



Nästa generations täckmaterial för växthus

Tillväxt Trädgård

**Stefan Karlsson¹, Christina Stålhandske¹, Klara Löfkvist²
Jonas Möller Nielsen³ och Sven Nimmermark⁴**

¹ Glafo – glasforskningsinstitutet, PG Vejdes väg 15, SE-351 96 Växjö

² JTI - Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Ideon Gateway, Scheelevägen 27
SE-223 70 Lund

³ Cascada AB, Georgs väg 1, SE-432 97 Rolfstorp

⁴ SLU – Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för Biosystem och Teknologi
Box 103, SE-230 53, Alnarp

Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap

Rapport 2014:15
ISBN 978-91-87117-76
Alnarp 2014



Nästa generations täckmaterial för växthus

Tillväxt Trädgård

**Stefan Karlsson¹, Christina Stålhandske¹, Klara Löfkvist²
Jonas Möller Nielsen³ och Sven Nimmermark⁴**

¹ Glafo – glasforskningsinstitutet, PG Vejdes väg 15, SE-351 96 Växjö

² JTI - Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Ideon Gateway, Scheelevägen 27
SE-223 70 Lund

³ Cascada AB, Georgs väg 1, SE-432 97 Rolfstorp

⁴ SLU – Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för Biosystem och Teknologi
Box 103, SE-230 53, Alnarp

Tillväxt Trädgård

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

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



Sammanfattning

I denna studie har olika nyare typer av glas som täckmaterial till växthus undersökts. Fokus har varit att hitta material som är energisparande samtidigt som de släpper igenom så mycket ljus inom PAR (Photosynthetic active radiation) området som möjligt.

De täckmaterial som valts ut har varit planglas med låg järnhalt, planglas med den mjuka lågemissionsbeläggningen optitherm, planglas med den hårda lågemissionsbeläggningen K-glas samt planglas med den självrengörande beläggningen Active. Valen har gjorts utifrån deras egenskaper vad gäller funktion, energibesparing, ljusgenomsläpplighet samt kostnaderna för materialet så att det blir ekonomiskt rimligt för dagens växthusproduktion.

Täckmaterialen har placerats i taket respektive väggarna med tanke på vad som ansågs vara mest lämpligt utifrån växthusproduktion. Exempelvis har självrengörande ytor placerats i takets insida eftersom det är den yta som man i växthusproduktion befarar bli mest smutsig. För de utvalda materialen har livscykelkostnaderna (LCC) beräknats utifrån vissa givna produktionsförutsättningar för två storlekar på växthus; 1 000 m² respektive 5 000 m². De bästa kombinationerna av tak- respektive väggmaterial har sedan kombinerats i ett idealhus och beräkningar har gjorts.

Resultaten visade att vid nybyggnation av växthus där investeringskostnaden för värmesystemet räknas med kan man i idealhuset få en livscykelkostnad som ger en besparing på 14 % jämfört med ett standardreferenshus. Investeringskostnaderna för de förbättrade glasmaterialen är då visserligen högre än för vanligt standardglas men då den beräknade energibesparingen var 30 % blir den totala kalkylen lovande.

Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	2
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	3
INLEDNING	4
LITTERATURSTUDIE.....	4
<i>Planglasbeläggningar.....</i>	<i>4</i>
Lågemissionsbeläggningar	4
Självrengörande beläggningar	5
Anti-reflektiva beläggningar	6
Övriga planglaslösningar (utvecklade för solenergi-branschen)	6
Låg järnhalt	6
Mönstrade glas	6
Härdade glas	6
<i>Växternas respons med fokus på ljus</i>	<i>7</i>
Ljusintensiteten	7
Ljuskvaliteten	8
Växtskyddsaspekter	8
<i>Täckmaterial till växthus</i>	<i>8</i>
Täckmaterial	8
Glas	8
Sprutfärg	10
MATERIAL OCH METOD	10
<i>Planglaslösningar som lämpar sig för växthus.....</i>	<i>10</i>
<i>Beräkningar för planglaslösningar som lämpar sig för växthus.....</i>	<i>11</i>
Valda växthus och övriga odlingsförutsättningar	11
Valda planglaslösningar	12
Effekt- och energibehov.....	13
Beräkning av livscykelkostnad (LCC)	14
Livscykelkostnad (LCC)	14
Antagna priser, ränta, m.m.	14
Påverkan på skörd.....	14
RESULTAT	15
Resultat av livscykelkostnadskalkyler	15
Idealväxthuset	15
Valda planglaslösningar	15
Effekt- och energibehov.....	15
Livscykelkostnad (LCC)	15
Känslighetsanalys.....	15
U-värdet sämre	15
Energipriset lägre.....	15
Priset på behandlat glas högre	16
Odling vid lägre temperatur.....	16
DISKUSSION.....	19
SLUTSATSER.....	19
FRAMTIDA ARBETE	20
REFERENSER	20

Inledning

Växthus har som funktion att förlänga odlingssäsongen och optimera tillväxten genom att ge växter ett gott klimat. För att kunna utnyttja solen som energi- och ljuskälla måste transparenta material användas som täckmaterial. I Sverige finns det idag uppskattningsvis 400 ha växthus med varierande standard på klimatskalen. De vanligaste täckmaterialen idag är 4 mm enkelglas och 16 mm polykarbonat (kanalplast), men det förekommer även en del hus med 32 mm akryl samt växthus med 0,2 mm polyetenfolie, både med enkel- och dubbelskikt som blir allt vanligare. Normalt kan man räkna med att kanalplast håller i max 20 år. En stor del av de nuvarande växthusen byggdes under 80- och 90-talen och det finns därmed ett stort behov av att byta ut täckmaterial på många växthus. Antar man att hälften av den totala ytan av växthus i Sverige har kanalplast innebär det att ca 10 ha behöver bytas varje år. I Danmark och Norge är växthusarealen ungefär lika stor som i Sverige medan den är något större i Finland. Det är därför rimligt att anta att det i Norden finns ett årligt renoveringsbehov på ca 50 ha. Utöver det är det rimligt att anta att nybyggnationen uppgår till några tiotals ha per år.

En mycket stor kostnadspost inom växthusproduktion är energin och det är därför viktigt att de material som används är så energieffektiva som möjligt utan att ljustransmissionen påverkas negativt.

Inom planglasteknik har mycket hänt de senaste åren. Funktionella beläggningar har närmast blivit regel snarare än undantag för byggindustrin. Vi har i denna rapport identifierat tre olika funktionella beläggningar som potentiellt kan användas inom växthusbranschen – lågemissionsbeläggning (som har goda värmeisolerande egenskaper och hög ljustransmission), anti-reflektiv beläggning (som ger bättre ljusgenomsläpplighet) och självrengörande beläggning (som ger en renare glasyta och därmed ökar ljusgenomsläppligheten). För att säkerställa optimal funktion anpassad för växthusförhållande måste beläggningarna placeras på rätt yta av glaset. Exempelvis bör man i växthus placera den självrengörande ytan invändigt istället för som i bostadshus på utsidan.

Litteraturstudie

Planglasbeläggningar

Lågemissionsbeläggningar

Lågemissionsbeläggningar har funnits på byggmarknaden flera år. De syftar främst till att spara energi. Funktionen hos lågemissiva beläggningar är att långvågig (omkring 10 μm) värmestrålning reflekteras inom byggnaden utan att kraftigt försämra ljustransmissionen i det visuella området eller inom PAR (photosynthetic active radiation) området (Ludvigsson 2011). En nackdel är att lågemissiva beläggningar ofta reflekterar en del solljus. En annan nackdel är att vissa lågemissiva beläggningar är mjuka och måste skyddas för att bevara funktionen och därmed främst är lämpade för tvåglaslösningar. En vanlig lågemissionbeläggning innehåller fluor-dopad (ca 1 %) tennoxid som det aktiva lagret, t ex Pilkingtons K-glas som även kan användas i enkelglas. Fluor har som funktion att bilda konduktivetsband med fria elektroner i halvledarmaterialet SnO_2 , de fria elektronerna reflekterar IR-strålning. Ett lager med fluor-dopad tennoxid, ca 0,3 μm , kan reflektera mer än 85 % av IR strålningen (tjockare upp till 90%). Beläggningen är transparent då den är <1 μm men uppvisar starka iriserande färger. Det problemet kan döljas med ytterligare en eller två beläggningar där brytningsindex spelar stor roll (ett mellanlager med brytningsindex 1,7 döljer de iriserande färgerna), t ex med CVD Si-C-O mix, Si-N-O mix, SiO_2 - SnO_2 mix, Al_2O_3 - TiO_2 (Gordon 1997). En annan metod att dölja de iriserande färgerna är att belägga glaset med först 25 nm SnO_2 , sedan 25 nm SiO_2 och sist F- SnO_2 (Gordon, 1983). En fördel är att det bildas mindre kondens och i så fall endast i kanterna av glaset. Visserligen kommer avfuktningen mot klimatskalet att minska, men denna effekt borde uppvägas av den högre ljustransmissionen och minskat kondensdropp på växterna.

En del forskning pågår för att hitta kombinationsfunktionen lågemission och antirefleksion som ökar ljustransmissionen av lågemissiva beläggningar (Hammarberg och Roos 2003).

Den mest vanliga lågemissionsbeläggningen är ett enkelt eller dubbelt lager med silver. Silver är dock inte möjligt att använda till enkelglas eftersom lagret behöver ligga skyddat. Tillsammans med silver beläggs det med flera andra beläggningsslager för att skydda silverbeläggningen på olika sätt (Schaefer *et al.*, 1997).

Självrengörande beläggningar

Beläggningar som verkar "självrengörande" har getts mycket intresse de senaste åren, både inom forskning och i kommersiella applikationer. Den starkaste fördelen med en sådan typ av beläggning är minskning av underhållskostnader. I växthus kan denna yta vara mycket intressant särskilt på insidan av växthusen eftersom det lätt blir smuts i form av alger, torvpartiklar, kemikalierester m.m. på glaset. Den självrengörande effekten är relaterad till kontaktvinkeln vid tre-fas gränsen (vätskefas/fast fas/ångfas) mellan ytorna av en droppe på ett fast material yta (Rios *et al.*, 2009). Om kontaktvinkeln är $<90^\circ$ är den fasta ytan hydrofil och om den är $>90^\circ$ är ytan hydrofobisk. Om kontaktvinkeln går mot noll är ytan kategoriserad som ultrahydrofil och då kontaktvinkeln är $>150^\circ$ är ytan kategoriserad som ultrahydrofob. Det finns två alternativa metoder att få fram "självrengörande" beläggningar; användning av ultrahydrofila eller ultrahydrofoba ytor.

Ultrahydrofila ytor är oftast baserade på titanoxid, TiO_2 -beläggningar. TiO_2 kan inducera fotokatalytiska reaktioner genom absorption av UV-strålning som leder till oxidation av organiska ämnen och bakterier som fastnat på ytan. Detta kan vara av särskilt intresse i växthus då det har potential att minska smittotrycket av vissa patogener. När TiO_2 bestrålas med UV blir ytan ultrahydrofil på grund av att OH-grupper bildas på ytan, processen är reversibel. Aktiviteten av processen beror på flera parametrar såsom sammansättning av beläggningen, appliceringsmetod och kristallstruktur. Den fotokatalytiska nedbrytningen av organiska substanser är första steget. Steg två är att de organiska substanserna sköljs bort med vatten på grund av den ultrahydrofila ytan. Den här typen av beläggning passar bäst till oorganiska fasta material såsom glas. Organiska material som polymerer skulle påverkas av den fotokatalytiska nedbrytningen. I fönsterapplikationer bör beläggningen positioneras på yta 1 dvs. utåt så att den lätt kan kommas åt av sol och regn. I växthussammanhang bör den med fördel kunna placeras på insidan. Exempel på produkter på marknaden är Pilkington Activ™, St-Gobain Bio Clean®, PPG Sunclean™ och Cardinal Neat®. TiO_2 -beläggningar ger dock ytan ett något högre brytningsindex och därmed ökar ljusets reflektion, dvs. ljustransmissionen försämras något och därför pågår mycket forskning om att hitta "självrengörande" beläggningar med antireflekta egenskaper (sammansättningen på beläggningen ändras), kombinationen av TiO_2 och SiO_2 är ett alternativ (Helsch och Deubener, 2012; Zhang *et al.*, 2005).

Ultrahydrofoba beläggningar utgår med inspiration ifrån naturen. Lotus-blomman har en yta på bladen som gör att vatten som hamnar på bladen snabbt blir till droppar som tar med sig smutsen och rinner av (Rios *et al.*, 2009). Den självrengörande karaktären brukar kallas Lotus-effekten, en term myntad av Wilhelm Barthlott. Lotusblommans yta har en komplex struktur – flera lager med 5-10 μm höga toppar där ytan är täckt av ett lager med ultrahydrofoba kristalloider i nanostorlek. Hydrofobiciteten repellerar vattnet och ger en hög kontaktvinkel som reducerar arean som vattendroppen är i kontakt med bladet samtidigt som ytstrukturen reducerar adhesionen ytterligare liknande en spikmatta som en fakir använder. Vattendroppen rör sig lätt över ytan och tar med sig smutspartiklar. Kontaktvinkeln och glidvinkeln ("the sliding angle") är två viktiga parametrar för denna typ av beläggning. Trifluormetyl, CF_3 , och PTFE (polytetrafluoroetylene) är två exempel på beläggningar av denna typ. Det största problemet med ultrahydrofoba beläggningar är att stabiliteten och hållbarheten är låg – ytan måste ha helt rätt struktur och erosion av denna resulterar i dramatiska förändringar i funktionen. De flesta av de rapporterade ultrahydrofoba beläggningarna

är mjuka och svagt bundna ämnen eller ej kors-länkade polymerer. Lotusblomman förnyar sin yta kontinuerligt då den växer, men detta är inte möjligt för artificiella ytor. Livslängden för ultrahydrofoba beläggningar tas oftast inte upp i den vetenskapliga litteraturen men nyligen har problemet blivit alltmer studerat, antingen genom att den skadade ytan återigen bildar ett ultrahydrofobt beteende eller genom att demonstrera reparerbarhet av skadad yta då man återigen applicerar beläggningen (Wang *et al.*, 2013).

Anti-reflektiva beläggningar

Anti-reflektiva (AR) beläggningar syftar till att minimera reflektionen av ljus vid glasytor (Ludvigsson, 2011). Med en antirefektiv yta får man en ökad ljustransmission. Ljusreflektionen beror av infallsvinkeln och är generellt ca 8 % för varje glasyta. Reflektionen kan minimeras till ca hälften med AR beläggningar. AR effekten beror av interferens av ljus som passerar genom tunna optiska lager med olika brytningsindex jämfört med substratet (Bräuer, 1999). AR beläggningar har en stor marknad inom fönsterindustrin, men även för glasögon, displayer, optiska instrument, monitorer, vindrutor till fordon etc. För monitorer och TV-skärmar kombineras AR ofta med anti-statisk funktion (ARAS). En AR beläggning byggs vanligtvis upp av flera lager varvade med högt och lågt brytningsindex. Det finns även enkel-lager beläggningar och då är kravet att beläggningen måste ha ett lägre brytningsindex än substratet. Typiska material som används är SiO₂, TiO₂, ZrO₂, Al₂O₃, MgF₂, CeF₃. En produkt på marknaden som är belagd på båda sidor är SGGVision Lite® från Saint Gobain. Det finns även glas med AR beläggningar utvecklade för växthusbranschen – Groglass AR (<http://www.groglass.com/en/products/greenhouse-glass>). Det är vanligt att AR beläggningar reflekterar en liten del av den nära infraröda strålningen, NIR-strålningen, vilket minskar värmetransmissionen till viss del (ca 4%). AR beläggningar används flitigt inom solcellsbranschen (Deubener *et al.*, 2009).

Övriga planglaslösningar (utvecklade för solenergi-branschen)

Låg järnhalt

Inom solenergi-branschen är glas ett vanligt material som har goda kemiska och optiska egenskaper. Ljusabsorptionen i glas beror till största delen av järnhalten i glaset, mer specifikt Fe²⁺ halten. Halten av Fe²⁺ kan minimeras genom renare råvaror, annan glassammansättning eller genom att förskjuta redox-förhållandet Fe²⁺/Fe³⁺ till exempel med små tillsatser av ett avfärgningsmedel t. ex. Sb₂O₃. Förskjuta redox-förhållandet kan inte göras i alla typer av tillverkningsmetoder, t.ex. inte för floatglas, men det är vanligt för valsat (draget) glas.

Mönstrade glas

En annan metod att öka solutnyttjandet är att använda mönstrade planglas. Den mönstrade ytan gör att mer ljus ifrån olika vinklar kommer igenom glaset. Det är även vanligt att mönstrade planglas används för privata syften inom arkitektur som till exempel badrum. Mönstrade planglas tillverkas med drag-metoden inte float-tekniken.

Härdade glas

De mekaniska egenskaperna är viktiga för tillämpningar i solenergibranschen. För sådana applikationer tillämpas vanligtvis termisk härdning som ökar hållfastheten ca 2-3 ggr. Tjockleken av glas är också av stor betydelse. Nyligen utvecklade tekniska processer har lett till att man idag kan termiskt härda ca 2 mm tunt planglas men 3 mm (eller tjockare) är fortfarande dominerande på marknaden. I tabell 1 nedan listas karakteristiska värden för hållfastheten av soda-kalk-silikat planglas (härdade glas). Den termiska härdningen påverkar inte den optiska kvaliteten nämnvärt,

men hållfastheten och även sprickmönstret påverkas. När termiskt härdat glas går sönder bildas mycket mindre glasbitar med inte lika vassa kanter jämfört med vanligt planglas. Termiskt härdat planglas brukar därför ofta kallas säkerhetsglas och används ofta i säkerhetssyften även inom växthusbranschen på kontinenten. Ett problem som finns med termiskt härdat glas är att det kan uppstå spontanbrott. Detta beror på att nickelsulfid (NiS) partiklar i glaset övergår till dess α -fas ($T > 380^\circ\text{C}$) vid härdningen och hinner inte gå tillbaka till sin α -fas under den snabba kylningen i härdningsprocessen. Med tiden går NiS-partiklarna långsamt tillbaka till α -fasen och utvidgas då med ca 4% (går snabbare vid högre temperatur) och kan då utlösa ett spontanbrott i glaset. På grund av detta problem finns ett "heat-soak-test" där man värmer upp glaset till 290°C i minst 2 timmar för att snabba på fasändringsprocessen. "Heat-soak-testet" som dock inte är hundra procentigt är standardiserat genom en europeisk norm, EN 14179. Värmeförstärkt planglas är härdat till ca hälften av termiskt härdat planglas och vid brott bildas mindre glasbitar som dock fortfarande kan ha vassa kanter.

Tabell 1: Tabell över olika metoder för härdning av glas, hållfasthet efter härdning samt tillhörande europeisk standard.

Glas typ	Karakteristisk hållfasthet (MPa)	Standarder
Planglas	45	EN 572
Termiskt härdat säkerhetsglas	120	EN12150
Mönstrat planglas	90	EN12150
Värmeförstärkt planglas	70	EN 1863
Kemiskt härdat planglas	150	EN 12337

Växternas respons med fokus på ljus

Ljuset påverkar tillväxten, utvecklingen och utseendet hos plantor och det är därför viktigt att täckmaterialens påverkan på ljussammansättningen är känd. Täckmaterialen kan påverka allt från inkommande mängd ljus till vilket spektra av ljus som tränger igenom. Särskilt viktigt är det därför att ha kontroll på plantresponsen vid kombination av flera olika beläggningar. Det finns därför ett stort behov av fortsatta studier av plantresponsen för olika transparenta lösningar för växthusproduktion.

Ljusintensiteten

Ljusintensiteten eller ljusmängden som plantorna får har betydelse för hur stor mängd biomassa som produceras. Det finns en tumregel som säger att 1 % ökning i mängd ljus ger 1 % ökning av skördad produkt. Den faktiska ökningen varierar dock med växtslaget. Följande generella nivåer för tillväxtökning gäller för rotfrukter: 0,8-1%, grönsaker: 0,7-1 %, snittblommor: 0,6-1 %, blomsterlök: 0,25 - 1,25 %, blommande krukväxter 0,5-1% och grönväxter som krukväxt: 0,65 %. Tillväxtökningen är dock beroende på många faktorer. Exempelvis är ökningen större vid lägre ljusnivåer innan plantorna nått sitt ljusoptimum, högre CO_2 nivåer och högre temperaturer. Även kvaliteten påverkas positivt av en högre ljusmängd (Marcelis *et al.*, 2006).

Solenergin driver fotosyntesen och därmed biomassaproduktionen. Temperaturen är den primära faktorn för växtens utvecklingshastighet. En kombination av hög temperatur och mycket ljus, upp till ett visst optimum, ger en god tillväxt (Liu och Heins, 2002).

Ljushetningen brukar i många sammanhang anges i lux, som är ett mått på ljus som är relaterat till ögats känslighet. Detta mått säger inget om hur stor fotonmängden är, vilket är intressantast för växten. Allt det synliga ljuset är dock inte användbart för växterna och ljushetningen som växterna kan ta nytta av uttrycks i PAR (photosynthetic active radiation) med enheten $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ och sekund. Optimal tillväxthastighet och biomassaproduktion har i försök med kalanchoë, begonia och krukosor visat sig ligga kring $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ och sekund (Mortensen, 2004).

Ljuskvaliteten

Ljuskvaliteten anger inom vilket ljusspektra ljuset ligger och vilka våglängder och därmed färger som ljuset har. Ljus i olika färger d.v.s. ljus med olika våglängder påverkar växternas tillväxt och utveckling. Olika växtslag reagerar olika på olika ljus och reaktionerna kan vara mer eller mindre tydliga. Förändring i färgspektra kan fås genom filter som filtrerar bort vissa våglängder eller genom att använda LED lampor där man kan få enskilda färger på ljuset. I studier har man visat att blått ljus kan ha viss tillväxtretarderande effekt och antalet laterala förgreningar stimuleras. Grönt och gult ljus ger ökad tillväxt.

Olika typer av ljusspektra kan påverka plantorna i olika riktningar. Vissa ljus ger en ökad och andra en minskad sträckningstillväxt. Genom att minska andelen långvågigt rött ljus (700-800 nm) som är som störst under tidig kväll kan sträckningstillväxten minskas (Mata och Botto, 2009; Rajapakse *et al.*, 2001). Det finns dock risk att blomningen hos långdagsplantor försenas (Runkle och Heins, 2003).

Växtskyddsaspekter

Ljusspektrat påverkar växtskadegörare hos plantor på olika sätt. I försök med LED lampor har olika ljusspektra visat sig påverka patogener (Schuerger och Brown, 1997). Vissa UV-filter har visat sig ha positiv effekt på minskningen av skadedjur. Samtidigt har behandling med intensivt UV-ljus under kort tid gett goda effekter på svampangrepp eftersom bladet blir mera kraftigt och stärks i sin motståndskraft. UV ljus delas upp i tre fraktioner UV-C (<280nm), UV-B (280-320nm) och UV-A (320-390nm). Små mängder av UV-B ljus är nyttigt för plantorna medan höga nivåer kan skada dem (Nawkar *et al.*, 2013). Att ha ett ljus som är så optimalt som möjligt är viktigt för att ge plantorna en bra tillväxt och gör dem starka och motståndskraftiga mot skadegörare.

Täckmaterial till växthus

Täckmaterial

De vanligast förekommande täckmaterialen för växthus idag är olika typer av plastfolier, glas och hårdplaster, där plastfolie utgör ca 90 % av totala växthusarealen i världen (Castilla, 2012). I norra Europa dominerar, av tradition, glashus men i och med oljekriserna på 70- och 80-talen började man mer och mer att gå över till olika former av kanalplast bestående av akryl eller polykarbonat. Priserna pressades allt mer i branschen och kostnaderna ökade både på arbete och energi och nyare och billigare växthuskonstruktioner började vinna mark. Venlohusen, som redan använts mycket i Nederländerna, började spridas längre norrut i Europa och senare började även olika typer av hus med plastfolie att vinna terräng i form av multispanhus eller enklare båghus. Dubbelplasten var antingen enkel för säsongsodling, eller dubbel med luftspalt för åretruntodling.

Glas

I norra Europa dominerar av tradition 4 mm enkelglas för att uppnå hög ljustransmission och låg investeringskostnad. När det gäller ljustransmissionen är det inte bara materialets egen transmission som är av betydelse, utan även dess vikt. Ett tyngre material medför ofta en kraftigare växthuskonstruktion som i sig minskar ljustransmissionen. Fokus har av tradition legat på pris, snarare än på kvalitet.

Under senare år har en hel del forskning gjorts på olika typer av glaskvaliteter, såsom glas med låg järnhalt, diffuserande glas, antireflexbehandlat glas, lågemissionsbeläggningar och dubbelglas.

(Hemming *et al.*, 2011; Max *et al.*, 2012). För publika glasade miljöer har man t.ex. i samband med renoveringen av Berlins botaniska trädgård använt SentryGlas, ett laminerat glas från DuPont (Stelzer, 2009). Vid Wageningens universitet har man gjort teoretiska beräkningar på olika glasmaterial för växthus för att bedöma vilka material som är intressanta att undersöka vidare. Glasen som man undersökt var standardglas, 90+-glas och glas med låg järnhalt. Dessa olika glas har sedan belagts med antireflex- eller lågemissionsbeläggningar från olika tillverkare. Olika kombinationer testades med både enkelglas och dubbelglas. Det årliga ekonomiska utbytet räknades ut för de olika alternativen. Någon hänsyn togs inte till hur de olika materialen påverkade övriga investeringskostnader. Någon livscykelkostnad gjordes inte heller. För beräkningarna användes simuleringsprogrammet KASPRO (Hemming *et al.*, 2011). Man noterade att ljustransmission och påverkan på spektrumet som släpptes igenom varierade stort mellan olika tillverkare. Detsamma gällde för de olika antireflexbehandlingarna. Antireflexbehandling från en tillverkare ökade främst ljustransmissionen inom det röda området, men minskade transmissionen av UV- och NIR (700-2 500 nm) (Hemming *et al.*, 2011). Detta är viktigt att ha i åtanke vid val av beläggningar, då olika våglängder bl.a. kan påverka växternas morfologi.

Lågemissionsbehandlingar ökar glastemperaturen på insidan, vilket ökar konvektionsförlusterna, samtidigt som kondensationen minskar och luftfuktigheten ökar (Hemming *et al.*, 2011). Enkel eller dubbelglas (2 x 4 mm med 8 mm luftspalt) med antireflexbehandling befanns i studien vara det mest lönsamma med ett årligt investeringsutrymme på € 2,0-2,5 per kvadratmeter. Lågemissionsbeläggningar gav bara ett investeringsutrymme på € 0,9 per kvadratmeter och år (Hemming *et al.*, 2011).

Till skillnad mot Nederländerna har man i Tyskland testat olika material i speciella försöksuppställningar med avseende på U-värde vid olika vinklar med och utan kondensation. Dessutom har ljustransmission vid olika våglängder och U-värde vid olika vindhastigheter uppmätts. Ett intressant material som testades var en kombination av enkel glasruta i kombination med folie av etylen, tetrafluoretylen, antingen enbart på utsidan eller både på in- och utsidan. Folien har smutsavvisande egenskaper vilket på sikt bör minska skuggningen på grund av smuts. Luftspalten mellan glas och folie styrdes med hjälp av en fläkt, på så vis att man helt kunde ta bort luftspalten och därigenom få ett enkelskikt, t.ex. för bättre kylning när det är för varmt (Max *et al.*, 2012). Mätningar genomfördes i särskilt byggda mätlådor (hot boxes) som placerades utomhus och i vilka de olika materialen placerades i olika vinklar. I mätlådorna kunde temperatur, vindhastighet och kondensation styras. Resultaten visade att U-värdet ökar med ökad kondensering och vindhastighet, särskilt i enkelglaskonstruktioner. Täckmaterialets vinkel, 0°, 26° respektive 90°, påverkade U-värdet marginellt, för standard enkelglas, 6,7, 6,6 respektive 6,7 W/(°C x m²). Dubbelglas i kassett hade lägst ljustransmission av samtliga testade material, 78 % inom PAR. Högst ljustransmission inom PAR hade floatglas med låg järnhalt och antireflexbehandling på båda sidor, där transmissionen låg på 99 %. Glas med låg järnhalt med lågemissionsbeläggning hade en transmission på 84 % inom PAR. Standardglas hade 88 %. Det intressanta är att lösningen med glas och folie på en sida hade en transmission på 89 % (Max *et al.*, 2012).

I Hannover, Tyskland, har man genom projektet ZINEG (Future Initiative Low Energy Greenhouse) byggt ett antal fullskaleväxthus för att testa olika metoder för att minska energianvändning och klimatpåverkan från växthus (Tantau, 2012). I Hannover har man byggt ett venloväxthus i standardutförande på 960 m² med dubbelglas i tak, 2 x 4 mm glas med 12 mm luftspalt som kassett. Glaset har antireflexbehandlats. I huset har man monterat tre olika typer av vävar, transparent energiväv, traditionell energiväv och mörkläggningsväv. Trots att ljustransmissionen genom kassettglaset var något högre än för standard enkelglas, blev den totala ljustransmissionen inom PAR i januari enbart 40 % för diffus strålning och 30 % för direkt strålning. Anledningen till detta förklaras med de tre vävarna, installationen av assimilationsbelysning och det faktum att växthuset blivit förstärkt för att klara dubbelglaskonstruktionen, samt att växthuset dimensionerats enligt gällande regler för att klara snölasterna. Man noterade att energianvändningen ökade med ökad

vindhastighet, trots dubbelglaset, men att vindhastigheten inte påverkade energianvändningen lika mycket när vävarna var fördragna (Tantau, 2012).

I Nederländerna har företaget Technokas tillsammans med tomatodlingsföretaget Duijvestijn Tomaten byggt ett växthus med en helt ny konstruktion som de kallar för ID Kas®. Hela konstruktionen är omgjord jämfört med traditionella venlohus, vilket innebär att man får en starkare konstruktion som klarar högre laster men med mindre stål och aluminium. Man har därför kunnat montera glaskassetter i taket bestående av två glasrutor med 4 mm tjockt antireflexbehandlat, diffuserande och härdat glas. För att utnyttja glaset bättre är rutorna 3,18 x 2,08 m. Eftersom huset inte har något fackverk monteras väven så att den går från ränna till ränna (nock till nock), vilket gör att vävpaketen inte skuggar när väven är öppen då vävpaketen är under rännorna. Resultatet har blivit att huset släpper in mer ljus än ett traditionellt venlohus (Technokas, 2014; van Adrichem, personligt meddelande 2014). Huruvida det är ekonomiskt försvarbart återstår att se, men tanken är att det skall vara en lösning som betalar sig i framtiden (van Adrichem, personligt meddelande 2014).

Sprutfärg

Ett alternativ till glasbeläggningar och olika typer av vävar, är att behandla växthuset med någon form av sprutfärg. Sprutfärgen sprutas på delar eller hela huset på våren och tas bort under sensommaren eller tidig höst. Beroende på vad man vill uppnå finns det olika sorters sprutfärg, färg som primärt reflekterar solljus inom både PAR och NIR, värmereflekterande sprutfärg som släpper igenom mycket av ljuset inom PAR, men som reflekterar det mesta av värmestrålningen (IR), diffuserande färg, diffuserande färg som samtidigt reflekterar värmestrålning och sprutfärger som tar bort vissa våglängder som t.ex. de blå våglängderna (ReduSystems, 2014).

NIR (near infrared radiation (770-2300 nm) – reflekterande sprutfärger minskar temperaturen i växthuset men kan ha en viss försenande effekt på blomningen hos ett antal växtsorter (Blanchard och Runkle 2010).

Material och Metod

Planglaslösningar som lämpar sig för växthus

Flera olika typer av glaskvaliteter visade sig i litteraturstudien vara intressanta för växthus och dessa visas i tabellerna 2 till och med 6 nedan.

Tabell 2-6. Olika glaskvaliteter från olika tillverkare och deras egenskaper med avseende på U-värde, ljustransmission (LT) inom 400-700 nm, UV-transmissionen och solfaktorn.

Vägg (Pilkington – Spectrum)

Planglas	Luftspalt	Beläggning	Beläggningssida	U-värde	LT (%)	UV (%)	Solfaktor (g)
2 x 4 mm OF	8 mm	-	-	3,08	82	53	0,78
2 x 4 mm OW	8 mm	-	-	3,08	84	75	0,84
2 x 4 mm OF	8 mm	OT S1	2	2,03	70	33	0,46
2 x 4 mm OW	8 mm	OT S3	2	2,08	82	40	0,61

Kod: OF = Optifloat (vanlig float), OW = Optiwhite (lågjärn), OT = Optitherm (lågmission, mjuk)

Vägg (Saint-Gobain – Calumen® II)

Planglas	Luftspalt	Beläggning	Beläggningssida	U-värde	LT (%)	UV (%)	Solfaktor (g)
2 x 4 mm PL	8 mm	-	-	3,1	82	-	0,77
2 x 4 mm D	8 mm	-	-	3,1	84	-	0,83
2 x 4 mm PL	8 mm	PT One	2	2	71	-	0,47
2 x 4 mm PL	8 mm	PT One II	2	2	71	-	0,48
2 x 4 mm D	8 mm	PT One	2	2	73	-	0,49
2 x 4 mm D	8 mm	PT One II	2	2	73	-	0,50
2 x 4 mm PL	8 mm	PT Lux	2	2,2	81	-	0,70
2 x 4 mm PL	8 mm	PT Total+	2	2,1	80	-	0,65
2 x 4 mm PL	8 mm	PT Ultra N	2	2,1	80	-	0,59
2 x 4 mm D	8 mm	PT Max	2	2,1	82	-	0,67
2 x 4 mm D	8 mm	PT Ultra N	2	2,1	82	-	0,61

Kod: PL = Planilux (vanlig float), D = Diamant (lågjärn), PT = Planitherm (lågmission, mjuk)

Tak (Pilkington – Spectrum)

Planglas	Luftspalt	Beläggning	Beläggningssida	U-värde	LT (%)	UV (%)	Solfaktor (g)
4 mm OF	-	-	-	5,75	90	68	0,87
4 mm OW	-	-	-	5,75	92	86	0,91
4 mm OF	-	KN	2	3,64	83	53	0,75
4 mm OW	-	KN	2	3,64	84	69	0,79

Kod: OF = Optifloat (vanlig float), OW = Optiwhite (lågjärn), KN = K-glas N (lågmission, hård)

Tak (Saint-Gobain – Calumen® II)

Planglas	Luftspalt	Beläggning	Beläggningssida	U-värde	LT (%)	UV (%)	Solfaktor (g)
4 mm PL	-	-	-	5,8	90	-	0,87
4 mm D	-	-	-	5,8	91	-	0,9
4 mm D	-	VL	2	5,8	94	-	0,9

Kod: PL = Planilux (vanlig float), D = Diamant (lågjärn), VL = Vision Lite (anti-reflektion)

Beräkningar för planglaslösningar som lämpar sig för växthus

Valda växthus och övriga odlingsförutsättningar

I beräkningarna har vi utgått från två storlekar på nyproduktion av venlo-växthus, 1 000 respektive 5 000 m². Gemensamt för båda husen är att de är placerade i nordvästra Skåne och att orienteringen

är öst-väst, det vill säga med långsidorna mot söder respektive norr. Taklutningen är 22° och ståndsdehøyden är 5 m, varav sockeln är 0,9 m och isolerad med U-värdet 0,5 W/(m² x °C). Marken är dränerad. Husen har en transparent energiväv (Ludvig Svensson SLS 10 Ultra Plus) med en effektreduktion på 42 %. Väven dras för då ljusintensiteten understiger 100 W/m² solarimetervärde. Husen har ingen assimilationsbelysning. Det har antagits att smuts på täckmaterialet minskar ljustransmissionen med 10 % och att spröjsen minskar ljustransmissionen med 5 %. Husen är uppvärmda året runt med uppvärmningstemperaturen 16 °C kl. 21-10 och 18 °C kl. 10-21. Ingen hänsyn har tagits till fuktstyrning. Ofrivillig ventilation har antagits vara 0,5 omsättningar per timme. Huset på 1 000 m² har bredden (gavel) 28,8 m och längden (långsida) 34,7 m, vilket blir 9 nockar. Huset på 5 000 m² har bredden 67,2 m och längden 74,4, med 21 nockar.

Valda planglaslösningar

För båda husen har valts ett referenshus (beräkning 1) med standard 4 mm planglas i taket och 2 x 4 mm standard planglas i väggarna. De olika alternativen visas i tabellen nedan. De alternativ som valts ut för beräkningarna i den här förstudien, har baserats på vilka behandlingar som vi har uppgifter om hur de påverkar ljustransmission och U-värde, samt vilka som vid en första anblick överhuvudtaget är av intresse för växthussammanhang.

Beräkning 1 är referenshuset, som motsvarar ett standard venlohus så som det byggs idag, med 4 mm flytplanat glas i taket och dubbelglas i väggarna. Körningarna 2a-4 är med olika alternativa material i väggarna och beräkningarna 6-10 är med olika alternativ i taket men med standard dubbelglas (2 x 4 mm planglas, standard växthus) i väggarna. Genom att göra separata beräkningar för väggar respektive tak, är det möjligt att efteråt slå ihop olika materialalternativ för tak respektive vägg genom att helt enkelt summera resultaten från beräkningarna. Detta har inte gjorts i projektet, men är möjligt för läsaren att göra för att själv se effekten av olika lösningar.

Beräkning 11a är en beräkning över ett tänkt "idealhus" där de mest lovande alternativen från de tidigare beräkningarna har lagts ihop.

Beräkning 11b är en känslighetsanalys över beräkning 11a där U-värdet har antagits vara 10 % sämre än i den ursprungliga beräkningen.

Alternativet 2 x 4 mm med luftspalt 8 mm, är ett kassetglas där luftspalten mellan glasrutorna är hermetiskt tillslutet och fyllt med vanlig luft.

Optiwhite är ett glas med låg järnhalt. Optitherm ett mjukbelagt lågemissionsglas som reflekterar tillbaks långvågig värmestrålning in i växthuset. I dagligt tal kallas det här för energisparglas. Beläggningen är mjuk och måste skyddas från mekanisk påverkan och är därför placerad på sida 2 räknat från utsidan, så att beläggningen hamnar inne i luftspalten.

K-glas är ett hårdbelagt lågemissionsglas som tål mekanisk påverkan och därför lämpar sig för englaslösningar.

Antireflexbehandlat glas reflekterar mindre ljus än vanligt glas vilket ökar ljustransmissionen några procent. Det är väldigt svårt att teoretiskt bedöma effekten av ett antireflexbehandlat glas på produktionen.

Samtliga behandlingar påverkar den spektrala fördelningen på det infallande ljuset från UV, synligt och långvåg värmestrålning. I vissa fall ökar t.ex. UV-strålningen och i andra kan långvågig värmestrålning påverkas. Dessa aspekter har det inte funnits resurser till att undersöka i den här förstudien.

Tabell 7: Tabell över de olika beräkningarna (beräkningarna) med olika typer av planglas med och utan behandling. Optiwhite är ett glas med låg järnhalt, K-glas är ett lågemissionsbelagt glas med hård beläggning, Optitherm är ett lågemissionsbelagt glas med mjuk beläggning och Active är ett glas med självrengörande beläggning.

#	Takmaterial			Väggmaterial		
		Behandling	U-värde W/(m ² x K)		Behandling	U-värde W/(m ² x K)
1	4 mm planglas	-	7,0	2 x 4 mm planglas, standard växthus	-	4,3
2a	4 mm planglas	-	7,0	2 x 4 mm med luftspalt 8 mm	Optiwhite	4,3
3	4 mm planglas	-	7,0	2 x 4 mm med luftspalt 8 mm	Optitherm (S2)	3,2
4	4 mm planglas	-	7,0	2 x 4 mm med luftspalt 8 mm	Optitherm (S2) + Optiwhite	3,3
6	4 mm planglas	Optiwhite	7,0	2 x 4 mm planglas, standard växthus	-	4,3
7	4 mm planglas	Antireflex + K-glas (S2)	4,8	2 x 4 mm planglas, standard växthus	-	4,3
8	4 mm planglas	Antireflex + K-glas (S2) + Optiwhite	4,8	2 x 4 mm planglas, standard växthus	-	4,3
9	4 mm planglas	Antireflex + Optiwhite	7,0	2 x 4 mm planglas, standard växthus	-	4,3
10	4 mm planglas	Active	7,0	2 x 4 mm planglas, standard växthus	-	4,3
11a	4 mm planglas	Antireflex + K-glas (S2)	4,8	2 x 4 mm med luftspalt 8 mm	Optitherm (S2)	3,2

Effekt- och energibehov

Effektbehovet för de olika alternativen visas i tabellerna 8, för det lilla huset och 9 för det större huset, där även nödvändig pannstorlek har uppskattats. Det är den nödvändiga pannstorleken som ligger till grund för livscykelkostnadsberäkningarna som gjorts längre fram.

Effektbehovet har räknats för en lägsta temperatur på -18 °C (oktober-april) och som kan uppkomma vart 10:e år. Effektbehovet räknas fram utan väv för att klara av snösmältning när det är som kallast. Beräkningarna har gjorts med datorprogrammet EBBE v. 6.0.

I resultaten för nödvändig pannstorlek kan man se att även om effektbehovet minskar med ett nytt material, beräkning 3 för växthuset på 1 000 m², så behöver det inte betyda att pannan blir mindre, då effektminskningen är för liten för att man skall kunna komma ner en pannstorlek. Var denna brytpunkt befinner sig beror på det aktuella fallet, vilket syns tydligt i beräkning 3 för det större växthuset, där en mindre panna kan väljas, trots att effektminskningen är lägre i fallet med det stora växthuset, -3 %, jämfört med -5 % för det mindre huset.

Som väntat har åtgärder i väggarna större betydelse för små växthus, där väggarean har större andel av den omslutande arean, än för stora växthus.

Beräkning av livscykelkostnad (LCC)

Livscykelkostnad (LCC)

För varje beräkning har även livscykelkostnaden beräknats, och dessa redovisas i tabellerna 8, för det lilla huset, och 9, för det stora huset. Ekvationen för att beräkna livscykelkostnaden visas i ekvationen nedan.

$$LCC = \text{Investering} \times (\text{energikostnad} + \text{underhållskostnad}) \times F_{nu}$$

där

LCC	= livscykelkostnaden i kronor
Investering	= investeringskostnaden i kronor
energikostnad	= produktens årliga påverkan på energikostnaden i kronor
underhållskostnad	= produktens årliga underhållskostnad i kronor
F_{nu}	= nusumme faktorn, som räknas fram med hjälp av kalkylränta och livslängd, dimensionslös.

Antagna priser, ränta, m.m.

Investeringskostnaden har varit kostnaden för täckmaterialet exklusive spröjs, stål, aluminium, betong och inredning till växthuset, plus investeringskostnaden för värmepanna.

- Investeringskostnaden för en värmepanna sattes till 3 500 kr/kW.
- Energikostnaden baserades på att man använder pellets och sattes till 0,4 kr/kWh.
- Kalkylräntan sattes till 6 % och livslängden till 10 år.

Livslängden på glasmaterialet är visserligen betydligt längre, men den ekonomiska osäkerheten i växthusbranschen gör att det blir mer förutsägbart med en kortare kalkyltid. Detta sammantaget ger en nusumme faktor för periodiska betalningar på 7. Något restvärde har inte antagits.

Underhållskostnaden sattes till 10 kr/m² för standardglas och till 20 kr/m² för alla andra glasytor. De priser på materialen som har använts i beräkningarna har vi fått från tillverkarna och gäller det prisläge som gäller just nu (2014). Priserna förändras löpande och justeringar kan därför komma att bli aktuella. Det är stor skillnad mellan olika material i prisnivå och vissa beläggningar ger ett dubbelt så högt pris som vanligt glas.

Påverkan på skörd

För varje beräkning har en påverkan på skörden uppskattats. Då det är svårt att bedöma hur produktionen generellt påverkas av förändrad ljustransmission för prydnadsväxter, har genomgående skördepåverkan beräknats för tomat, där en normalskörd har antagits till 52 kg/(m² x år). Skördenivån har antagits variera med 1 % för varje procent som ljustransmissionen förändras. Det innebär att om ljustransmissionen minskar med 1 % kommer skörden att minska med 0,5 kg/m² och år (Hansson, T., 2014). Vidare har ett snittpris på 9 kr/kg tomat antagits.

Samtliga livscykelkostnadskalkyler har gjorts i kalkylbladsprogrammet Apple Numbers v. 2.1.

Resultat

Resultat av livscykelkostnads kalkyler

I de fall där pannan kan minskas ner blir ett betydande bidrag till en positiv livscykelkostnads kalkyl att investeringskostnaden för pannan blir lägre. Detta medför att trots en högre kostnad för behandlat glas kommer den totala investeringen ändå att bli lägre än för referenshuset. Utöver detta kommer de årliga besparingarna för minskad energiåtgång.

I beräkningarna 7 och 8 minskar skörden med 2,6 ton per år, men den totala ekonomin blev ändå bättre tack vare lägre investeringskostnad och minskad energianvändning. För Beräkning 7 blev resultatet knappt 400 000 kr bättre under en tioårsperiod för lilla huset och nästan 1,9 miljoner bättre för det större huset, jämfört med referenshuset.

Även om åtgärder i taket generellt sett har störst effekt när det gäller energianvändning, kan det i vissa fall innebära att en åtgärd i väggen kan minska pannans storlek så mycket att besparing i livscykelkostnad blir avsevärd, vilket tydligt ses i Beräkning 3 för stora huset, där resultatet under en tioårsperiod förbättrades med 10 %, eller knappt 1,3 miljoner kronor.

Idealväxthuset

Utifrån resultatet från beräkningarna 1-10 ovan valde vi att göra en Beräkning för ett tänkt idealväxthus (Beräkning 11a), där de mest ekonomiska lösningarna för väggar och tak har kombinerats i ett idealhus. Idealhuset har beräknats både för 1 000 m² och 5 000 m².

Valda planglaslösningar

Det material som valdes för väggarna är en kasettlösning med 2 x 4 mm planglas med en mjuk lågemissionsbeläggning typ Pilkington OptiTherm på sida två räknat från utsidan, med vanlig luft mellan glasskivorna. I taket valdes ett enkelt skikt planglas på 4 mm, även det med lågemissionsbeläggning, typ Pilkington K-glas, som är en hård beläggning och därför tål mekanisk påverkan.

Effekt- och energibehov

Resultaten för effekt- och energibehov blev desamma som om beräkningarna 3 och 7 lagts ihop, vilket var förväntat. Effektbehovet blev 28 % lägre än för referenshuset och energianvändningen hela 30 % lägre.

Livscykelkostnad (LCC)

För livscykelkostnaden, där hänsyn togs till högre kostnad för glaset, underhållskostnad och något lägre skörd, men en lägre investering i pannanläggning och en årligt lägre energikostnad, blev resultatförbättringen hela 14 % bättre än för referenshuset, vilket motsvarar drygt 2 miljoner kronor under en tioårsperiod.

Känslighetsanalys

I beräkningarna 11b-11e har känslighetsanalyser gjorts för aspekterna: U-värde, energipris, pris för behandlat glas och odling vid lägre temperatur.

U-värdet sämre

I känslighetsanalyserna för U-värdet har det undersökts vad som händer om U-värdet är 10 % sämre för det behandlade glaset jämfört med de teoretiska värdena (Beräkning 11b).

Energipriset lägre

Körningar har gjorts där känsligheten för ett energipris som är 20 % lägre har antagits (Beräkning 11d).

Priset på behandlat glas högre

Priserna på behandlat glas är ungefärligt och varierar från projekt till projekt, olika glasleverantörer med mera. Därför har en känslighetsanalys gjorts där känsligheten för ett pris på behandlat glas är 10 % högre (Beräkning 11e).

Odling vid lägre temperatur

Lägre temperatur innebär lägre energiåtgång, vilket normalt verkar till energieffektiva lösningars nackdel. En Beräkning där både referenshus (1b) och idealhus (11c) har 1 °C lägre temperatur har därför testats.

Tabell 8: Växthus på 1 000 m² i nordvästra Skåne. Resultatet av effekt- och energibehov med respektive utan väv, samt lämplig pannstorlek för att klara effekten. Livscykelkostnaden för de olika alternativen visas även för de olika alternativen liksom skillnad i livscykelkostnad jämfört med referenshuset. Körningar 11b-11e är känslighetsanalyser. Idealväxthuset är markerat med röd ram.

1 000 m² venlo Nordvästra Skåne - effekt, energi och LCC

#	Effektbehov		Energibehov		Skillnad mot referenshus		LCC		Skillnad mot referens	
	Utan väv	Med väv	Panna	per kv.m.	Effekt	Energi	kr	kr	kr	%
	kW	kW	kWh	kWh/m ²	kW	kWh	%	kWh	%	%
1	391	242	400	511 713	512	-	-	3 120 273	-	-
1b	380	235	400	465 084	465	-11	-3 %	2 982 996	-137 277	-4 %
2	391	242	400	511 713	512	0	0 %	3 299 041	178 768	6 %
3	370	230	400	480 095	480	-21	-5 %	3 144 609	24 336	1 %
4	370	230	400	480 095	480	-21	-5 %	3 241 013	120 740	4 %
6	391	242	400	511 713	512	0	0 %	3 195 043	74 770	2 %
7	306	192	300	388 434	388	-85	-22 %	2 723 222	-397 051	-13 %
8	306	192	300	388 434	388	-85	-22 %	2 793 281	-326 992	-10 %
9	391	242	400	511 713	512	0	0 %	3 126 153	5 880	0 %
10	391	242	400	506 563	507	0	0 %	3 246 442	126 169	4 %
11a	284	180	300	358 614	359	-107	-27 %	2 679 250	-441 023	-14 %
11b	309	194	300	393 316	393	-82	-21 %	2 781 414	-338 859	-11 %
11c	276	175	300	326 449	326	-115	-29 %	2 584 556	-398 440	-13 %
11d	284	180	300	358 614	359	-107	-27 %	2 468 096	-652 177	-21 %
11e	284	180	300	358 614	359	-107	-27 %	2 704 655	-415 618	-13 %

Tabell 9: Växthus på 5 000 m² i nordvästra Skåne. Resultatet av effekt- och energibehov med respektive utan väv, samt lämplig pannstorlek för att klara effekten. Livscykelkostnaden för de olika alternativen visas även för de olika alternativen liksom skillnad i livscykelkostnad jämfört med referenshuset. Körningar 11b-11e är känslighetsanalyser. Idealväxthuset är markerat med röd ram.

5 000 m² Nordvästra Skåne - effekt, energi och LCC

#	Effektbehov		Energibehov		Skillnad mot referenshus			LCC		Skillnad mot referens	
	Utan väv	Med väv	Panna	per kv.m.	Effekt	Energi		kr	kr	%	
					kW	kWh	kWh/m ²	%	kWh	%	%
1	1 714	1 065	2 000	2 275 685	-	-	455	-	14 582 323	-	-
1b	1 500	1 035	2 000	2 067 253	-214	-208 432	413	-12 %	13 968 692	-613 631	-4 %
2	1 714	1 065	2 000	2 275 685	0	0	455	0 %	15 196 511	614 188	4 %
3	1 666	1 037	1 500	2 204 590	-48	-71 095	441	-3 %	13 189 038	-1 393 285	-10 %
4	1 666	1 037	1 500	2 204 590	-48	-71 095	441	-3 %	13 414 706	-1 167 617	-8 %
6	1 714	1 065	2 000	2 275 685	0	0	455	0 %	14 956 377	374 054	3 %
7	1 287	817	1 500	1 657 533	-427	-618 152	332	-25 %	12 695 413	-1 886 910	-13 %
8	1 287	817	1 500	1 657 533	-427	-618 152	332	-25 %	13 045 914	-1 536 409	-11 %
9	1 714	1 065	2 000	2 275 685	0	0	455	0 %	14 533 224	-49 099	0 %
10	1 714	1 065	2 000	2 253 550	0	-22 135	451	-1 %	15 419 419	837 096	6 %
11a	1 239	789	1 500	1 590 657	-475	-685 028	318	-28 %	12 497 789	-2 084 534	-14 %
11b	1 346	851	2 000	1 740 775	-368	-534 910	348	-21 %	14 689 742	107 419	1 %
11c	1 205	767	1 500	1 448 822	-295	-618 431	290	-20 %	12 080 222	-1 888 470	-14 %
11d	1 239	789	1 500	1 590 657	-475	-685 028	318	-28 %	11 561 199	-3 021 124	-21 %
11e	1 239	789	1 500	1 590 657	-475	-685 028	318	-28 %	12 594 559	-1 987 764	-14 %

Diskussion

De energiberäkningar som gjorts har varit statiska och har inte tagit hänsyn till massflödena i växthuset och hur dessa påverkas av olika klimatskal. En viktig parameter i det här sammanhanget är hur luftfuktigheten påverkas i växthuset, när man har varmare ytskikt som inte avfuktar luften lika mycket som traditionella enkelglas. En beräkningsmodell som bättre simulerar fuktbalansen med olika glaskvaliteter är därför nödvändig för bättre utvärdering av olika glasbeläggningar. Den beräknade energibesparingen kan eventuellt vara lägre än den som räknats fram i det här arbetet. Däremot är sannolikt effektbehovet oberoende av fuktbalansen.

I livscykelkostnadsberäkningarna har påverkan på skörden antagits utifrån hur mycket som ljustransmissionen påverkas av olika beläggningar. Antagandet är väldigt grovt och det är inte orimligt att skördeutfallet blir helt annorlunda, då olika beläggningar även påverkar ljusspektrat och ljusets diffusion. Praktiska försök med diffuserande material, både vävar och glas, har visat att diffusering av ljus uppväger en lägre ljustransmission och detta har inte tagits hänsyn till i det här arbetet.

Beräkningarna är gjorda för nybyggnation av växthus och omfattar därför investering i ett värmesystem och de besparingar som är möjliga att göra i systemet till följd av en mindre energiåtgång. I de fall ett byte av täckmaterial i ett befintligt växthus ska göras kommer kalkylen bli en annan. Vid byte av täckmaterial kan fler material än glas komma att bli aktuellt vilket gör att fler studier och beräkningar på detta måste göras.

I denna studie har endast teoretiska beräkningar av livscykelkostnader och investeringskostnader för materialen undersökts. De olika täckmaterialen kommer att påverka växterna och dessa aspekter har förutom när det kommer till skörd inte tagits med. Lågmissionsglas som reflekterar tillbaka större andel värmestrålning in i husen gör att bladtemperaturen kommer att öka vilket i sin tur gör att transpirationen kommer att öka. Simuleringar i Nederländerna har visat att lågmissionsglaset ger fuktigare hus. I ett hus som ger en högre bladtemperatur skulle man kunna sänka lufttemperaturen och därmed spara ytterligare energi.

Slutsatser

Det finns idag nya typer av glaslösningar som är bättre än befintliga glaslösningar. Beroende på hur och vad man odlar så kan de vara bättre både ekonomiskt och odlingsmässigt. Dessa glaslösningar finns i dag på marknaden och är tillgängliga för installation.

Numera finns tekniska lösningar för hur man kan ha dubbelglaskassetter med glasmaterial i tak som är bättre än polykarbonat avseende ljustransmission, U-värde och hållbarhet.

Vid nybyggnation av växthus är det ekonomiskt lönsamt att fokusera på effekt- och energibesparingarna och inte bara på att få ett material som maximerar skördenivån. Det blir billigare att bygga med mera energieffektivt material om pannstorleken blir mindre till följd av ett mindre effektbehov.

Fotoperioden, ljuskvaliteten (ljusspektrat, våglängderna) och ljusintensiteten påverkar alla växter på olika sätt. För att kunna utvärdera lämpligheten av olika täckmaterial kan vissa material uteslutas till följd av ofördelaktiga ljusspektra. För att kunna avgöra den slutliga kvaliteten som de medför behöver dock utvärderande provodlingar med växter göras. Det är då viktigt att få med långdags- och kortdagsväxter, dagsneutrala prydnadsväxter samt gurka och tomat eftersom alla reagerar mer eller mindre starkt på olika ljusförhållanden.

Framtida arbete

Ljuset påverkar tillväxten, utvecklingen och utseendet hos plantor och det är därför viktigt att täckmaterialens påverkan på ljussammansättningen är känd. Täckmaterialen kan påverka allt från inkommande mängd ljus till vilket spektra av ljus som tränger igenom. Det är särskilt viktigt att ha kontroll på plantresponser vid kombination av flera olika beläggningar. Det finns därför ett stort behov av fortsatta studier av plantresponser för olika transparenta lösningar för växthusproduktion.

Referenser

- Blanchard, M.G. och Runkle E.S. 2010. Influence of NIR-Reflecting Shading Paint on Greenhouse Environment, Plant Temperature and Growth and Flowering of Bedding Plants. *Transactions of the ASABE*, 53(3) 939-944.
- Bräuer, G. 1999. Large area glass coating. *Surface and Coatings Technology*, 112(1-3), 358-365.
- Castilla, N. 2012. *Greenhouse Technology and Management, 2nd Edition*. CAB International, Wallingford.
- Deubener, J., Hensch, G., Moiseev, A. och Bornhöft, H. 2009. Glasses for solar energy conversion systems. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(7), 1203-1210.
- Gordon, R. 1997. Chemical vapor deposition of coatings on glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 218, 81-91.
- Gordon, R. 1983. Non-iridescent glasstructures, US Patent 4377613.
- Hammarberg, E. och Roos, A. 2003. Antireflection treatment of low-emitting glazings for energy efficient windows with high visible transmittance. *Thin Solid Films*, 442(1-2), 222-226.
- Hansson, T., Personligt meddelande 2014. Grön Kompetens AB. Grön Kompetens AB.
- Hensch, G. och Deubener, J. 2012. Compatibility of antireflective coatings on glass for solar applications with photocatalytic properties. *Solar Energy*, 86(3), 831-836.
- Hemming, S., Kempkes, F.L.K. och Mohammadkhani, V. 2011. New Glass Coatings for High Insulating Greenhouses without Light Losses - Energy Saving, Crop Production and Economic Potentials. *Acta Horticulturae* 893, 217-226.
- Liu, B. och Heins, R.D. 2002. Photothermal ratio affects plant quality in 'Freedom' poinsettia. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127(1), 20-26.
- Ludvigsson, M. 2011. *Functional Coatings PX00101*. Projektrapport, Glafo AB, Glasforskningsinstitutet, Växjö, Sweden.
- Marcelis, L.F.M., Broekhuijsen, A.G.M., Meinen, E., Nijs, E.M.F.M. och Raaphorst, M.G.M. 2006. *Quantification of the growth response to light quantity of greenhouse grown crops*. In: Proceedings of the Vth International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture, 97-103.
- Mata, D.A. och Botto, J.F. 2009. Manipulation of Light Environment to Produce High-quality Poinsettia Plants. *Hortscience*, 44(3), 702-706.
- Max, J.F.J., Reisinger, G., Hofmann, T., Hinken, J., Tantaud, H.-J., Ulbrich, A., Lambrecht, S., von Elsner, B. och Schurr, U. 2012. Glass-film-combination: Opto-physical properties and energy saving potential of a novel greenhouse glazing system. *Energy and Buildings*, 50, 298-307.
- Mortensen, L.M. 2004. Growth and light utilization of pot plants at variable day-to-day irradiances. *European Journal of Horticultural Science*, 69(3), 89-95.
- Nawkar, G.M., Maibam, P., Park, J.H., Sahi, V.P., Lee, S.Y. och Kang, C.H. 2013. UV-Induced Cell Death in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(1), 1608-1628.

- Rajapakse, N., Cerny, T., Li, S.M. och Oi, R. 2001. *Alteration of greenhouse light environment by photoselective covers to produce compact plants*. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Current Trends for Sustainable Technologies, Vols I and II, 243-248.
- ReduSystems 2014. <http://www.redusystems.co.uk/>. Mardenkro B.V., Nederländerna.,
- Rios, P.F., Dodiuk, H. och Kenig, S. 2009. Self-cleaning coatings. *Surface Engineering*, 25(2), 89-92.
- Runkle, E.S. och Heins, R.D. 2003. Photocontrol of flowering and extension growth in the long-day plant pansy. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(4), 479-485.
- Schaefer, C., Bräuer, G. och Szczyrbowski, J. 1997. Low emissivity coatings on architectural glass. *Surface and Coatings Technology*, 93(1), 37-45.
- Schuerger, A.C. och Brown, C.S. 1997. Spectral quality affects disease development of three pathogens on hydroponically grown plants. *Hortscience*, 32(1), 96-100.
- Stelzer, I. 2009. High UV-transmission laminated glass interlayer supports near-natural plant prosperity. In: *Glass Performance Days, June 11-15, 2009*, Tampere, Finland, 361-362.
- Tantau, H.-J. 2012. Das Niedrigenergiegewächshaus - Methode zur Analyse der Wärmeströme und der PAR-Durchlässigkeit. (Low Energy Greenhouse - Method to Analyse Heat Flux and PAR-Transmittance). *Landtechnik*, 67(3), 196 - 204.
- Technokas 2014. <http://www.technokas.nl/>. De Lier, Nederländerna.
- van Adrichem, A., Personligt meddelade 2014. Duijvestijn Tomaten. <http://duijvestijntomaten.nl/>. Pijnacker, Nederländerna. Duijvestijn Tomaten. <http://duijvestijntomaten.nl/>. Pijnacker, Nederländerna.
- Wang, F.J., Lei, S., Ou, J.F., Xue, M.S. och Li, W. 2013. Superhydrophobic surfaces with excellent mechanical durability and easy repairability. *Applied Surface Science*, 276, 397-400.
- Zhang, X.-T., Sato, O., Taguchi, M., Einaga, Y., Murakami, T. och Fujishima, A. 2005. Self-cleaning particle coating with antireflection properties. *Chemistry of Materials*, 17(3), 696-700.