyvärr kunde inte elmätarna kopplas så att de mätte elförbrukningen för de fyra försöksraderna, utan de kopplades så att de mätte över sex rader, d.v.s. en elcentral för sex belysningsrader. Elförbrukningen mättes över lampraderna 17–22 vid HPS+LED och 23–28 vid HPS. Elmätarna har avlästs manuellt i försöksväxthuset vid oregelbundna tidpunkter. Före tiden 8.10.2013 kan inga avlästa elförbrukningar användas p.g.a. att ett relä varit sönder vilket lett till felaktiga värden.

Bild 41 visar en graf över avläst elförbrukning omräknat till kWh/m² per dygn vid HPS+LED och HPS. Elförbrukningen vid HPS+LED och HPS är nästan samma mellan 25.11.2013 och 24.3.2014, d.v.s. ca 3,7 kWh/m² per dygn. Tiden efter den 6.3.2014 varierar elförbrukningen något på grund av att man börjat belysa med hänsyn till solinstrålningen. Den något lägre elförbrukningen vid HPS+LED före den 25.11.2013 kan bero på att en del av LED-armaturerna slocknat på grund av att några säkringar hade slagit ifrån, felet åtgärdades så snabbt som möjligt. Under perioden då regelbundna belysningstider använts (1.11.2013–5.3.2014) borde HPS teoretiskt ha förbrukat lite mera el vid de sex belysningsraderna (4,1 kWh/m² per dygn) jämfört med HPS+LED vilket de inte gjorde. Total beräknad eleffekt vid HPS+LED är 157,6 kW och vid HPS (referens) 168,3 kW.

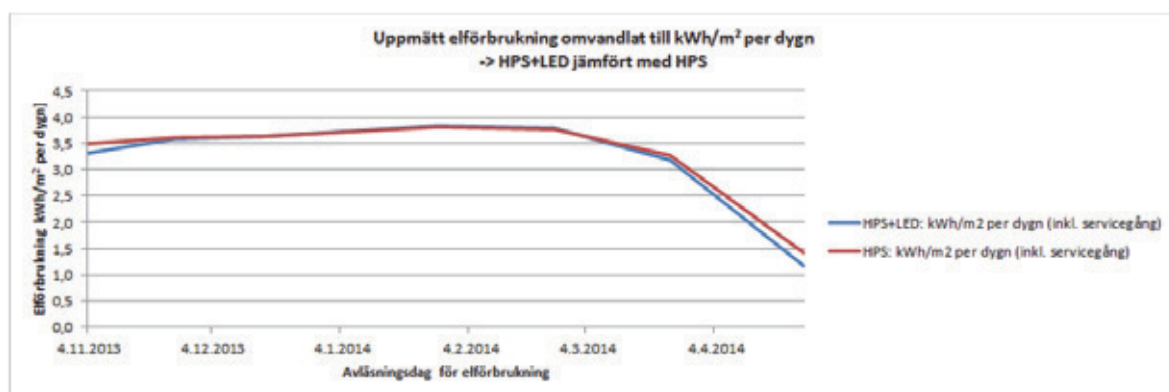


Bild 41. Avläst elförbrukning omräknat till kWh/m² per dygn vid HPS+LED (sex belysningsrader) och vid HPS (sex belysningsrader).

4.1.1. Teoretisk elförbrukning

Den teoretiska elförbrukningen har beräknats för HPS+LED och HPS i blockväxthuset under den regelbundna belysningstiden d.v.s. 1.11.2013–5.3.2014. I blockväxthuset finns totalt 1768 HPS-lampor placerade ovanför gångarna. Alla lampor i växthuset är 600 W men kan användas som 750 W lampor. Man bör vara medveten om att när man pratar om en 250, 400 eller 600 W HPS-lampa är egentligen den verkliga eleffekten ca +10 % p.g.a. drossel och övriga förluster. I blockväxthuset finns totalt 52 odlingsrader, vardera 56 m. Växthusarealen inklusive servicegång är totalt 6300 m² (exklusive servicegång totalt 5824 m²) vilket betyder att en odlingsrad motsvarar 121 m². I växthuset har totalt 112 Hortishine armaturer á 205 W från Netled installerats vid fyra belysningsrader, en areal på 484 m² (inklusive servicegång). 34 HPS-lampor finns per belysningsrad vilket betyder 136 lampor vid fyra rader.

LED-armaturerna vid HPS+LED (fyra rader) har varit tända klockan 23.00–17.00 varje dygn d.v.s. totalt 18 h/dygn. HPS-lamporna (600 W, sex rader) har lyst klockan 23.30–17.30 varje dygn d.v.s. totalt 17 h/dygn. Medan HPS (referens) och övriga växthuset belysts med HPS 600 W klockan 23.00–23.30 och klockan 16.30–17.00, d.v.s. 1 h/dygn samt HPS 750 W klockan 23.30–16.30 d.v.s. 17 h/dygn och totalt blir det 18 h/dygn belysning.

I Tabell 7 har elinstallationseffekter och -förbrukningar vid HPS+LED och HPS i blockväxthuset beräknats teoretiskt. I den vänstra delen av tabellen har inte HPS-lampornas drosslar och övriga förluster beaktats, medan de beaktats i den högra delen. Drosseffekterna och övriga förluster har uppskattats till +10 % av lampans eleffekt. Eleffekten (inkl. drosslar) vid HPS+LED har beräknats till 113 kW och eleffekten vid HPS till 112 kW (fyra belysningsrader). Den totala elinstallationseffekten (inkl. drosslar och servicegång) vid HPS+LED uppgår till 233 W/m² och den totala elinstallationseffekten vid HPS uppgår till 232 W/m².

Elförbrukningen [kWh per dygn] vid de fyra raderna vid HPS+LED är ca 2,9 % lägre än vid de fyra raderna vid HPS (referens). Beräknar man elförbrukningen i enheten [kWh/m² per dygn] får man 4,0 kWh/m² per dygn vid HPS+LED och 4,1 kWh/m² per dygn vid HPS (fyra belysningsrader). Det vill säga ca 0,1 kWh/m² per dygn högre vid HPS. Elförbrukningen vid sex belysningsrader d.v.s. en elcentral vid HPS+LED är 3,7 kWh/m² per dygn jämfört med 4,1 kWh/m² per dygn vid HPS. Skillnaden beror på att LED enbart installerats på fyra belysningsrader och inte på sex rader, d.v.s. två rader vid HPS+LED belyses enbart med HPS 600 W och ingår inte i försöksområdet. Anledningen till att elförbrukningen för sex belysningsrader här har beräknats är att de skall kunna jämföras med den uppmätta elförbrukningen.

Jämför man den teoretiska elförbrukningen per m² per dygn med den uppmätta förbrukningen varierar förbrukningen något vid HPS. Vid HPS+LED är den teoretiska elförbrukningen [kWh/m² per dygn] samma (3,7 kWh/m² per dygn) som för den uppmätta. Elförbrukningen vid HPS är 0,4 kWh/m² per dygn högre vid teoretiskt beräknad förbrukning än vid uppmätt (värdet inkl. drosslar och övriga förluster). Om man utesluter drosslarna och övriga förluster och koncentrerar sig enbart på lampeffekten överensstämmer uppmätta elförbrukningarna bättre överens med den teoretiska.

Tabell 7. Teoretiskt beräknade elinstallationseffekter och elförbrukningar vid HPS+LED och HPS i blockväxthuset. I de två vänstra kolumnerna har inte drosslarna beaktats medan de har beaktats i de två längst till höger.

Blockväxthuset			
Teoretisk effekt (4 försöksrader)	kW	Teoretisk effekt (4 försöksrader) inkl. drossel	kW
HPS 600 W + LED 205 W (4 rader)	104.6	HPS 660 W + LED 205 W (4 rader)	112.7
HPS 750 W (4 rader)	102.0	HPS 825 W (4 rader)	112.2
Differens (HPS+LED)-HPS	2.6	Differens (HPS+LED)-HPS	0.5
HPS+LED elcentral (6 försöksrader)	kW	HPS+LED elcentral (6 försöksrader)	kW
LED 205 W (4 rader)	23.0	LED 205 W (4 rader)	23.0
HPS 600 W (6 rader)	122.4	HPS 660 W, inkl. drossel (6 rader)	134.6
Total effekt	145.4	Total effekt	157.6
HPS elcentral (6 försöksrader)	kW	HPS elcentral (6 försöksrader)	kW
HPS 750 W (6 rader)	153.0	HPS 825 W, inkl. drossel (6 rader)	168.3
Total effekt	153.0	Totalt effekt	168.3
Differens HPS elcentral - HPS+LED elcentral	7.6	Differens HPS elcentral - HPS+LED elcentral	10.7
Total effekt för hela blockväxthus	1318.4	Total effekt för hela blockväxthus	1447.9
Installationseffekt (inklusive servicegång)	W/m²	Installationseffekt (inkl. servicegång) inkl. drossel	W/m²
Installationseffekt LED 205 W	47	Installationseffekt LED 205 W	47
Installationseffekt HPS 600 W	169	Installationseffekt HPS 660 W	185
Installationseffekt LED 205 W+HPS 600 W	216	Installationseffekt LED 205 W+HPS 660 W	233
Installationseffekt HPS + övriga (750 W)	211	Installationseffekt HPS + övriga (825 W)	232
Differens (HPS+LED)-HPS	5.3	Differens (HPS+LED)-HPS	1.1
Teoretisk elförbrukning	kWh/ dygn	Teoretisk elförbrukning (inkl.drossel)	kWh/dygn
HPS+LED elcentral (6 rader)	2494	HPS+LED elcentral (6 rader)	2702
HPS elcentral (6 rader)	2723	HPS elcentral (6 rader)	2996
Differens (HPS elcentral - HPS+LED elcentral)	229	Differens (HPS elcentral - HPS+LED elcentral)	294
LED 205 W (4 rader)	413	LED 205 W (4 rader)	413
HPS 600 W (4 rader)	1387	HPS 660 W (4 rader)	1526
LED 205 W + HPS 600 W (4 rader)	1800	LED 205 W + HPS 660 W (4 rader)	1939
HPS 750 W och 600 W (4 rader)	1816	HPS 825 W och 660 W (4 rader)	1997
Differens (HPS - HPS+LED, 4 rader)	15	Differens (HPS - HPS+LED, 4 rader)	58
Utgående från 4 rader	kWh/m²/ dygn	Utgående från 4 rader	kWh/m²/dygn
HPS+LED elförbrukning kWh/m ² per dygn	3.7	HPS+LED elförbrukning kWh/m ² per dygn	4.0
HPS elförbrukning kWh/m ² per dygn	3.8	HPS elförbrukning kWh/m ² per dygn	4.1
Utgående från 6 rader dvs. en elcentral	kWh/m²/ dygn	Utgående från 6 rader dvs. en elcentral	kWh/m²/dygn
HPS+LED elförbrukning kWh/m ² per dygn	3.4	HPS+LED elförbrukning kWh/m ² per dygn	3.7
HPS elförbrukning kWh/m ² per dygn	3.8	HPS elförbrukning kWh/m ² per dygn	4.1

Om man beräknar elförbrukningen i enheten [kWh/m²] för den tid när belysning första gången tändes tills den helt släcktes, d.v.s. 9.9.2013–30.4.2014 får man att elförbrukningen var i medeltal ca 2,8 % lägre vid HPS+LED jämfört med HPS (fyra försöksrader). När LED-försöket planerades var målet att ha samma elförbrukning vid HPS+LED och HPS. Om man beräknar elförbrukningen [kWh/m² per dygn] under samma tidsperiod får man vid HPS+LED 3,3 kWh/m² per dygn och vid HPS 3,4 kWh/m² per dygn, d.v.s. ca 3 % lägre vid HPS+LED. Beräknar man elförbrukning i enheten [kWh/kg tomat] för samma tidsperiod får man vid HPS+LED 11,2 kWh/kg tomat och vid HPS 11,8 kWh/kg tomat d.v.s. ca 5,1 % lägre vid HPS+LED.

I Bild 42 presenteras elförbrukningen per månad [MWh] för fyra odlingsrader vid HPS+LED och för fyra odlingsrader vid HPS (referens). I grafen kan man se hur elförbrukningen fördelar sig mellan de olika belysningarna per månad.

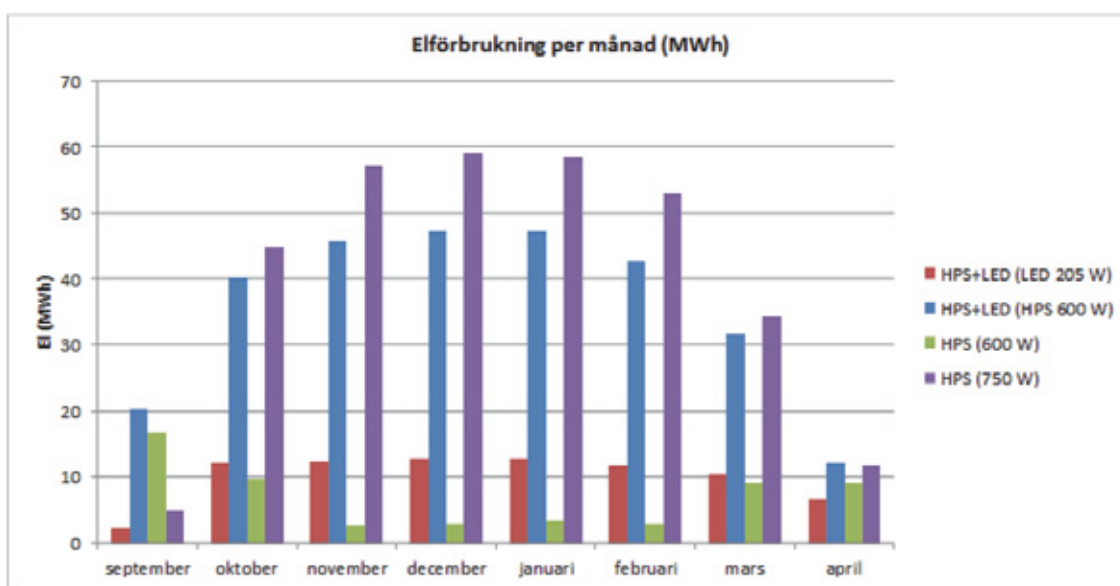


Bild 42. Elförbrukningen per månad [MWh] för fyra odlingsrader vid HPS+LED och vid HPS (referens).

Bild 43 visar elförbrukningen i kWh/kg tomat per månad vid HPS+LED och HPS (referens). Ur grafen kan man se att det krävs mest elektricitet per producerat kg tomat i oktober varefter mängden el som krävs sjunker varje månad. Störst är skillnaden mellan HPS+LED och HPS i januari.

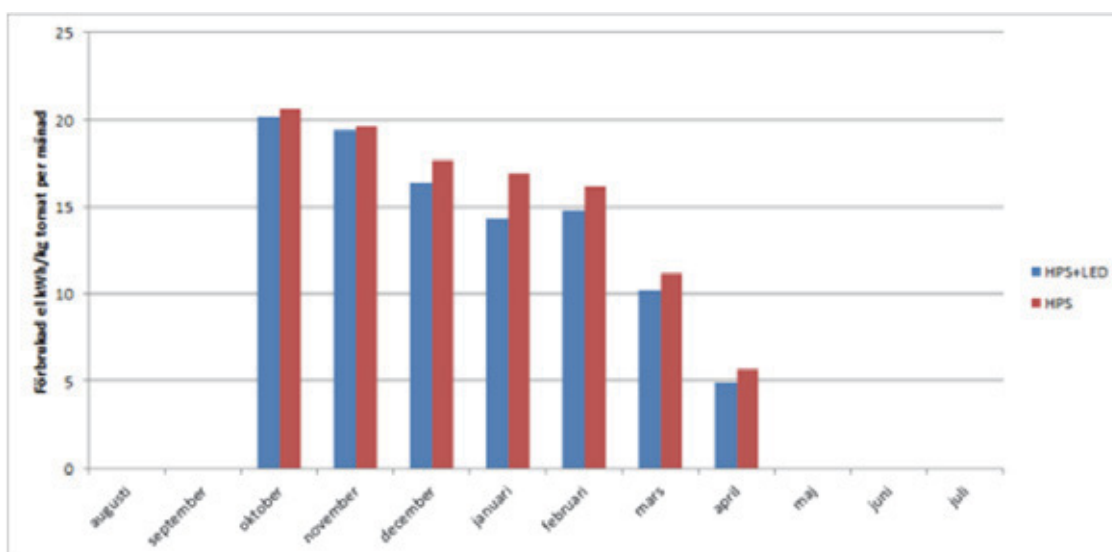


Bild 43. Elförbrukningen i kWh/kg tomat per månad.

4.2. Test av LED-armaturer med blått ljus och kemisk analys av tomater

4.2.1. Försöksupplägg

Företaget LED Finland Oy erbjöd sig att låna ut fyra LED-armaturer med enbart blått ljus till projektet under försöksperioden. Genom att belysa tomatplantor med blått ljus kan tomaters smak, näringsämnen och/eller hälsoämnen eventuellt påverkas. Ett samarbete med LED Finland Oy inleddes och armaturerna installerades i Martin Siggs blockväxthus avskilt från övriga försök. De blåa LED-armaturerna placerades mellan tomatplantorna på rad efter varandra strax ovanför mellanvärmeröret (Bild 44). Armaturerna lyste enbart åt ena sidan, ut mot gången (mot öst) och installerades på höjden 1,6 m från golvet så att de skulle belysa både tomater och planta. Vardera armaturen hade en eleffekt på 130 W. De blåa LED-armaturerna kopplades till ett eluttag vid en elcentral på norra väggen och belysningstiderna ställdes in m.h.a. en timer. LED-armaturerna lyste mellan klockan 23.00 och 6.00 (7 h) varje dag. Avståndet från LED-armaturen närmast nordväggen och elcentralen var ca 15 m. Avståndet mellan LED-armaturerna var ca 0,5 m. Observera att när tomatplantorna har släpps ner förflyttas plantorna något längs med raden. Detta betyder att de plantor som man började belysa inte är de samma när belysningsförsöket avslutades.

Belysningstiden valdes så att den inte skulle störa arbetarna när de jobbade i växthuset, eftersom ljuset från armaturerna var väldigt starkt och lyste rakt ut mot gången. Förutom det blåa ljuset belystes plantorna även med HPS-toppbelysning, HPS 600 W klockan 23.00–23.30 och 16.30–17.00, d.v.s. 1 h/dygn samt HPS 750 W klockan 23.30–16.30, 17 h/dygn, d.v.s. totalt 18 h/dygn. För mera information om belysningstider se kapitel 2.4. De blåa armaturerna installerades den 4.11.2013 och var i användning fram till sista april 2014.



Bild 44. Blåa LED-armaturer som lånats av LED Finland Oy installerades i försöksväxthuset i Pjelas. (Foto Daniel Sjöholm)

Yrkeshögskolan Novia och MTT inledde ett samarbete med Östra-Finlands universitet under hösten 2013. Östra-Finlands universitet har utfört kemiska ämnesanalyser på tomater från Martin Siggs växthus. Östra-Finlands universitet och LED Finland Oy har bekostat alla tomatanalyserna, övriga kostnader påfördes projektet.

Under vintern och våren skickades totalt sex omgångar med tomater för kemisk ämnesanalys till Östra-Finlands universitetet. Tanken var att undersöka om det finns skillnader i mängden näringsämnen, hälsoämnen (t.ex. fenoler och flavanoider) i tomater belysta med HPS+LED jämfört med tomater belysta med enbart traditionell HPS-toppbelysning. Den första omgången tomater skickades den 25.11.2013 därefter ungefär med en månads intervall. Antalet tomater för analys och vilket ljus tomaterna har belysts med varierar något mellan omgångarna. Vanligtvis har 20 stycken röda tomater (så mogna som möjligt) valts ut från varje belysningsområde. Tomater har plockats från följande områden för analys: 1) blockväxthuset HPS+LED (LED-armaturer från Netled Oy, Hortishine, mellanbelysning), 2) blockväxthuset HPS (referens), 3) blockväxthuset HPS+LED (blåa LED-armaturer från LED Finland Oy) och 4) åsväxthuset HPS+LED (LED-armaturer från Philips, GreenPower LED mellanbelysning). Handelsträdgård Martin Sigg har haft ansvaret för plockning och val av tomater för analys.

Samtidigt som mogna tomater skickades till universitetet skickades också tomater för analys till MTT i Pikis under vintern och våren 2014. MTT har utfört Brix-mätningar och analyserat mängden organiska syror.

4.2.2. Ljusbmätning vid LED-armaturer med blått ljus

Den 10.3.2014 utfördes ljusbmätningar vid de blåa LED-armaturerna m.h.a. Vasa universitets Delta Ohm ljushandmätare (modell HD2102.2) och tillhörande quantum sensor (PAR). Mätningarna utfördes tidigt på morgonen när det var mörkt utomhus och när det naturliga ljuset inte antas ha påverkat mätningarna. Under mätningarna var HPS-lamporna (750 W) och de fyra blå LED-armaturerna (130 W) tända.

Mätpunkterna valdes godtyckligt vid plantorna intill LED-armaturerna. Bild 45 visar var mätpunkterna valdes i blockväxthuset. Mätpunkt 2.1 (1,25 m från golv) vid gången, punkt 2.2 (1,25 m från golv) mellan plantor. Mätpunkt 2.3 (1,70 m från golv) vid gången, punkt 2.4 (1,70 m från golv) mellan plantor och LED-armaturer. Vid dessa fyra punkter mättes PAR-intensiteten vid fem olika ställen mitt för LED-armaturen, en mätpunkt mättes två gånger. Sensorn hölls riktad enligt tomatbladen d.v.s. ca 70°. Utöver dessa mätningar mättes PAR-intensiteten på ca 10 cm avstånd vinkelrätt från LED-armaturernas mitt, vid avståndet ca 1,7 m från golvet, på fem ställen.

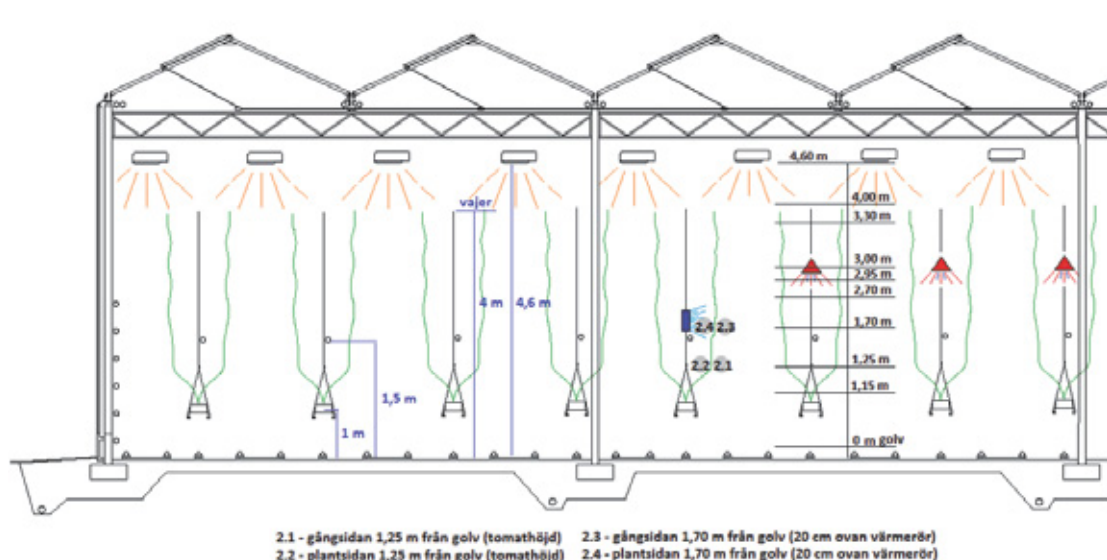


Bild 45. Skiss över de valda ljusbmätningarna 2.1–2.4.

I Bild 46 presenteras uppmätt PAR-intensitet med ± 1 standardavvikelse vid de olika mätpunkterna uppmätta vid LED-armaturerna med blått ljus i blockväxthuset. Standardavvikelserna vid de mätpunkter som mättes närmast LED-armaturerna (2.4 och vinkelrätt mot LED) är högre än de övriga. En liten förflyttning av sensorn mitt framför armaturen vid korta avstånd gjorde att PAR-intensiteten kunde ändra med några hundra $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Intensiteterna vid punkt 2.2–2.3 varierade inte mycket.

I slutskedet av projektet jämfördes olika PAR-mätare i laborieförhållanden. Den PAR-mätare som användes vid ovanstående mätningar konstaterades inte vara lämplig vid mätning av PAR-strålning från konstbelysning, mätaren visar för låga värden. Den DeltaOHM mätare som användes bör inte överhuvudtaget användas vid mätning av konstljus. De värden som presenteras i Bild 46 återspeglar inte verkligheten. Problematiken angående olika PAR-mätare presenteras utförligare i kapitel 3.9.3.

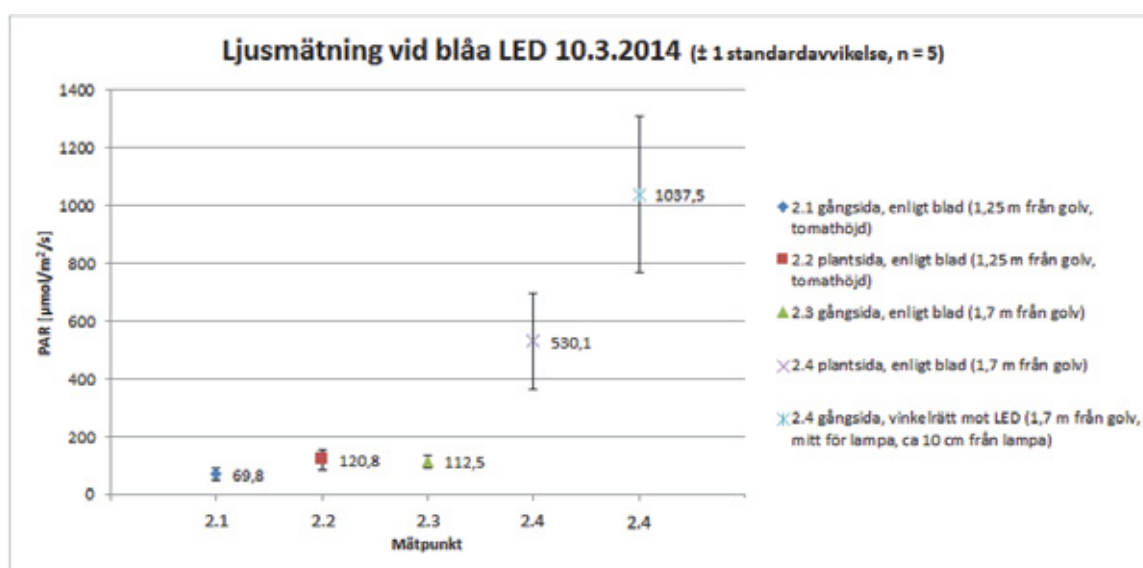


Bild 46. Bild 46 PAR-medelvärden med ± 1 standardavvikelse vid olika mätpunkter uppmätta vid LED-armaturer med blått ljus i blockväxthuset. Observera att HPS-lamporna i taket även var tända under mätningarna.

4.2.3. Analys av tomatfrukter

För att bedöma tomatens kvalitet mättes mognadsgraden, det totala vattenlösliga stabila ämnet (brix), syrlighet, fenolhalt, färskvikt och torrsvikt. Fenolhalten mättes vid Östra-Finlands universitet i Joensuu. Alla övriga mätningar gjordes vid MTT i Pikis.

Ett bra sätt att bedöma tomatens smak är att mäta brix och syrlighet. Vid brixmätningar brukar den största andelen vara socker, men det finns också vattenlösliga organiska syror och pektins. Den mogna tomatens brixhalt är oftast >5 %. Tomatens goda smak påverkas också av syrahalten, de titrabla syror: organiska syror, citronsyra och äppelsyra. Ju högre syrahalten är i en mogen frukt desto godare smak har den. Fenoler är antioxidanter som har en positiv hälsoinverkan på människan. Hyperin är en fenol och en flavonoid.

Tomater plockades fem gånger för fenolanalyser och fyra gånger för övriga analyser. Skördedatumet var oftast 1–3 dagar före mätningarna. Eftersom LED-armaturerna med blått ljus var fyra till antal belystes endast ett fåtal tomatplantor. För att få tillräckligt antal frukter för analys behöll odlaren tomaterna oskördade några dagar längre (i februari–maj) vid LED-armaturerna med blått ljus jämfört med övriga tomater. På grund av detta är tomaternas mognadsgrad högre i den grupp som skickades till MTT.

4.2.4. Färskvikt, torrsvikt, mognadsgrad, brix-mätning och de titrabla syrorna

Frukterna delades i olika färggrad (mognadsgrad) med hjälp av en färgkarta (Int. Standardisation of Fruits and Vegetables: Tomato, OECD 2003). Skalan slutade på 12, men eftersom en del frukter var mognare, användes också högre siffror som 13 och 14 (Bild 48).

Vid varje omgång användes fyra frukter till analys av syror och åtta frukter till brix-mätningar. Medelvärden av brix rapporteras här. Hälften av frukten användes till vikt-mätningar och den andra halvan till övriga analyser. Den halva tomaten placerades i en gasväv och pressades med en press. Gasväven användes för att förhindra att innehållet (partiklarna) skulle försvinna med vätskan. Brixvärdet mättes minst tre gånger per en tomat. Syrahalten mättes en gång per en tomat.

4.2.5. Resultat

Torrsubstanshalten i procent varierade mellan olika belysningar (Bild 47). Den var högst vid blå LED under hela säsongen. Skillnaden till andra ljuskällor var dock inte stor. Mognadsgraden vid mätningarna varierade mellan belysningarna, mest vid blå LED (Bild 48). Den har dock inte påverkat torrsubstanshalten betydligt. Mognadsgraden har märkbar betydelse för tomatens smak. Jämförelse med mognadsgraden och brixhalten visade att skillnaderna mellan olika ljuskällor var liten, men blå LED var hela tiden bland de med högsta värden (Bild 49). I januari och februari testades det att lämna några tomater på ett bord över natten och resultatet blev att brixhalten ökade något. I mars och april/maj hade det ingen effekt. Mängden tomater för de titrabla syrorna var så liten, att vi inte kunde dra några slutsatser av mätningarna. Variationen var inte stor och inga tydliga trender observerades.

I hyperinhalten fanns det skillnader mellan olika belysningar och månader (Bild 50). Hyperinhalten var störst när LED-armaturerna med blåa lysdioder lyst nära mognande tomater speciellt under den mörkaste årstiden december och januari. När den globala strålningen ökade, minskade skillnaderna mellan blåa LED och andra ljuskällor. Frukten mognadsgrad verkade inte påverka hyperinhalten.

Slutsatsen av dessa analyser är att ljusspektrum tycks ha betydelse för tomatens kvalitet speciellt på vintern. Det borde dock forskas mera för att bli helt säker på saken och undersöka olika möjligheter till god kvalitet.

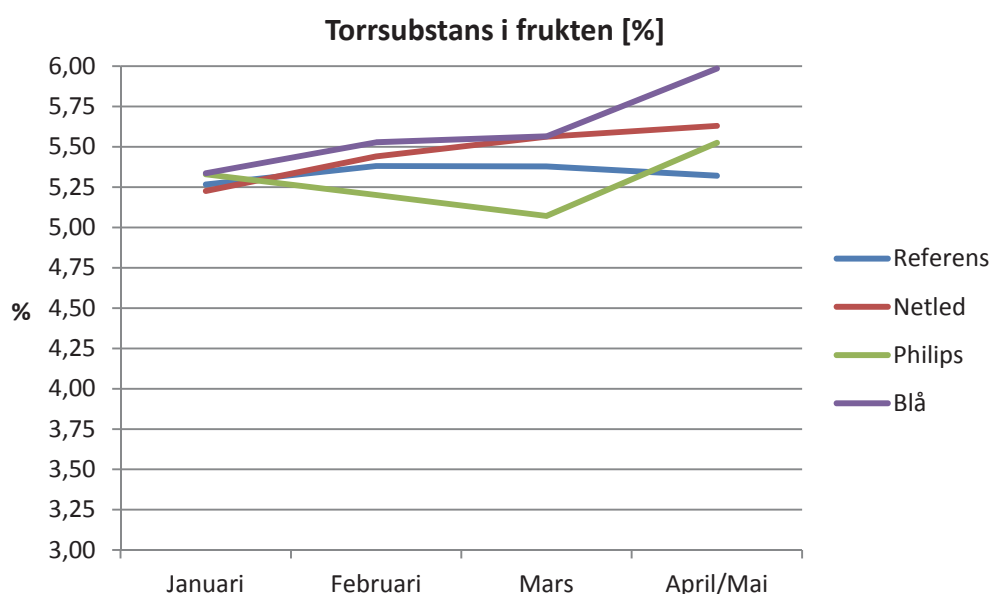


Bild 47. Torrsubstanshalten i procent i tomatfrukten vid olika belysningar.

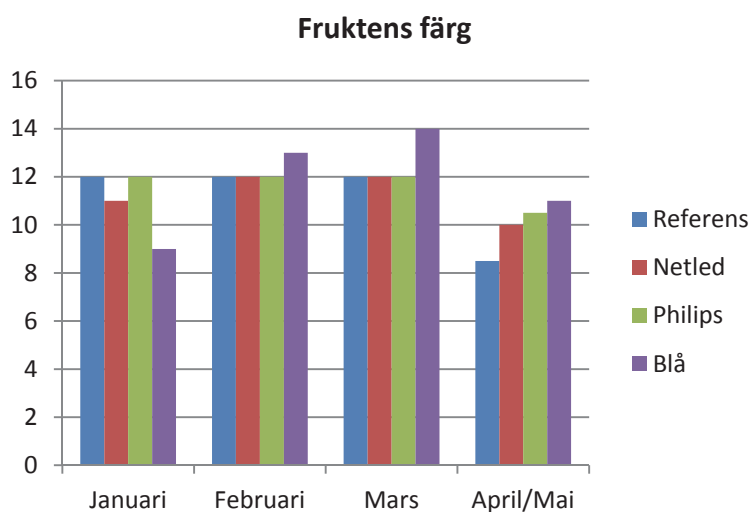


Bild 48. Frukternas färg bedömda före analyser. Färgkarta/värikartta: Int. Standardisation of Fruits and Vegetables: Tomato, OECD 2003.

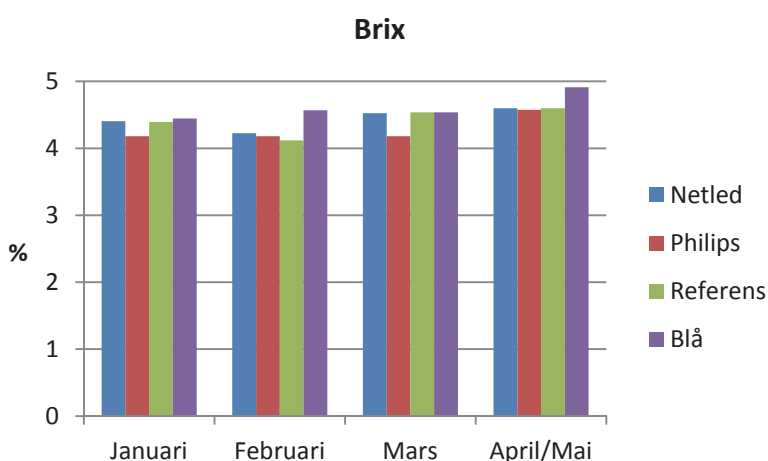


Bild 49. Brixhalten i tomatvätskan.

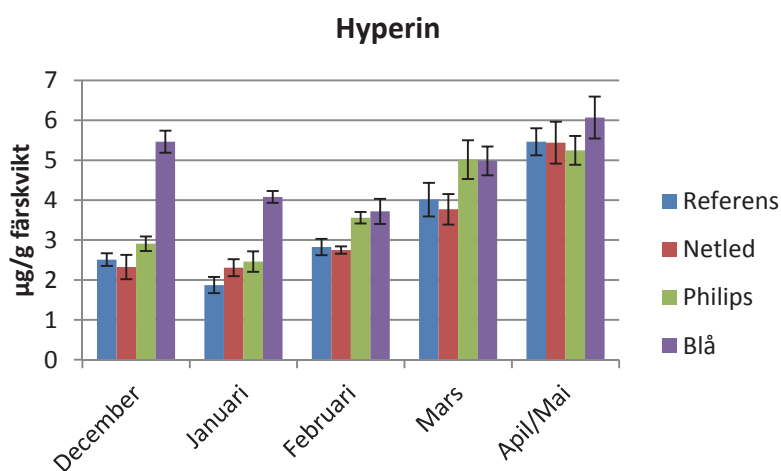


Bild 50. Hyperinhalten i tomater med SE (standarderror).

4.3. Tomatsmaktest

Ljusets kvalitet och styrka kan påverka tomatplantans tillväxt av rötter, blad och stam men även blomningstidpunkt och fruktsättning (Månsson, 2010). Forskning i Sverige har visat att det kan vara möjligt att förbättra smaken och doften hos kryddväxter om man belyser dem med LED-ljus (Nyrén, 2010).

I den här studien ville vi undersöka om olika typer av ljus kan styra förekomsten av smakämnen i tomatfrukten. Kan det vara möjligt att LED-belysta (hybrid) tomater skulle smaka godare än traditionellt belysta HPS-tomater? För att utreda om LED-belysning förändrar tomaternas smak arrangerades ett tomatmaktest i projektet Växthus-LED. Tomatsmaktestet anordnades den 12.2.2014 vid Yrkeshögskolan Novia i Vasa. Skolans studerande och personal deltog i undersökningen. Här beskrivs tomatmaktestets genomförande, presentation av resultat och diskussion.

4.3.1. Försöket

Plockning av tomat

Måndagen den 10.2.2014, kl. 7.00–8.00 plockades de tomater som skulle användas i smaktestet från Martin Siggs växthus i Pjelax, Närpes. Alla tomater plockades så mogna och jämnstora som möjligt. Tomaterna plockades från flera olika plantrader, höger och vänster plantsida, dock inte från någon sidorad vid väggarna eller vid ändan av någon plantrad.

Till testet plockades 40 + 40 tomater från HPS-området i blockväxthuset. Därefter plockades 40 tomater från området HPS+LED (LED-mellanbelysning från Netled Oy) i blockväxthuset. Slutligen plockades 40 tomater från åsväxthuset med HPS+LED (LED-mellanbelysning från Philips). Information om belysningstider och elinstallationseffekter finns presenterade i kapitlen 2.3 och 2.4.

Tomaterna placerades i märkta oanvända vita plastpåsar. Tomaterna förvarades i öppna plastpåsar i rumstemperatur (20 °C) i Novias utrymmen i Technobothnia. Samtliga tomater som plockades var av sorten Encore.

Försöksupplägg

Den 11.2.2014 skickades en inbjudan till alla Novias studerande och personal i Vasa. Onsdagen den 12.2.2014, kl. 9.00 delades tomaterna upp i små klyftor. Tomaterna delades först en gång på mitten och därefter vardera halva i tre lika stora delar. Klyftorna placerades på papperstallrikar som numrerades 1–4. Fyra tallrikar av vardera sorten, d.v.s. totalt 16 tallrikar med tomater erbjöds åt testpersonerna. Knivar och skärbräden tvättades mellan varje tomatsort och engångshandskar användes. Tallrik 1 bestod av HPS-tomater, tallrik 2 bestod av HPS+LED-tomater (Netled Oy LED-mellanbelysning), tallrik 3 bestod av HPS-tomater och slutligen tallrik 4 av HPS+LED-tomater (Philips LED-mellanbelysning).

Den 12.2.2014, kl. 9.30 inleddes tomatmaktestet vid Yrkeshögskolan Novia, Vasa, Technobothnia. Testpersonerna erhöll ingen information om vilka tomater som belysts med vilket ljus. Testpersonerna fick däremot information om att en del tomater hade belysts med HPS+LED och en del med enbart HPS-belysning.

Varje testperson erhöll ett frågeformulär, se *Bilaga 1*. I formuläret skulle man betygsätta tomaterna från de olika tallrikarna efter sin egen smakupplevelse. Man fick smaka ett obegränsat antal tomatklyftor. Man skulle smaka tomatklyftor från varje tallrik (1–4) i en specifik ordning. Högst uppe i varje formulär fanns beskrivet vilken tallrik man skulle börja provsmaka. Detta för att utesluta att alla skulle börja provsmaka från samma tallrik och att resultatet skulle bli missvisande.

Man skulle ge varje tallrik med tomater (1–4) ett vitsord mellan 1–5. Vitsordet 1 var bäst smak och vitsordet 5 var sämst smak. Vitsordsskalan var följande: 1 = mycket välsmakande, 2 = bra smak, 3 = medelmåttlig smak, 4 = dålig smak och 5 = riktigt dålig smak. Efter att man gett vitsord kunde man skriva ner en smakkommentar för vardera tallriken. I slutet av formuläret skulle man ange om man

klart kunde känna en smakskillnad mellan tomaterna från de olika tallrikarna. Slutligen frågades det efter testpersonens kön och så kunde man ge övriga kommentarer. Smaktestet pågick fram till kl. 14.30.



Bild 51. Bild från tomat smaktestet den 12.2.2014 vid Novia. Foto Daniel Sjöholm.

4.3.2. Analyser & resultat

Totalt deltog 93 testpersoner (72,0 % män, 26,9 % kvinnor och 1,1 % ospecificerad) från Yrkehögskolan Novia i undersökningen. Ur Bild 52 kan man se hur testpersonernas smakvitsord fördelar sig över de olika tomattallrikarna. För tallrik 1 (HPS) har flest testpersoner (32 stycken) svarat att tomaterna har bra smak. För tallrik 2 (HPS+LED, Netled Oy) har flest testpersoner (35 stycken) svarat att tomaterna har medelmåttlig smak. För tallrik 3 (HPS) har flest testpersoner (34 stycken) svarat att tomaterna har bra smak och slutligen för tallrik 4 (HPS+LED, Philips Oy) har flest testpersoner (39 stycken) svarat att tomaterna har medelmåttlig smak.

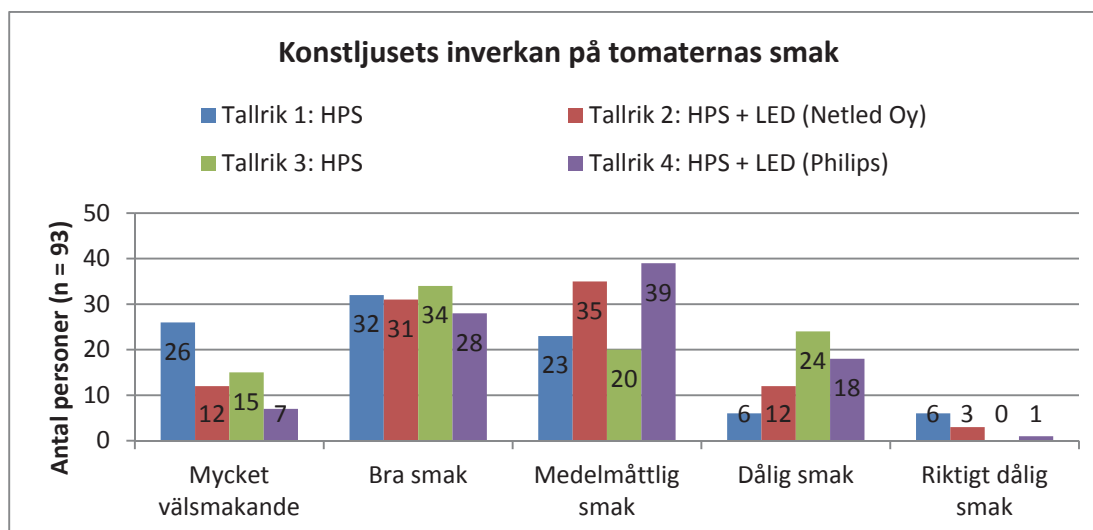


Bild 52. Fördelningen av tomattestpersonernas smakvitsord för de olika tomattallrikarna 1–4.

I Bild 53 kan man se hur tomattestpersonernas smakvitsord fördelar sig över de olika tomattallrikarna 1–4, här anges däremot smakvitsordens andel per tallrik i procent. Analyserar man de olika smakvitsorden så erhöll tallrik 1 (HPS) högsta procentuella andelen av rösterna för smakvitsordet mycket välsmakande (28 %). Vitsordet bra smak är nästan jämnt fördelat över de olika tomattallrikarna (i medeltal 33,6 %). Tallrik 2 (HPS+LED, Netled Oy) och tallrik 4 (HPS+LED, Philips) har erhållit en större procentuell andel (i medeltal 16,7 %) av smakvitsordet medelmåttlig smak än de tomattallrikar som belysts med traditionell belysning (HPS). Analyserar man vitsordet dålig smak så har tallrik 1 (HPS) erhållit lägst procentuell andel (6,5 %) och tallrik 3 (HPS) erhållit den högsta procentuella andelen (25,8 %). Tallrik 2 (HPS+LED, Netled Oy) en procentuell andel på 12,9 % och tallrik 4 (HPS+LED, Philips) på 19,4 %. Den procentuella andelen av vitsordet riktigt dålig smak för de olika tallrikarna är mycket lågt (0–6,5 %). Den största andelen (6,5 %) erhöll tallrik 1 (HPS).

Eftersom tomaterna på tallrik 1 och 3 var identiska (HPS-belysta) borde testpersonerna ha gett liknande vitsord åt tallrikar, vilket de inte gjorde. De vitsord som varierar mest är mycket välsmakande med 11,9 %, dålig smak med 19,3 % och riktigt dålig smak med 6,5 %.

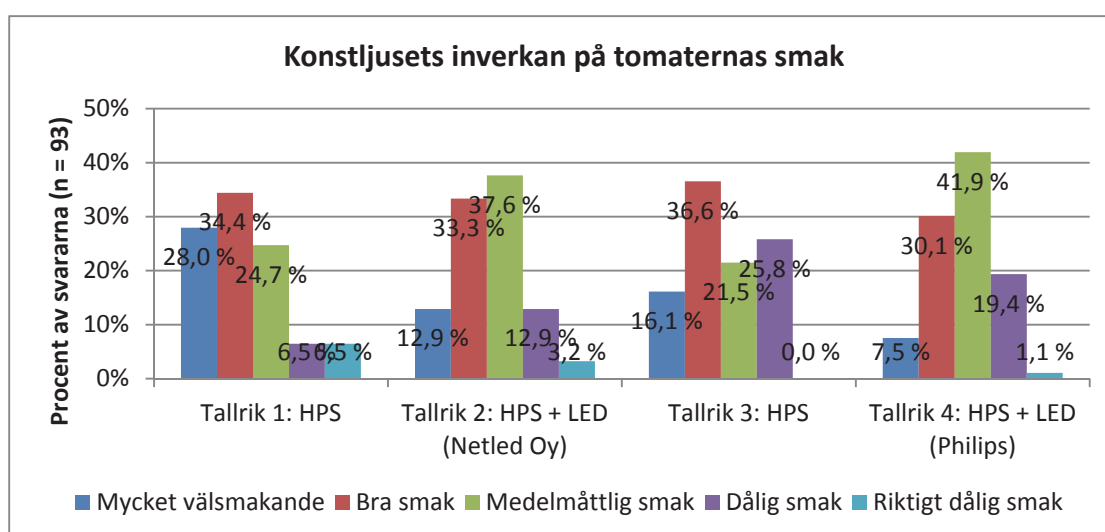


Bild 53. Fördelningen av tomattestpersonernas smakvitsord i procent för de olika tomattallrikarna 1–4.

För att få ett mått på hur testpersonerna har svarat för varje enskild tallrik beräknades ett s.k. smakmedeltal. Smakmedeltalet erhöles genom att beräkna ett medeltal för alla testpersoners vitsord per tallrik. Därefter beräknades standardavvikelsen för varje tallrik. I Bild 54 finns en graf över de beräknade smakmedeltalen för vardera tallriken med ± 1 standardavvikelse.

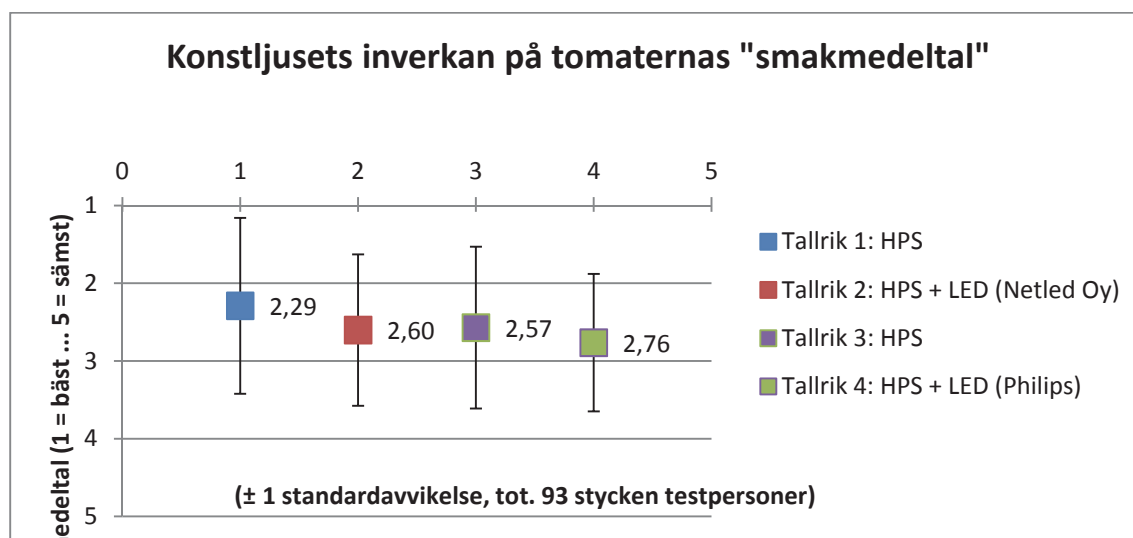


Bild 54. Beräknade tomat smakmedeltal med ± 1 standardavvikelse för vardera tomattallriken.

Analyserar man smakmedeltalen i Bild 54 kan man konstatera att standardavvikelsen är väldigt stor, vilket innebär att man inte kan dra någon slutsats om vilken tomattallrik som har fått det högsta eller lägsta vitsordet. Genom att analysera testpersonernas vitsord på ovanstående sätt utelämnar man dock den enskilda personens vitsordsfördelning, vilket även kan vara något vilseledande.

Genom metoden korstabulering är det möjligt att ytterligare studera resultaten genom att avgränsa resultaten till ett eller flera svarsalternativ, d.v.s. man kan filtrera svaren eller bryta ned dem. En kombination av dessa alternativ är också möjligt. Korstabeller är datatabeller som presenterar resultaten av en hel grupp av respondenter, samt resultat från undergrupper av respondenterna. Korstabeller möjliggör att man kan undersöka relationer inom de data som kanske inte skulle vara uppenbara vid analys av de totala enkätsvaren. (Wyse, 2012)

Respondenternas svar har analyserats med metoden korstabulering av Kendall Rutledge vid Yrkeskeshögskolan Novia, forskning och utveckling. Metoden har använts för att analysera om det finns någon tomat sort (tallrik 1–4) som testpersonerna tycker smakar bättre än någon annan. För korstabuleringsanalysen ignorerades smakvitsordet 3, medelmåttlig smak för att fokusera på de välsmakande tomaterna mot de med dålig smak. Smakvitsorden 1 och 2 tillhör gruppen välsmakande och smakvitsorden 4 och 5 gruppen dålig smak. Tomaterna på tallrik 1 (HPS) hade den största procentandelen med vitsordet 1 (mycket välsmakande) och vitsordet 5 (riktigt dålig smak). Korstabulerings-testet visar att testpersonerna ansåg att tomaterna på tallrik 1 (HPS) är de som är mest välsmakande.

Genom ett chi-två-test kan korstabulerings-testets tabeller analyseras djupare. Man kan t.ex. undersöka om det finns ett mönster i hur undersökningssdeltagarna har svarat eller om det kan anses vara slumpmässigt, d.v.s. man signifikantestast ett samband. Det första sambandet som testades var om respondenternas kön påverkade att tomattallrik 1 blev vald som den mest välsmakande. Testet visade att testpersonernas kön inte påverkade valet av tomattallrik. Det andra sambandet som testades var om det fanns en statistisk signifikant skillnad om smaktesterna trodde sig kunna känna en klar skillnad mellan de olika tallrikarna med tomater. I undersökningen frågades det om man klart kunde känna smakskillnader mellan tomaterna från de olika tallrikarna. 72,0 % av testpersonerna svarade att man nog kunde känna en klar smakskillnad medan 24,7 % svarade att de inte kände det.

Testet visade att det inte var någon skillnad. I Tabell 8 redovisas testpersonernas kommentarer från tomatsmaktestet. Kommentarererna är mycket varierande.

Tabell 8. Testpersonernas smakkommentarer för tomattallrikarna 1–4.

Tallrik 1	Tallrik 2	Tallrik 3	Tallrik 4
1 = 4, samma smak	Sur	Söt	Sötare
Rätt sur	Lite svagare	3 och 4 lika goda	
Very tasty and juicy	Taste a bit flat but juicy	Taste a bit flat but also juicy	Flat and not so juicy
Mildaste	Mindre söt	Minst smak	Syrlig första smak
Otroligt goda	Mycket välsmakande	Bra smak, kanske bäst	Jordigt första intryck
Smakade lite äldre än de andra	Mer smak än ettan	Mindre smak	Stark smak
Mera söt (väldigt god, men beror kanske på att det var den första jag smakade).			Sämre smak
OK			
Matsal			Vattnig

Tabell 9 visar de övriga kommentarerna som testpersonerna kunde ge i slutet av undersökningsformuläret. En intressant kommentar är att man kunde ha erbjudit vatten vid smaktestet för att skölja munnen mellan de olika tomatsorterna. Genom att skölja munnen med vatten kan man kanske ha känt eventuella smakskillnader bättre.

Tabell 9. Testpersonernas övriga kommentarer.

Övriga kommentarer
2 och 4 surare i smaken
Fat 2, 3 och 4 smakar vattniga
Jag tyckte att 1, 3 och 4 smakade likadant
Svårt att känna skillnader (borde kanske ha "nollställt paletten" emellan smakprov, dvs. sköljt med vatten)
Kände en liten skillnad
Nr 1 hade minst smak och nr 4 var lite besk. Ingen skillnad mellan 2 och 3
Kände skillnad mellan några, inte alla
Liten skillnad i syrlighet
Samtliga bättre än de billiga polska jag köpte sist
Alla lika goda
Lite skillnad men inte klart
Man kunde känna skillnad mellan 3 och 4

4.3.3. Diskussion

Genom att ha utfört ett tomatsmaktest med 93 försökspersoner så är slutsatsen att man inte kan säga att någondera tomatsorten smakar bättre än de andra. HPS+LED-tomater upplevs smaka samma som traditionellt belysta (HPS) tomater. 72 % av testpersonerna svarade dock att man kunde känna en klar smakskillnad mellan de olika tomaterna.

Om man använder sig av metoden korstabulering och utelämnar smakvitsordet 3 (medelmåttlig smak) så är det tallrik 1 (HPS) som respondenterna tycker smakar godast. Testpersonernas svar kan tolkas på olika sätt med olika analysmetoder.

Förbättringsförslag till tomatsmaktestet är att man kunde ha ändrat vitsordsskalan så att vitsordet 5 är bästa smaken och vitsordet 1 är den sämsta smaken. Många testpersoner kommenterade vitsordsskalan. Man kunde även ha utfört smaktestet igen för att verifiera att resultaten verkligen överensstämmer. Testpersonerna kunde i ett nytt smaktest erbjudas vatten för att skölja munnen med mellan varje tomatklyfta, för att eventuella smakskillnader kanske skulle kännas tydligare.

4.4. Jämförelse av effektivitet hos LED-armaturer

4.4.1. Inledning

I dagsläget belyses växthusodlingar huvudsakligen med högtrycksnatriumlampor (HPS). Som ett alternativ till dessa har under senare år en rad olika tillverkare presenterat LED-armaturer. Många är avsedda för mellanbelysning. I detta kapitel presenteras resultaten av en undersökning av ett antal sådana armaturer i laboratorieförhållanden.

LED-belysning kan potentiellt vara fördelaktig jämfört med HPS-belysning på tre sätt:

- 1) Den kan ha en högre PAR-effektivitet, alltså i förhållande till den förbrukade energin generera fler ljusfotoner inom det fotosyntetiskt aktiva området.
- 2) Den kan ha ett fördelaktigare spektrum inom PAR-området, d.v.s. en större andel av de genererade fotonerna finns inom de våglängdsområden som växten bäst kan tillgodogöra sig.
- 3) LED-ljuskällan är utspridd på flera punkter, vilket ger upphov till en jämnare fördelning av ljusupptaget hos växten.

Dessa tre faktorer samverkar och i slutändan är det ökat skördevärde per förbrukad elenergi som är måttet på hur bra belysningen är. I detta kapitel studeras endast den första faktorn. Kvaliteten hos spektra ignoreras alltså och likaså de geometriska aspekterna.

Tre olika LED-armaturer på den finländska marknaden jämförs i denna undersökning med en HPS-lampa. De LED-armaturer som undersöks är armaturer avsedda för mellanbelysning och har formen av horisontella stavar med lysdioderna utplacerade över armaturens längd. Armaturerna är av märkena Netled, Valoya och Philips. Jämförelseljuskällan är en 600 W HPS-armatur från Elektro-Valo försedd med en Philips Master Green Power lampa. Denna armatur är avsedd för toppbelysning och donerades till Novia av Helle Oy i Närpes.

Utöver växthusarmaturerna undersöktes också en armatur som inte i dagsläget finns kommersiellt tillgänglig för växthusmarknaden. Armaturen levererades av företaget Lumitar. Den är till skillnad från de tre från Netled, Valoya och Philips en punktljuskälla och armaturens fysiska utformning är inte gjord för mellanbelysning, men spektrum är enligt tillverkaren anpassat för växthusändamål. Den togs med i jämförelsen på grund av en påstått hög effektivitet. Tekniken bakom armaturen uppges vara ny och bättre än LED-teknik. Lumitar levererade i själva verket fyra olika armaturer med olika egenskaper. Endast den med bästa PAR-effektiviteten presenteras i denna rapport.

Vid mätningarna upptäcktes betydande variationer i uppmätt strålning beroende på vilken mätapparat som användes. Denna rapport innehåller därför också en jämförelse mellan olika mätutrustning för PAR-strålning.

4.4.2. Teori

Nomenklatur

Strålning anges i växthussammanhang antingen i energienheter, J, W, Wm^{-2} etc. eller kvantumenheter μmol , μmols^{-1} , $\mu\text{mols}^{-1}\text{m}^2$ etc. Utöver enheten som används finns också skillnader i vilket våglängdsområde som mäts. Ett vanligt område är det fotosyntetiskt aktiva området, benämnt PAR (photosynthetically active radiation), vilket omfattar våglängderna 400–700 nm. Strålning inom detta område kallas då ofta PAR-strålning. Vilket våglängdsområde som betraktas och vilka enheter som används är egentligen två skilda frågor, men vanligen kombineras dessa så att PAR-strålning anges i kvantumenheter och total kortvågig strålning (0–2500 nm) i energienheter. När strålningens inverkan på växternas kemiska processer, såsom fotosyntes, är i fokus är kvantumenheter att föredra eftersom det är mängden fotoner, snarare än strålningens energi som är av betydelse.

För PAR-strålning saknas etablerade beteckningar. I det följande följs en princip liknande den som används i (Ross & Sulev, 1999), varvid för kortvågig strålning (0–2500 nm) i energienheter används indexet E och för PAR-strålning (400–700 nm) i kvantumenheter används indexet PAR . Strålningsflödet från en ljuskälla kan alltså anges som kortvågiga energiflödet, Φ_E [W] eller som fotosyntetiskt aktiva fotonflödet, Φ_{PAR} [μmols^{-1}]. Strålningstätheten, d.v.s. strålningsflödet per area, vid en mottagande yta anges på motsvarande sätt av irradiansen, I_E [Wm^{-2}] eller fotosyntetiskt aktiva fotonflödestätheten I_{PAR} [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$].

Samband mellan energistorheter och fotonflödesstorheter

Spektrala irradiansen $I_{\lambda,E}$ [$\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$] anger hur irradiansen fördelas över spektrum, d.v.s. hur stor irradiansen är för strålning av en viss våglängd, λ . Spektrala irradiansen är alltså en funktion av våglängden. Totala irradiansen I_E fås som integralen av spektrala irradiansen över hela våglängdsområdet.

$$I_E = \int_0^{2500} I_{\lambda,E} d\lambda \quad (1)$$

På motsvarande sätt definieras den spektrala PAR-fotonflödestätheten, $I_{\lambda,PAR}$ [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{nm}^{-1}$] och för totala PAR-fotonflödestätheten gäller då den motsvarande ekvationen

$$I_{PAR} = \int_{400}^{700} I_{\lambda,PAR} d\lambda \quad (2)$$

Kvoten mellan spektrala PAR-fotonflödestätheten och irradiansen för en given våglängd är en central storhet då man vill omvandla mellan energienheter och kvantumenheter. För denna kvot gäller ekvationen

$$k_\lambda = \begin{cases} \frac{I_{\lambda,PAR}}{I_{\lambda,E}} = \frac{\lambda}{N_A hc} & \text{då } 400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 700 \text{ nm} \\ 0 & \text{annars} \end{cases} \quad (3)$$

där N_A är Avogadros tal, $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, h Plancks konstant $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ och c ljushastigheten $2,998 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

Av ekvation (3) framgår att spektrala omvandlingsfaktorn k_λ [$\mu\text{mol/Ws}$] är beroende av våglängden. För PAR-områdets gränsvåglängder 400 nm och 700 nm är den 3,34 $\mu\text{mol/Ws}$ respektive 5,85 $\mu\text{mol/Ws}$. Våglängdsberoendet innebär att omvandlingsfaktorn mellan (total) irradians och (total)

PAR-fotonflödestäthet, och likaså mellan energiflöde och PAR-fotonflöde, beror av ljuskällans energispektrum enligt

$$k = \frac{\Phi_{PAR}}{\Phi_E} = \frac{I_{PAR}}{I_E} = \frac{\int_{400}^{700} I_{\lambda,PAR} d\lambda}{\int_0^{2500} I_{\lambda,E} d\lambda} = \frac{\int_{400}^{700} \frac{1}{N_A hc} \lambda I_{\lambda,E} d\lambda}{\int_0^{2500} I_{\lambda,E} d\lambda} \quad (4)$$

I denna ekvation är både täljare och nämnare proportionella mot irradiansen och kvoten beror därför inte av irradiansen, utan endast av energispektrets form. Om man känner till energispektret för en ljuskälla kan alltså den totala omvandlingsfaktorn k beräknas. För ljuskällan i fråga är k en konstant. Däremot kommer k att få olika värden för olika ljuskällor.

Om man i stället för energispektret känner kvantumspektret bör detta först omvandlas till ett energispektrum.

Strålningskällans effektivitet

Ur ekonomisk synpunkt är kvoten mellan genererat PAR-fotonflöde och förbrukad eleffekt av central betydelse. Denna kvot saknar etablerat namn, men kallas här "PAR-effektivitet" och betecknas K . Den har enheten $\mu\text{mols}^{-1}\text{W}^{-1}$ eller μmolJ^{-1} . PAR-effektiviteten beror av två faktorer, dels ljuskällans strålningsverkningsgrad, d.v.s. hur stor andel av den använda elenergin som omvandlas till strålningsenergi, dels på omvandlingsfaktorn k för ljuskällans spektrum.

Strålningssensorer

Irradians från solstrålningen mäts vanligen med en pyranometer medan fotonflödestätheten mäts med en PAR-sensor, som vanligen är av fotodiodtyp och försedd med filter för att begränsa respon- sen till PAR-området, 400–700 nm. Även irradians kan mätas med sensorer av fotodiodtyp, men då med bredare filter. Det är dock svårt att täcka hela det kortvågiga området med en sensor av foto- diodtyp.

Responsiviteten, R , hos en sensor uttrycker utsignalen (mätvärdet) i förhållande till insignalen (verkligt värde hos en given fysikalisk storhet). Kvantumresponsiviteten hos en PAR-sensor anger uppmätt PAR-fotonflöde per verkligt fotonflöde mot sensorytan. En ideal PAR-sensor har en spektral kvantumresponsivitet som är 1 mellan 400 nm och 700 nm och 0 utanför dessa gränser. En verklig sensor har en kvantumresponsivitetskurva som approximerar detta ideal. I Bild 55 visas kvantumre- sponsiviteten för en typisk verklig PAR-sensor. Av Bilden framgår att responsiviteten är våglängdsbe- roende och avviker från 1, dock så att medeltalet för hela PAR-området är ungefär 1. För en ljuskälla med brett spektrum introducerar det här inget stort fel, men för en ljuskälla med ett smalt spektrum kan mätfelet bli större.

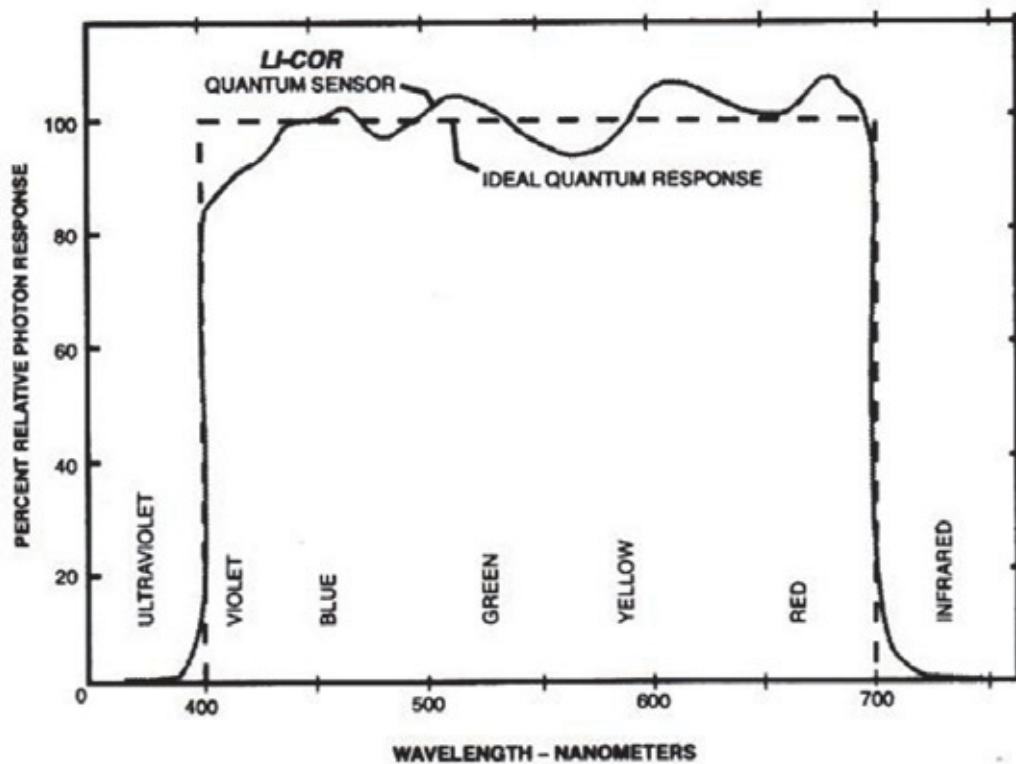


Bild 55. Spektral responskurva för LI-COR LI-190 enligt instruktionshandboken (december 2005).

Vissa tillverkare anger responsiviteten som uppmätt PAR-fotonflöde per verkligt energiflöde. Den ideala kurvan är då den som uttrycks av ekvation (3). Bild 56 visar en responsivitetskurva angiven på detta sätt. Även här ses att den verkliga responsiviteten avviker från den ideala.

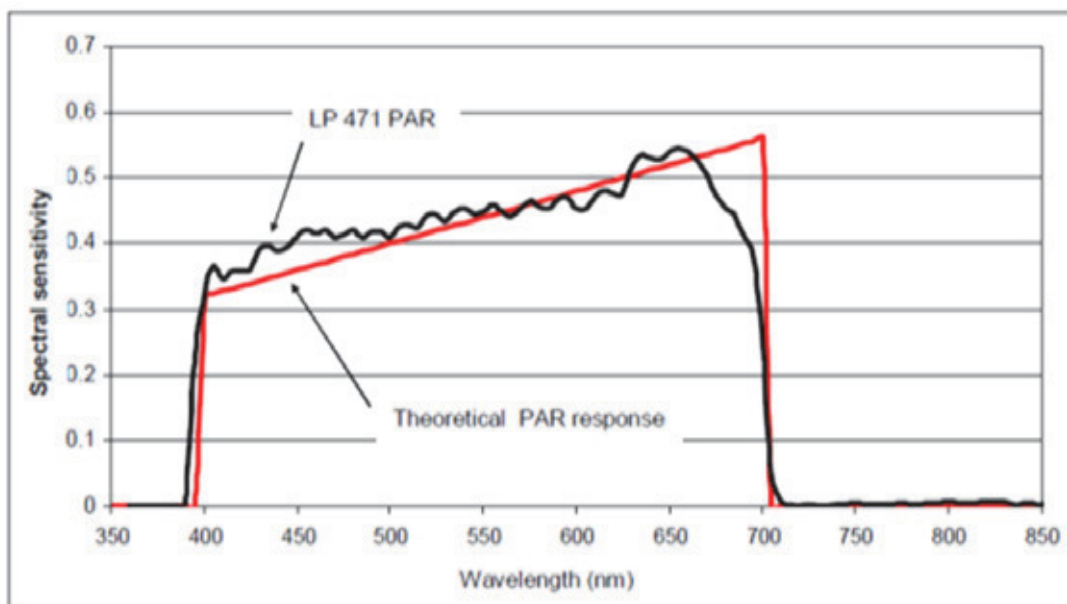


Bild 56. Spektral responskurva [$\mu\text{mols}^{-1}\text{W}^{-1}$] för LP471 PAR enligt information på DeltaOHMs hemsida (DeltaOHM, 2013). LP471 PAR är sensorn till en av de mätare som används i undersökningen. Produktinformationen på hemsidan avviker betydligt från den information som ges i handboken för produkten (Bild 60). En kontroll med tillverkaren visade att produktens specifikationer har ändrats trots att modellbeteckningen är den samma.

4.4.3. Jämförelse av PAR-mätare

Mätningarna gjordes initialt för jämförelsens skull med tre olika uppsättningar mätapparatur av olika fabriker. Den utrustning som användes var:

- 1) Apogee Spektroradiometer PS-100
- 2) DeltaOHM Photoradiometer HD2102.2 med PAR-sensor
- 3) LI-COR LI-190 Quantum sensor med Fluke 189 Multimeter

Mätningarna gav kraftigt divergerande resultat. Därför gjordes en lite mer djupgående analys för att utreda vilken utrustning som skulle betraktas som mest tillförlitlig.

För varje ljuskälla mättes fotonflödestätheten på olika avstånd och med olika infallsvinklar med de olika mätutrustningarna. Resultaten med de olika mätarna jämfördes sedan parvis. Resultaten av sådana jämförelser visas i Bild 57, Bild 58 och Bild 59. Av Bilderna framgår att det finns betydande skillnader mellan mätarna och att skillnaderna också beror av vilken ljuskälla som används. Så erhålls t.ex. med DeltaOHM ett värde som är betydligt mindre än med Apogee när strålningen kommer från Netleds armatur (Bild 57) medan situationen är den omvända när ljuset kommer från HPS-lampan (Bild 58).

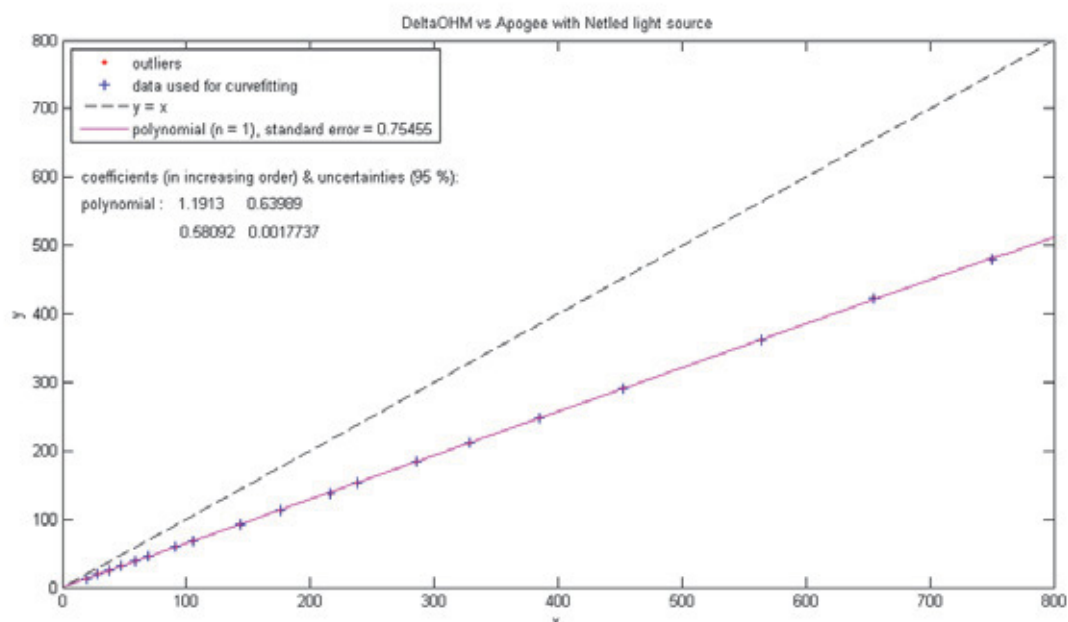


Bild 57. Jämförelse av uppmätta PAR-fotonflödestätheter när Netleds armatur används som ljuskälla. På vertikala axeln värdet enligt DeltaOHMs PAR-mätare, på horisontella axeln värdet enligt Apogees spektroradiometer. DeltaOHM ger för denna ljuskälla betydligt lägre värden än Apogee. Den streckade linjen motsvarar fullständig överensstämmelse mellan instrumenten.

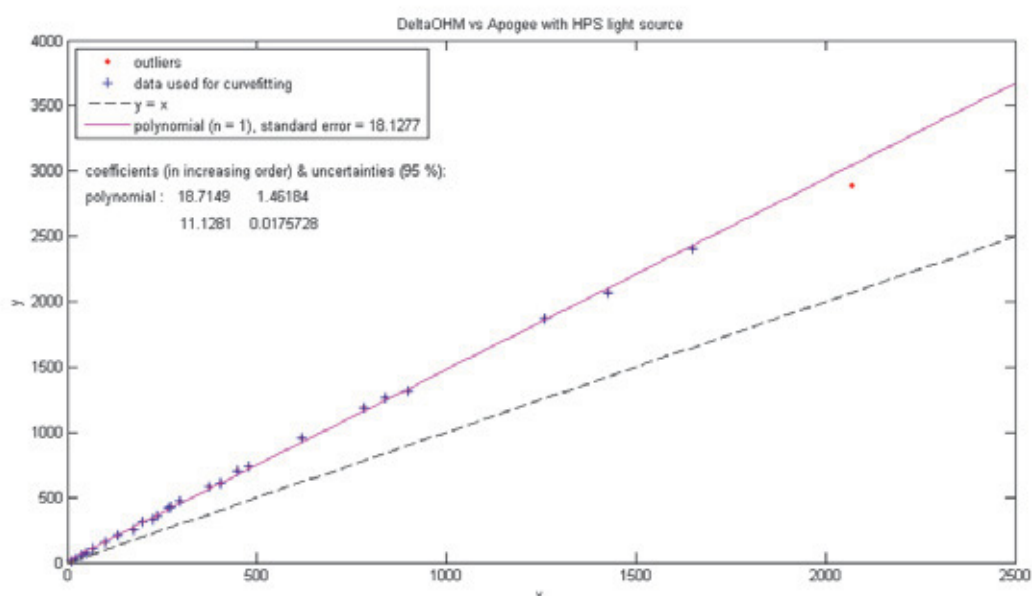


Bild 58. Jämförelse av uppmätta PAR-fotonflödestätheter när HPS-lampa används som ljuskälla. På vertikala axeln värdet enligt DeltaOHMs PAR-mätare, på horisontella axeln värdet enligt Apogees spektroradiometer. DeltaOHM ger för denna ljuskälla betydligt högre värden än Apogee. Den streckade linjen motsvarar fullständig överensstämmelse mellan instrumenten.

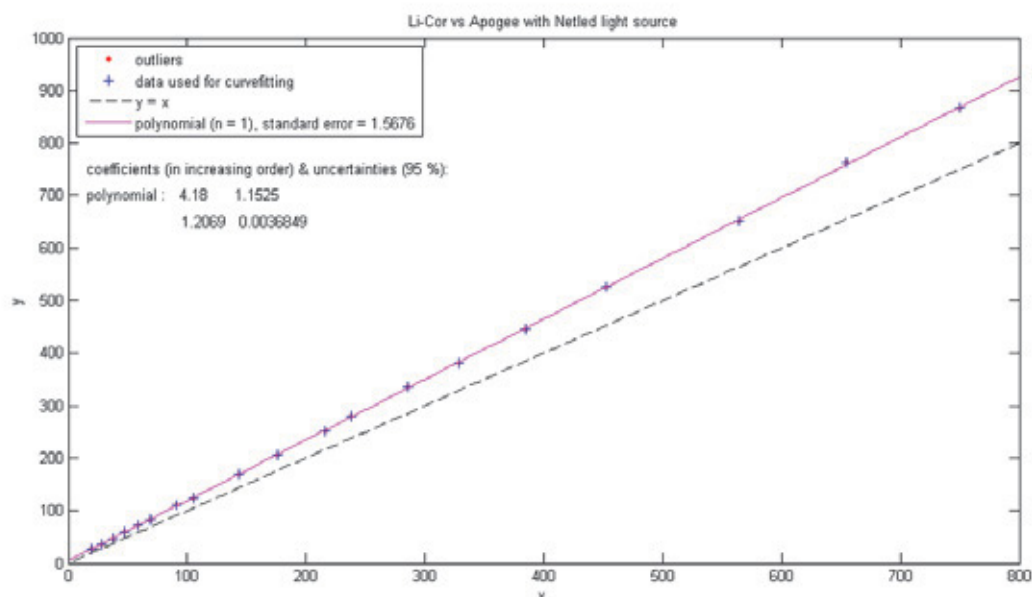


Bild 59. Jämförelse av uppmätta PAR-fotonflödestätheter när Netleds armatur används som ljuskälla. På vertikala axeln värdet enligt Li-Cors PAR-mätare, på horisontella axeln värdet enligt Apogees spektroradiometer. Li-Cor ger högre värden än Apogee. Den streckade linjen motsvarar fullständig överensstämmelse mellan instrumenten.

Bilderna ovan visar också att mätarna är linjära i förhållande till varandra. Interceptet är visserligen i några fall signifikant, men ändå litet. Mätvärden från olika mätare kan därför utan större fel betraktas som sinsemellan direkt proportionella. För den fortsatta analysen görs detta och i Tabell 10 redovisas hur mätvärdena då förhåller sig till varandra.

Tabell 10. Uppmätta skillnader mellan mätarna med olika ljuskällor. Det mätvärde som Apogee ger betraktas här som referensvärde och får därför värdet 100 %.

	Apogee	Li-Cor	DeltaOHM
HPS	100 %	113 %	155 %
Netled	100 %	117 %	65 %
Valoya	100 %	101 %	105 %
Philips	100 %	113 %	76 %

Att mätarskillnaderna beror av ljuskällan antyder att skillnaderna åtminstone delvis härrör från sensorernas spektrala respons. Därför gjordes en beräkning av mätarnas förväntade visning utgående från uppmätta spektrum och de responskurvor som tillverkarna gav för de olika sensorerna. För Apogee saknas responskurva, men eftersom en spektrometer är digitalt kalibrerbar individuellt för de olika våglängderna antogs en ideal respons. För DeltaOHM fanns endast en relativ responskurva tillgänglig (Bild 60). Den normerades därför för ett platt kvantumspektrum inom PAR-området. Den resulterande responskurvan ses i Bild 61. Total respons för olika mätare med olika ljuskällor, d.v.s. resultatet av en viktning av mätarens responskurva med ljuskällans spektrum (Bild 63) ses i Tabell 11.

Typical response curve

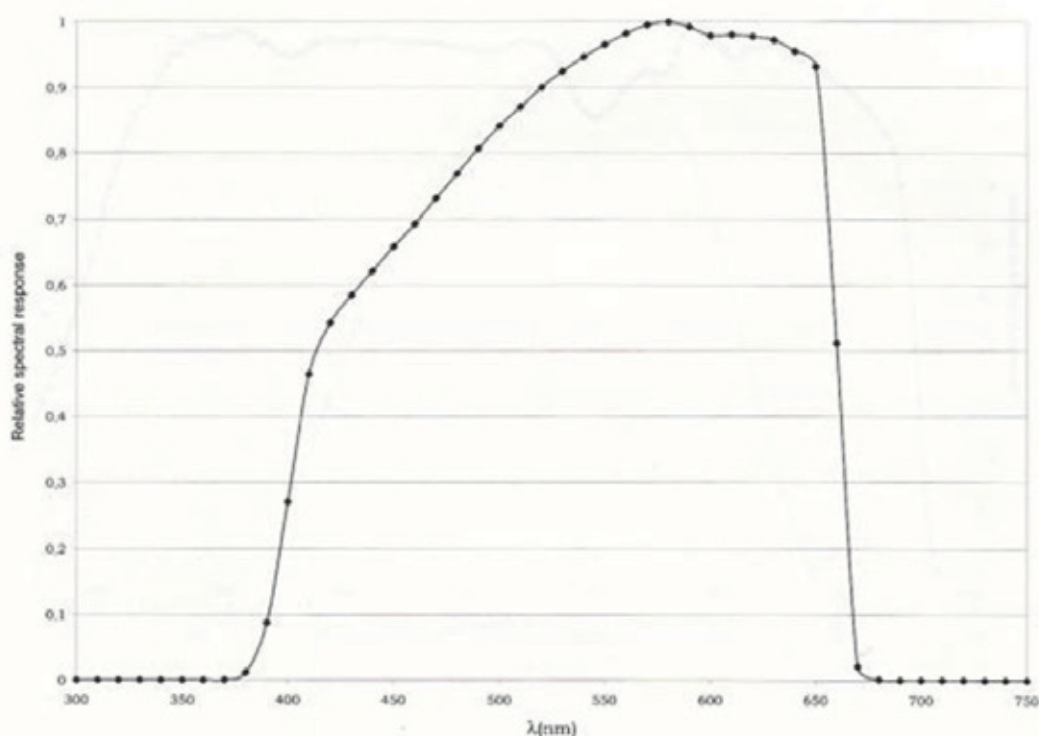


Bild 60. Spektral responskurva för LP471 PAR enligt bruksanvisningen för strålningsmätaren HD2102.2 (oktober 2005).

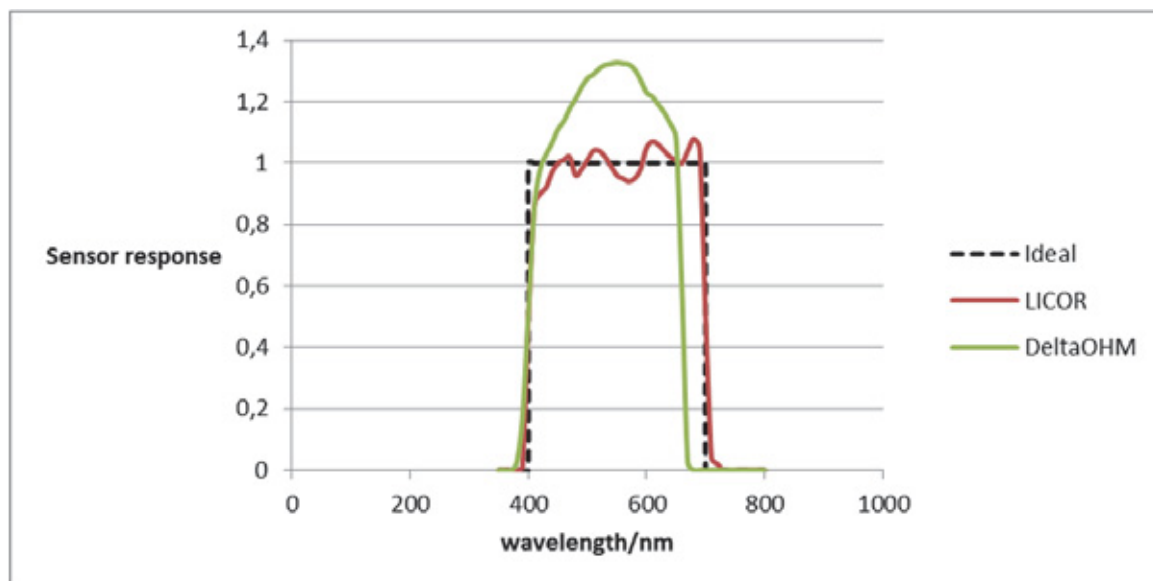


Bild 61. Responskurvor för de olika instrumenten. För Apogee saknas responsinformation. Den antas vara ideal.

Tabell 11. Förväntade skillnader mellan mätarna enligt angivna responskurvor. För Apogee förväntas inget fel p.g.a. spektral respons och det betraktas här som referensvärde.

	Apogee	Li-Cor	DeltaOHM
HPS	100 %	113 %	116 %
Netled	100 %	117 %	52 %
Valoya	100 %	101 %	68 %
Philips	100 %	113 %	68 %

En jämförelse av Tabell 10 och Tabell 11 visar att de uppmätta skillnaderna är större än de förväntade. Det kan delvis bero på att även Apogees responskurva signifikant avviker från den ideala. Men även om Li-Cor, med ganska små avvikelser i förväntad respons, tas som referens kvarstår oförklarade skillnader gentemot DeltaOHM. Det måste förmodligen tolkas så att de responskurvor som tillverkarna uppger inte är korrekta.

Slutsatsen av mätjämförelserna är att DeltaOHMs mätare inte är tillförlitlig. Denna slutsats kan dras redan på basen av responskurvan (Bild 60). Responskurvan avviker rejält från ideal respons, i synnerhet mellan 650 nm och 700 nm. För de två övriga mätarna är det svårt att avgöra vilken som är mer tillförlitlig. För Apogee uppges en kalibreringsonoggrannhet om 10 %, medan den sammansatta onoggrannheten för Li-Cor uppges till 6 %. (På motsvarande sätt uppges den sammansatta onoggrannheten för DeltaOHM till 8 %, vilket i ljuset av responskurvan i Bild 60 och resultaten i Tabell 10 förefaller felaktigt lågt.) 10 % och 6 % ger en förväntad skillnad om högst 12 % mellan Apogee och Li-Cor. Den verkliga skillnaden är åtminstone för Netleds armatur större än så och det finns alltså skäl att anta onoggrannheten är större än de angivna värdena.

4.4.4. Mätmetod för bestämning av strålningsflöde

Strålningsmätningarna utfördes i ett rum inrett för optometriska mätningar. Rummets väggar och tak var svartmålade och golvet täckt med svart väv. För mätningarna tillverkades en gonometrisk mätrigg med cylindergeometri. Mätriggen består av en bom fäst i två armar som roterar kring en axel (se Bild 62). Mätriggen var 2,4 m lång för att rymma armaturerna i längsriktning. Armaturerna placerades längs mätriggens axel. Bommen fanns sålunda på konstant avstånd (ca 0,5 m) från armaturen. Fotonflödestätheten mättes sedan vid ett antal markerade punkter längs bommen och armarna av mätriggen. Mätningarna upprepades med armarna låsta i olika vinklar. Sensorn hölls med basen i kontakt med bommen respektive armarna och dess yta hade därför samma riktning som cylinderns mantelyta respektive bas/toppyta. På så sätt mättes fotonflödet i en stor mängd punkter utspridda på en cylinders hela yta, dock så att symmetri utnyttjades där möjligt. En bakgrundskompensation för reflekterad strålning från väggar m.m. gjordes genom att mäta strålningen i mätpunkterna med den direkta strålningen från armaturen skuggad. När detta värde subtraherats från bruttostrålningen erhöles för varje punkt ett nettovärde, som representerade den direkta strålningen. En integration över cylinderns yta gav sedan det totala nettoflödet genom ytan av en cylinder som omsluter armaturen och därmed det totala fotonflödet från armaturen.

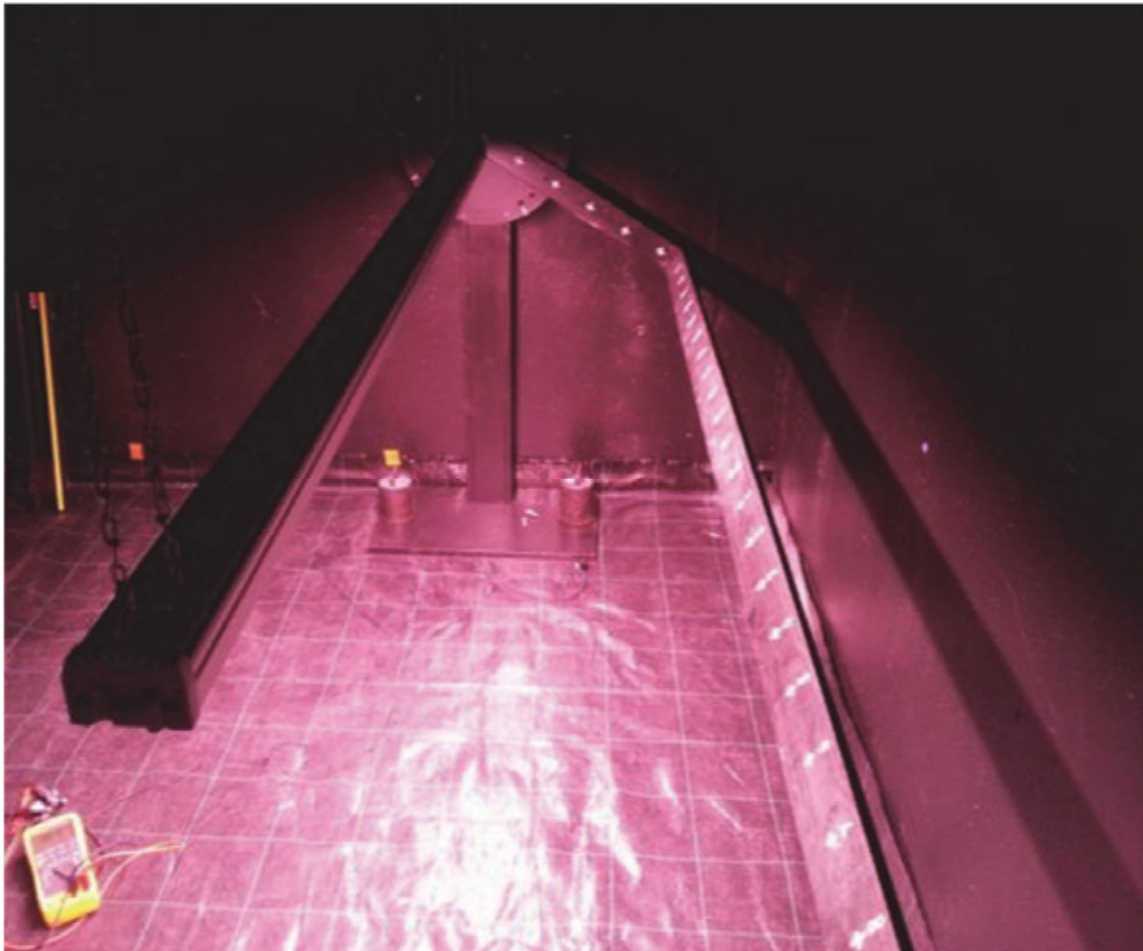


Bild 62. Mätriggen och en armatur upphängd längs mätriggens axel. Foto Daniel Sjöholm

4.4.5. Jämförelse av armaturer

Spektra

Kvantumpektra för de olika armaturerna ses i Bild 63. Spektra är uppmätta med Apogee. Philips och Netled har kraftiga toppar i blåa och röda området. Det röda ljuset dominerar. Även Valoya har en topp i röda och i blåa området, men dessa toppar är betydligt bredare och dessutom finns strålning i det gula området. Det visuella intrycket av ljuset från Valoyas armatur är följdriktigt klart vitare än för Netled och Philips som har ett distinkt lila sken. Lumitars armatur ger ett mycket vitt ljus. De facto ser spektrum ut som för en normal vit LED. Undersökningen ger egentligen inga resultat som tyder på att det är fråga om något annat än en ordinär vit LED. HPS-armaturen strålar helt enligt förväntningarna främst inom det gula området.

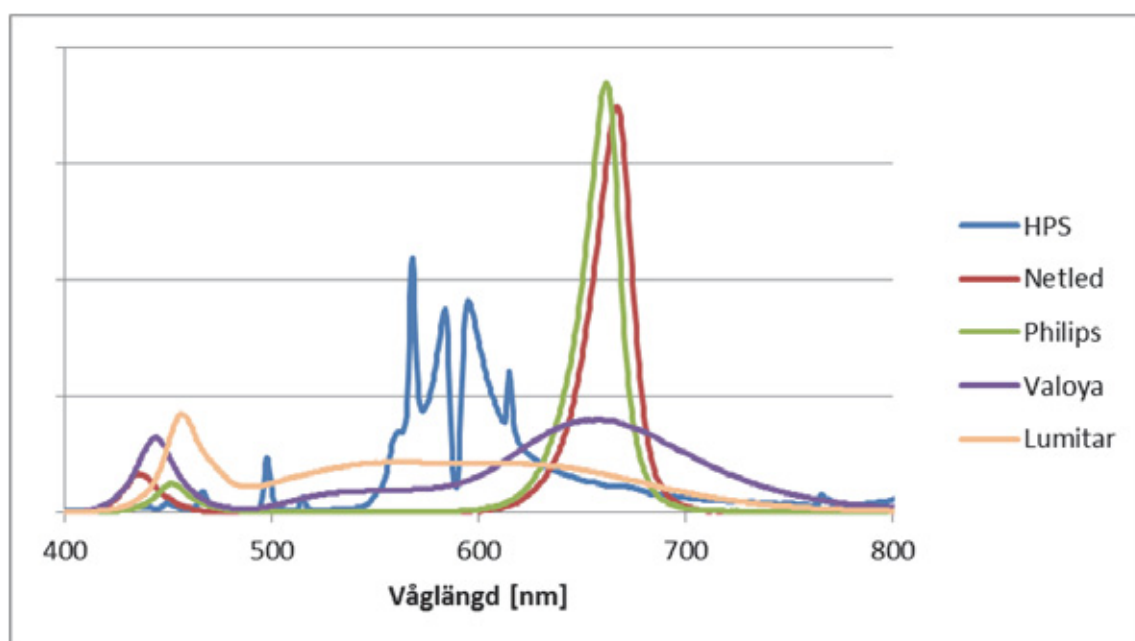


Bild 63. Normaliserade kvantumpektra för de olika armaturerna.

PAR-fotonflöde och PAR-effektivitet

Undersökningen av mätapparatur för PAR-strålning (kap 3.9.3) visar att en av de tre undersökta mätarna (DeltaOHM) är klart mindre tillförlitlig än de övriga två. När ingendera av de övriga två, Apogee och Li-Cor, klart framgår som mest tillförlitlig uppges värdena enligt båda mätarna i presentationen av mätresultaten för de olika armaturerna. Mätningarna utfördes av praktiska orsaker med Li-Cors mätare och skalades sedan om för att ge Apogees motsvarande värde. Skalningen gjordes baserat på koefficienterna i Tabell 10.

Resultatet av mätningarna presenteras i Tabell 12 samt Bild 64 och Bild 65. De uppmätta värdena enligt Li-Cor stämmer för Philips och HPS väl överens med de angivna. I bägge fallen ger Apogee ett lägre värde. Här bör emellertid påpekas att det fotonflödesvärde som HPS-tillverkaren anger är för enbart lampan. För armaturen finns inget värde tillgängligt. Det angivna värdet borde alltså korrigeras med armaturens förluster. Då kan Apogee ha lika god eller bättre överensstämmelse än Li-Cor. För Valoya och Netled är uppmätta värden 21–35 % lägre än angivna värden. Den armatur från Netled som användes i mätningarna var begagnad, medan angivna data gäller ny armatur. Enligt Netled är åldringseffekten "några procent" och förklarar därför inte skillnaden. För Lumitars del finns inget angivet värde att jämföra med.

Både fotonflödet och effekten för HPS-lampan är klart större än för övriga. Det beror på att den är avsedd för toppbelysning. En HPS-lampa för mellanbelysning skulle effektmässigt vara mer jämförbar med LED-armaturerna.

I fråga om uppmätt PAR-effektivitet ger Philips LED-armatur bäst resultat. Netleds armatur och HPS-armaturen är ungefär likvärdiga, medan Valoyas och Lumitars armaturer ger den lägsta PAR-effektiviteten, 10–20 % lägre än HPS-armaturen. Värdet för Philips LED-armatur är cirka 25 % högre än HPS-armaturens och 40–60 % högre än de sämsta LED-armaturernas.

Tabell 12. PAR-fotonflöde och PAR-effektivitet för de olika armaturerna. För varje armatur ges tillverkarens angivna värde (om tillgängligt) och uppmätt värde med Li-Cors mätutrustning samt beräknat ekvivalent värde med Apogees utrustning.

		PAR-fotonflöde $\mu\text{mol/s}$	Eleffekt W	PAR-effektivitet $\mu\text{mol/Ws}$
HPS	angivet värde	1100	675	1.63
	uppmätt värde (Li-Cor)	1073	646	1.66
	beräknat värde (Apogee)	950	646	1.47
Philips	angivet värde	220	105	2.10
	uppmätt värde (Li-Cor)	224	108	2.07
	beräknat värde (Apogee)	198	108	1.84
Valoya	angivet värde	317	192	1.65
	uppmätt värde (Li-Cor)	247	189	1.31
	beräknat värde (Apogee)	244	189	1.29
Netled	angivet värde	440	200	2.20
	uppmätt värde (Li-Cor)	336	195	1.72
	beräknat värde (Apogee)	287	195	1.47
Lumitar	angivet värde	-	-	-
	uppmätt värde (Li-Cor)	116	86	1.34
	beräknat värde (Apogee)	113	86	1.31

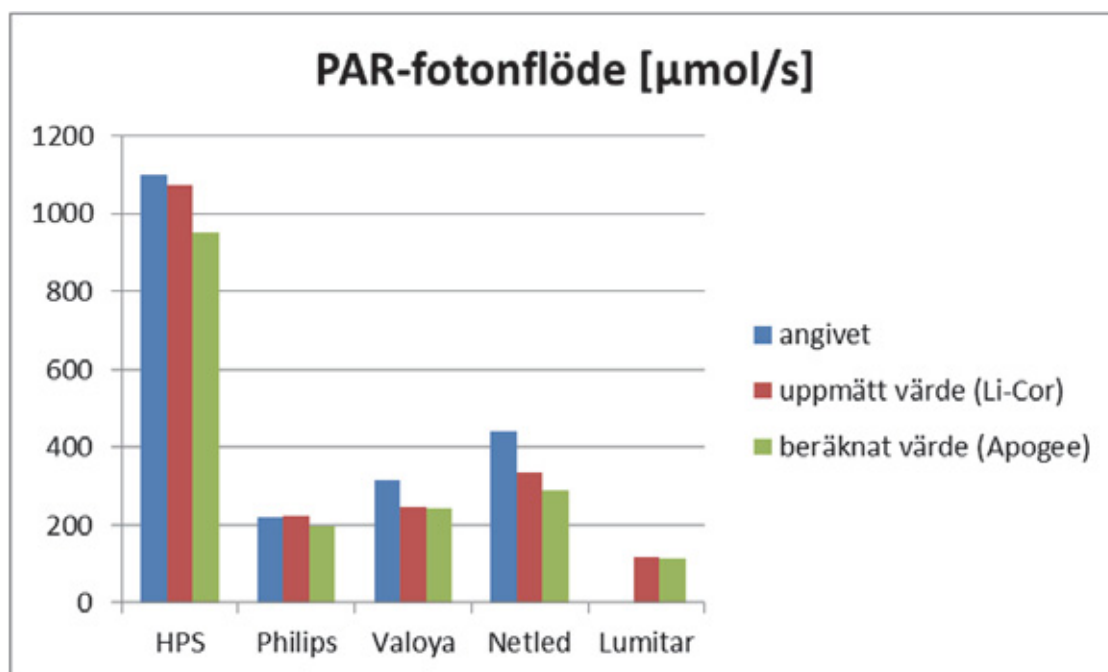


Bild 64. PAR-fotonflöde från de olika armaturerna. För varje armatur ges tillverkarens angivna värde (om tillgängligt) och uppmätt värde med Li-Cors mätutrustning samt beräknat ekvivalent värde med Apogees utrustning.

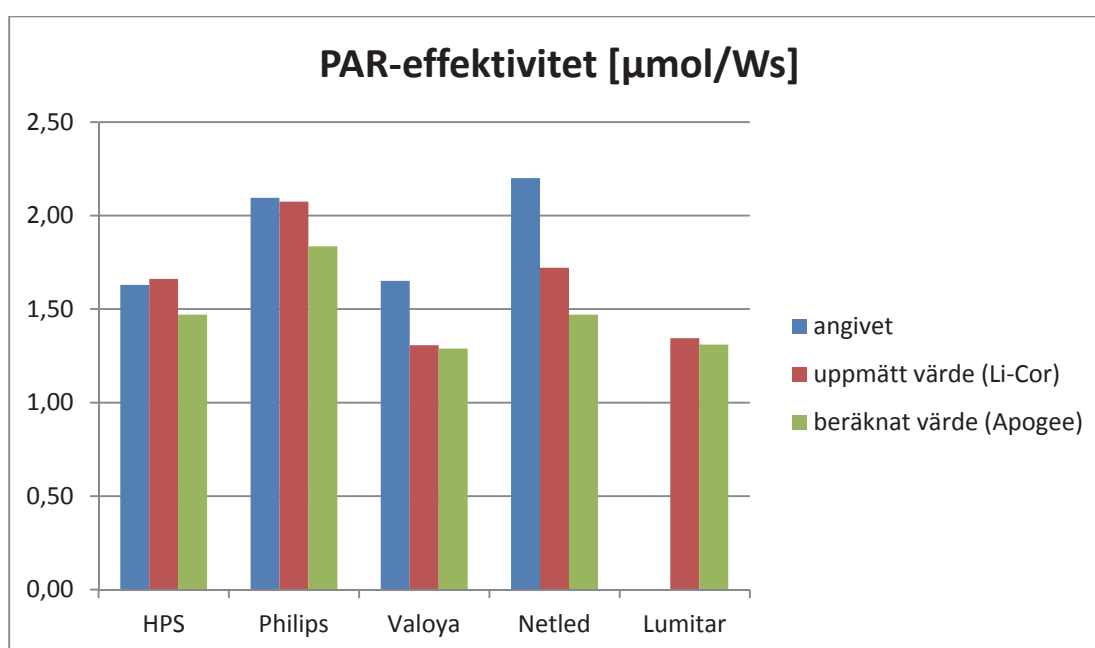


Bild 65. PAR-effektivitet för de olika armaturerna. För varje armatur ges tillverkarens angivna värde (om tillgängligt) och uppmätt värde med Li-Cors mätutrustning samt beräknat ekvivalent värde med Apogees utrustning.

4.4.6. Diskussion

PAR-effektivitetsmätningarna visar att det finns betydande skillnader i PAR-effektivitet mellan LED-armaturerna, och att endast en av dem presterar bättre än HPS-armaturen. På rent radiometrisk grund är det alltså endast Philips LED-armatur som har potential att ge ett ekonomiskt mervärde. Huruvida den 25 % bättre PAR-effektiviteten är tillräcklig för att motivera investeringskostnaden faller utanför ramen med denna undersökning.

Jämförelsen ovan gäller alltså en HPS-armatur för toppbelysning och LED-armaturer för mellanbelysning. Huruvida detta är en rättvis jämförelse kan naturligtvis diskuteras. PAR-effektiviteten för en HPS-mellanbelysning kan avvika från den för HPS-toppbelysning. Generellt brukar lampor med större effekt vara mer effektiva än lampor med lägre effekt. Å andra sidan blir det ingen absorption i reflektormaterialet vid mellanbelysning med HPS-lampor. För en jämförelse mellan HPS-mellanbelysning och LED-mellanbelysning är PAR-effektivitetsvärdena som presenterats ovan alltså inte nödvändigtvis helt korrekta. Om man däremot överväger en belysningslösning med enbart toppbelysning mot en lösning med reducerad toppbelysningseffekt kompletterad med LED-mellanbelysning är de ovan presenterade värdena högst relevanta. Då bör man emellertid också beakta att mellanbelysning i sig ger en bättre spridning av ljuset i plantbeståndet, en faktor som redan i sig kan ge betydande positiva effekter helt oberoende av PAR-effektiviteten. I det sammanhanget bör igen påpekas att dessa positiva effekter förmodligen blir större med LED-armatur genom att ljuskällan är utspridd över armaturens hela längd till skillnad från HPS-lampor som i stort sett utgör punktkällor.

En annan faktor som bör beaktas är hur apparaturen åldras. I samtliga fall kan man förvänta sig en nedgång i PAR-effektivitet över tid. För lysdioder (LED) sker en långsam gradvis nedgång över tid. Även HPS-lampor åldras med reducerat strålningsflöde som resultat. Nedgången är i sig snabbare än för lysdioder, men relativt livslängden är skillnaden mindre. För Philips Green Power CG påstås dock att ljuseffekten hålls konstant över lampans livstid (Philips, 2010). HPS-armaturens elektriska styrningsutrustning åldras också med sämre verkningsgrad som resultat. Även reflektorer åldras genom oxidation och nedsmutsning. För HPS-armaturen kan detta vara en väsentlig faktor, medan varken Philips eller Valoya verkar använda reflekterande ytor. Netled utnyttjar i viss mån reflektion. I Lumitars armatur verkar den reflekterande ytan vara väl skyddad. I stället har den en separat glasyta som de övriga saknar.

Som konstaterades i inledningen innefattar en rättvis bedömning av de olika ljuskällorna förutom PAR-effektiviteten även spektrumets kvalitet och geometriska beaktanden. Vad gäller spektrumets kvalitet är Netled och Philips ganska likartade, medan Valoya har ett bredare spektrum. Netled och Philips är så pass likartade att spektrala kvalitetsskillnader knappast kan kompensera den högre PAR-effektiviteten hos Philips. Valoya igen ligger så pass långt efter Philips i PAR-effektivitet att det är svårt att tro att spektrala kvalitetsskillnader skulle uppväga skillnaden. De geometriska aspekterna är mycket svårbedömda. Armaturerna skiljer sig åt betydligt på denna punkt, vissa riktar ljuset nedåt, andra åt sidorna och här inverkar också hur man väljer att installera armaturen.

Sammanfattningsvis verkar Philips vara den av de undersökta LED-armaturerna som har bäst potential att konkurrera med HPS-belysning. Lumitar saknar kvaliteter som skulle göra den intressant för växthusanvändning.

5. Sammanfattning

5.1. Växthusodlaren kommentarer

Projektets försöksväxthusodlare Martin Sigg anser sig inte ha sett någon större skillnad mellan HPS+LED rader och HPS referensrader. Odlaren har t.ex. inte lagt märke till någon skillnad i uppmätta ledningstal, användningen av biologiska bekämpningsmedel, humlornas orientering, livslängd eller bevattningsbehov.

Det som odlaren dock har lagt märke till är att tomatplantorna vid HPS+LED har varit något grönnare, "fräschare", t.ex. bladen har varit större och grönnare än vid övriga rader under vinterdelen av odlingssäsongen, alltså den mörkaste delen. Det som odlaren också lagt märke till är att gångarnas golv vid HPS+LED verkar vara upplysta med det röda och blå ljuset från LED-armaturerna, vilket han upplever som en ljusförlust. Odlaren är också av den åsikten att växthusodlaren i eventuella framtida växthusprojekt borde vara medlem i projektets styrgrupp.

Martin Sigg valde att inte investera i Netleds lampor efter att projektet avslutats, utan istället installerade han Philips GreenPower LED (dubbelinstallation) i hela blockväxthuset hösten 2014.

5.2. Allmän diskussion

I odlingsförsöket i Pjelas användes LED-mellanbelysning från företaget Netled Oy med namnet Hortishine. Vid jämförelse av olika växtlamptillverkares offerter i projektets början ansågs Netled Oy ha den bästa armaturen på marknaden. Vid mätningar utförda i laboratorieförhållande i projektets slutskede konstaterades det att Hortishine inte uppnådde det fotonflöde och den PAR-effektivitet som utlovades. PAR-effektivitetsmätningarna visar att det finns betydande skillnader i PAR-effektivitet mellan LED-armaturerna, och att endast en av dem presterar bättre än HPS-armaturen. På rent radiometrisk grund är det endast Philips LED-armatur (GreenPower LED) som har potential att ge ett ekonomiskt mervärde. Philips LED-armaturen är ca 25 % effektivare än en HPS 600 W toppbelysningslampa.

I laboratorieförhållande jämfördes även olika PAR-mätare. Stora skillnader mellan de olika mätarna konstaterades. Om man själv vill mäta PAR-strålning vid konstljus i ett växthus bör man vara noggrann att välja en sådan mätare som har en responskurva som täcker hela PAR-området d.v.s. 400–700 nm. Slutsatsen av mätjämförelserna är att DeltaOHMs mätare inte är tillförlitlig. Denna slutsats kan dras på basen av responskurvan. Responskurvan avviker rejält från ideal respons, i synnerhet mellan 650 nm och 700 nm.

Vid försöksområdena i växthuset utfördes punktljutmätningar med förhoppning om att utreda hur ljusintensiteten varierar vid olika punkter runt plantan, i gången, mellan plantrader och därefter beräkna ett ungefärligt värde på hur mycket ljus från konstbelysningen som når fram till plantan. En ljusmättningsmodell har uppgjorts och mätningar har utförts. Olyckligtvis valdes en sådan PAR-mätare (DeltaOHM) vars responskurva inte omfattade hela PAR-området och därmed erhöles värden som systematiskt underskattar strålningen vid HPS+LED i förhållande till HPS. Punktljutmätningarna utfördes före laboratoriemätningarna. Enligt vår ljusmättningsmodell och den PAR-mätare vi använde oss av får plantorna vid HPS+LED i medeltal totalt 98,4 % av den PAR-strålning som plantorna vid HPS erhåller. Vid HPS+LED erhåller plantorna närmast LED-armaturen i medeltal ca 19,6 % mera PAR jämfört vid HPS. Medan samma plantor fast vid gångsidan erhåller i medeltal ca 13,2 % lägre PAR jämfört med HPS. I planttopparna är ljusintensiteten naturligtvis lägre vid HPS+LED eftersom HPS-eleffekten sänkts. Inga säkra slutsatser kan dras på basen av detta försök.

Under försöksperioden installerades en stationär pyranometer och en stationär PAR-sensor (quantum sensor) i vardera försöksområdet. Pyranometrarna har gett information om hur växthuset har belysts och vilka ljusintensitetsnivåerna [W/m^2] har varit i plantornas topphöjd under hela odlings säsongen. Från oktober 2013 till februari 2014 har medel $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ per månad varit ca 20–25 % lägre vid HPS+LED än vid HPS. PAR-sensorn har uppmätt PAR-intensiteten [$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$] under hela säsongen på avståndet 2,45 m från golvet och uppåt (ca 0,5 m under LED-armaturen). Genom att mäta här har vi bl.a. fått information om hur LED-armaturerna varit tända samt hur PAR-nivåerna specifikt vid denna mätpunkt varierat under hela odlings säsongen. Under den period när regelbundna belysningstider använts (1.11.2013–5.3.2014) har det i medeltal belysts med $(16,7 \pm 3,3) \text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$ vid HPS+LED och vid HPS $(8,4 \pm 4,1) \text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$, d.v.s. med faktorn två högre vid HPS+LED. Observera att detta inte gäller för hela plantan.

Mätboxar med temperatur- och relativa fuktighetssensorer installerades vid tre mätnivåer i försöksområdena och data har samlats in under hela försöksperioden. Uppmätta skillnader är små. Den största temperaturskillnaden ($+0,5 \text{ }^\circ\text{C}$) har uppmätts på högsta mätnivån vid HPS+LED. Den största relativa fuktighetsskillnaden ($+3,0 \%$) har uppmätts på mellannivå vid HPS+LED. I projektet utfördes även en värmekameraundersökning vid de båda försöksområdena. Tomatblad och tomatfrukter fotograferades vid flera mätpunkter en morgon i början av februari 2014. Vid en av tre punkter var bladmedeltemperaturen $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ högre vid HPS+LED än vid HPS. Vid de två övriga punkterna var medeltemperaturen $0,5\text{--}0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ lägre vid HPS+LED än vid HPS. Största temperaturskillnaden sågs i tomaternas yttemperatur. Vid samtliga mätpunkter var tomatmedeltemperaturen $1,2\text{--}1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ lägre vid HPS+LED jämfört med HPS. Förutom tomattemperaturen är skillnaden i temperatur och fuktighet mycket små och saknar högst sannolikt betydelse.

Skördeskillnaderna mellan HPS+LED (hybridområdet) och HPS (referensområdet) var positiva men små. Totalt 2,2 % större skörd under hela odlings säsongen vid HPS+LED. Största skördeskillnaden $+6,6 \%$ vid HPS+LED fanns under de mörkaste vintermånaderna när regelbundna belysningstider användes. Tomatmedelvikten har varierat mellan 75 och 103 gram och skillnaderna mellan HPS+LED och HPS under den regelbundna belysta perioden är minimal, endast 0,6 % lägre vid HPS+LED.

I försöket hölls nästan samma elförbrukning vid HPS+LED och HPS. För att uppnå samma förbrukning sänktes HPS-elfeffekten från 750 W till 600 W vid HPS+LED. Elförbrukning [kWh/kg tomat] var ca 5,1 % lägre vid HPS+LED jämfört med HPS under hela säsongen.

Tomatfrukter från olika ljusbehandlade områden har analyserats kemiskt. Slutsatsen är att ljusspektrum har betydelse för tomatens kvalitet, speciellt på vintern. Det borde dock forskas mera för att få klarhet i hurdana spektrum och ljusintensiteter som kan möjliggöra en god skörd. Ett tomat-smaktest anordnades i Vasa vid Yrkeskolegskolan Novia. Tanken var att utreda om tomater som belysts med HPS+LED upplevs smaka annorlunda än traditionellt belysta tomater (HPS). Totalt deltog 93 personer och av dem svarade 72 % att de kunde känna en klar smakskillnad mellan de olika tomaterna. Vid närmare analys av svaren kan man inte fastställa att någondera tomaten skulle smaka bättre.

I framtiden kan LED-växtbelysning mycket väl vara den dominerande ljuskällan i växthus. Frågan är om 2,2 % större skörd och 5,1 % lägre elförbrukning per producerat kilogram tomat idag är tillräckligt för att odlarna skall välja Netled Oys LED-mellanbelysningsarmatur. Varje odlare är unik med unika växthus och det är många faktorer som man måste tänka på vid en investeringskalkyl. Lönsamhetsfrågan kvarstår ännu men vi hoppas att denna rapport är till nytta för odlare som går i tankar att investera i LED-växtbelysning.

6. Källförteckning

- Borg, M., Frände, N., & mfl. (2012). Projektet "Energieffektiva växthus 2015"; Kartläggning av nuläget och utvecklingsmöjligheter inom växthusbranschen. Vasa: Yrkeshögskolan Novia, forskning och utveckling, opublicerad.
- DeltaOHM. (den 15 4 2013). Delta OHM HD2102.1/HD2102.2 ENGLISH, REV. 2.1. Hämtat från http://www.deltaohm.com/ver2012/download/HD2102_M_uk.pdf den 2 2 2015
- Grimstad SO, M. R., & Gislerød, H. (2006). The use of artificial light in year round production of greenhouse crops in Norway. *Acta Horticulturae*, ss. 711: 35–42 (Proc. Vth IS on Artificial Lighting).
- LI-COR Biosciences. (den 8 1 2013). NewsLine, Measuring Change in a Changing world. Hämtat från Daily Light Integral (DLI) measurement using LI-COR Light Sensors: <http://www.licor.com/env/newslines/2013/01/daily-light-integral-dli-measurement-using-li-cor-light-sensors/> den 26 8 2014
- Månsson, S. (2010). LED-ljusets inverkan på tillväxt och utveckling hos tomatplantor, *solanum lycopersium L.* Alnarp: Sveriges lantbruksuniversitet, LTJ-fakulteten, område Hortikultur. Hämtat från http://stud.epsilon.slu.se/1832/1/mansson_s_100921.pdf
- Nyrén, M. (2010). Ljus kvaliténs inverkan på tillväxt och smak hos basilika *Ocimum basilicum* och citronbasilika *Ocimum basilicum var. citrodorum*. Alnarp: Sveriges lantbruksuniversitet, LTJ-fakulteten, Hortikultur. Hämtat från http://stud.epsilon.slu.se/1829/1/nyren_m_100922.pdf
- Philips. (6 2010). www.philips.com/horti. Hämtat från Growing your profits, Horticultural lighting: http://www.lighting.philips.com/b-dam/b2b-li/en_AA/products/Horticulture/Horticulture-products/overview_growing_your_profits-hid-en.pdf den 3 2 2015
- Ross, J., & Sulev, M. (den 9 10 1999). Sources of errors in measurements of PAR. Hämtat från http://www.planta.cn/forum/files_planta/par_measurement_errors_145.pdf den 30 1 2015
- Singhal, G. R. (1999). Concepts in Photobiology: Photosynthesis an Photomorphogenesis. New Delhi: Narosa Publishers/New Delhi and Kluwer Academic/Dordrecht.
- Treiman, A. (2005). Life at the limits: Earth, Mars, and Beyond. Hämtat från http://www.lpi.usra.edu/education/fieldtrips/2005/activities/ir_spectrum/ den 24 6 2014
- Tuominen, J. (2008). Valota ja huolla harkitusti. Puutarha ja Kauppa 14, 10-12.
- Wyse, S. E. (den 28 6 2012). SnapSurveys. Hämtat från Benefits of using cross tabulations in surveys analysis: <http://www.snapsurveys.com/blog/benefits-cross-tabulations-survey-analysis/> den 2 6 2014



Naturresursinstitutet
Viksbågen 4
00790 Helsingfors
tfn 029 532 6000