

# MODELLERING OCH OPTIMERING AV DET NATURLIGA LJUSFLÖDET I BLOCKVÄXTHUS

Delrapport för projekt Heijastus –  
valo- ja energiatehokkuuden parantaminen  
nykyisissä ja uusissa kasvihuoneissa

Mats Braskén







# MODELLERING OCH OPTIMERING AV DET NATURLIGA LJUSFLÖDET I BLOCKVÄXTHUS

DELRAPPORT FÖR: Heijastus– valo- ja energiatehokkuuden  
parantaminen nykyisissä ja uusissa kasvihuoneissa

Mats Braskén\*

\* YrkesHögskolan Novia, Wolffskavägen 33, 65200 Vasa



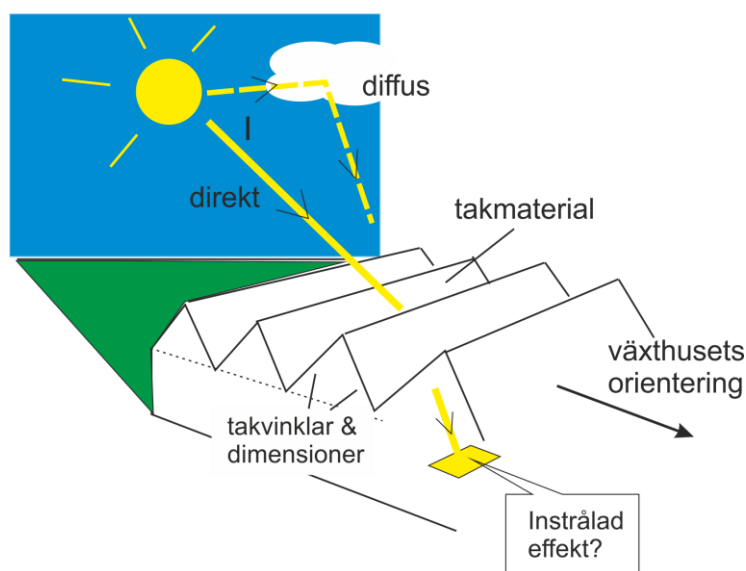
Europeiska jordbruksfonden för  
landsbygdsutveckling:  
Europa investerar i landsbygdsområden

## 1. INLEDNING

Växthusodling under de kalla och mörka perioderna av året i Finland är en energikrävande verksamhet och målet är givetvis att så långt som möjligt minimera åtgången av energi. Genom att optimera plantornas tillgång till naturligt ljus, under de månader då detta är möjligt, hoppas man t.ex. kunna minska användningen av energikrävande konstbelysning.

I en tidigare delrapport (se rapporten ”Solstatistik för Sydösterbotten”) har tillgången på solljus i de Sydösterbottniska kustregionerna under året behandlats. Den föreliggande delrapporten har som mål att undersöka hur solstrålningen transporteras genom växthusets tak och hur t.ex. valet av växthusorientering, takmaterial och åsvinklar påverkar tillgången på naturligt ljus inne i växthuset (se figur 1). I denna rapport har vi valt att koncentrera oss på s.k. blockväxthus, där samma takåselement upprepas ett flertal gånger längs växthusets längdriktning. För ett större blockväxthus kommer största delen av det ljus som når plantorna, att ha passerat genom taket, varför vi kommer att koncentrera oss på taket och försumma väggarna.

Den här rapporten har gjorts inom projektet ”Heijastus – valo- ja energiatehokkuuden parantaminen nykyisissä ja uusissa kasvihuoneissa” som finansierats av Europeiska jordbruksfonden för landsbygdsutveckling: Europa investerar i landsbygdsområden, beviljat av Österbottens och Södra Österbottens NTM-centraler. Rapporten ingår i en större helhet. Vasa universitet har fungerat som projektägare och Yrkeshögskolan Novia som en delgenomförare.

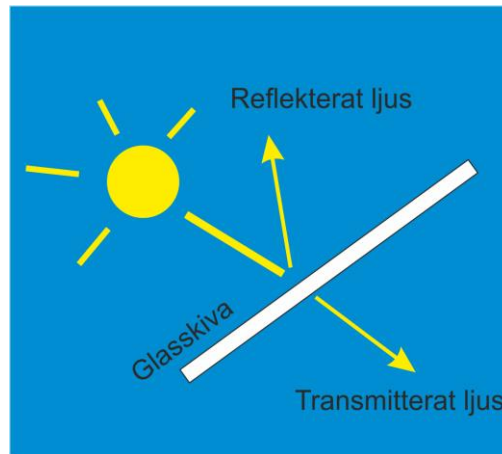


Figur 1. Några av faktorerna som påverkar hur mycket naturligt ljus som når växtligheten inne i ett blockväxthus.

I kapitel 2 och 3 beskrivs hur modelleringen av ett blockväxthus utförts, medan resultaten av denna modellering redovisas i kapitel 4.

## 2. HUR LJUS PASSERAR GENOM GLAS

För att dagsljuset skall nå plantorna inne i växthuset, måste det först passera växthuset tak och väggar. I de flesta fall är materialet som ljuset måste passera glas. Ljus som träffar en glasskiva kan antingen reflekteras, brytas och passera genom (transmitteras), eller absorberas i glaset (se figur 2) [1]. Om man vill utnyttja det naturliga dagsljuset maximalt, vill man givetvis att en så stor del av det inkommande ljuset som möjligt skall transmittas genom växthuset tak.

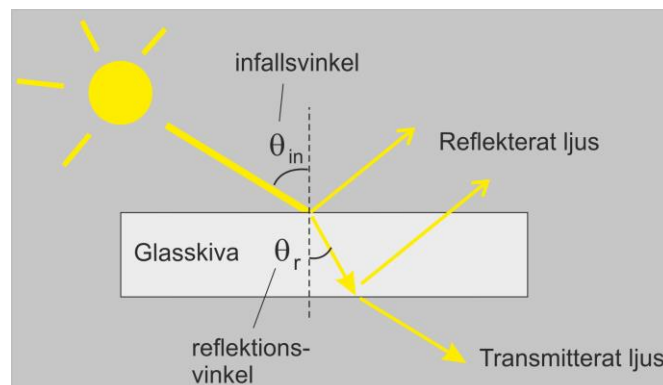


Figur 2. Solljus som faller in mot en glasskiva kan antingen gå genom glaset (transmitteras), reflekteras, eller absorberas i glaset.

Hur stor andel av det inkommande solljuset som transmittas, beror av ljusets infallsvinkel och takmaterialets egenskaper. Vill man maximera mängden solljus som går genom växthuset tak, har man alltså två variabler att spela med (om vi antar att växthuset orientering är fixerad): takvinklarna och takmaterialet. I detta sammanhang bör påpekas att vi inte beaktar effekten av ogenomskinliga takdetaljer (rännor, lister, osv.), vilka givetvis också minskar mängden ljus som passerar genom taket.

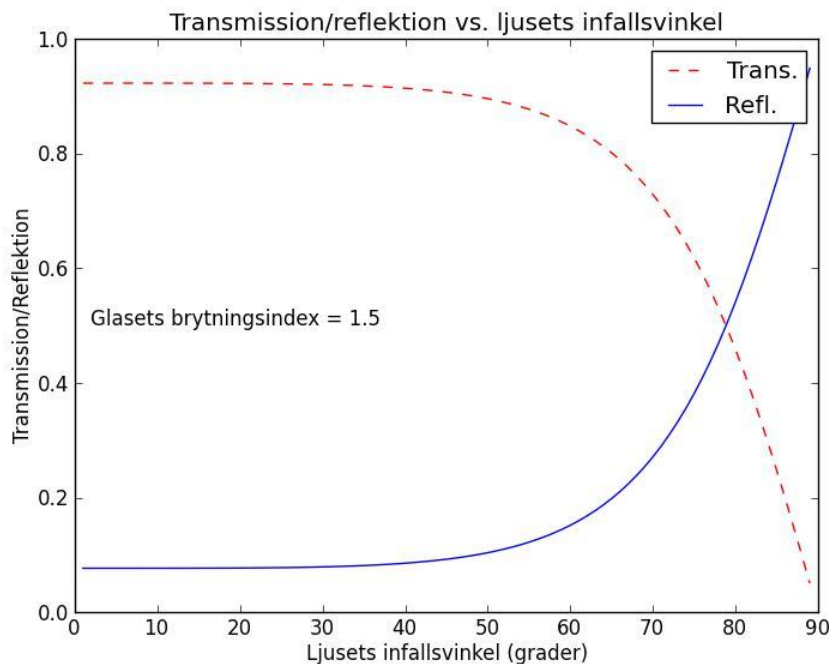
### 2.1 Fresnels ekvationer

Givet en viss glasskiva, så är vi intresserad av hur mycket av det inkommande ljuset som går genom och hur mycket som reflekteras. Svaret på denna fråga beror av typen av glas och av ljusets infallsvinkel (se figur 3).



Figur 3.

Ekvationerna som ger andelen av det inkommande ljusets som går genom glasskivan, dvs. den så kallade transmissionskoefficienten  $T$ , kallas Fresnels ekvationer. Fresnels ekvationer finns kort beskrivna i bilaga A. I figur 4 nedan visas hur transmissionskoefficienten (och reflektionskoefficienten) ändrar med ljusets infallsvinkel. I exemplet har vi använt glas med brytningsindex  $n = 1,5$ .



Figur 4. Transmissionskoefficienten ( $T$ ) och reflektionskoefficienten ( $R$ ) beror av ljusets infallsvinkel. Vi ser att för en infallsvinkel nära  $90^\circ$  reflekteras det mesta av det inkommande ljuset ( $R \approx 1$  och  $T \approx 0$ ). Vid alla vinklar gäller att  $T + R = 1$  om inget ljus absorberas i glaset.

Ur grafen kan vi t.ex. utläsa att för en infallsvinkel på  $\theta_{in} = 10^\circ$ , är transmissionskoefficienten  $T \approx 0,92$ . Det innebär att om det inkommande solljusets intensitet är  $100 \text{ W/m}^2$ , så passerar  $92 \text{ W/m}^2$  genom glaset och  $8 \text{ W/m}^2$  reflekteras.

## 2.2 Olika glastypers brytningsindex

Hur mycket av det inkommande (synliga) ljuset som passerar en glasskiva, beror av glasets brytningsindex ( $n$ ) och glasets absorptionskoefficient ( $\beta$ ). I de flesta fall kan man försumma den absorption som sker i en tunn, ren glasskiva (för en glasskiva täckt av is, snö, eller smuts är situationen givetvis en annan) [1]. I tabell 1 nedan ges brytningsindex och transmissionen för ett antal olika tillverkares glasskivor. Dessa glasskivor används bland annat som tak och väggmaterial i växthus.

Tabell 1. Tabell över de optiska egenskaperna (synligt ljus/PAR) för växthusglas från några olika tillverkare. Transmissionsvärdena är angivna för strålning som faller in vinkelrätt mot glaset ( $\theta_{in} = 0^\circ$ ) och i vissa fall också för transmissionen av diffust ljus (ljus med  $\theta_{in} = 0^\circ \rightarrow 90^\circ$ ). Brytningsindexet ( $n$ ) har beräknats utgående från det angivna transmissionsvärdet ( $T$ ) med hjälp av formel (A.5) i bilaga A.

Material	Transmission (%) (vinkelrät)	Transmission (%) (diffus)	Brytningsindex	Tillverkare/ referens
Floatglass, 4 mm	89–90	82	1,64–1,60	a)
White glass, 4 mm	90–91	83	1,60–1,56	a)
Anti-reflection glass, 4 mm	95–97	89–90	1,28–1,38	a)
Diffuse glass, 4 mm	90–91	76–82	1,56–1,60	a)
DA glass	>90	>81 (with 50% haze)	< 1,64	b)
Floatglass	90	82,5 (with 0% haze)	1,64	c)
Diffuse glass	>92	>83,5 (with 15% haze)	< 1,51	c)
Diffuse glass + anti-reflection	>96	>88,5 (with 15% haze)	< 1,33	c)
Diffuse glass	91 (with 27,5% haze)		1,60	d)
Diffuse glass	>92 (with 75% haze)		< 1,51	d)
Low iron floatglass	91+		1,60	d)

Som vi ser av tabellen så ligger brytningsindexet hos de flesta tillverkares glas mellan 1,3 och 1,6. Transmissionen av ljus som faller in vinkelrätt mot glaset ( $\theta_{in} = 0^\circ$ ) varierar, beroende på tillverkare, mellan 89 % och 97 %. Innan man drar förhastade slutsatser angående möjliga ljusintensitetsvinster, måste man hålla i minnet att glas med lågt brytningsindex och hög transmission, oftast är betydligt dyrare än vanligt fönsterglas.

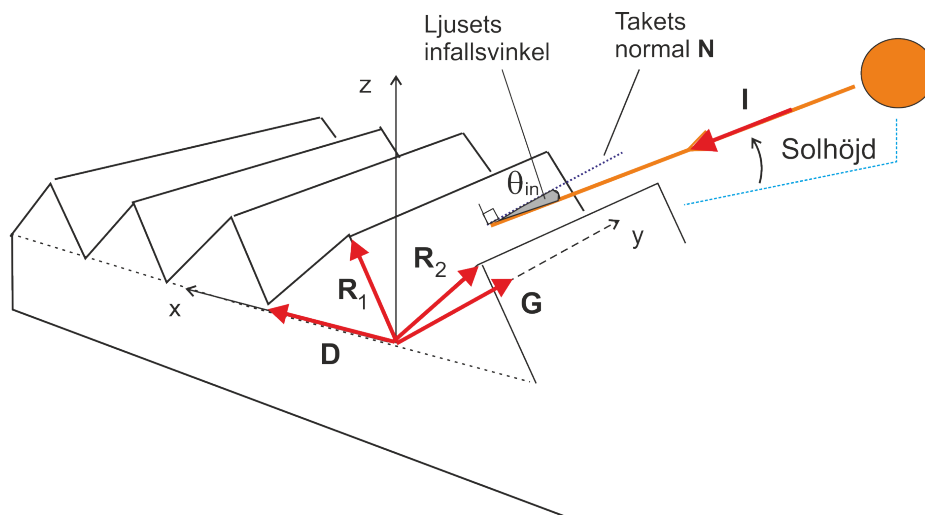
### 3. MODELL AV ETT BLOCKVÄXTHUS

Vårt mål i detta kapitel är att skapa en modell av taket på ett blockväxthus (se figur 5). Denna modell har som mål att, från den inkommande ljusintensiteten, förutsäga den ljusintensitet som går genom takglaset.



Figur 5. Martin Siggs blockväxthus i Pjelas (Sydösterbotten) där mätningar av ljusintensiteten gjorts och som tjänar som modellväxthus i vissa av våra beräkningar.

Vår modell av blockväxthuset måste vara flexibel nog att tillåta olika takkonstruktioner, glasmaterial och orientering av växthuset. Utöver detta måste modellen klara av direkt solstrålning (från olika lägen hos solen) och diffus strålning. En sådan flexibel växthusmodell har tagits fram av Zwart [2] och är den vi kommer att använda oss av. Modellen utgår från ett antal fördefinierade vektorer, samt en variabel vektor (se figur 6).

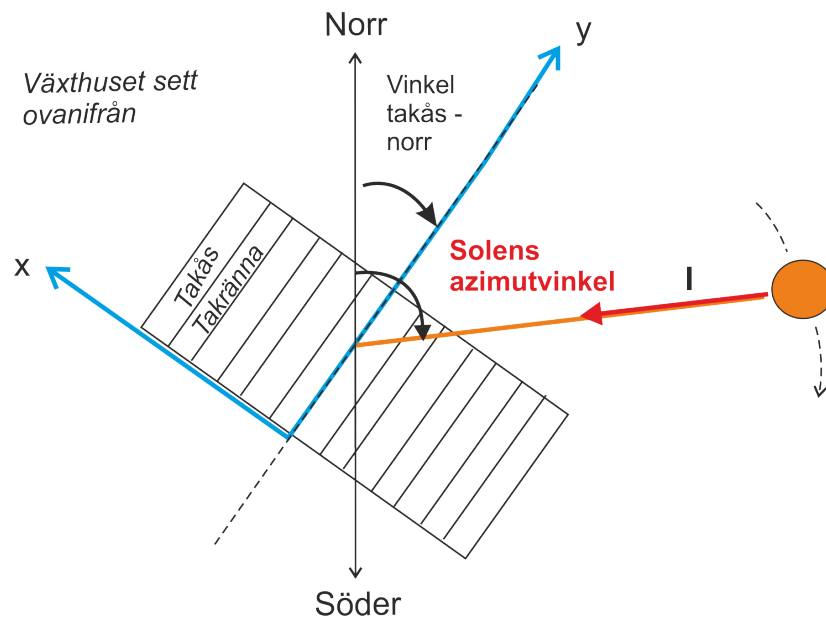


Figur 6. Växthusets form (åshöjd och taklutning) definieras av de fixa vektorerna  $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{R}_2$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{N}$  och  $\mathbf{G}$ . Det inkommande ljusets riktning (som ändras med solens läge) ges av vektorn  $\mathbf{I}$ .

I figur 7 visas samma växthus, men nu sett ovanifrån. Solens läge på himlen bestäms av två vinklar, solhöjden och den s.k. azimutvinkeln. Exempelvis när solen vid middagstid står rakt i söder, är solhöjden maximal och azimutvinkeln  $180^\circ$ . Solens rörelse på himlen beskrivs i vår växthusmodell av att intensitetsvektorn  $\mathbf{I}$  ändras både storlek och riktning under dagens lopp.



Eftersom vi vill behålla friheten att växthusets längdriktning inte behöver vara fixerad, så måste vi också ange en vinkel mellan växthusets takåsar och nordriktningen (figur 7).

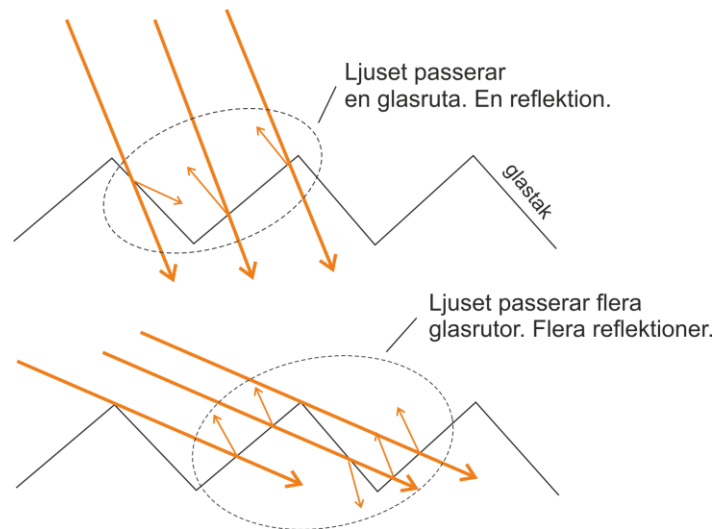


Figur 7. Ett Blockväxthus sett ovanifrån. Solens läge på himlen mäts relativt norr (azimutvinkeln). Växthusets orientering ges med hjälp av vinkeln mellan husets åsriktning (y-axeln) och nordriktningen.

Zwarts modell tillåter också att man beaktar ogenomskinliga takelement i modellen (takrännor, stödbalkar, etc.) [2]. Vi kommer inte att beakta effekten av dessa skuggande element i våra beräkningar, utan endast se på hur takglaset påverkar ljustransmissionen.

### 3.1 Solljusets passage genom glastaket

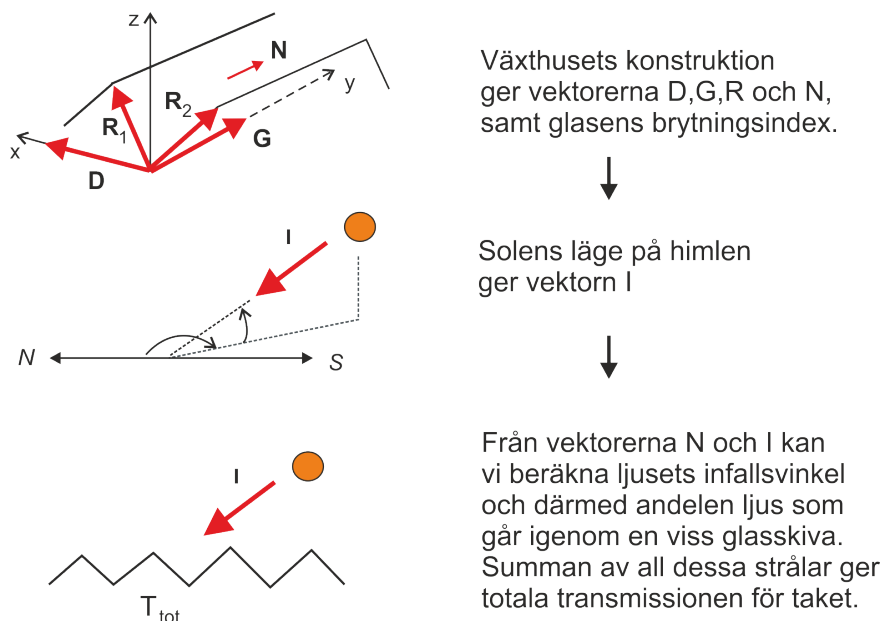
Hur stor andel av det inkommande solljuset som passerar genom en glasskiva i växthusets tak, beror främst på ljusets infallsvinkel (se figur 3). När solen står lågt på himlen är ljusets infallsvinkel stor och därmed ökar också andelen reflekterat ljus, medan andelen ljus som transmitteras minskar. En annan effekt av att solen står lågt på himlen, är att ljuset hamnar att passera flera glasskivor och därmed reflekteras upprepade gånger innan det når växthusets inre (se figur 8). Att beakta dessa upprepade transmissioner/reflektioner, är väsentliga för att få ett korrekt värde på den transmitterade ljusintensiteten tidigt och sent på dagen, samt för de delar under året när solen inte når så högt över horisonten (tidig vår-vinter- och sen höst).



Figur 8. Hur solljuset passerar genom växthusets glastak beror av solens höjd på himlen och takets form. Mitt på dagen när solen står högt passerar solljuset genom endast en glasskiva, medan senare (eller tidigare) på dagen kan ljuset gå genom flera glasrutor och reflekteras upprepade gånger.

### 3.2 Att ställa upp och lösa växthusmodellen

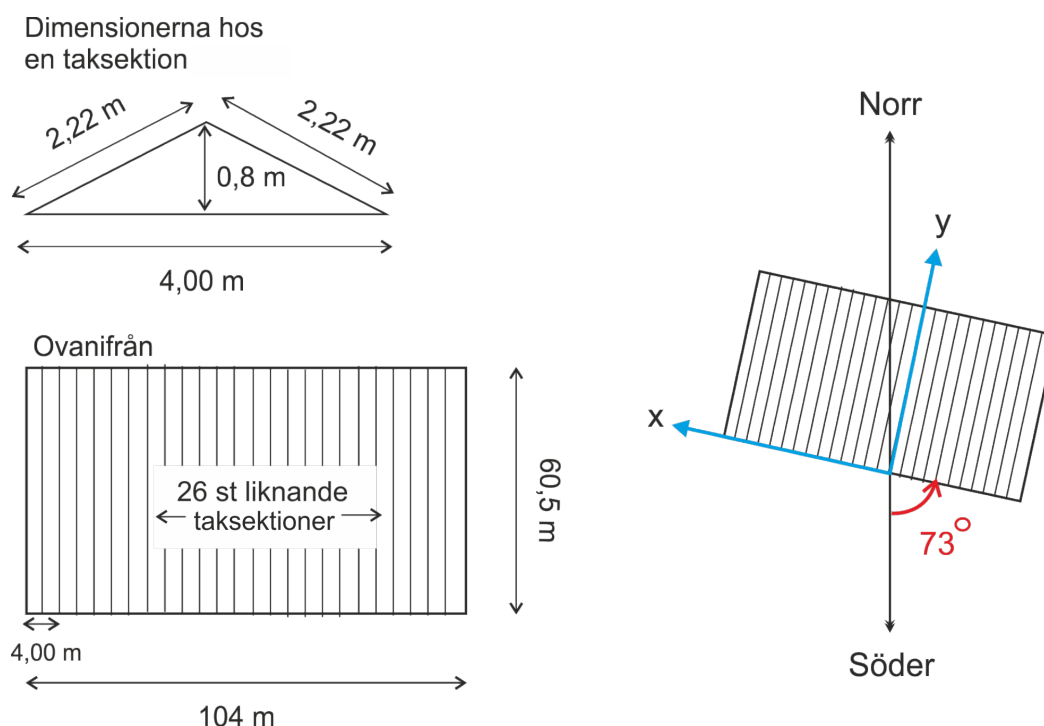
Att lösa vår växthusmodell för ett visst blockväxthus (given takkonstruktion, glasmaterial och orientering), innebär att vi för en viss solposition beräknar andelen av solljuset som passerar genom taket. Denna information sammanfattas i takets totala transmissionskoefficient  $T_{tot}$ . De viktigaste stegen i dessa beräkningar sammanfattas i figur 9 (för detaljer se [2]).



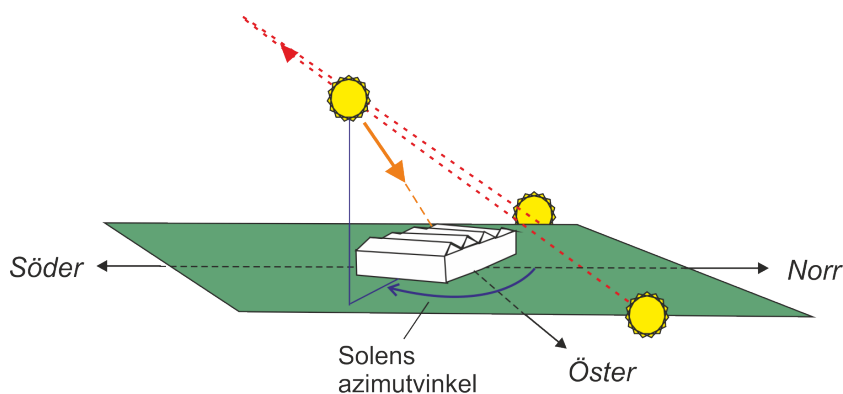
Figur 9. Stegen i beräkningen av växthustakets totala transmission  $T_{tot}$ .

### 3.3 Modellblockväxthuset

Som vårt exempelblockhus skall vi använda oss av Martin Siggs växthus, beläget i Pjelas, Närpes (lat  $62,40^\circ$ , long  $21,38^\circ$ ). Detta blockväxthus består av 26 stycken liknande takelement och hela odlingsdelen av växthuset har en längd på cirka 104 m och bredd 60,5 m (se figur 10). Glastaket består av 4 mm tjockt dragglas (float glass), vilket enligt tabell 1 har en transmission på 89–90 % för en infallsvinkel på  $0^\circ$ . Detta motsvarar ett brytningsindex på 1,64–1,60. Vi bör notera att vi här endast beaktar transmissionen genom taket, dvs. vi innefattar inte transmissionen genom växthusets sidor i våra beräkningar. En annan sak som utesluts ur våra beräkningar, är effekten av ogenomskinliga takelement (stuprännor, stödkonstruktioner, etc.). Solens rörelse över växthuset en typisk vårdag visas i figur 11.



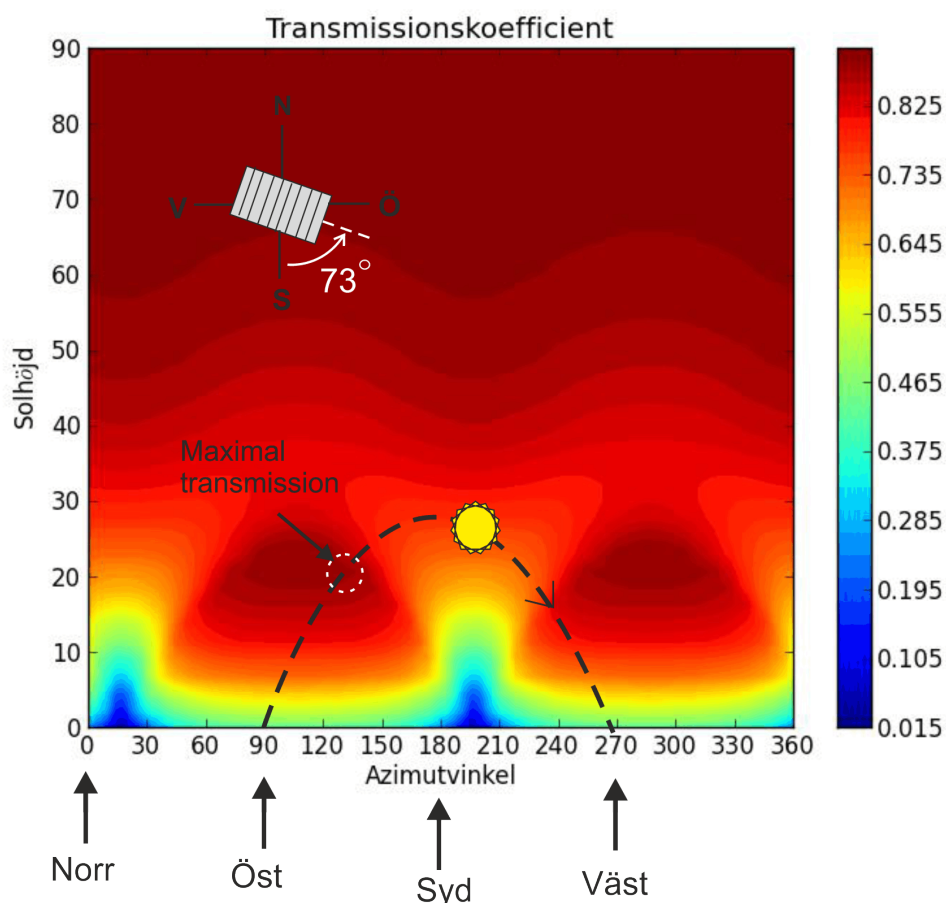
Figur 10. Dimensionerna för och orientering hos det blockväxthus vi använder oss av som modell i våra beräkningar.



Figur 11. Under dagens lopp rör sig solen över himlen och belyser taket från olika vinklar. Solens läge på himlen ges av solhöjden och azimutvinkeln.

### 3.3.1 Transmissionen genom modellblockväxthusets tak

Givet växthuset i figur 10, är vi intresserade av att beräkna den totala transmissionen genom takglaset för olika lägen hos solen. På morgonen står solen ännu lågt på himlen och infallsvinkeln är stor, varför vi förväntar oss att även transmissionen är liten. Senare på dagen, när solen står högre på himlen, är infallsvinkeln mindre och transmissionen därför större. Transmissionskoefficientens värde för olika solpositioner finns återgivet i figur 12. Värdena är för det blockväxthus som beskrivs i figur 10.

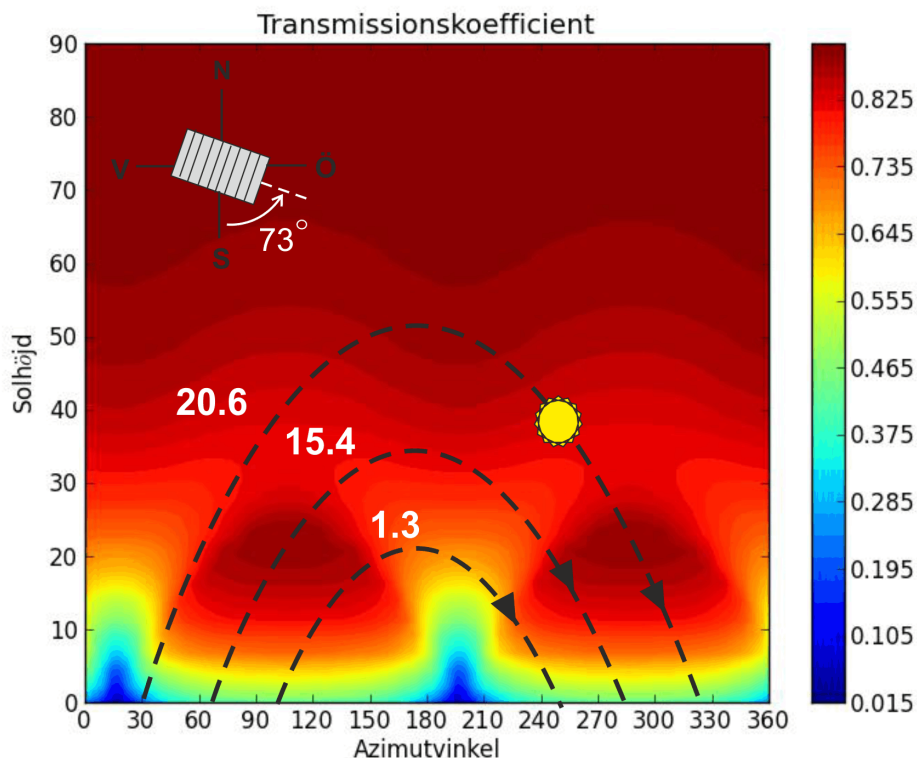


Figur 12. Konturgrafen visar transmissionskoefficienten hos vårt modellväxthus för olika solpositioner. Djupröd färg innebär en hög transmission och mörkblå en låg. Som exempel visas också solens rörelse över himlen en vårdagjämningsdag (20 mars). Solen går upp i öster (azimutvinkel = 90°), står vid middagstid (azimutvinkel = 180°) som högst på himlen (solhöjden = 27°) och går ner i väster (azimutvinkel = 270°). Vi ser att transmissionen genom takglaset är som störst på förmiddagen när solens azimutvinkel är ca 130° och solhöjden ca 20°.

Vi ser från figur 12 att vi har en låg transmission (blå-grön-gul färg) när solens azimutvinkel är kring 200°. Vid denna tidpunkt och solvinkel, faller solens strålar in längs med växthusets takåsar och ljusets infallsvinkel är stor. Solen lyser nästan vinkelrätt mot takåsarna när azimutvinkeln är cirka 110° och då är infallsvinkeln som minst och transmissionen som störst.

### 3.3.2 Transmissionen under olika tidpunkter på året

Eftersom solens exakta bana över himlen beror av tidpunkten på året, kan ett växthus ha en optimal ljustransmission för vissa tider på året, men en sub-optimal för andra tider. I figur 13 visas solens bana över himlen för tre olika dagar under året. I figuren har vi valt 1:a mars, 15:e april och 20:e juni. Dessa solbanor gäller för Sydösterbotten (Pjelax). Vi ser att som blockväxthuset nu är orienterat, så utnyttjar det solljuset som bäst under förmiddagen på våren (mars–april), medan under sommarmånaderna (juni–juli) utnyttjas eftermiddagsljuset optimalt. Det bör påpekas att dessa beräkningar förutsätter att ingenting skymmer solen under dagens lopp, så som träd eller andra byggnader.



Figur 13. Transmissionen genom blockväxthusets tak under tre olika dagar på året. Dessa solbanor gäller för den ort där vårt modellväxthus är placerat (Pjelax, Sydösterbotten).

### 3.3.3 Transmitterade intensiteten genom takglaset

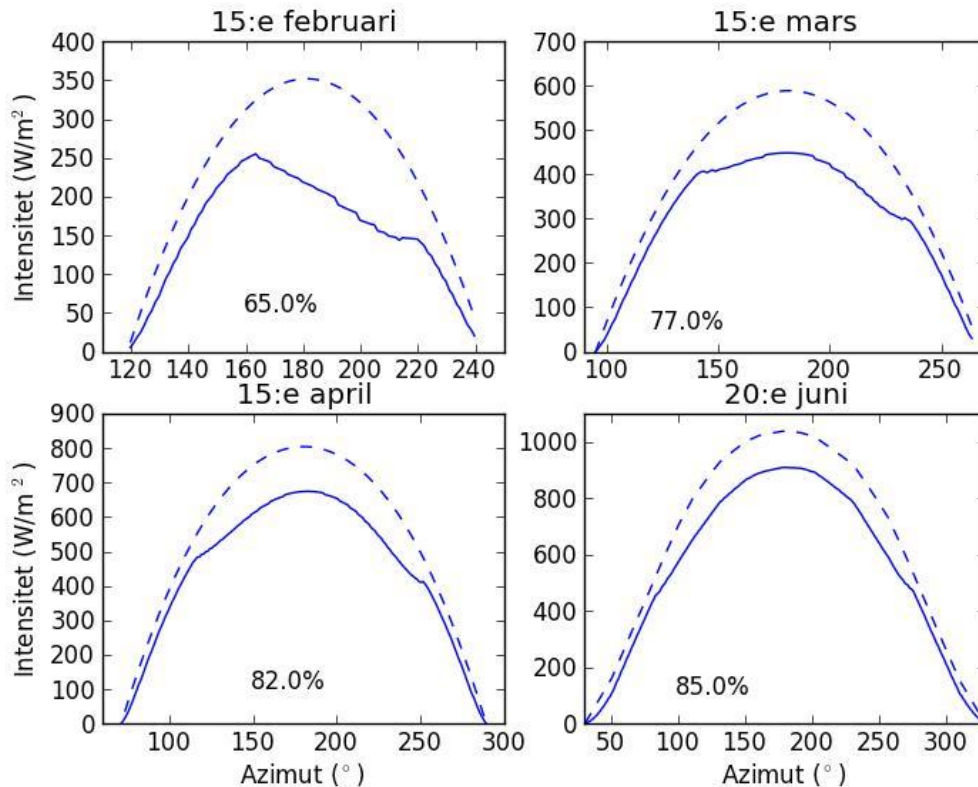
Vad man som växthusodlare är intresserad av är inte bara den totala transmissionen ( $T$ ), utan främst mängden solenergi som går genom takglaset och når plantorna. Eftersom det inkommande solljusets intensitet ( $I$ ) beror av solhöjden ( $\theta$ ) enligt

$$I(\theta) = I_0 \sin(\theta) \quad (1)$$

så blir den transmitterade intensiteten för en viss solposition ( $\xi$  = azimutvinkel,  $\theta$  = solhöjd)

$$I_{trans}(\xi, \theta) = T(\xi, \theta) \cdot I(\theta) \quad (2)$$

Den transmitterade intensiteten under fyra olika dagar på året visas i figur 14. Notera att dessa grafer är unika för den takkonstruktion och växthusorientering som är definierade i figur 10. Vi skall senare studera vad som händer när t.ex. blockväxthusets orientering ändras.

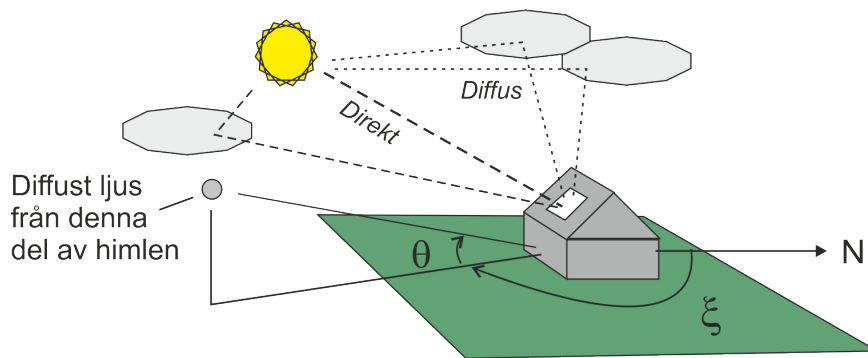


Figur 14. Den inkommande (streckade linjen) och den transmitterade (heldragna) solintensiteten, i enheten watt per kvadratmeter, för fyra olika dagar under året. Angivet i graferna finns också den totala procenten solenergi som passerar genom glastaket under samma dygn (t.ex. 65 % den 15:e februari). Att procenten är lägre under vårvintern, än under sommaren, beror på att solen står lågt på himlen under vår-vintern och reflektionsvinkeln därför är större än under sommarmånaderna.

### 3.3.4 Diffus strålning

Resultaten i föregående kapitel antar att vi har en solig dag med enbart direkt solstrålning. Eftersom inte alla dagar är soliga, utan vi har en fördelning mellan direkt och diffus strålning (se delrapporten ”Solstatistik för Sydösterbotten” för mer detaljer), så måste vi också ta med hur stor del av det diffusa ljuset som går genom takglaset (se figur 15). Den diffusa transmissionskoefficienten,  $T_{\text{diffus}}$ , kan beräknas genom att utgå från koefficienten för en given solposition och därefter integrera över alla solvinklar [3]:

$$T_{\text{diffus}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} T(\xi, \theta) \cdot I(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) d\theta d\xi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) d\theta d\xi} \quad (3)$$



Figur 15. Ljuset från himlen kommer inte endast från solen, utan kan först reflekteras och spridas av moln. Detta s.k. diffusa ljus når oss från hela himlen och är helt dominerande en molnig dag.

Intensitetsuttrycket  $I_d(\theta)$  beskriver hur det diffusa ljuset beror av vinkeln över horisonten ( $\theta$ ). Ser man på himlen även en helt mulen dag, så är horisonten ( $\theta = 0^\circ$ ) lite mörkare än himlen rakt ovanför ( $\theta = 90^\circ$ ). Ett ofta använt uttryck för hur  $I_d(\theta)$  varierar, är [4]:

$$I_d(\theta) = \frac{1+3 \cdot \sin(\theta)}{4} \quad (4)$$

Använder vi uttryck (4) och utför integrationen i ekvation (3) för vårt modellväxthus, så får vi en diffus transmission som är  $T_{diffus} = 0,851$ . Detta innebär att cirka 85 % av den diffusa strålningen från himlen går genom växthustaket. Känner vi alltså till fördelningen mellan direkt och diffus strålning från himlen en viss dag under året (se delrapporten ”Solstatistik för Sydösterbotten” för mer detaljer), så kan vi beräkna den totala strålningen inne i växthuset som:

$$I_{total} = T(\xi, \theta) \cdot I(\xi, \theta) + T_{diffus} \cdot I_{diffus} \quad (5)$$

Som exempel kan vi ta en vårdag i mars (28.3), klockan 13:00. Vid denna tidpunkt är solhöjden  $\theta = 30^\circ$  och azimutvinkeln  $\xi = 191^\circ$ . Dessa solvinklar ger en direkt transmissionskoefficient som är  $T(\xi = 191^\circ, \theta = 30^\circ) = 0,74$  för vårt modellväxthus. Om det direkta solljusets intensitet utanför växthuset uppmäts till  $190 \text{ W/m}^2$  och den diffusa intensiteten till  $192 \text{ W/m}^2$ , så blir den totala intensiteten inne i växthuset, enligt ekvation (5)

$$I_{total} = 0,74 \cdot 190 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 0,85 \cdot 192 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 304 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

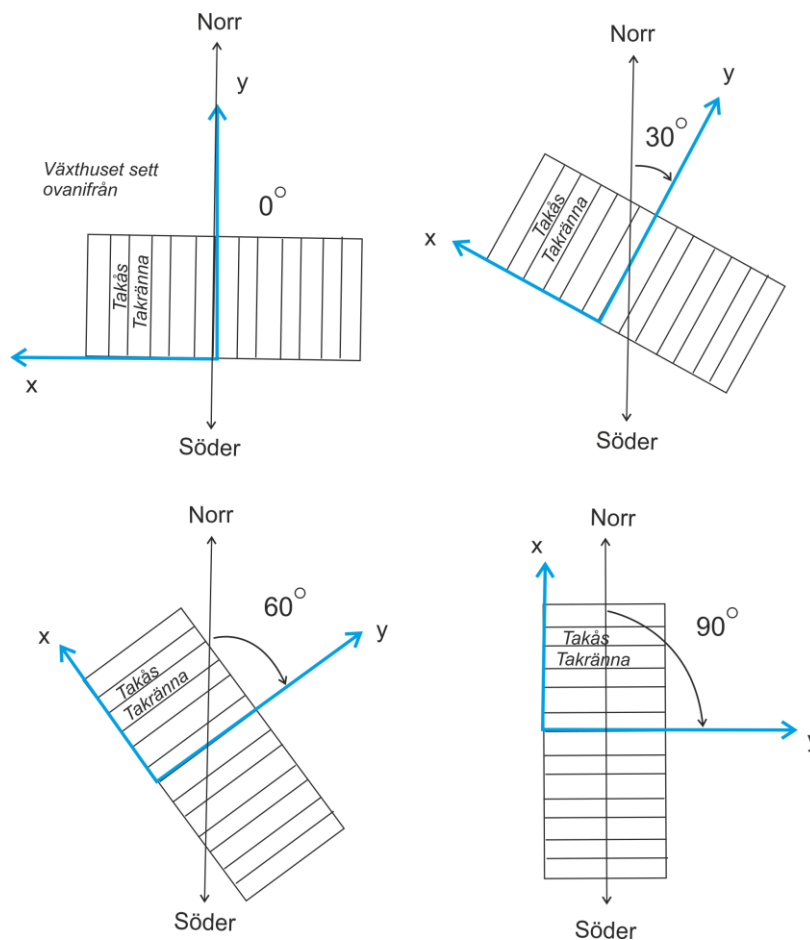
Globala intensiteten in är alltså  $382 \text{ W/m}^2$ , varav  $304 \text{ W/m}^2$  når växthuset inre.

## 4. OPTIMERING AV VÄXTHUSGEOMETRIN

Kan man öka mängden naturligt ljus inne i växthuset genom att ändra på växthusets orientering, glasmaterialet i taket, och/eller formen på taket? I detta kapitel skall vi undersöka hur dessa tre faktorer påverkar transmissionen genom glastaket.

### 4.1 Växthusets orientering

Vi har i detta kapitel valt att utgå från samma blockväxthus som tidigare (se figur 10), men varierar växthusets orientering. I det ursprungliga växthuset är vinkeln mellan norr och takåsens längdriktning  $17^\circ$ . För att se hur växthusets orientering påverkar transmissionen, låter vi denna vinkel variera mellan  $0^\circ$  och  $90^\circ$  (se figur 16).

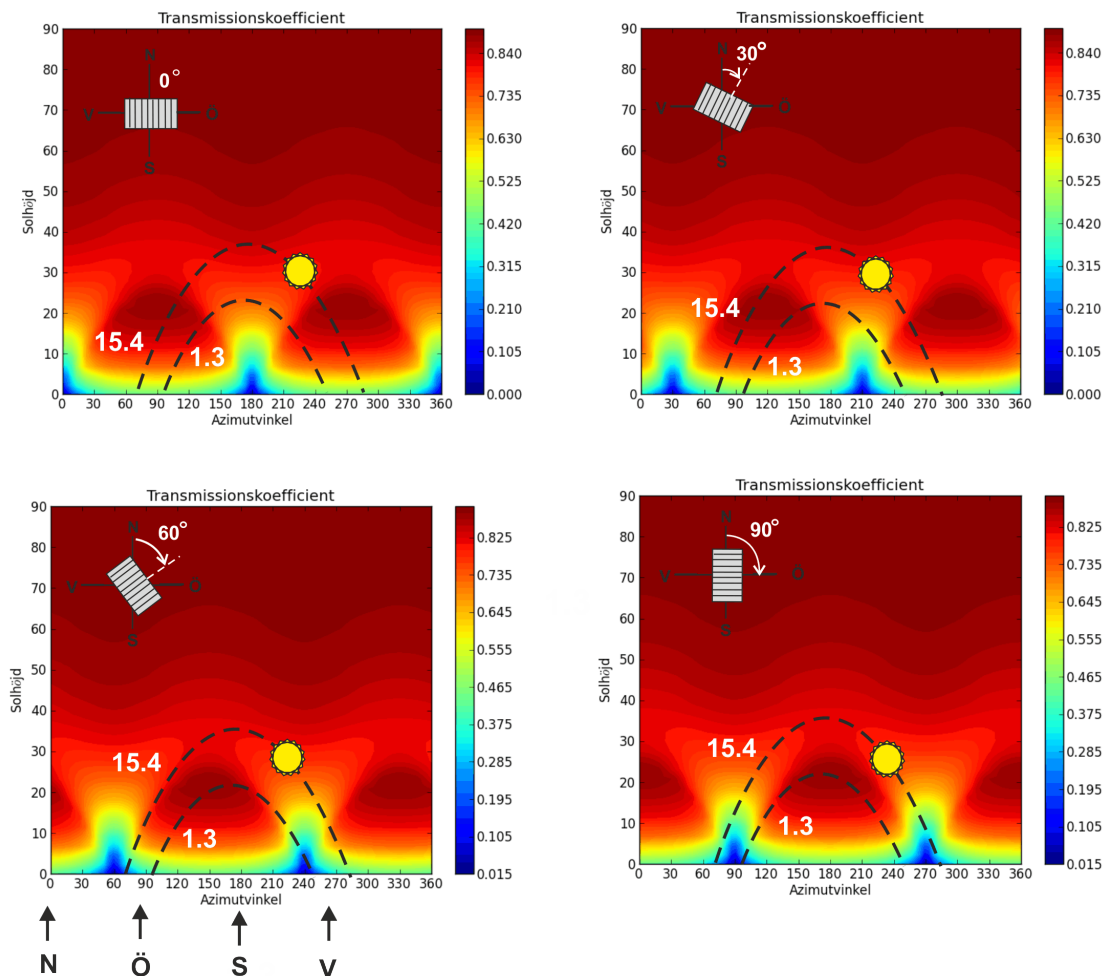


Figur 16. Våra beräkningar har utförts för fyra olika orienteringar på blockväxthuset:  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  och  $90^\circ$ . Dessa vinklar är definierade enligt figuren.

Transmissionskoefficienten för dessa fyra fall visas i figur 17. Notera att värdet på den diffusa transmissionen inte påverkas av vridningen, utan förblir  $T_{\text{diffus}} = 0,851$ . Ur figuren ser vi att transmissionsmönstret som helhet förblir oförändrat och endast förskjuts. De lägsta värdena för transmissionen finns som väntat för de vinklar där solljuset faller in parallellt med takåsarna.

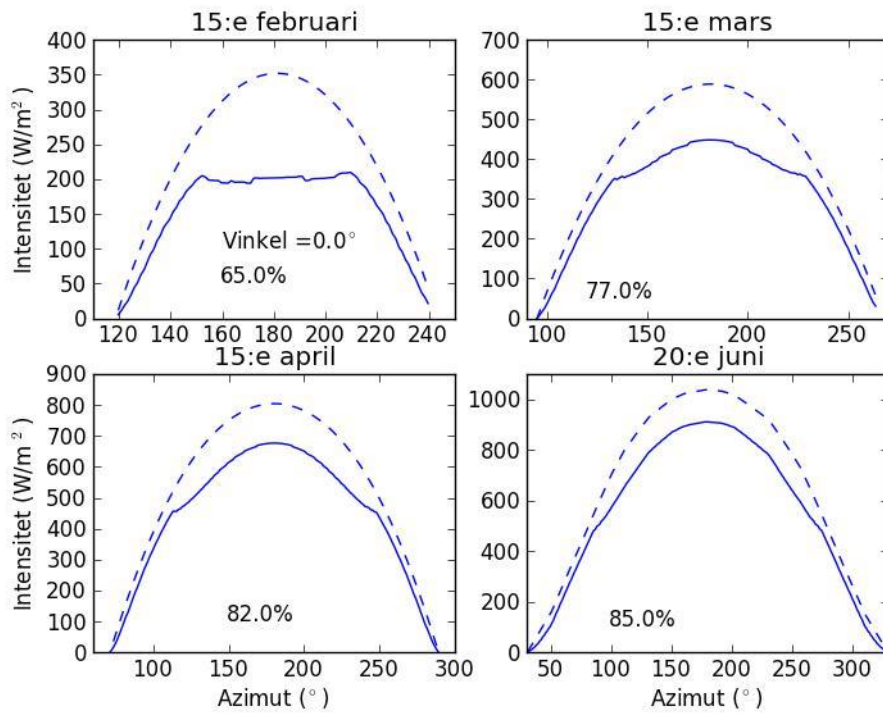


En effekt av att ändra växthusets orientering, som kan utläsas ur graferna, är hur solljuset på eftermiddagen, respektive eftermiddagen utnyttjas (se figuren).

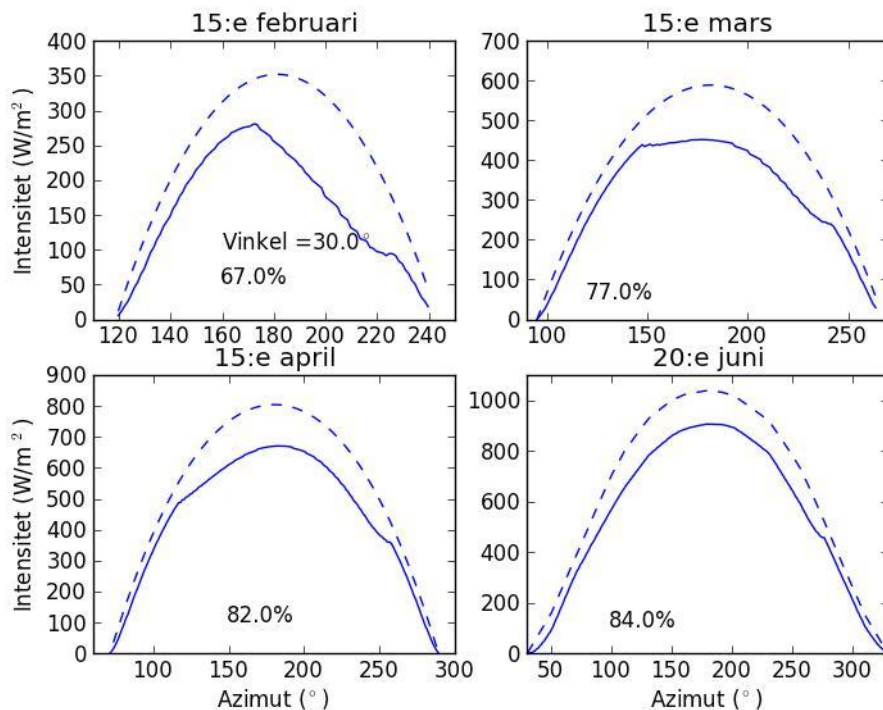


Figur 17. Transmissionskoefficienten för de fyra olika växthusriktningarna. Vi ser att när växthuset vrids flyttas hela mönstret till höger mot större azimutvinklar. I graferna finns också insatt solens bana vid två olika tidpunkter under våren (1:a mars och 15:e april). Beroende på hur växthuset är vridet, utnyttjas förmiddagssolen eller eftermiddagssolen bättre.

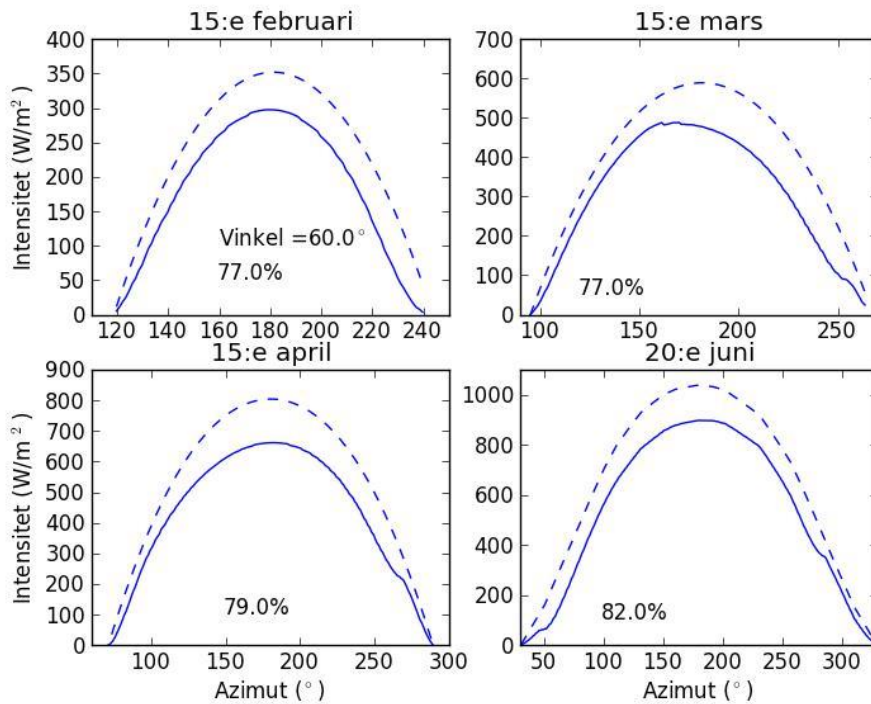
Figur 18a–d visar hur växthusets orientering påverkar andelen solljus som transmitteras genom växthustaket. Som jämförelse har vi använt samma fyra tidpunkter under året som tidigare i figur 14. Ur graferna i figur 18 ser vi att växthusets orientering klart påverkar transmissionen. Däremot ser vi att det inte finns något enkelt optimum, vilket skulle gälla för hela året. Väljer man en växthusorientering som optimerar det naturliga ljuset under den tidiga vår-vintern, så tappar man något under de ljusa sommarmånaderna när solen står högt på himlen. Dessa slutsatser gäller dock endast för soliga dagar. Som vi tidigare konstaterade, så beror inte transmissionen av diffust dagsljus (= molnig dag) på växthusets orientering. En annan sak att notera, är att vi inte beaktar det solljus som går genom väggarna. Bidraget från väggarna i växthuset beror av hur dessa är vända, men det är som störst för låga solvinklar (tidig morgon/sen kväll och/eller tidig vår-vinter). Hur långt solljuset som passerar genom en sidovägg tränger in i växthuset, beror givetvis också av växtligheten inne i växthuset.



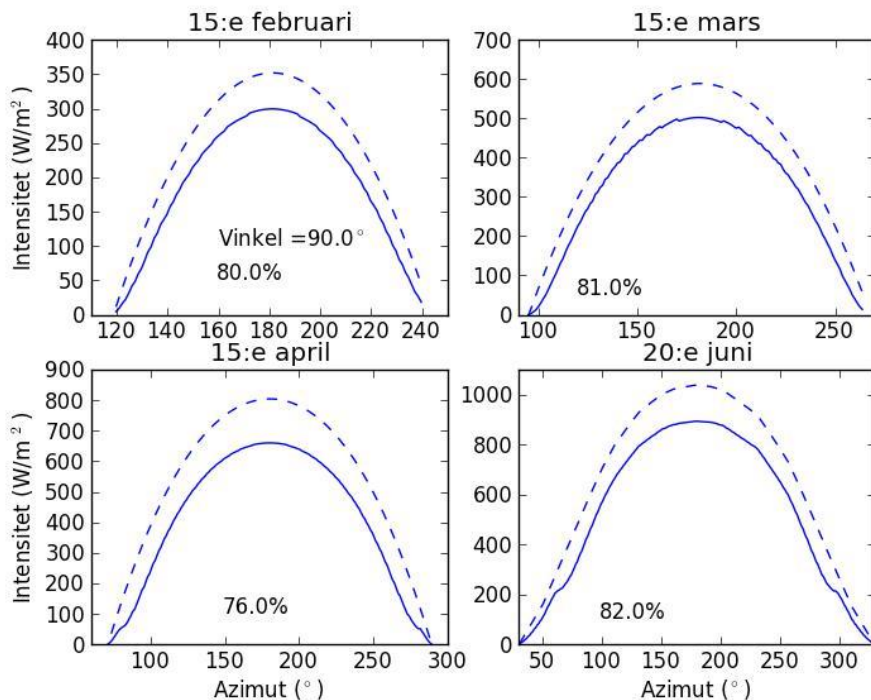
Figur 18a. Vi ser att för en växthusvinkel på  $0^\circ$  (takåsarna pekar mot norr), så har vi en låg transmission på främst vår-vinter.



Figur 18b. Växthusets vinkel är  $30^\circ$ . Transmission har ökat något på vår-vinter men är fortfarande låg, främst under eftermiddagen. Transmissionen mitt på sommaren har minskat en aning.



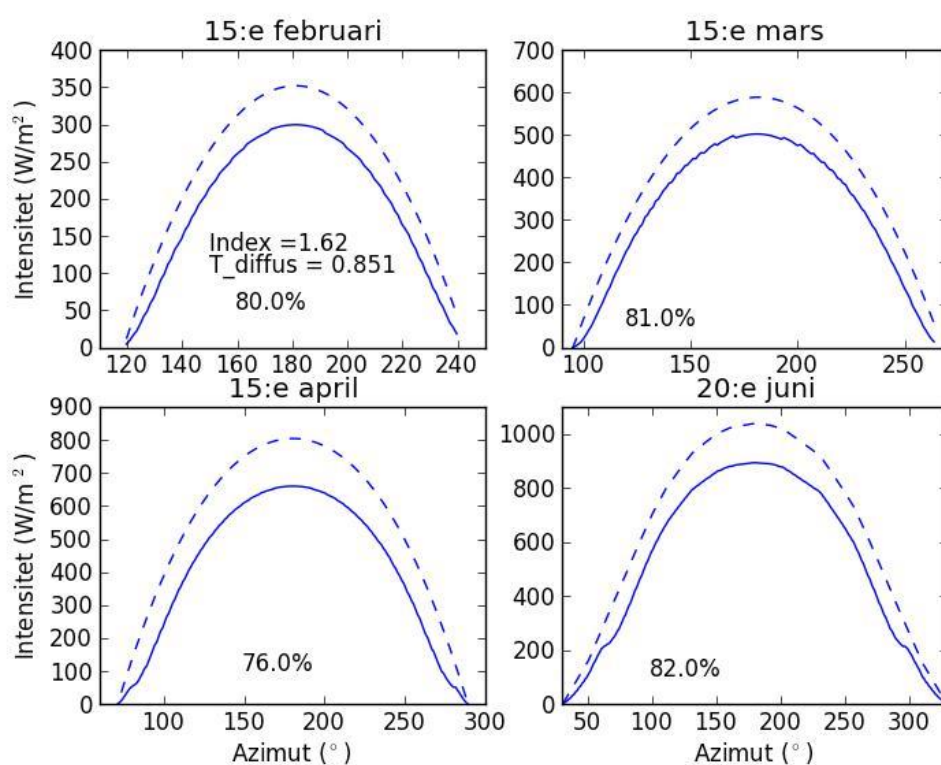
Figur 18c. Växthusets vinkel är 60°. Transmission har klart ökat i februari, är oförändrad i mars och minskat något i april.



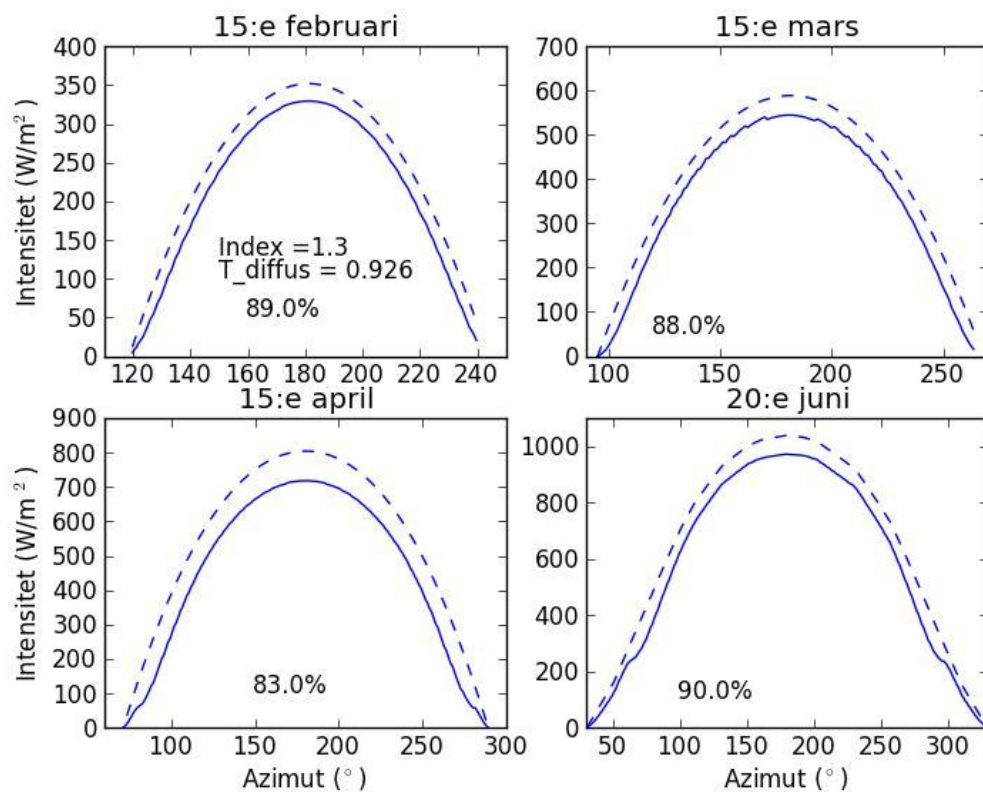
Figur 18d. Växthuset vinkel är 90° (takåsarna pekar rakt mot öster). Transmission har klart ökat i februari och mars och minskat något i april.

## 4.2 Materialet i växthusets tak

Hur mycket kan vi förvänta oss att vinna i transmission om vi väljer ett annat takmaterial till ett växthus? I det modellväxthus vi använt i våra beräkningar, har vi antagit att taket består av 4 mm tjockt flytglas med ett brytningsindex på 1,62 (se tabell 1). Det finns kommersiellt tillgängligt glas med ett betydligt lägre brytningsindex (kring 1,3), frågan är bara om detta glas är värt sitt betydligt högre pris. Låt oss se effekterna av ett annat glas genom att jämföra två blockväxthus, båda med en vridning på  $90^\circ$  (takåsarna pekar rakt mot öster), så att de utnyttjar det svaga vår-vintersolljuset optimalt. I figur 19a–b jämför vi ett blockväxthus med ett billigare glas och högre brytningsindex ( $n = 1,62$ ), med ett växthus där takglaset har ett betydligt lägre brytningsindex ( $n = 1,3$ ).



Figur 19a. Växthuset vridning är  $90^\circ$  (takåsarna pekar rakt mot öster) och glastaket består av 4 mm:s dragglas med brytningsindex 1,62.



Figur 19b. Samma växthus som i figur 19a, men nu består glastaket av glas med brytningsindex 1,3. Som vi ser har både den diffusa och direkta transmissionen klart ökat.

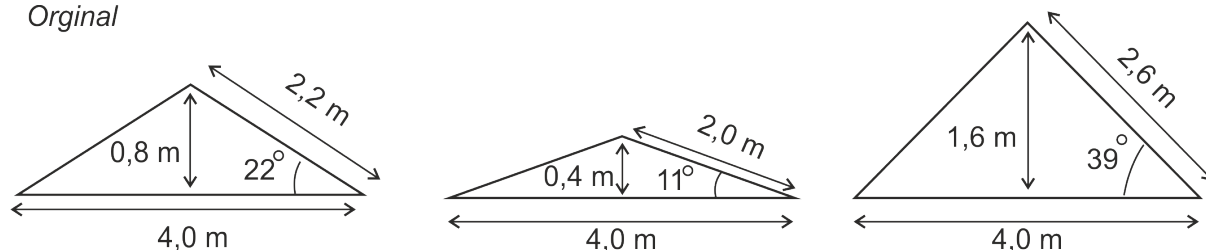
Resultaten i figur 19 visar att det finns en klar ljusenergivinst i att använda sig av glas med ett lägre brytningsindex. Ökningen i andelen transmitterat ljus kan nå upp till nästan 10 procentenheters ökning under vissa delar av året. Vi ser också att ökningen inte bara gäller direkt solljus, utan också transmissionen av diffust dagsljus. Detta innebär att man kan uppnå en betydande ljusvinst, oberoende av om det är en solig eller molnig dag.

Trots att glas med ett lägre brytningsindex i vissa avseenden alltid är bättre, måste man väga detta mot den betydligt högre kostnaden för glaset. Vidare kan det hända att, trots att man får en ökad transmission, ändå inte uppnår de kritiska ljusintensitetsnivåer som krävs för att plantorna skall växa optimalt. Om konstbelysning ändå krävs under största delen av dygnet, finns det ingen anledning att försöka optimera tillgången på naturligt ljus genom byte av takglas.

### 4.3 Växthusetakets konstruktion

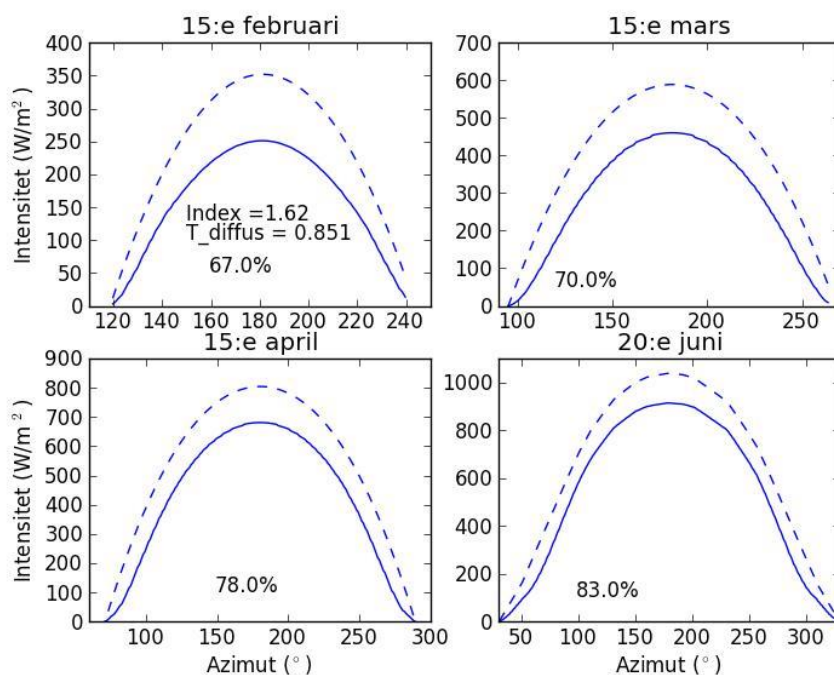
Hur mycket solljus som går genom ett takglas beror inte endast av glasets brytningsindex, utan också på ljusets infallsvinkel (se figur 3). Infallsvinkeln mellan solljuset och takglaset kan vi påverka genom att ändra lutningen hos takåsen. Priset vi betalar om vi gör takåsen för brant, är en ökad materialåtgång (glasskivorna måste vara större). Gör vi däremot takåsen för platt, kan vi öka problem med avsmältningen av snö och en för hög mekanisk belastning. För att studera inverkan av alternativa takkonstruktioner, skall vi återgå till vårt originalväxthus och glas med brytningsindex 1,62. Vi låter skeppets vidd förbli 4,0 m, men varierar höjden till takåsen, som i originalet var cirka 0,8 m (se figur 20).

Original

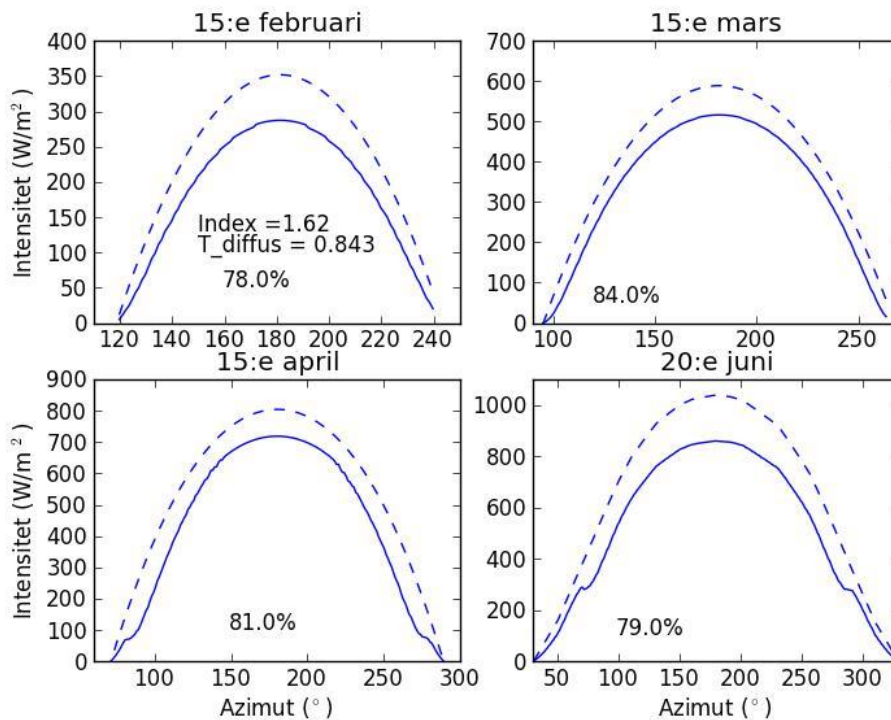


Figur 20. En sektion av växthusetaket med tre olika åshöjder, 0,8 m (original), 0,4 m och 1,6 m.

I figur 21a visas resultatet för ett tak med en lägre åshöjd (0,4 m). Den lägre takhöjden minskar transmissionen kraftigt under de månader när solen står lågt på himlen, men ökar den en aning för sommarmånaderna (jämför med figur 18a). Den diffusa transmissionen genom taket är i princip oförändrad.



Figur 21a. Transmissionen för ett växthus med vinkel  $90^\circ$  och en lägre åshöjd på 0,4 m.



Figur 21b. Transmissionen för ett växthus med vinkel  $90^\circ$  och en högre åshöjd på 1,6 m.

Höjer vi takåsen till 1,6 m får vi det resultat som visas i figur 21b. Jämför vi med originaletaket i figur 19a ser vi att transmissionen är lite lägre i februari, för att bli större i mars och april och igen minska till de ljusa sommarmånaderna. En slutsats av dessa beräkningar blir att om vi vill utnyttja solljuset under vårvintern optimalt, bör inte taket ha för liten lutning. Priset vi betalar för mer ljus är givetvis en något större materialåtgång.

## 5. SAMMANFATTNING

Att öka tillgången på naturligt ljus för plantorna i ett växthus kan innebära en direkt ekonomisk insparning för odlaren, eftersom behovet av konstgjord belysning och uppvärmning kan minskas. Innan man däremot börjar fundera över hur växthuset skall placeras och konstrueras, bör man först grundligt reda ut under vilka delar av året (och dygnet) som man behöver ha störst tillgång till naturligt ljus. Som vi har sett i kapitel 4, så kan en lösning som optimerar ljustillgången under vårvintern, ha den motsatta effekten under sommarmånaderna. Under sommarmånaderna är dessutom det vanligen större problemet att bli kvitt överskottsvärmen från växthuset [5]. Vidare om det naturliga ljuset inte alls räcker till under största delen av dygnet en viss månad, så är försöken till optimering kanske en onödig övning. Efter att dessa frågor är utredda, avgör givetvis praktiska och ekonomiska faktorer. Tillåter tomten som växthuset placeras på att växthusets orientering ändras? Betalar sig de större materialkostnaderna som en högre takåshöjd innebär igen i form av minskade energikostnader? Slutsatsen är att en optimering av den naturliga ljustillgången bara är en bit i det större pusslet att höja energieffektiviteten hos ett växthus.

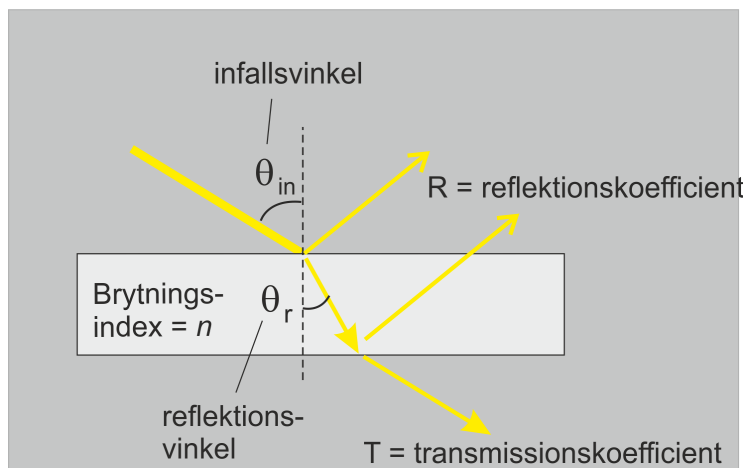
## BILAGA A. FRESNELS EKVATIONER

Ekvationerna vilka ger andelen reflekterat och transmitterat ljus, kallas Fresnels ekvationer [1]. För solljus som faller in på en glasskiva ger dess ekvationer:

$$\begin{aligned}
 R_{\perp} &= \left( \frac{\sin(\theta_{in} - \theta_r)}{\sin(\theta_{in} + \theta_r)} \right)^2 \\
 R_{\parallel} &= \left( \frac{\tan(\theta_{in} - \theta_r)}{\tan(\theta_{in} + \theta_r)} \right)^2 \\
 T_{\perp} &= \left( \frac{2 \sin(\theta_r) \cos(\theta_{in})}{\sin(\theta_{in} + \theta_r)} \right)^2 \cdot \frac{n \cos(\theta_r)}{\cos(\theta_{in})} \\
 T_{\parallel} &= \left( \frac{2 \sin(\theta_r) \cos(\theta_{in})}{\sin(\theta_{in} + \theta_r) \cos(\theta_{in} - \theta_r)} \right)^2 \cdot \frac{n \cos(\theta_r)}{\cos(\theta_{in})}
 \end{aligned}
 \tag{A.1}$$

Vinklarna som förekommer i formlerna finns förklarade i figuren nedan. Reflektionsvinkeln  $\theta_r$  kan beräknas ur Snells lag (om infallsvinkeln  $\theta_{in}$  är given):

$$\sin(\theta_{in}) = n \sin(\theta_r) \tag{A.2}$$



Den totala transmissionen för opolariserat ljus blir

$$T_{tot} = \frac{1}{2} \left( \frac{T_{\perp}}{1 + R_{\perp}} + \frac{T_{\parallel}}{1 + R_{\parallel}} \right) \tag{A.3}$$

Eftersom det ljus som inte transmitteras, reflekteras, så gäller att

$$R_{tot} = 1 - T_{tot} \tag{A.4}$$

Det är uttryck (A.3) och (A.4) som visas grafiskt i figur 4. Om  $\theta_{in} = 0^\circ$  så förenklas  $T_{tot}$

$$T_{tot} = \frac{2n}{n^2 + 1} \tag{A.5}$$



## REFERENSER

- [1]. E. Hecht, *Optics*, 4th edition, 2001.
- [2]. H.F. De Zwart, *Determination of Direct Transmission of a Multispan Greenhouse Using Vector Algebra*, J. agric. Engng Res. 1993, **56**, p.39–49.
- [3]. G.L.A.M. Swinkels, P.J. Sonneveld and G.P. Bot, *Improvement of Greenhouse Insulation with Restricted Transmission Loss through ZigZag Covering Material*, J. agric. Engng Res. 2001, **79**, p. 91–97.
- [4]. K.L. Coulson, *Solar and Terrestrial Radiation*, 1975.
- [5]. Mats Borg, *Kartläggning av nuläget och utvecklingsmöjligheter inom växthusbranschen*. Opublicerad Novia-rapport från projektet ”Energieffektiva växthus 2015”, Novia 2012.

YRKESHÖGSKOLAN  
**NOVIA**

Novia är den största svenskspråkiga yrkeshögskolan i Finland med examensinriktad ungdoms- och vuxenutbildning, utbildning som leder till högre yrkeshögskoleexamen samt fortbildning och specialiseringsutbildning. Nova har ca 4000 studerande på sex campus i Vasastad, Jakobstad, Raseborg och Åbo.

Yrkeshögskolan Nova är en internationell yrkeshögskola, via samarbetsavtal utomlands och internationalisering på hemmaplan. Novias styrka ligger i närvaron och nätverket i hela Svenskfinland.

Novia representerar med sitt breda utbildningsutbud de flesta samhällssektorer. Det är få organisationer som kan uppvisa en sådan kompetensmässig och geografisk täckning. Högklassiga och moderna utbildningsprogram ger studerande en bra plattform för sina framtida yrkeskarriärer.

YRKESHÖGSKOLAN NOVIA

Wolffskavägen 33, vån 4, 65200 Vasastad  
Växel tfn (06) 328 5000  
Fax (06) 328 5110  
[www.novia.fi](http://www.novia.fi)

ANSÖKNINGSBYRÅN

Wolffskavägen 33, 65200 Vasastad  
Tfn (06) 328 5555  
Fax (06) 328 5117  
[ansokningsbyran@novia.fi](mailto:ansokningsbyran@novia.fi)

Yrkeshögskolan Nova upprätthåller en publikations- och produktionsserie för att sprida information och kunskap om verksamheten såväl regionalt, nationellt som internationellt. Publikations- och produktionsserien är indelad i fem kategorier:

R - Rapporter • P - Produktioner • A - Artiklar • L - Läromedel • S - Studerandes arbete

Läs våra senaste publikationer på [www.novia.fi/FoU/publikation-och-produktion](http://www.novia.fi/FoU/publikation-och-produktion)