



**HÖGSKOLAN
I GÄVLE**

AKADEMIN FÖR TEKNIK OCH MILJÖ

Datormodellering av en värmelagrande betongväggs inverkan på det termiska klimatet i ett växthus

Andreas Agebro

Juni 2010

Examensarbete i Byggnadsteknik, 15 poäng, C nivå

Handledare: Jan Akander

Examinator: Johan Norén

Abstract

This report describes the building of a computer model that makes it possible to simulate the thermal climate in a greenhouse. The computer model is built on the physical theory of heat exchange that occur in a greenhouse, such as radiation and convective heat exchange. The model also includes the heat storage that is active in a greenhouse.

The computer model is used to simulate the thermal climate in a greenhouse under three periods, winter, spring and summer. It also investigates which effect a concrete wall has on the thermal climate in a greenhouse. The purpose of putting a concrete wall in the greenhouse model is to investigate the possibility to store heat during the day and then use this heat when the temperature drops during the night.

The result from the simulations shows that a concrete wall levels the big difference in temperature that normally occurs under a day in a greenhouse. It also shows that heat is stored in the concrete wall and during the night the wall temperature is higher than both the outdoor temperature and the greenhouse temperature. This makes the wall a source of heat during this time.

Keywords:

Greenhouse, heat storing wall, concrete wall, finite differential method, greenhouse climate, thermal greenhouse modeling.

Sammanfattning

Växthus är pga. sin utformning väldigt känsligt för klimatets påverkan. Detta resulterar i att klimatet i växthus under soliga dagar kan uppnå väldigt höga temperaturer medan temperaturen under kalla dagar och nätter kan bli lika låg som den rådande utomhustemperaturen. Växthusets klimat blir därför väldigt extremt och temperatursvängningarna stora.

Temperatursvängningarna beror till stor del på växthusets låga värmetröghet och genom att öka trögheten i en byggnad kan temperatur svängningar minskas och ett jämnare termisk klimat uppnås. En ökning av trögheten kan också bidra till att värme lagras under varmare perioder och på så sätt minska ett eventuellt uppvärmningsbehov under de kalla perioderna.

För att undersöka tröghetens inverkan och möjligheterna till värmelagring hos ett växthus har detta examensarbete inriktats på uppbyggnaden av en datormodell som kan simulera ett växthus termiska förhållanden. Modellen har sedan använts för att undersöka hur en betongvägg påverkar det termiska klimatet i växthuset samt betongväggens förmåga att lagra värme. Datormodellen har byggts upp i MATLAB vilket gör det möjligt att med klimatdata från olika perioder simulera växthusets inre klimat. Datormodellen bygger på matematiska beräkningar som grundar sig på fysikaliska och termiska samband.

Växthuset som undersöks i datormodellen bygger på ett växthus som är planerat att uppföras på trädgårdsanläggningen Wij trädgårdar i Ockelbo. Växthuset går under namnet Eldtemplet och ingår i projektet "Ny energi i gamla landskap" som ska utforska möjligheterna till nya energikällor inom trädgårds- och odlingsverksamhet.

Simuleringar har genomförts med klimatdata från ett dygn under tre olika årstider, vinter, vår och sommar. Resultatet från simuleringarna visar att temperaturerna i växthuset påverkas väldigt mycket av den infallande solstrålningen. Införandet av en betongvägg ökar växthusets tröghet och jämnar ut temperatursvängningarna i växthuset. Simuleringarna visar också att betongväggen får en värmelagrande förmåga och under vissa perioder kan tillföra växthuset värme under natten då temperaturen i växthuset sjunker. Genom resultatet kan slutsatsen dras att det finns åtgärder att ta till som kan förbättra växthusets termiska egenskaper väsentligt och göra växthus mer energieffektiva.

Förord

Detta examensarbete har utförts för att belysa möjligheterna till energieffektivisering inom fler områden än enbart bostäder och kommersiella byggnader. Examensarbetet har bidragit till en djupare förståelse för både byggnadsteknik och fysik samt datorsimulering av byggnader.

Jag vill ge ett särskilt stort tack till min handledare Jan Akander som hjälpt till med uppbyggnaden av datormodellen och således gjort det möjligt att genomföra detta examensarbete.

Ett tack riktas också till samtliga personer och företag inblandade i uppförandet av Eldtemplet på Wij trädgårdar som bidragit med underlag till växthuset som simulerats.

Gävle. Maj 2010

Andreas Agebro

Innehåll

Abstract

Sammanfattning

Förord

Beteckningar

Ordlista

1	Inledning.....	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Problem	12
1.3	Syfte.....	12
1.4	Mål.....	12
1.5	Avgränsning	12
1.6	Målgrupp	12
2	Metod	14
2.1	Litteraturstudie.....	14
2.2	Datormodellering	14
3	Genomförande, ett växthus i datorn.....	15
3.1	Växthus, ett hus i glas.....	15
3.1.1	Växthuseffekten	15
3.1.2	Vädrets påverkan på växthuset.....	16
3.1.3	Klimatskal	17
3.1.4	Byggnadens tröghet	19
3.1.5	Växthusets klimat	20
3.2	Modellering	21
3.2.1	Värme	22
3.2.1.1	Värmeutbyte.....	23
3.2.1.2	Konvektion.....	23
3.2.1.3	Långvågig strålning	24
3.2.1.4	Värmelagring	26
3.2.1.5	Finita differensmetoden.....	27
3.2.2	Energibalans	29
3.2.3	Växthusets utformning i modellen och verkligheten	29

3.2.4	Klimatdata och materialegenskaper	30
3.2.4.1	Klimatdata	31
3.2.4.2	Materialdata	34
4	Resultat.....	35
4.1	Vinter	36
4.2	Vår/höst.....	37
4.3	Sommar	38
4.4	Temperatur i väggen	39
5	Diskussion.....	41
5.1	Vinter	42
5.2	Vår/höst.....	43
5.3	Sommar	43
6	Slutsatser	44
7	Referenser	45
8	Bilagor.....	47
	Bilaga 1. Källkod till växthusmodellen.....	47
	Bilaga 2. Utetemperatur.....	53
	Bilaga 3. Diffus och direkt solstrålning vinter [W/m ²].....	54
	Bilaga 4. Diffus och direkt solstrålning vår/höst [W/m ²].....	55
	Bilaga 5. Diffus och direkt solstrålning sommar [W/m ²].....	56

Beteckningar

T_{yta} = Temperaturen för en yta [°C]

T_{luft} = Temperaturen för luften i växthuset [°C]

T_{ute} = Temperaturen utomhus [°C]

T_{sky} = Temperaturen på himlen [°C]

T_{ekv} = Ekvivalent inne temperatur pga. strålning [°C]

$T_{operativ}$ = Operativ temperatur [°C]

T_{st} = Stjärntemperaturen, temperaturen i mitten av en stjärnkoppling [°C]

I_{direkt} = Direkt solstrålning [W/m^2]

I_{diffus} = Diffus solstrålning [W/m^2]

I_{sol} = Summan av direkt och diffus solstrålning [W/m^2]

ϕ = energiflöde eller värmeflöde [W]

F = synfaktor

t_{stab} = stabilitets tidsteg [h]

σ = Boltzmann's konstant [$5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$]

A = area [m^2]

V = volym [m^3]

ρ = densitet [kg/m^3]

λ = värmekonduktivitet [$W/m \cdot K$]

C = Värmekapacitet [J/K]

C_p alt. c = Specifik värmekapacitet [J/kg·K]

ε = emittans [-]

τ = transmittans [-]

α = absorptans [-]

ρ = reflektionsfaktor [-]

α_{ri} = värmeöverföringskoefficient pga. strålning in i ett rum [$W/m^2 \cdot K$]

α_{re} = värmeöverföringskoefficient pga. strålning ut från ett rum [$W/m^2 \cdot K$]

α_{ci} = värmeöverföringskoefficient pga. konvektion in i ett rum [$W/m^2 \cdot K$]

α_{ce} = värmeöverföringskoefficient pga. konvektion ut från ett rum [$W/m^2 \cdot K$]

α_g = värmeöverföringskoefficient pga. ledning [$W/m^2 \cdot K$]

n = luftomsättningar i ett rum [oms/h]

Ordlista

Datormodell	I denna rapport syftar ordet på en modell som grundar sig på matematiska beräkningar.
Energibalans/värmebalans	Energibalans syftar till en beräkning eller en fysikalisk företeelse där inflödet av energi/värme är lika med utflödet. Energibalanser används för att beräkna temperaturer och energierflöden.
Utomhustemperatur	Utomhustemperaturen syftar till den rådande lufttemperaturen utomhus.
Lufttemperatur	Lufttemperatur syftar till temperaturen på luften inne i växthuset.
Direkt solstrålning	Solstrålning som träffar en yta utan att tidigare transmittierats eller reflekteras.
Diffus solstrålning	Solstrålning som påverkats genom transmission, absorption eller reflektion, innan den når en annan yta.

1 Inledning

Med dagens rådande hot om drastiska klimatförändringar väcks frågor och debatt om människans inverkan och ansvar för klimatet. För att minska den mänskliga påverkan på jordens klimat är det viktigt att användningen av naturresurser och konsekvenserna av användandet ses över. Detta har också skett inom många områden och under de senaste åren har stora förändringar gjorts. Ett av dessa områden är byggbranschen där miljöfrågor fått högre prioritering och hårdare krav har börjat ställas på energiförbrukning, val av material, vilka ämnen som ingår i byggvaror osv.¹

Energianvändningen utgör en stor del av människans exploatering av naturresurser och kraven på användningen har blivit hårdare. Nyligen röstade Europaparlamentet igenom en ny lag som ställer högre krav på byggnaders energiförbrukning. Lagen säger att alla byggnader ska vara energisnåla innan 2020 och till stor del använda förnyelsebar energi.² För att minska samhällets energiförbrukning och uppfylla dessa krav är det därför viktigt att se över alla energiförbrukande byggnader. Ett område där det fortfarande finns åtgärder att vidta för att minska energiförbrukningen är växthusbranschen där såväl uppvärmningsformerna som utformningen av växthus kan förbättras.³

En byggnads huvudsakliga syfte är ofta att skapa en avskärmning från det rådande klimatet för att kunna skapa ett annat klimat inuti byggnaden. Ett växthus ska skapa en avskärmning för att ge växter bättre förutsättningar att frodas. Växthus används för såväl privat som kommersiellt bruk och är utformningen bra och placeringen rätt ger växthuset goda odlingsmöjligheter.⁴ Beroende på hur och när växthuset ska nyttjas kan det ibland krävas uppvärmning. Dock kan ett uppvärmt växthus vara väldigt energikrävande. Detta examensarbete undersöker om dygnslagring av värme kan minska uppvärmningsbehovet hos ett växthus. Det undersöks också om dess stora temperatursvängningar går att minska genom lagring av överskottsvärme.

1.1 Bakgrund

Som en del i projektet "Ny energi i gamla landskap" som drivs av Landskapsparken i Ockelbo har Wij Trädgårdar inlett en projektering av en ny växthusanläggning. Anledningen till att Wij planerar att uppföra en ny anläggning är att man vill belysa olika uppvärmningsmetoder för byggnader. Genom att uppföra ett växthus där olika uppvärmningsmetoder tillämpas kommer man kunna ge besökare mer än bara en teoretisk information om användbara uppvärmningssätt. Besökarna ska kunna se hur de olika uppvärmningsmetoderna fungerar i praktiken genom att de nyttjas för att värma växthusanläggningen. Den nya anläggningen ska också kunna utnyttjas i forskningssyfte där de olika metoderna som används kan studeras.⁵

Växthusets utformning och egenskaper medför stora transmissionsförluster vilket resulterar i stor energiförbrukning om det ska värmas under årets kallare perioder. I en rapport av Lunds Tekniska

¹ <http://www.bygg.org/miljofragor.asp> 2010-05-23

² <http://www.nyteknik.se/nyheter/bygg/byggartiklar/article780517.ece> 2010-05-23

³ Lantz, Mikael, Larsson, Gunnel & Hansson, Torbjörn, Förutsättningar för förnybar energi i svenska växthusodlingar, Rapport nr 57, Lunds Tekn. högsk., Lund 2006

⁴ Samuelsson, Lars-Eric & Schenkmanis, Ulf, Växthus och drivbänkar, 3., något rev. uppl., Ica, Västerås, 2004 s. 10

⁵ <http://www.wij.se/default.asp?HeadPage=349&SubPage=181&Language=sv> 2010-05-23

Högskola från 2006 med rubriken *Förutsättningar för förnybar energi i svenska växthusodlingar* undersöktes förutsättningarna för svenska växthus att övergå från fossila bränslen till förnybar energi och på så sätt minska utsläppen. I rapporten framgår det att växthusets känslighet för yttre temperaturförändringar medför ett behov av tillförlitliga värmesystem vilket uppfylls genom användning av fossila bränslen. Den svenska energipolitiken anges som en betydande orsak till undersökningen, då bl.a. Kyotoavtalet kräver att koldioxidutsläppen begränsas och att förnybara energikällor får större utrymme. Rapporten anger att den svenska växthusodlingens energiutnyttjande till stor del baserar sig på fossila bränslen och att stora förändringar måste genomföras för att också detta verksamhetsområde ska uppnå Kyotoavtalets mål.⁶ Rapporten redogör för möjligheterna och konsekvenserna av att ändra energiförsörjningen hos växthus dock tas bara växthusens energiförsörjning upp och inte dess utformning. Därför bör även nya lösningar på energieffektivare utformningar och energisparande lösningar tas fram då dessa kan bidra till att göra växthusen mer energieffektiva. Detta examensarbete har därför inriktats mer på att belysa möjligheterna att minska energiförbrukningen hos växthus genom dess utformning än effektivisering av dess uppvärmningsmetoder.

Samhället har tre huvudsakliga energiresurser: fossila bränslen, kärnbränsle och flödande energi. Dessa tre utgör grunden för vår energianvändning och utnyttjandet förändras snabbt och ser olika ut på olika platser på jorden. Resursutnyttjandet är förenat med många problem som påverkar alla områden i samhället, från politik och ekonomi till ekologi och naturvetenskap. Den framtida energiutvinningen måste fördelas på de tre olika resurserna, frågan är bara hur.⁷

Naturresurserna som utgör grunden för energiutvinning kan delas in i tre olika typer: lager, fonder och flöden.

Lagrade resurser har en begränsad storlek och en långsam tillväxt. Exempel på sådana resurser är fossila bränslen och kärnbränslen. Ökad teknik kan göra att resurserna kan utnyttjas bättre men de är fortfarande begränsade.⁸

Fonderna är en typ av inbyggt flöde med inbyggt lager. Fonden har alltså en begränsad storlek men fylls ständigt på. Vilket innebär att vi kan utnyttja fonderna så länge vi inte överskrider tillväxten av dem och låter fonden återhämta sig om vi över exploaterat fonden. Exempel på fonder är bioenergi och vattenkraft.⁹

Den enda energiresursen som inte påverkas av hur mycket den exploateras är den flödande energiresursen. Denna resurs är förvisso ändlig då solen en dag kommer slockna men ur ett mänskligt och ekologiskt tidsperspektiv kan flödena på jorden ses som eviga. Som resurs kan vi utnyttja flödena till 100 % utan att påverka framtida generationers utnyttjande av flödena. Exempel på flödande energiresurser är solenergi, vind- och vågkraft.¹⁰ Problemet med flödandeenergin är att

⁶ Lantz, Mikael, Larsson, Gunnel & Hansson, Torbjörn, *Förutsättningar för förnybar energi i svenska växthusodlingar*, Rapport nr 57, Lunds Tekn. högsk., Lund 2006

⁷ Areskoug, Mats & Eliasson, Per, *Energi för hållbar utveckling: ett historiskt och naturvetenskapligt perspektiv*, 1. uppl., Studentlitteratur, Lund, 2007 s. 187

⁸ Ibid s. 187

⁹ Ibid s. 188

¹⁰ Ibid s. 187-188

den liksom all energi är en färskvara och måste utnyttjas direkt. Detta medför vissa fördelar med de två övriga energiresurserna då människan själv kan bestämma när energin ska skapas men flödena sker hela tiden oavsett om de utnyttjas av människan eller inte. Dock har olika tekniker gjort det möjligt att lagra energin från flödena genom att omvandla energin till t.ex. värme eller elektricitet. Omvandlingen och lagring av energi medför dock alltid vissa förluster.

Att ta tillvara på de flödande energierna bidrar till att minska förbrukningen av jordens energiresurser samt att begränsa utsläppen. Det är därför viktigt att hitta nya områden och nya lösningar där dessa energier kan nyttjas om människans påverkan på klimatet ska reduceras. Ett sådant område som kan vara värt att undersöka är värmelagring där överskottsvärme lagras för att sedan utnyttjas när ett uppvärmningsbehov finns.

Det finns flertalet rapporter som redovisar undersökningar av olika former av värmelagring för att värma ett växthus. I rapporten *Korttidslagring av energi i stenbädd för växthus i kombination med yttre solfångare* från SLU redogör författarna för en undersökning av en stenbädd som värmelagring för att värma ett växthus. Ett växthus på 60m² beläget i Skåne värmdes under hösten 1982 med hjälp av värme som lagrats i en stenbädd på 30m³. Stenbädden värmdes med varmluft som togs från växthuset under dagtid och uppvärmd luft från varmluftsångare. Under soliga perioder kunde växthuset värmas med en bråkdel av värmen som lagrats i stenbädden men under molnigare dagar tömdes lagret på några dagar.¹¹

I en annan rapport som heter *Numerical and experimental analysis of convection heat transfer in passive solar heating room with greenhouse and heat storage* från University of Science and Technology i Wuhan, Kina, studeras ett soluppvärmt rum med en växthusdel. Rummet värms genom konvektiv värmeöverföring från växthuset och värmelager. Värmelagren består av en vägg som skiljer rummet från växthuset samt ett stenlager som utgörs av golvet i de båda rummen. Väggen har öppningar vid tak och golv och genom denna utformning kan luft strömma från det ena utrymmet till det andra och på så sätt överföra värme från solstrålning och lagrad värme. En numerisk analys har gjorts på modellen och resultatet visar att växthuset och rummets temperatur under vintern kan stiga med upp till 10°C över utomhustemperaturen och energiförbrukningen kan reduceras.¹² Denna studie kommer som nämnts ifrån Kina och är därför utförd med Kinas rådande klimatförutsättningar vilka kan skilja sig mot Sveriges förutsättningar. Dock visar studien på att utformning och lagring av överskottsvärme kan bidra till minskad energiförbrukning hos glasade konstruktioner.

Då växthus består av väldigt lätta material och det rådande vädret har en stor påverkan på växthusets klimat kan det under dagen behöva ventileras ut värme medan det på natten behöver tillföras värme. Detta medför att stora mängder energi går åt till att värma växthuset under natten samtidigt som växthuset kan uppnå väldigt höga temperaturer under dagtid. Både rapporten från SLU och Kina ger indikationer på att värmelagring till stor del kan minska växthusens energibehov. Därför har detta examensarbete inriktats på att undersöka vilken påverkan en betongvägg har på växthusets internvärme.

¹¹ Andreasson, Ingmar, Wigström, Peter & Magnusson, Göran, Korttidslagring av energi i stenbädd för växthus i kombination med yttre solfångare: Short-term storage of energy in rock bed for greenhouses in combination with external solar collector, Lund, 1984

¹² Wei, Chen & Wei, Liu, Numerical and experimental analysis of convection heat transfer in passive solar heating room with greenhouse and heat storage, Solar Energy, Volume 76, Issue 5, Pages 623-633, 2004

1.2 Problem

Kan en betongvägg bidra till att minska växthusets temperatursvängningar och kan en sådan lösning bidra till att överskottsvärme lagras för att sedan värma växthuset då temperaturen i växthuset sjunker.

1.3 Syfte

Syftet med examensarbetet är att påvisa ett samband mellan utformningen och materialet i ett växthus och dess temperaturförhållanden. Examensarbetet ska också påvisa effekterna av enkla och passiva lösningar för att påverka en byggnads energibehov.

1.4 Mål

Målet med examensarbetet är att klargöra om växthusets termiska egenskaper går att förbättra genom att tillföra växthuset mer massa och på så sätt minska dess känslighet för yttre påverkan. Samt att undersöka om detta kan minska uppvärmningsbehovet av växthuset.

1.5 Avgränsning

Den modell av växthuset som används i detta arbete kommer medföra flertalet avgränsningar som gör att temperaturerna som tas fram inte kan användas för att ge en exakt bild av växthusets termiska klimat. Rapporten och modellen kan istället användas som en vägvisare för hur en värmelagrande vägg kan påverka det inre klimatet i ett växthus, samt den potentiella möjligheten att minska uppvärmningsbehovet.

Rapporten berör inget som har att göra med odling i växthus utan inriktar sig enbart på de byggnadstekniska förhållanden som berör växthusets termiska egenskaper.

Modellen kommer endast undersöka uteklimatets påverkan på växthuset. Hur uppvärmning genom en extern värmekälla påverkar växthuset kommer alltså inte undersökas. Värmelagringen kommer undersökas i ett begränsat antal utföranden då det främsta syftet är att undersöka om en värmelagrandevägg påverkar växthusets klimat och inte hur denna vägg bäst utformas.

I undersökningen kommer fukt och växters påverkan på växthusets termiska klimat att utelämnas. Även den mänskliga inverkan och styrningen av växthusets klimat kommer utelämnas.

De ekonomiska aspekterna i utformningen av ett växthus kommer inte undersökas varken då det gäller energibesparingar eller materialkostnader.

1.6 Målgrupp

Växthuset som undersökts har relativt små dimensioner för kommersiella växthusodlingar. Dock kan dimensionen anses stor för hobbyodlingar och dylikt. Därför kan denna rapport anses vara mest relevant för personer och företag inom bygg- och växthusbranschen. Men också privatpersoner med intresse för energieffektivisering och växthusodling bör finna rapporten inspirerande och lärorik. Det är dock de byggnadstekniska egenskaperna hos ett växthus som undersöks därför är rapporten inte riktad till dem som enbart är intresserade av odlingsförhållanden eller växternas påverkan av utformningen av ett växthus.

Rapporten ger förutom förslagen på energisparande åtgärder i växthus också en redogörelse för olika termiska egenskaper och förhållanden hos byggnadsdelar samt en inblick i deras påverkan på en byggnads värmebalans. Vilket bör ge läsaren en fördjupad förståelse för klimatets påverkan på innemiljön och hur glasade ytor påverkar innemiljön.

2 Metod

Till grund för examensarbetet ligger litteraturstudier och en datormodell. Datormodellen har skapats utifrån kunskaper som inhämtats från litteraturstudierna och av författaren tidigare förärvda kunskaper inom byggnadsteknik.

2.1 Litteraturstudie

Hela undersökningen grundar sig på litteraturstudier. Den litteratur som ingått i studien behandlar byggnadsteknik, fysik, materialegenskaper, växthus, energi och klimat. Inför undersökningen har också flertalet rapporter och artiklar inom ämnet växthus, energihushållning, värmelagring, energiöverföring och klimatpåverkan studerats. Förutom tryckta rapporter, artiklar och litteratur har också internet använts för att inhämta fakta och information.

2.2 Datormodellering

För att kunna utföra en analytisk undersökning med varierande parametrar har en datormodell av ett växthus byggts upp. Modellen bygger på fysikaliska grunder, byggnadstekniska samband och matematiska beräkningar. En kvantitativ och dynamisk termisk modell har byggts upp i datorprogrammet *MATLAB*. Att modellen är kvantitativ innebär att matematiska relationer används för att beräkna för de olika variablerna i modellen. En dynamisk modell är tidsberoende vilket betyder att förhållandena kan variera med tiden.¹³ *MATLAB* är ett program utgivet av *The MathWorks* där modeller simuleras med matematiska funktioner.¹⁴ Förutom beräkningar och simuleringar har *MATLAB* också används för visualisering av data.

Växthusmodellen är uppbyggd av flera delberäkningar och modeller som antingen ger värden på olika parametrar som ska ingå i simuleringen av växthuset eller sätts in i den slutgiltiga modellen.

¹³ Nilsson, Örjan & Österlund, Michael, Dynamisk simulering i fysik och teknik, Studentlitteratur, Lund, 2003 s. 15-16

¹⁴ Ibid s. 307

3 Genomförande, ett växthus i datorn

Genom en datormodell studeras den inverkan en betongvägg har på temperaturväxlingen i ett växthus. I modellen byts en av växthusets vanliga väggar ut mot en betongvägg. Förhoppningarna är att betongväggen ska lagra värme under dagen och värma växthuset med den lagrade värmen under kvällen och natten.

Undersökningen utförs med klimatdata från tre olika perioder vinter, vår/höst och sommar. Ett dygn från varje period kommer väljas ut där temperatur och solstrålning intar ett ungefärligt medelvärde för perioden. Valet av dygn sker genom en enkel visuell utgallring av det dygn som intar ett ungefärligt medelvärde av temperatur och solstrålning då det är inverkan av värmelagringen som ska studeras och inte växthusets faktiska temperaturer. Framförallt är det intressant att undersöka väggens inverkan på växthusets temperatursvängningar och om det finns möjlighet att höja temperaturen under dygnets kallare timmar och på så sätt minska uppvärmningsbehovet.

3.1 Växthus, ett hus i glas

Att odla under glas ger helt nya förutsättningar och möjligheter för växtligheten att frodas. Växthuset skapar ett skyddat klimat med stort ljusinsläpp vilket gör att odlings säsongen kan förlängas och växter som har stora krav när det gäller värme och ljus kan odlas på platser de annars inte skulle trivas på. Genom ett växthus ges också möjligheter att påverka odlingsklimatet för växterna t.ex. genom att tillföra värme eller extra ljus från lampor.¹⁵

3.1.1 Växthuseffekten

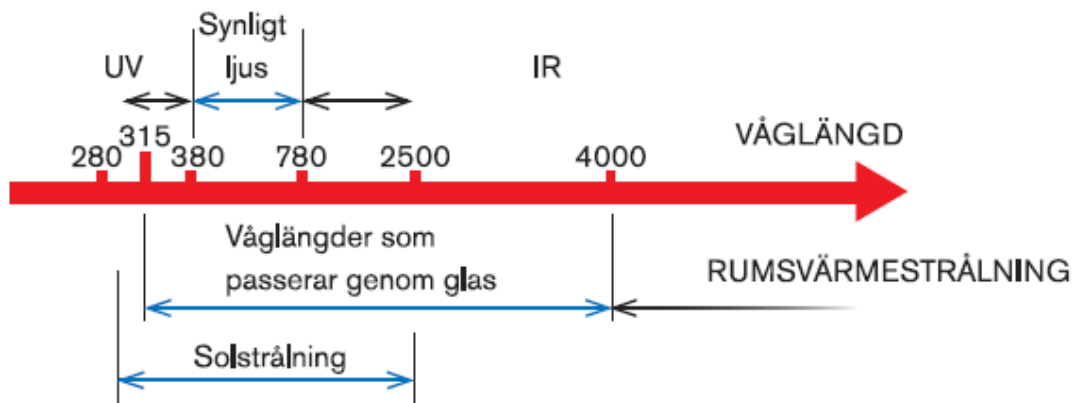
Växthuseffekten är benämningen på det fenomen som ger växthuset dess goda odlingsförutsättningar. Detta fenomen har varit känt bland forskare sedan 1800-talet och kommer sig av att energi i form av solljus kan flöda obehindrat in i ett växthus men utflödet begränsas av glaset. På så sätt ändras energibalansen och då tillförseln av energi är större än bortförseln kommer energiinnehållet att öka och därigenom stiger också temperaturen. På samma sätt som glaset påverkar klimatet i ett växthus påverkar också vissa gaser i atmosfären hela jordens klimat, vilket har gett stor uppmärksamhet åt de ökade koldioxidutsläppen då koldioxiden anses ha stor inverkan på jordens uppvärmning.¹⁶

För att beskriva växthuseffekten lite närmare krävs vissa grundläggande kunskaper om strålning och vilken typ av strålning som solen ger. Den strålning från solen som når jorden har våglängder mellan 280-2500 nm. Strålningens våglängd ger den vissa egenskaper och fördelningen är följande 280-350 nm är UV-ljus 380-780 nm är synligt ljus och våglängder däröver är IR-strålning, infraröd strålning. Ett vanligt fönster släpper igenom våglängder från 315-2500 nm, alltså det mesta av solstrålningen utom UV-strålningen. Se Figur 1.

¹⁵ Samuelsson, Lars-Eric & Schenkmanis, Ulf, Växthus och drivbänkar, 3., något rev. uppl., Ica, Västerås, 2004 s. 10

¹⁶ Areskoug, Mats & Eliasson, Per, Energi för hållbar utveckling: ett historiskt och naturvetenskapligt perspektiv, 1. uppl., Studentlitteratur, Lund, 2007 s. 131

Dock kan solskyddsglas utformas så att de förhindrar både UV- och IR-strålning. Ett sådant glas förhindrar då max 45 % av solens strålning då fördelningen hos solstrålningen enligt SS-EN 410 är 4 % UV-strålning, 55 % synligt ljus och 45 % IR- strålning.¹⁷ Vanligt glas släpper in större delen av solstrålningen som sedan absorberas eller reflekteras då den träffar ytor i växthuset. Den absorberade strålningen omvandlas till värme för att sedan avges i form av långvågig strålning med



Figur 1. Strålnings våglängder och glasets genomsläpplighet för dessa. Källa: Carlson, Per-Olof, Bygga med glas.

våglängder på över 4000 nm. Detta gör att större delen av den långvågiga strålning som träffar glasade ytor återigen absorberas och väldigt liten del av den inkommande strålningen kommer att lämna växthuset. Temperatur stiger sedan i takt med att den långvågiga strålningen i växthuset ökar och växthus kan på så sätt ses som en energifälla.¹⁸

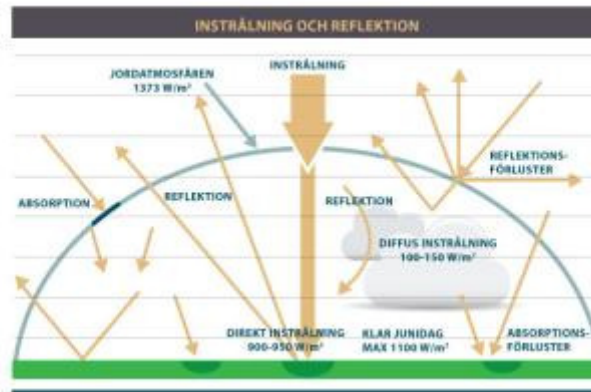
3.1.2 Vädrets påverkan på växthuset

Förutsättningarna för ett bra odlingsklimat i växthuset kommer främst från utomhus temperaturen och den solstrålning som når växthuset men också vindförhållandena påverkar växthuset klimat. Detta innebär att växthuset geografiska placering har stor inverkan på klimatet i växthuset och solstrålningen har som nämnts i kapitel 3.1.1 en stor inverkan på växthuset temperatur. Den solstrålning som når växthuset är både direkt solstrålning och diffus solstrålning. Den direkta solstrålningen når växthuset utan att påverkas av något annat än atmosfären vilket innebär att den endast når växthuset då inga moln hindrar den. Den diffusa solstrålningen är solstrålning som når växthuset efter att den reflekterats eller transmitterats av växthuset omgivning. Växthuset utsätts för diffus strålning även om solen täcks av moln. I Sverige är 45-65% av solstrålningen diffus.¹⁹ Se Figur 2. Den direkta solstrålningen ger betydligt större energi än den diffusa men båda två har stor inverkan på växthuset.

¹⁷ Carlson, Per-Olof, Bygga med glas, Glasbranschföreningen, Stockholm, 2005 s. 20-21

¹⁸ Samuelsson, Lars-Eric & Schenkmanis, Ulf, Växthus och drivbänkar, 3., något rev. uppl., Ica, Västerås, 2004 s. 16

¹⁹ [http://www.ssolar.com/Solenergi2010/EnergifaktaDEL1brSolenFramtidensbasenergi/Solinstr%C3%A5lning/ta bid/608/Default.aspx](http://www.ssolar.com/Solenergi2010/EnergifaktaDEL1brSolenFramtidensbasenergi/Solinstr%C3%A5lning/ta%20bid/608/Default.aspx) 2010-05-17



Figur 2. Solstrålningens fördelning och påverkan på jorden. Källa: <http://www.ssolar.com> 2010-05-20

3.1.3 Klimatskal

Liksom ett vanligt hus kan också växthuset delas upp i tre olika byggnadsdelar, grund, väggar och tak. Hos växthuset består ofta tak och väggar av samma material vars viktigaste egenskap är att släppa igenom solljus. Växthusen behöver också en bärande stomme då byggnadsmaterialet hos väggar och tak sällan har särskilt stor bärighet.

Växthusets grund kan skilja sig beroende på vilken typ av odling som ska bedrivas i växthuset. Kräver odlingen djup jord är det lämpligt att ha en grund bestående av en växtbädd vilket betyder att odlingsjord kommer utgöra golvet i växthuset. Med en sådan grund så placeras stommen samt väggar på en nedgrävd stödmur. Om odlingen istället sker i krukor kan en betonggrund i form av platta på mark utgöra växthusets grund.

De vanligaste materialen för väggar och tak hos större växthus är glas eller kanalplast. Kanalplast är plastplattor bestående av polykarbonat. Plattorna består av två eller fler plastskikt med luftkanaler. Detta gör att kanalplasten isolerar relativt bra men ljusgenomsläppligheten är sämre. Dessutom försämras denna egenskap då plasten åldras. Glas är det mest traditionella materialet och fördelarna med glas är att det släpper igenom mycket ljus, är lätt att rengöra och lätt att byta ut. Dock kräver glaset en stabil och stark stomme eftersom rutorna är relativt tunga.²⁰

Glas har en oordnad molekylstruktur vilket gör glas transparent och ljus kan således passera igenom det. Strålningen som träffar en glasad yta kommer att transmittas, reflekteras och absorberas enligt:

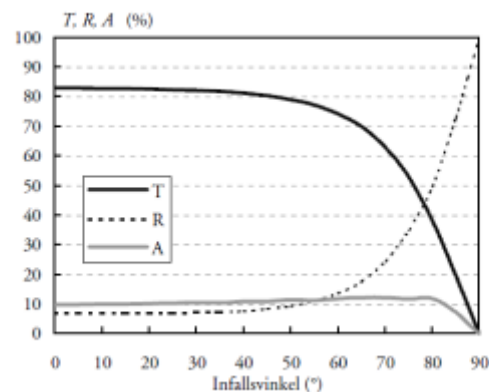
$$\text{Ekv. 1} \quad I_0 = \tau + \alpha + \rho$$

Där I_0 står för infallande strålning τ för transmittans, α för absorbtans och ρ för reflektion. Värdena anges ofta i procent där I_0 är 100 % och sambandet visar att mängden strålning som transmittas är beroende av den absorberade och reflekterade strålningen och vice versa. Den absorberade strålningen bidrar till att värma upp glaset vilket i sin tur leder till att glaset avger värme genom strålning och konvektion, detta kallas sekundär transmission. Den sekundära transmissionen

²⁰ Samuelsson, Lars-Eric & Schenkmanis, Ulf, Växthus och drivbänkar, 3., något rev. uppl., Ica, Västerås, 2004 s. 26

tillsammans med den primära transmissionen kallas den totala solenergi transmissionen och benämns solfaktorn.²¹

Hur mycket solstrålning som transmitteras, absorberas och reflekteras är beroende på strålningens infallsvinkel. Transmissionen är som störst då infallsvinkel är 0° och är relativt konstant upp till 60° för att sedan snabbt avta till 0 % vid 90° vinkel. Se Figur 3. Vinkelberoende transmission (T), reflektion (R) och absorption (A) för vanligt floatglas för infallsvinkel θ (från ytans normal).



Figur 3. Vinkelberoende transmission (T), reflektion (R) och absorption (A) för vanligt floatglas för infallsvinkel θ (från ytans normal). Källa: <http://www.ebd.lth.se> 2010-05-20

Vanligt glas sägs vara opakt dvs. ogenomsläppligt, för långvågig strålning. Detta gör att strålningen från ett rum absorberas och reflekteras av glaset och således stannar större delen av den energi som strålningen innehåller i rummet. En viss del av energin förloras genom utåt gående strålning och konvektion från det uppvärmda glaset. Detta skapar alltså en växthuseffekt.²²

Värmen som uppstår då en glasad yta utsätts för solstrålning illustreras av Figur 4 och ekvationen för de glasade ytorna är:

$$\text{Ekv. 2} \quad \phi_{glas} + \phi_{trans} = \phi_{re} + \phi_{ce} + \phi_{ri} + \phi_{ci}$$

Den vänstra delen av ekvationen redovisar den energi som den glasade ytan får genom solstrålning och den högra delen redovisar den långvågiga strålning och konvektiva värme som den glasade ytan avger. Den värme som genereras i de glasade ytornas ges i modellen av:

$$\text{Ekv. 3} \quad \phi_{glas} = I_{sol} \cdot \alpha_{glas} \cdot A_{(glas)}$$

$$\text{Ekv. 4} \quad \phi_{trans(j)} = \left(\sum_{i=1}^4 [I_{sol(i)} \cdot \tau_{glas(i)} \cdot A_{(i)}] - \phi_{abs} \right) \cdot \frac{A_{(j)}}{\sum_{i=1}^4 A_{(i)}} \cdot \alpha_{(j)}$$

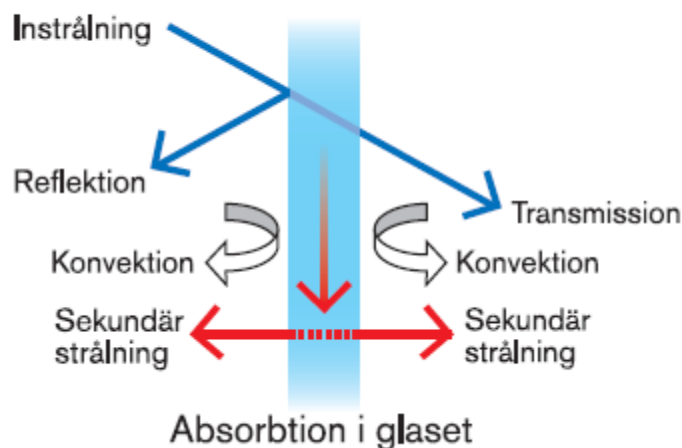
$$\text{Ekv. 5} \quad \phi_{abs} = \phi_{trans(mark)} + \phi_{trans(vagg)}$$

För de opakta ytorna, alltså marken och väggen, i växthus ges den genererade värmen av Ekv. 6.

²¹Carlson, Per-Olof, Bygga med glas, Glasbranschföreningen, Stockholm, 2005 s. 15-20

²² Ibid s. 20

$$\text{Ekv. 6} \quad \Phi_{trans(j)} = A_{(j)} \cdot \varepsilon_{(j)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^4 [I_{sol(i)} \cdot \tau_{glas(i)}]}{\sum_{i=1}^6 A_{(i)}}$$



Figur 4. Transmission, absorption och reflektion då en glasad yta utsätts för solstrålning.
Källa: Carlson, Per-Olof, Bygga med glas.

3.1.4 Byggnadens tröghet

Traditionellt sett är växthus byggda i väldigt lätta material vilket medför att byggnadens inre klimat i stor utsträckning påverkas av yttre klimatförhållanden. En varm solig dag värms växthuset upp för att sedan kyls ned lika fort då utomhustemperaturen sjunker och solstrålningen avtar. Växthusets låga värmeisoleringsgrad och de lätta materialens förmåga att lagra värme ger växthuset låg tröghet. Dessa egenskaper gör att växthuset snabbt anpassar sig till de yttre förhållandena medans en tyngre byggnad ger en fördröjning hos effekterna av den yttre påverkan.

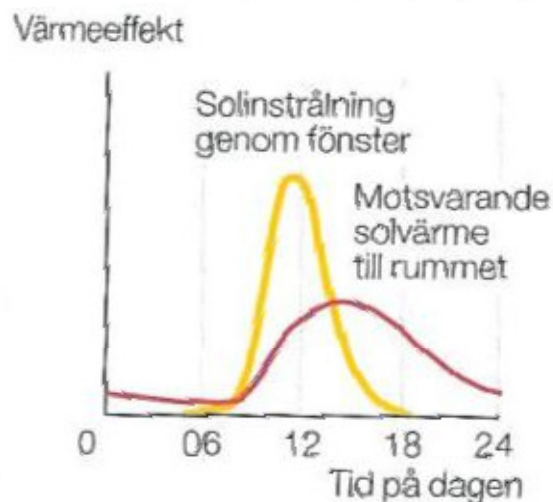
Trögheten hos en konstruktion kan beskrivas som dess förmåga att hålla en jämn temperatur när värmeflödena varierar i tiden. Denna egenskap bestäms av konstruktionens värmekapacitet där en hög värmekapacitet kan lagra stora energimängder utan att ändra temperaturen väsentligt. Medans en konstruktion med låg värmekapacitet endast kan lagra stora energimängder då dess temperatur stiger avsevärt.²³ Detta innebär att en lätt konstruktion snabbt stiger i temperatur då den utsätts för mycket solstrålning för att sedan snabbt sjunka i temperatur då solstrålningen avtar, medans en tung konstruktion lagrar solstrålningen och temperaturen sakta stiger för att sedan avge energin lika sakta och på så sätt behålla sin uppnådda temperatur längre.²⁴ Detta illustreras genom diagrammet i Figur 5. Trögheten hos en byggnad uttrycks med:

$$\text{Ekv. 7} \quad \tau = \frac{C}{H}$$

²³ Akander, Jan, Värmetröghetens inverkan på energibehovet: Studier på ett småhus, Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm, 1999

²⁴ Abel, Enno & Elmroth, Arne, Byggnaden som system, Formas, Stockholm, 2006 s. 87

Där C är konstruktionens totala värmekapacitet och H utgör konstruktionens förlustfaktor, även kallad konduktans, som beror på klimatskärmens U-värde och byggnadens ventilationsförluster.²⁵



Figur 5. Byggnad och inrednings värmekapacitets påverkan på värmeutvecklingen i ett rum.
Källa: Abel, Enno & Elmroth, Arne, Byggnaden som system

En kropps värmekapacitet är den mängd värme som krävs för att höja dess temperatur med en K eller grad C och enheten är Ws/K eller J/K . Värmekapaciteten tas fram genom att multiplicera materialets specifika värmekapacitet, C_p [$Ws/kg \cdot K$], med kroppens massa [kg].²⁶ Glas har en relativt hög specifik värmekapacitet, $840 Ws/kg \cdot K$ ²⁷ vilket kan jämföras med betong som har ungefär samma specifika värmekapacitet²⁸. Betong anses vara en god värmelagrare i byggnadssammanhang emedan glas anses vara sämre. Förklaringen är att mängden glas hos ett fönster eller ett växthus aldrig är särskilt stort, då glaset högst är någon centimeter tjockt, vilket gör att värmekapaciteten också blir liten. Detta tillsammans med glasets höga U-värde som kommer sig av dess relativt höga värmekonduktivitet, $1,05 W/m \cdot K$ ²⁹, och dess tunna konstruktion ger växthuset en låg tröghet. Den enda byggnadsdel som brukar ha en värmelagrare effekt i ett växthus är marken eller grundsulan och i vissa fall en bärande stomme.

3.1.5 Växthusets klimat

Till följd av växthusets utformning och dess lätta konstruktion kan växthusklimatet ofta te sig ganska extremt. Under varma och soliga dagar kan väldigt höga temperaturer uppnås och under nätter och vintern kan växthuset nå temperaturer lika låga som de lägsta utomhustemperaturerna. Detta gör att skillnaden mellan växthusets lägsta och högsta temperatur kan bli stor.

²⁵ Akander, Jan, Värmetröghetens inverkan på energibehovet: studier på ett småhus, Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm, 1999

²⁶ Burström, Per Gunnar, Byggnadsmaterial: uppbyggnad, tillverkning och egenskaper, 2. uppl., Studentlitteratur, Lund, 2007 s. 49

²⁷ Davies, Morris Grenfell., Building heat transfer, J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004 s.28

²⁸ ibid s. 28

²⁹ Ibid s.28

Detta gör att växthusklimatet är beroende av yttre klimatförhållanden. Vilket innebär att om odling ska bedrivas även under årets kallare perioder behöver värme tillföras hos svenska växthus.³⁰

Hur ett rums termiska klimat upplevs beror på lufttemperaturen, de omgivande ytornas temperatur, luftomsättningen och fukthalten i rummet.³¹ Vid modelleringen av växthuset kommer alla dessa faktorer utom luftfuktigheten att tas hänsyn till.

Lufttemperaturen i ett rum är ett enkelt mätbart mått på termiskt klimat men utan omgivningens inverkan ger den ingen hel bild av hur klimatet uppfattas.

För att modellen ska ge ett temperaturvärde som går att referera till så har även växthusets operativa temperatur räknats fram. Den operativa temperaturen anges som T_{op} och är en sammanvägning av lufttemperaturen och medelstrålningstemperaturen från samtliga angränsande ytor. Den kan således ge en bättre indikation än bara lufttemperaturen eller strålningstemperaturen på vilken temperatur en människa skulle uppleva i växthuset. Den operativa temperaturen tar hänsyn till värmeöverföringskoefficienterna för konvektion och strålning mellan hud och luft samt hud och omgivande ytor. Inomhus med någorlunda normala temperaturer har dessa ungefär samma storlek och kan därav försummas.³²

Ekv. 8
$$T_{op} = \frac{T_{luft} + \bar{T}_m}{2}$$

3.2 Modellering

Modellen grundar sig på matematiska ekvationer och kan i teorin utföras med papper och penna vilket dock är väldigt tidskrävande och analytiska lösningar med varierande parametrar skulle bli omständiga och i praktiken nästan omöjliga att lösa. Alla beräkningar i modellen grundar sig på byggnadsfysik och materialegenskaper. För att simulera varierande temperaturer och flöde är modellen tidsberoende och utgångspunkten är att studera ett 24 timmars förlopp, alltså ett dygn, med en tidsupplösning på en timme. Matematiska egenskaper hos modellen medför att antalet tidssteg behöver ökas, alltså kommer tidsstegen bli mindre än en timme. Tidsstegens storlek blir beroende av modellen för värmelagring i betongväggen.

Modellen kommer användas för att ta fram ytornas temperaturer och lufttemperaturen i växthuset. För beräkningen av värmeöverföringskonstanter som är beroende av ytornas temperatur eller lufttemperaturen kommer temperaturen från tidssteget innan att användas. Begynnelsevillkoren för modellen kommer således att behöva anges. Detta innebär att värmeöverföringen kommer bli lite tidsförskjuten då värmeöverföringskoefficienterna är beroende av växthusets temperaturförhållanden i tidssteget innan. Detta kan motiveras med att det hos verkliga material också finns en viss fördröjning i värmeöverföringen som hänger ihop med materialets tröghet men det innebär också att tidsstegen inte kan vara för stora.

För att ge en verklig bild av växthusets termiska förhållanden kommer simuleringen köras flera gånger efter varandra innan värdena tas fram för analys. Detta görs för att materialen i modellen ska

³⁰ Lantz, Mikael, Larsson, Gunnel & Hansson, Torbjörn, Förutsättningar för förnybar energi i svenska växthusodlingar, Rapport nr 57, Lunds Tekn. högsk., Lund 2006

³¹ Davies, Morris Grenfell., Building heat transfer, J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004 s. 2

³² Abel, Enno & Elmroth, Arne, Byggnaden som system, Formas, Stockholm, 2006 s. 33-34

få en termisk historia och alltså inte antas börja på 0°C. Detta medför också att begynnelsevillkoren, som antas, får en ringa betydelse.

Den slutgiltiga växthusmodellen bygger på tre mindre modeller samt en modell som räknar fram klimatdata. En modell byggs upp för att simulera värmelagringen i en vägg och i marken, en modell byggs upp för att simulera värmestrålningen mellan alla ytor i ett rum och den slutgiltiga modellen sammankopplar de andra två modellerna och beräknar alla termiska parametrar. Dessutom laddas data in i växthusmodellen från en modell som simulerar klimatet för den period som ska undersökas.

Värmetillförseln sker genom solstrålning och utomhustemperaturen. Detta innebär att växthuset värms under dagen för att sedan avge värme under natten då lufttemperaturen sjunker och solstrålningen är obefintlig. Modellen kommer användas för att undersöka om väggen och marken kan lagra tillräckligt med värme för att fungera som värmekälla då växthusets temperatur sjunker.

För att undersöka påverkan av en värmelagrande vägg kommer modellen göras i två olika utföranden. Ett utförande där den värmelagrande väggen är införd och en utan den värmelagrande väggen. Värdena från de två modellerna kan sedan jämföras och utvärderas för att ge en uppfattning om vilken effekt väggen har på växthuset.

3.2.1 Värme

Värme är egentligen energi som lagrats i någon slags materia. Värmen i sig uppkommer från rörelseenergi som är ett resultat av att molekylerna i lagringsmaterial vibrerar på ett ostrukturerat sätt.³³ Materialets molekylstruktur får således en betydande inverkan i dess förmåga att överföra och lagra värme. Molekylens strukturella uppbyggnad påverkar atomernas rörelsefrihet vilket tillsammans med antalet atomer per molekyl ger förutsättningen för materialets värmeegenskaper.³⁴

Den vanligaste orsaken till värmeöverföring är temperaturskillnader mellan två material. Temperaturskillnaden är då drivkraften i reaktionen och bidrar till att värme flödar spontant från det varmare materialet till det kallare.³⁵ Detta flöde pågår tills materialen uppnått en jämvikt, alltså har samma temperatur, och drivkraften således tagit slut.

Värmetransport kallas också värmeflöde och betecknas ϕ och har enheten Watt (W). Watt kan också anges som J/s vilket ger en närmare förståelse för värmeflödet som enklare kan förklaras som den totala värmemängden per sekund som flödar från ett material.³⁶

De fysikaliska värmetransportmekanismerna som kan ske tillsammans eller var för sig är:³⁷

Strålning

Konvektion

³³ Hagentoft, Carl-Eric, Vandrande fukt, strålning och värme: så fungerar hus, Studentlitteratur, Lund, 2003 s.45

³⁴ White, Mary Anne, Properties of materials, Oxford University Press, New York, 1999 s.93-94

³⁵ Ibid s.46

³⁶ Burström, Per Gunnar, Byggnadsmaterial: uppbyggnad, tillverkning och egenskaper, 2. uppl., Studentlitteratur, Lund, 2007 s.32

³⁷ Ibid s.32

Ledning

3.2.1.1 Värmeutbyte

Växthusets samtliga byggnadsdelar kommer antingen avge eller ta emot värme från dess omgivning. Detta sker genom en eller flera värmetransporter som nämnts i kapitel 3.2.1. De typer av värmeutbyte som sker i växthuset är konvektions- och strålningsutbyte mellan ytorna och luften i växthuset, konvektions- och strålningsutbyte mellan växthuset och dess omgivning samt värmeledning genom den värmelagrandeväggen och marken. De olika utbytena beräknas genom olika värmeöverföringskoefficienter som betecknas med α och har enheten $W/m^2 \cdot K$.³⁸ Koefficienterna beror i sin tur på ytornas förhållande till varandra, material egenskaper eller klimatfaktorer såsom vind men även på temperaturdifferenser.

De glasade ytorna antas ha samma temperatur på insidan som utsidan då värmemotståndet är så litet att det kan försummas.³⁹ Således kommer inte heller någon värmetransport ske i glaset istället sker de glasade ytornas värmeutbyte endast genom konvektion och strålning med dess omgivning. Väggen liksom marken i växthuset kommer också utbyta värme genom konvektion med inneluften och strålning med växthusets inre ytor men utåt sett sker värme utbytet genom värmetransport i väggen respektive marken.

3.2.1.2 Konvektion

Konvektion sker i växthusmodellen genom luftens rörelse. De glasade ytorna utsätts för både utvändig konvektion (α_{ce}) samt invändig konvektion (α_{ci}) medans den värmelagrande väggen och marken bara utsätts för invändig konvektion (α_{ci}).

Den utvändiga konvektionen beror på vindhastigheten runt växthuset och uttrycks i modellen genom Ekv. 9 och Ekv. 10.⁴⁰

För lovertssida:

$$\text{Ekv. 9} \quad \alpha_{ce} = 5 + 4,5 \cdot u - 0,14 \cdot u^2 \quad u \leq 10 \text{ m/s}$$

För läsida:

$$\text{Ekv. 10} \quad \alpha_{ce} = 5 + 1,5 \cdot u \quad u \leq 8 \text{ m/s}$$

I modellen kommer medelvärde för lovert- och läsidan att används.

Den invändiga konvektionen kan vara svår att förutse och på så sätt beräkna. Anledningen till detta är att den lätt påverkas av yttre faktorer så som utomhustemperatur och ventilation. Ett fönster eller en dörr som står öppen kan påverka konvektion i ett rum avsevärt.⁴¹ I växthus modellen kommer konvektionen beräknas med:

$$\text{Ekv. 11} \quad \alpha_{ci} = 2 \cdot |T_a - T_{yta}|^{1/4}$$

³⁸ Sandin, Kenneth, Praktisk byggnadsfysik, KFS, Lund, 2007 s.28, 30

³⁹ Ibid s.47

⁴⁰ Hagentoft, Carl-Eric, Introduction to building physics, Studentlitteratur, Lund, 2001 s. 43

⁴¹ Hagentoft, Carl-Eric, Vandrande fukt, strålande värme: så fungerar hus, Studentlitteratur, Lund, 2003 s. 66-67

T_a är ytans omgivande temperatur, i detta fall temperaturen på luften i växthuset. Absoluttecknet tar hänsyn till att värmen kan överföras såväl från ytan till luften som tvärtom. Denna formel anger konvektionen vid en laminär lufrörelse.⁴² En laminär lufrörelse innebär att ingen turbulens eller annan ojämn rörelse förekommer längs väggen utan luften cirkulerar i skikt som i sig kan röra sig i olika hastigheter.⁴³

Konvektion är även sammankopplad med ventilationen av växthuset genom att luften som tillförs byggnaden ger upphov till värmeutbyte. Då luften som tillförs är kallare än rumstemperaturen måste luften värmas och på samma sätt kan den tillförda luften öka rumstemperaturen. Den tillförda luften antas blanda sig jämnt med den övriga rumsluften direkt då den når rummet och energiförlusterna eller tillförseln beräknas genom:

$$\text{Ekv. 12} \quad \dot{M} \cdot C_{p,luft} \cdot (T_{luft} - T_{ute})$$

$$\text{Ekv. 13} \quad \dot{M} = \frac{n \cdot V \cdot \rho}{3600}$$

V står för volymen i lokalen och n för antalet omsättningar per timme vilket normalt sätts till 0,5 -1 oms/timme för bostäder.⁴⁴ Då växthuset kan antas vara betydligt otätare än en bostad kommer omsättningen antas vara högre. Konvektionen och luftomsättningen i byggnaden förhåller sig till varandra genom att den konvektiva värmeledningen från samtliga inre ytor är lika med luftomsättningen gånger temperaturdifferensen mellan ytorna och inkommande luft.

3.2.1.3 *Långvågig strålning*

På samma sätt som ytor utbyter värme konvektivt med inneluften, så utbyter ytorna också värme genom strålning. Utvändigt sett så utbyts värme genom långvågig strålning mot himlen och omgivande ytor, såsom mark, träd, byggnader m.m. medans det invändiga utbytet i byggnaden beror på ytornas förhållande till varandra. Värmeöverföringskoefficienten vid strålning beror på ytans emittans (ϵ), synvinkel (F) och temperaturdifferensen mellan de ytor som utbyter strålning med varandra. Ett mått på strålningsutbytet mellan olika ytor, värmeövergångskoefficienten för långvågig strålning α_r , beräknas genom:

$$\text{Ekv. 14} \quad \alpha_r = 4 \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot \bar{T}_m^3$$

\bar{T}_m står för medeltemperaturen hos alla ytor som deltar i utbytet och σ är Stefan Boltzmanns konstant ($5,67 \cdot 10^{-8}$).⁴⁵

Den yttre strålningen mot himlen beräknas med:⁴⁶

$$\text{Ekv. 15} \quad T_{sky} = 1.2 \cdot T_{ute} - 14 \text{ Horizontal yta mot klara himmel.}$$

$$\text{Ekv. 16} \quad T_{sky} = 1.1 \cdot T_{ute} - 5 \text{ Vertikal yta mot klar himmel.}$$

$$\text{Ekv. 17} \quad T_{sky} = T_{ute} \text{ Molnig himmel.}$$

⁴² Hagentoft, Carl-Eric, Introduction to building physics, Studentlitteratur, Lund, 2001 s. 44

⁴³ Davies, Morris Grenfell., Building heat transfer, J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004 s. 76-77

⁴⁴ Ibid s. 11

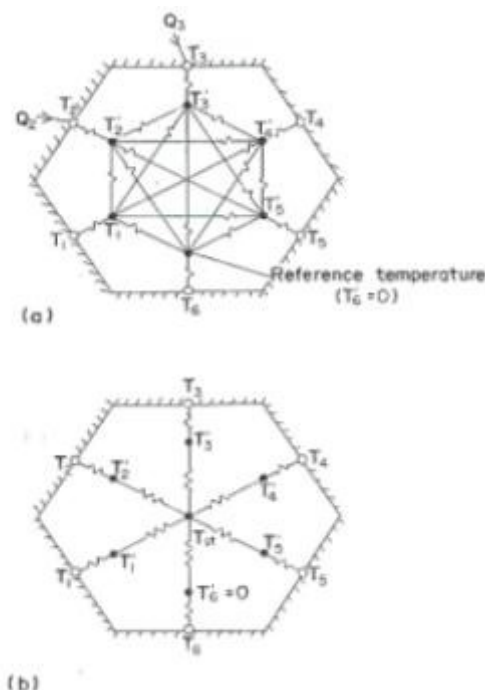
⁴⁵ Sandin, Kenneth, Praktisk byggnadsfysik, KFS, Lund, 2007 s.28

⁴⁶ Hagentoft, Carl-Eric, Introduction to building physics, Studentlitteratur, Lund, 2001 s. 54-56

Väggarnas utsida som har vertikala ytor kommer att inverka i ett strålningsutbyte med både himlen, den omgivande marken och alla omgivande ytor såsom träd, buskar, byggnader m.m. Utbyte fördelar sig med hänsyn till synfaktorn, alltså hur stor del av varje yta som väggen ser. I växthusmodellen kommer väggens strålningsfördelning antas vara lika stor mot himlen som mot marken, synfaktorn blir alltså 0,50 mot himlen och 0,50 mot omgivningen. Omgivande ytor antas ha samma temperatur som utomhustemperaturen.

Det långvågiga strålningsutbytet mellan ytorna i växthuset är invecklat och det exakta strålningsutbytet i byggnaden är väldigt komplicerat att modellera, inte minst utifrån att strålningen är starkt olinjär. Därför används i modellen en förenklad metod som redovisades i en artikel i *Building Environment*, vol 18, No. 3, 1983. Artikeln är skriven av M. G. Davies och heter *Optimal designs for star circuits for radiant exchange in a room, Building and Environment*. Davies redogör för en metod som skapar en stjärnkoppling för ett rektangulärt rum. Metoden innebär att temperaturen hos en yta modelleras med en nod. Denna nod strålar mot en nod i mitten av stjärnkopplingen, T_{st} , som har en ekvivalent strålnings temperatur som ger bra överensstämmelse med det verkliga strålningsutbytet som sker mellan ytorna. Genom denna metod kan ett motstånd mellan varje yta och den ekvivalenta strålningens temperatur optimeras. På så sätt kan värmeflödet mellan de olika ytorna simuleras på ett enkelt sätt, där temperaturerna är linjäriserad istället för potenser (T^4). I artikeln skriver Davies att strålningsutbytet i ett rektangulärt rum inte kan beräknas exakt med denna metod men felmarginalen är så pass liten att metoden är tillräckligt tillförlitlig för att användas i simuleringar.

Motstånden som räknas fram är beroende av ytornas synfaktorer och dess storlek i förhållande till varandra. Synfaktor ges ofta beteckningen F och kallas även formfaktor eller vinkelfaktor och är ett



Figur 6. a. Illustration av verklig strålningsfördelningen i ett sexsidigt rum b. omvandlingen till en stjärnkoppling. Källa: Building and Environment, Volume 18, Issue 3

mått på den energi som lämnar en yta och träffar en annan.⁴⁷ I växthuset utbyter varje yta energi med de fem övriga ytorna och så länge ytorna inte är konkava så utbyter inte ytan energi med sig själv.⁴⁸ På så sätt kommer växthusets dimensioner och utformning att påverka synfaktorerna i växthuset och i sin tur strålningsutbytet mellan dem.

Värmeöverföringskoefficienten (α_{ri}) för strålningen i huset är beroende av motstånden i stjärnkopplingen och strålning från den yta som undersöks. Motståndet påverkas av synfaktorerna och ytornas storlek och strålningen beror på medel temperaturen av alla ytor och emittansen.

Att strålningsutbytet beräknas efter Davies artikel innebär att växthusets måste anta en kubiskt rektangulär form vid modellerandet. Normalt sett har ett växthus sadeltak så detta antagande ger modellen vissa begränsningar.

3.2.1.4 *Värmelagring*

Förmågan för en kropp att lagra värme anges som värmekapacitet och värmekapaciteten anger den mängd värme som krävs för att höja en kropps temperatur med en grad. Den betecknas ofta med bokstaven C och har enheten J/K eller Ws/K. För att ange ett materials förmåga att lagra värme använder man specifik värmekapacitet och detta anger materialets värmekapacitet per kg. Beteckningen är då c eller Cp och enheten är J/(kg*K) eller Ws/(kg*K).⁴⁹

Genom att ange den specifika värmekapaciteten kan material enkelt jämföras i tabellform. Det bör dock noteras att den specifika värmekapaciteten anges per vikt och att det ofta är relevantare att ange ett materials värmekapacitet per volym. Det är då ett materials volymetriska värmekapacitet som beräknas.⁵⁰ När volymen blandas in blir också materialets densitet avgörande för hur mycket värme som kan lagras. Detta innebär att material som har låg specifik värmekapacitet ändå kan lagra relativt mycket värme om det har en hög densitet.

I datormodellen av växthuset kommer värmelagring simuleras genom finita differentialekvationer. I verkligheten sker dessa i väggens alla riktningar och väggens samtliga sidor bidrar alltså till värmeförlust eller förluster. Men i modellen kommer det verkliga fallet förenklas och värmetransporten kommer endast ske i en dimension. Detta innebär att värmeförlusterna som sker genom väggens minsta ytor, alltså i väggens periferi, försummas. Då väggens tjocklek är liten i förhållande till dess yta kommer dessa förluster att bli väldigt små och försummandet kommer inte påverka modellen nämnvärt.

I modellen delas väggen och marken upp i ett utvalt antal skikt, ju fler skikt desto noggrannare kan temperaturförhållandena i lagringsmediet studeras. I mitten av varje skikt antas det finnas en nod vars temperatur kan bestämmas genom att värmetransporten i väggen undersöks. Utgångspunkten för värmetransporten är väggytornas temperaturer som införs i modellen genom en nod som placeras på väggens framsida och en på dess baksida. Temperatur som dessa noder ges antas vara

⁴⁷ Holman, Jack Philip, Heat transfer, 7. ed., McGraw-Hill, New York, 1990 s. 394-395

⁴⁸ Hagentoft, Carl-Eric, Introduction to building physics, Studentlitteratur, Lund, 2001 s. 51

⁴⁹ Burström, Per Gunnar, Byggnadsmaterial: uppbyggnad, tillverkning och egenskaper, 2. uppl., Studentlitteratur, Lund, 2007 s.49

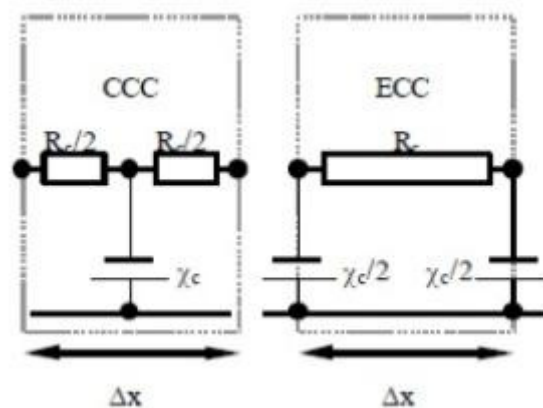
⁵⁰ Hagentoft, Carl-Eric, Vandrande fukt, strålning och värme: så fungerar hus, Studentlitteratur, Lund, 2003 s. 45

medeltemperaturen för hela väggytan. Dessa temperaturer blir sedan avgörande för de inre temperaturförhållandena hos väggen.

3.2.1.5 *Finita differensmetoden*

Temperaturförhållandena i väggen kan lösas numeriskt genom att använda finita differensmetoden. Metoden innebär att lagringsmediet, i detta fall en vägg, delas upp i flera celler. En nod i cellen får sedan representera cellens temperatur. Temperaturen är beroende av värmeflödet från de kringliggande noderna och värmeflödet är i sin tur beroende av materialets värmemotstånd. Men nodens temperatur beror också på materialets specifika värmekapacitet och densitet vilket kan sägas ge materialets värmelagringsförmåga. Värmelagringsförmågan kan tillföras cellen på två sätt, antingen kan den placeras i mitten av cellen vilket ger en så kallad "central capacity cell" (CCC) eller så kan den placeras mellan två halva celler vilket ger en så kallad "edge capacity cell" (ECC).⁵¹ I växthusmodelleringen kommer väggens värmelagring att beräknas med CCC metoden. Se Figur 7.

Temperaturförhållandet hos väggens noder beräknas genom en stationär endimensionell



Figur 7. Kopplingschema för CCC samt ECC lagring. Källa: Akander, Jan, The ORC method: effective modelling of thermal performance of multilayer building components

värmetransport över tre noder där temperaturen hos mittennoden fås från noderna bredvid. Den lagrade värmen ger sedan upphov till en temperaturändring hos cellen i nästa tidssteg, dvs i närmaste framtiden. I sin tur påverkar den aktuella cellen sina granncellers temperaturer. Beräkningen måste på så sätt ta hänsyn till både tid och rum. Tidsparametern kommer med i beräkningen genom att den värme som lagras i en nod används för att beräkna temperaturerna då beräkningen görs en gång till osv. Detta gör att ekvationen måste köras flera gånger för att ta fram temperaturen hos alla celler. Den temperatur som noteras och används i beräkningarna är den temperatur som värmelagringen i cellen åstadkommit och denna temperatur blir i sin tur utgångspunkten för förhållandena i nästa cell. För varje gång ekvationen beräknas ges nästa temperatur i väggen men även de redan framtagna temperaturerna kan ändras då dessa är beroende av kringliggande cellers temperatur. Detta skulle kunna jämföras med ett verkligt förhållande då temperaturen vandrar in eller ut ur väggen. Detta kan beskrivas med:

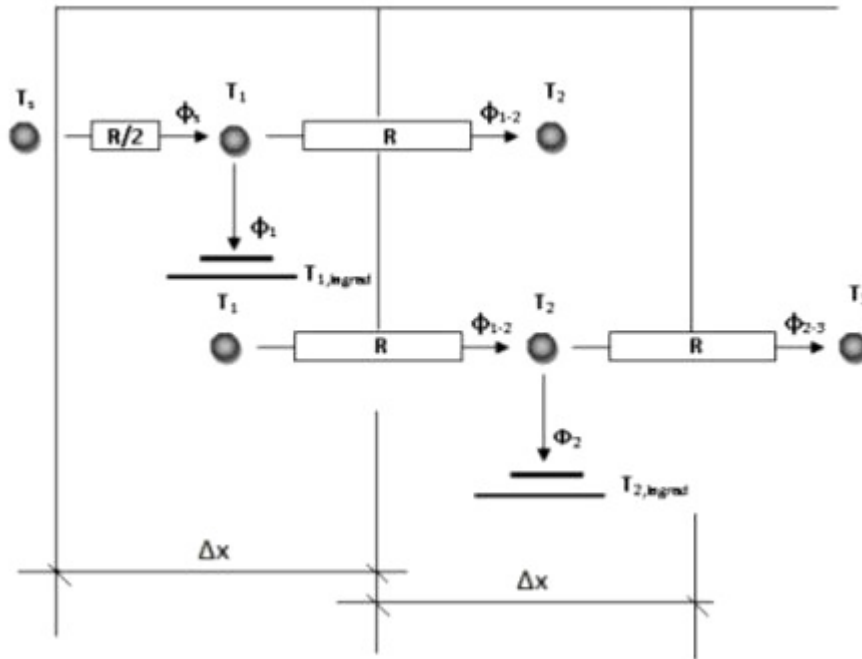
$$\text{Ekv. 18} \quad \phi_1 = \phi_s - \phi_{1-2}$$

⁵¹ Akander, Jan, The ORC method: effective modelling of thermal performance of multilayer building components, Diss. (sammanfattning) Stockholm : Tekn. högsk., Stockholm, 2000

Vilket är lika som:

$$\text{Ekv. 19} \quad \frac{c}{\Delta t} \cdot (T_{\text{plats,tid}} - T_{\text{plats,tid-1}}) = \frac{A}{R_{S-1}} \cdot (T_S - T_1) - \frac{A}{R_{1-2}} \cdot (T_1 - T_2)$$

Som ger i sin tur ger Ekv. 20 som används i modellen för att ta fram temperaturerna i vägg och mark.



oden.

$$\text{Ekv. 20} \quad T_{(\text{plats,tid})} = T_{(\text{plats,tid-1})} + \frac{\Delta t \cdot \lambda}{\Delta x^2 \cdot \rho \cdot c_p} (-2T_{(\text{plats,tid-1})} + T_{(\text{plats-1,tid-1})} + T_{(\text{plats+1,tid-1})})$$

Om ovanstående Ekv. 20 sätts in i Figur 8 nedan blir $T_{(\text{plats,tid})}$ samma som $T_{1,\text{lagrad}}$, $T_{(\text{plats,tid-1})}$ motsvarar T_1 , $T_{(\text{plats-1,tid-1})}$ motsvarar T_S och $T_{(\text{plats+1,tid-1})}$ motsvarar T_2 . Δt är en tidskonstant som anger storleken på tidsstegen hos ekvationen. Figur 2 illustrerar värme flödet och lagringen hos väggen.

Samma modell används för värmelagringen hos både väggen och marken i växthuset men hos marken är den sista temperaturen årsmedeltemperaturen. Då denna kan anses variera med högst 3°C på 3 meters djup och under en välisolerad platta på mark kan den anses vara lika med årsmedeltemperaturen.⁵²

Väggens tjocklek, antalet celler och dess material egenskaper blir avgörande för storleken på tidsstegen som tas i modellen. Om tidsstegen underskrids kan modellen matematiskt sett börja oscillera vilket innebär att temperaturerna börjar pendla.⁵³ Bestämningarna av tidsstegen görs med:

$$\text{Ekv. 21} \quad t_{\text{stab}} = \Delta x \cdot \delta \cdot c \frac{3 \cdot \Delta x}{2 \cdot \lambda}$$

⁵² Hagentoft, Carl-Eric, Vandrande fukt, strålande värme: så fungerar hus, Studentlitteratur, Lund, 2003 s. 109-111

⁵³ Hagentoft, Carl-Eric, Introduction to building physics, Studentlitteratur, Lund, 2001 s. 179-180

3.2.2 Energibalans

Hela växthusmodellen grundar sig på energibalansberäkningar där ingående energier är lika med utgående energier. Vad som sker i varje byggnadsdel har utretts för sig för att sedan sättas ihop till en hel modell bestående av ett flertal fysiska förlopp som sker med påverkan av varandra. Här redogörs det för samtliga energibalansberäkningar som tillsammans byggt upp modellen.

Energibalans för hela växthuset bygger på:

För glasade ytor:

$$\text{Ekv. 22} \quad \Phi_{glas} + \Phi_{trans} = \alpha_{ci} \cdot A \cdot (T_{yta} - T_{luft}) + \alpha_{ce} \cdot A \cdot (T_{yta} - T_{ute}) + \alpha_{ri} \cdot A \cdot (T_{yta} - T_{ekv}) + \alpha_{re} \cdot A \cdot (T_{yta} - T_{sky})$$

För vägg och golv yta:

$$\text{Ekv. 23} \quad \Phi_{trans} = \alpha_{ci} \cdot A \cdot (T_{yta} - T_{luft}) + \alpha_{ce} \cdot A \cdot (T_{yta} - T_{ekv}) + \alpha_{lg} \cdot A \cdot (T_{yta} - T_{vägg,1})$$

Ekvationerna måste utföras för varje yta i växthuset och målet är att räkna ut T_{yta} , alltså temperaturen för varje yta. Yttertemperaturerna ger i sin tur en inblick i temperaturförhållandet i växthuset. I energibalanserna är klimatfaktorerna givna men de ytberoende temperaturerna, T_{ekv} och T_{luft} , måste lösas ut för att ekvationerna ska kunna lösas. Då dessa temperaturer är beroende av T_{yta} kan de ersättas med:

$$\text{Ekv. 24} \quad T_{ekv} = \frac{\sum_{j=1}^6 \alpha_{ri(j)} \cdot A_{(j)} \cdot T_{yta(j)}}{\sum \alpha_{ri(j)} \cdot A_{(j)}}$$

$$\text{Ekv. 25} \quad T_{luft} = \frac{\sum_{j=1}^6 [\alpha_{ci(j)} \cdot A_{(j)} \cdot T_{yta(j)}] + \dot{M} \cdot c_p \cdot T_{ute}}{\sum [\alpha_{ci(j)} \cdot A_{(j)}] + \dot{M} \cdot c_p}$$

Genom Ekv. 24 och Ekv. 25 kan följande Ekv. 26 härledas

$$\text{Ekv. 26} \quad \Phi_{glas} + \Phi_{trans} + \alpha_{ce} \cdot A \cdot T_{ute} + \alpha_{re} \cdot A \cdot T_{sky} + \frac{\alpha_{ci} \cdot A \cdot (\dot{M} \cdot c_p \cdot T_{ute})}{\sum_{j=1}^6 [\alpha_{ci(j)} \cdot A_{(j)}] + \dot{M} \cdot c_p} = T_{yta} \cdot A \cdot (\alpha_{ri} + \alpha_{ci} + \alpha_{re} + \alpha_{ce}) - \alpha_{ci} \cdot A \cdot \frac{\sum_{j=1}^6 [\alpha_{ci(j)} \cdot A_{(j)} \cdot T_{yta(j)}]}{\sum [\alpha_{ci(j)} \cdot A_{(j)}] + \dot{M} \cdot c_p} - \alpha_{ri} \cdot A \cdot \frac{\sum_{j=1}^6 [\alpha_{ri(j)} \cdot A_{(j)} \cdot T_{yta(j)}]}{\sum [\alpha_{ri(j)} \cdot A_{(j)}]}$$

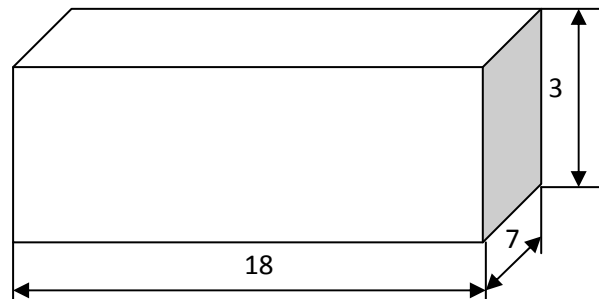
Denna energibalans måste utföras för varje yta och kan sättas ihop till en klimatvektor, K , som motsvarar vänsterledet i balansen och en matris, B , som motsvarar högerledet i balansen. Ur matrisen kan T_{yta} lösas ut ur det vänstra ledet och bilda temperatur vektor, T . Beräkning som ligger till grund för de termiska förhållandena i växthusmodellen redovisas av:

$$\text{Ekv. 27} \quad K = B \cdot T \rightarrow T = B^{-1} \cdot K$$

3.2.3 Växthusets utformning i modellen och verkligheten

Dimensionerna till det växthus som simuleras i datormodellen bygger på skiss förslag av Eldtemplet som Wij trädgårdar planerar att uppföra under 2010. Det verkliga växthuset kommer uppföras med sadeltak medan modellens växthus kommer att vara kubiskt rektangulär pga. strålningsmodellen som används. Växthuset i modellen har väggar och tak av enkelglas. I skissförslagen har växthuset en bredd på 7 m och en längd på 18 m. Växthuset som simuleras har också en bredd på 7 m, längd på 18 m och en höjd på 3 m. Se Figur 9. För att ge det simulerade växthuset så goda termiska förutsättningar som möjligt kommer väggens långsida vara orienterad i nordsydlig riktning och den

värmelagrande väggen kommer ersätta växthusets nordliga vägg. På så sätt tillförs maximal strålning till växthuset och den strålning som träffar den värmelagrande väggen träffar den sida som är in mot växthuset. Detta gör att den värme som genereras och lagras kommer växthus till gagn direkt och utan att behöva vandra igenom väggen.



Figur 9. Form och mått på växthuset som simuleras

Materialet som införs i den värmelagrande väggen är betong eftersom detta är ett vanligt material inom byggbranschen med fukttåliga egenskaper och god värmelagringsförmåga.⁵⁴

Luftomsättningen i växthuset sätts till 2 oms/h, vilket kan anses vara ganska lågt då växthuset troligtvis ventileras mer under dagen för att sänka dess temperatur. Men på natten kan det istället antas vara klimatskalets otäthet som bidrar till den enda luftomsättningen i växthuset.

3.2.4 Klimatdata och materialegenskaper

De klimatdata för temperatur och solstrålning som används i modellen är hämtad från en klimatmodell som är uppbyggd på mätvärden tagna i Stockholmsområdet under 1971. Dessa värden anses vara representativa för temperaturer i Stockholmsområdet.⁵⁵ Den strålningsmodell för klimatdata som används är samma modell som används i BRIS och IDA.⁵⁶ Solstrålningen är en summering av den direkta solstrålningen och den diffusa solstrålningen som träffar de olika delarna av klimatskalet. Klimatmodellen tar hänsyn till vilket väderstreck som byggnadsdelens är riktad mot samt vilken vinkel den infallande strålningen har i förhållande till byggnadsdelen. Den rådande utomhustemperaturen ger upphov till himlens och omgivningens temperatur på det sätt som tidigare redovisats. Den rådande vindhastigheten hämtas från Diagram 1 som bygger på 30 års vinddata ursprungligen uppmätt i vindzon 4.⁵⁷

⁵⁴ Burström, Per Gunnar, Byggnadsmaterial: uppbyggnad, tillverkning och egenskaper, 2. uppl., Studentlitteratur, Lund, 2007 s.204-206

⁵⁵ Akander, Jan, Värmetröghetens inverkan på energibehovet: studier på ett småhus, Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm, 1999

⁵⁶ Bring, A, Versatile System Simulation with the BRIS Program. Proceedings of the Fourth Symposium on the Use of Computers for Environment Engineering Related to Buildings. Ed: Kenchiku Kaikan, Tokyo, Japan, 1983

⁵⁷ Ibid

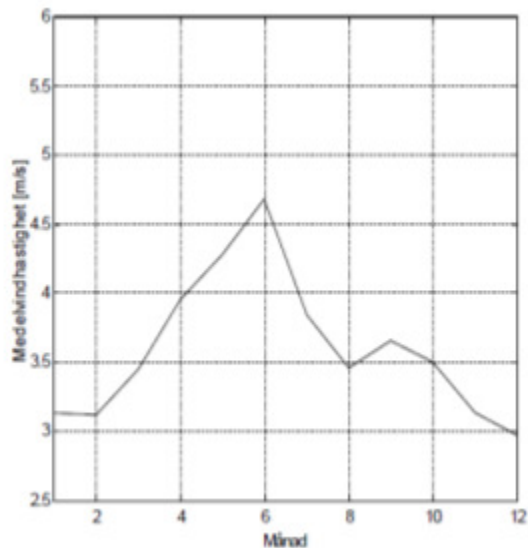


Diagram 1. Vindhastighet kring ett enplanshus i en Stockholmsförort med taknockshöjd 4 meter ovanför marknivå. Källa: Akander, Jan, Värmetröghetens inverkan på energibehovet: studier på ett småhus.

De klimatdata som väljs ut är klimatdata för ett dygn som motsvarar en ungefärlig medeltemperatur och medelsolstrålning för den perioden som undersöks. Utvald klimatdata redovisas i kapitel 3.7.1.

3.2.4.1 *Klimatdata*

De klimatdata som används redovisas i diagram nedan samt i siffror i bilaga 2 till 5. Värdena är uppmätta med en timmes intervaller men då tidsstegen i modellen kräver mer värden än bara 24 stycken på ett dygn tas fler värden fram genom linjär interpolering. I strålningsdiagrammen kan väderstreckens inverkan på strålningsmängden utläsas och hur dessa variera beroende på årstid.

Vindhastigheterna som väljs för de olika perioderna kommer från Diagram 1 och är:

Vinter 3,1 m/s

Vår/höst 3,5 m/s

Sommar 4,2 m/s

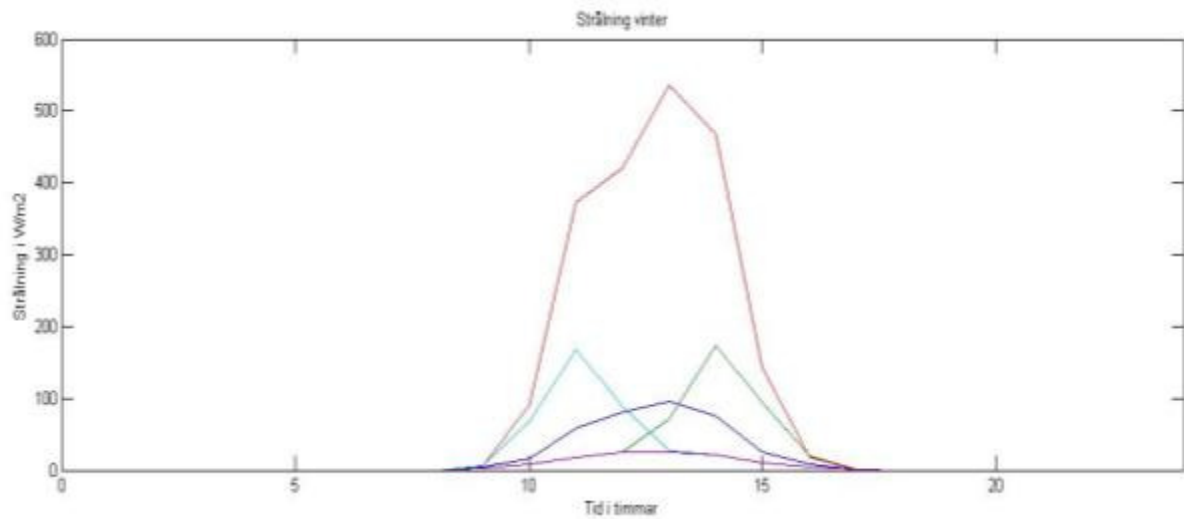


Diagram 2. Infallande solstrålning under ett dygn på vintern.

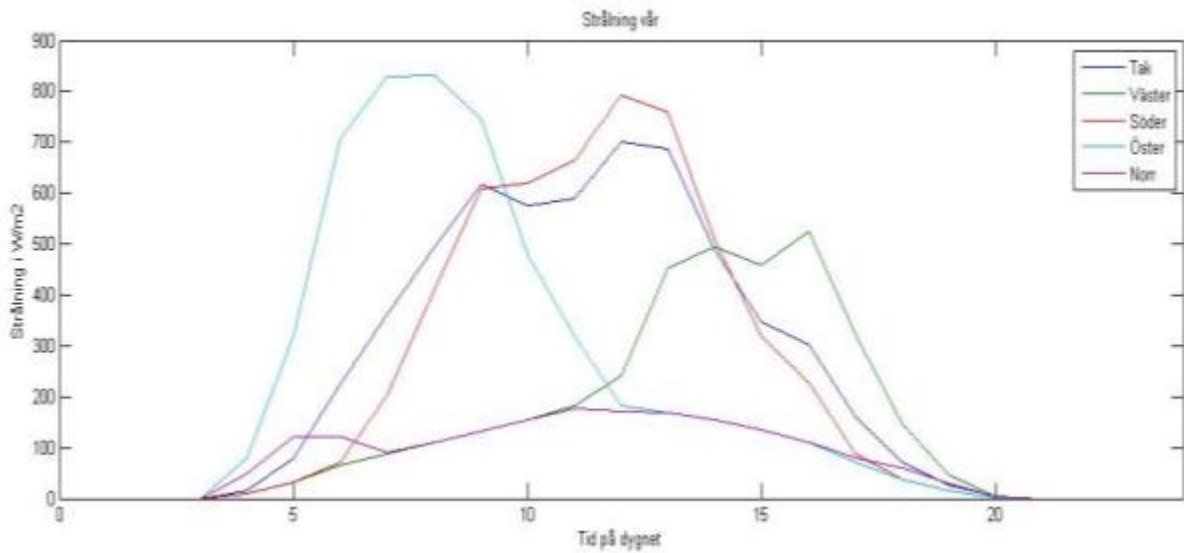


Diagram 3. Infallande solstrålning under ett dygn på vår/höst.

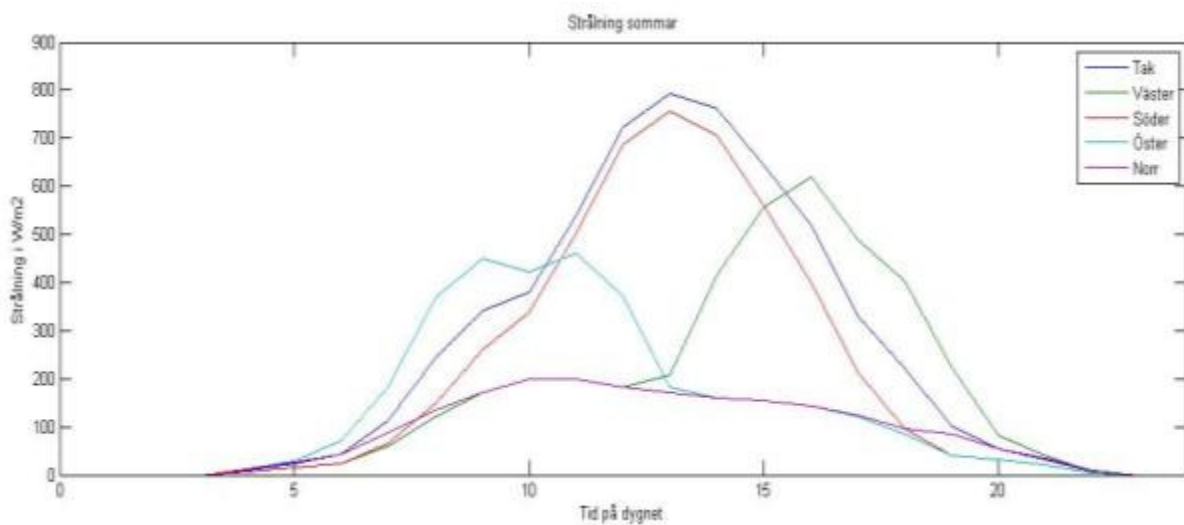


Diagram 4. Infallande solstrålning under ett dygn på sommar.

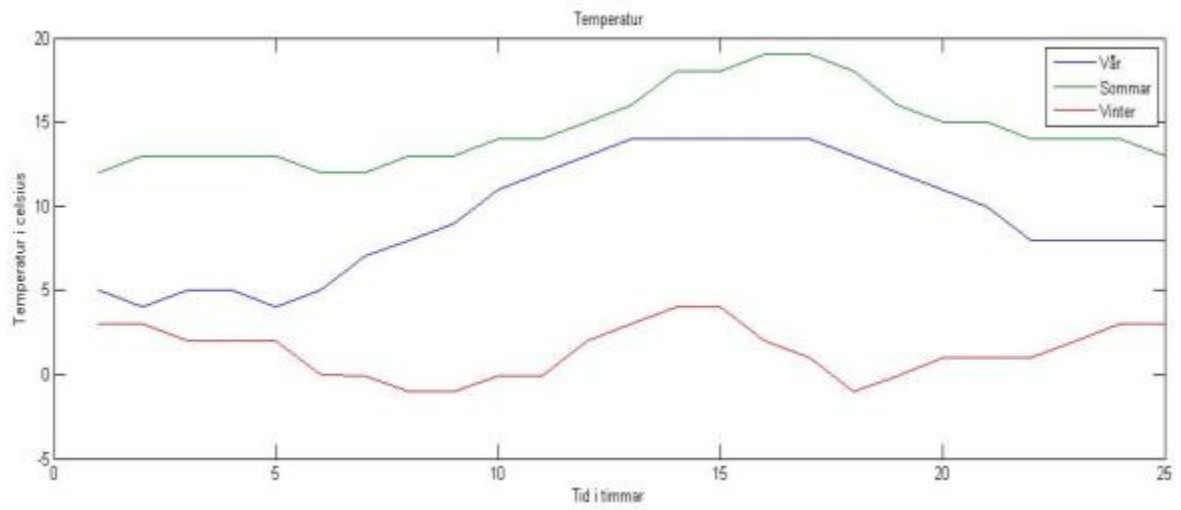


Diagram 5. Utomhustemperaturen för ett dygn på under vinter, vår/höst och sommar .

3.2.4.2 *Materialdata*

Växhusets dimensioner:

Höjd	3 m
Längd	18 m
Bredd	7 m
Area	126 m ²
Volym	378 m ³

De materialdata som används i växthusmodellen är tagen ur byggnadsteknisk litteratur och är:⁵⁸

δ_{luft}	1,2 kg/m ³
δ_{betong}	2200 kg/m ³
$\delta_{\text{jord/mark}}$	1460 kg/m ³
λ_{betong}	1,7 W/m·K
$\lambda_{\text{jord/mark}}$	1,3 W/m·K
c_{betong}	840 J/kg·K
$c_{\text{jord/mark}}$	880 J/kg·K
c_{luft}	1010 J/kg·K
ϵ_{betong}	0,9
ϵ_{jord}	0,9
τ_{glas}	0,83
α_{glas}	0,10
ρ_{glas}	0,07
n	2 oms/h

⁵⁸ Davies, Morris Grenfell., Building heat transfer, J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004 s.28

4 Resultat

Resultat från de olika simuleringarna redovisas i diagramform samt vissa utvalda värden i tabellform. Anledningen till att värdena valts att redovisas i diagram är för att detta tydligast påvisar den termisk påverkan en betongvägg har på växthuset. Eftersom de numeriska värdena på temperaturerna som tas fram inte är så viktiga i detta arbete skapar graferna den bästa bilden av värmelagringens effekter. Men för att underlätta jämförelsen mellan växthuset med värmelagring och det utan anges också några utvalda temperaturvärden i tabellform.

I tabellerna redovisas samtliga ytors temperaturer under ett dygn dessutom redovisas också lufttemperaturen, en medel temperatur av samtliga ytor och den operativa temperaturen. Det är också de sistnämnda tre temperaturerna som valts att redovisas i tabellform där max-, min- och medelvärde redovisas. Värdena i diagrammen bygger på en simulering med 240 tidssteg, alltså temperaturen för var 6:e minut under ett dygn räknats fram.

Lufttemperaturen, T_{luft} , är beroende av alla inre ytors temperatur och ger därför en indikation på värdet av dessa. Medelyttemperaturen, T_{ytamedel} , anger medelvärdet för samtliga yttemperaturer vid varje tidssteg. Den operativa temperaturen, T_{operativ} , ger ett värde som kan liknas med vad människan uppfattar som rumstemperatur.⁵⁹

Eftersom temperatur skillnaden kan skilja sig väldigt mycket beroende på årstid och om den värmelagrande väggen är med i simuleringen så kommer temperaturskalan att också skilja sig i de olika diagrammen.

Den värmelagrande väggens funktion och dess termiska förhållande kommer också att redovisas genom ett diagram för varje period. I dessa diagram kommer tre temperaturnoder redovisas, nod 2 som ligger närmast väggens inre yta, nod 5 som ligger i mitten av väggen samt nod 9 som ligger nära väggens utsida. För att ge en inblick i väggens temperatur i förhållande till dess omgivningen och på så sätt ge en uppfattning om väggens värmande effekter redovisas också utomhustemperaturen i dessa diagram.

⁵⁹ Abel, Enno & Elmroth, Arne, Byggnaden som system, Formas, Stockholm, 2006 s. 33-34

4.1 Vinter

Tabell 1. Temperaturer i växthusmodellen med värmelagravdevägg under vintern.

	Max	Min	Medel
$T_{ytamedel}$	4,6	-0,8	1,2
T_{luft}	4,6	-0,6	1,3
$T_{operativ}$	4,7	-0,5	1,3

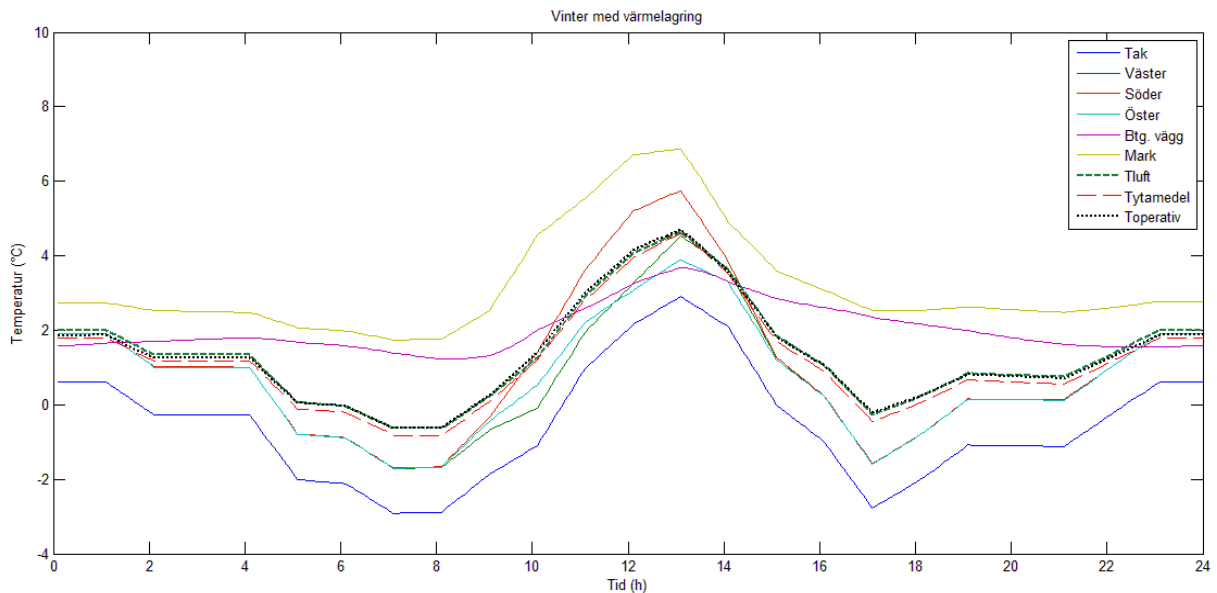


Diagram 6. Temperaturer i växthusmodellen med värmelagravdevägg under vintern.

Tabell 2. Temperaturer i växthusmodellen utan värmelagravdevägg under vintern.

	Max	Min	Medel
$T_{ytamedel}$	6,9	-1,8	1,4
T_{luft}	5,4	-1,1	1,3
$T_{operativ}$	5,9	-1,2	1,4

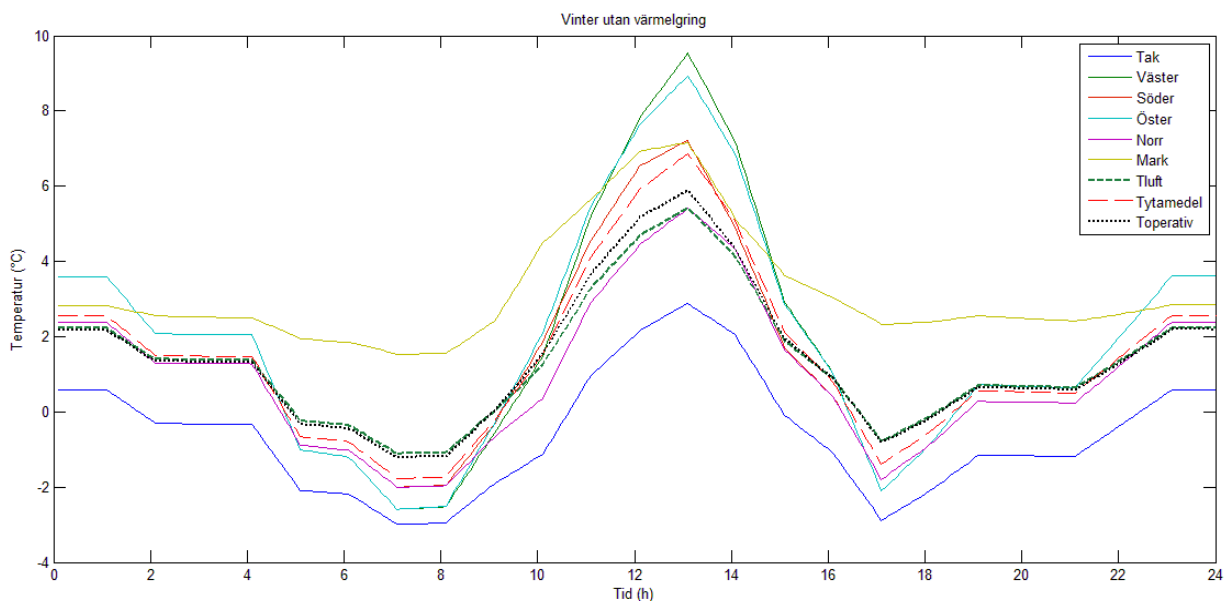


Diagram 7. Temperaturer i växthusmodellen utan värmelagravdevägg under vintern.

4.2 Vår/höst

Tabell 3. Temperaturer i växthusmodellen med värmelagravdevägg under vår/höst.

	Max	Min	Medel
$T_{ytamedel}$	21,2	7,1	13,5
T_{luft}	21,8	7,5	14,0
$T_{operativ}$	22,3	7,8	14,3

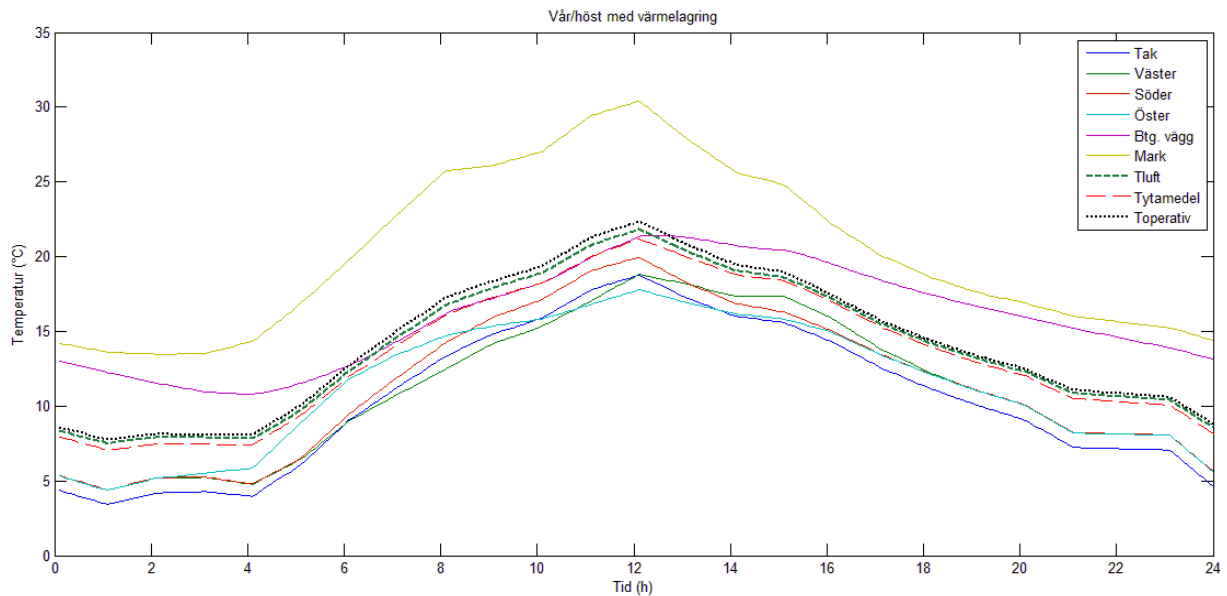


Diagram 8. Temperaturer i växthusmodellen med värmelagravdevägg under vår/höst.

Tabell 4. Temperaturer i växthusmodellen utan värmelagravdevägg under vår/höst.

	Max	Min	Medel
$T_{ytamedel}$	33,3	9,5	20,2
T_{luft}	26,7	8,2	16,5
$T_{operativ}$	29,2	9,1	18,0

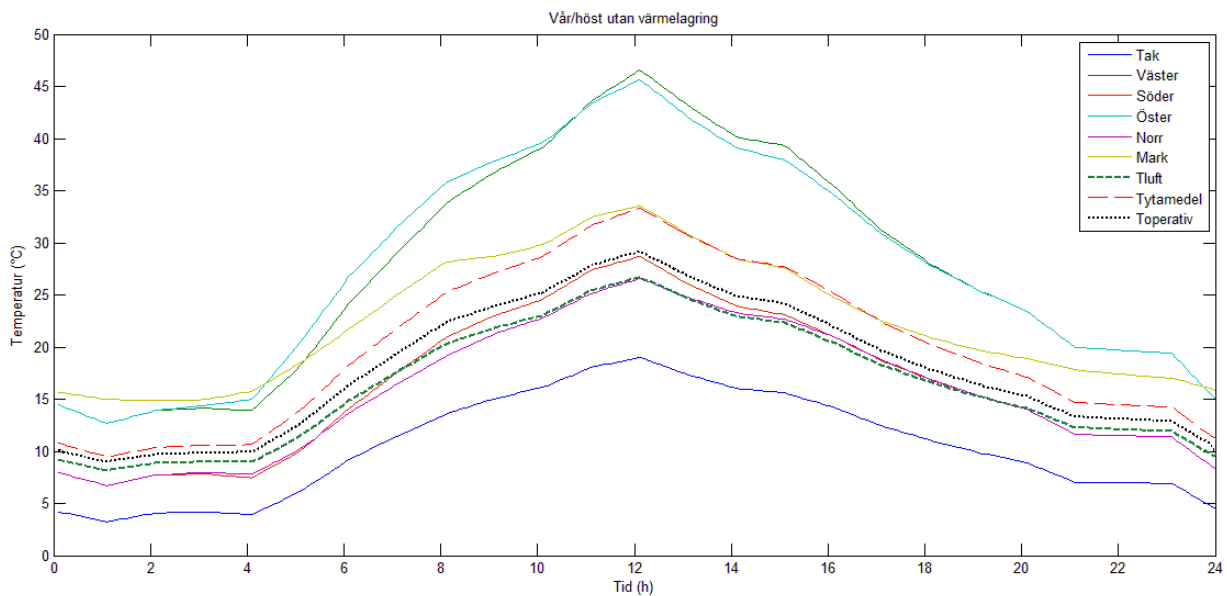


Diagram 9. Temperaturer i växthusmodellen utan värmelagravdevägg under vår/höst.

4.3 Sommar

Tabell 5. Temperaturer i växthusmodellen med värmelagravdevägg under sommaren.

	Max	Min	Medel
$T_{ytamedel}$	25,2	13,5	18,0
T_{luft}	26,0	13,7	18,3
$T_{operativ}$	26,5	13,8	18,6

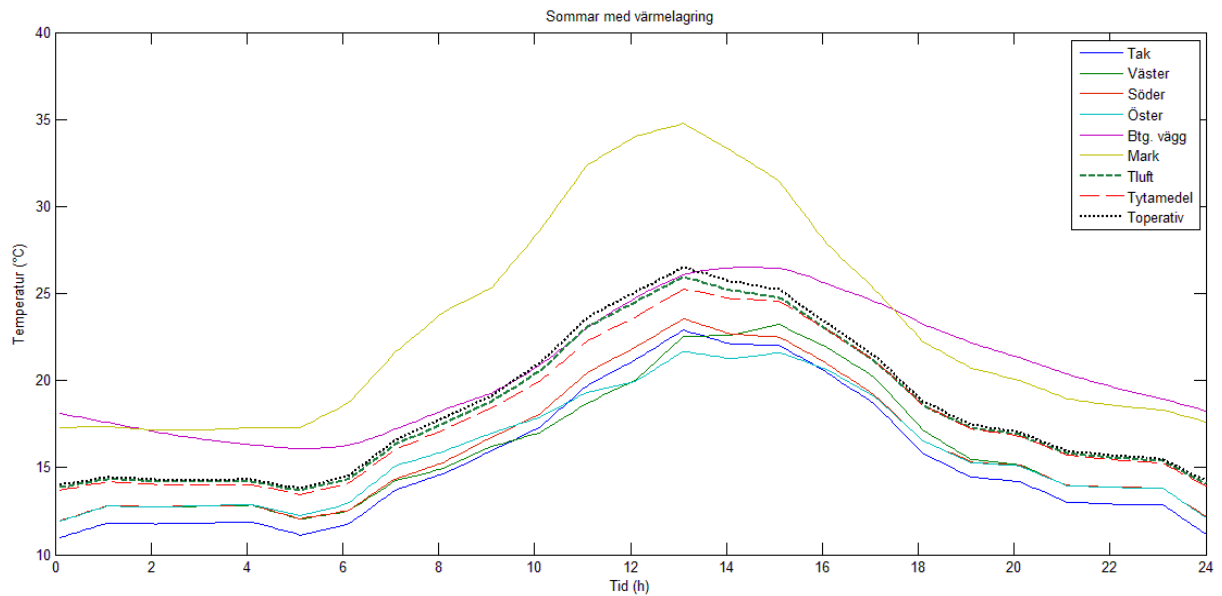


Diagram 10. Temperaturer i växthusmodellen med värmelagravdevägg under sommaren.

Tabell 6. Temperaturer i växthusmodellen utan värmelagravdevägg under sommaren.

	Max	Min	Medel
$T_{ytamedel}$	38,3	19,7	26,6
T_{luft}	31,0	16,3	21,8
$T_{operativ}$	33,7	17,0	23,5

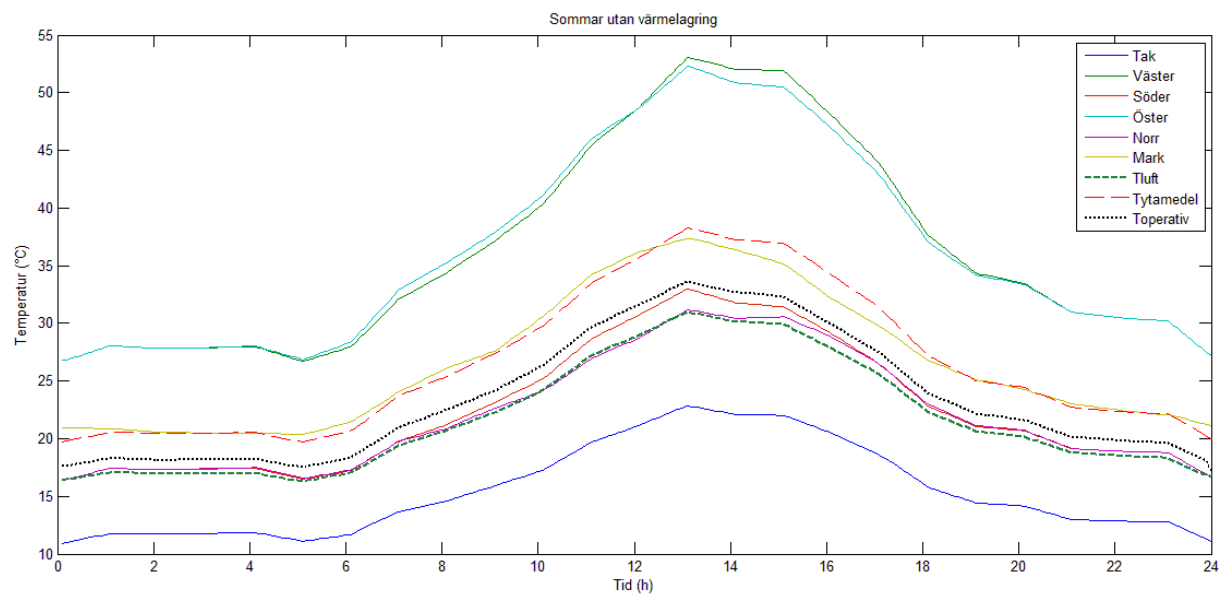


Diagram 11. Temperaturer i växthusmodellen utan värmelagravdevägg under sommaren.

4.4 Temperatur i väggen

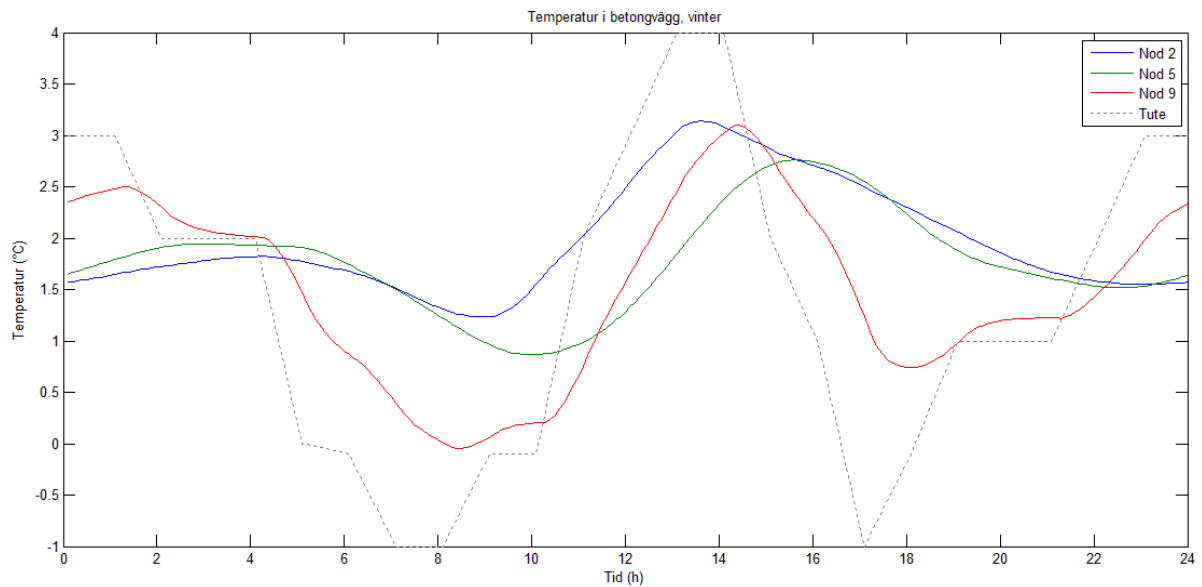


Diagram 12. Temperaturlinor i den värmelagrande väggen under vintern. Nod 2 ligger närmast väggens insida, nod 5 ligger mitt i väggen och nod 9 närmast väggens utsida.

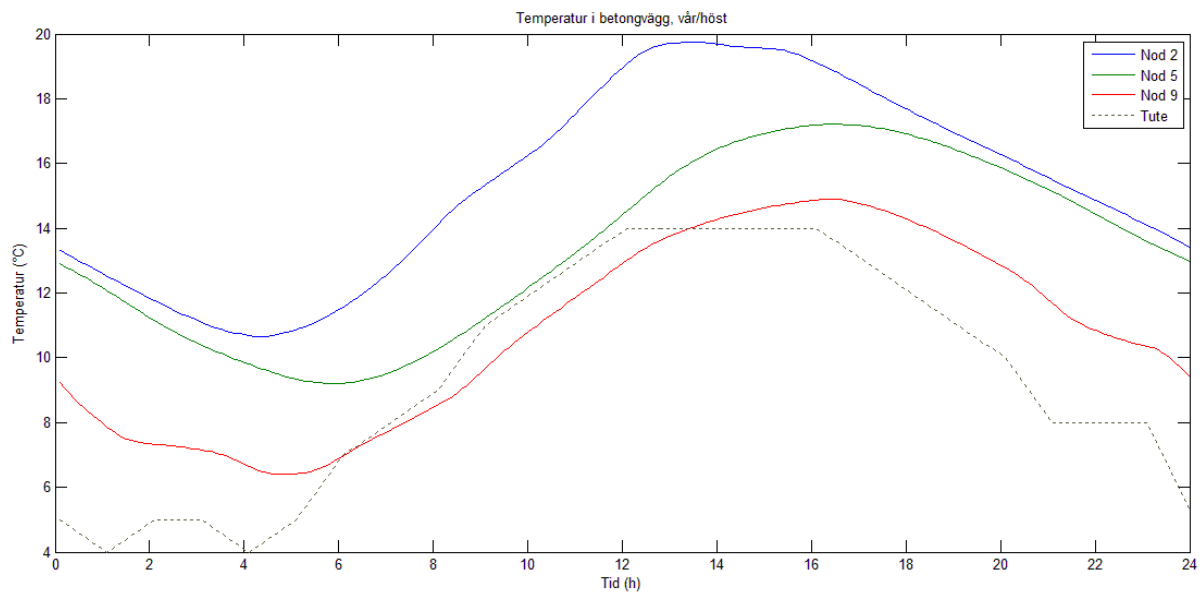


Diagram 13. Temperaturlinor i den värmelagrande väggen under vår/höst. Nod 2 ligger närmast väggens insida, nod 5 ligger mitt i väggen och nod 9 närmast väggens utsida.

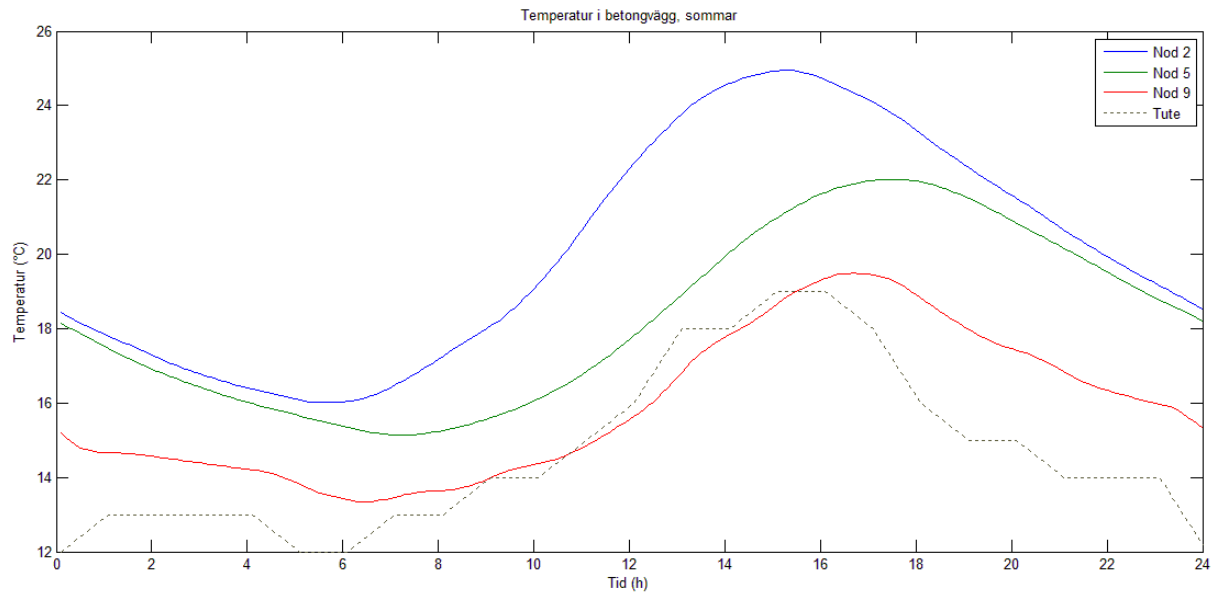


Diagram 14. Temperaturer i den värmelagrande väggen under sommar. Nod 2 ligger närmast väggens insida, nod 5 ligger mitt i väggen och nod 9 närmast väggens utsida.

5 Diskussion

Diagrammen i kapitel 4 visar att växthusets tröghet tydligt påverkas av införandet av en betongvägg. Väggen minskar temperatursvängningarna och fördröjer effekterna av omgivningens termiska påverkan på växthuset. Detta visar att modellen som byggts upp för att simulera växthusets klimat ger en pålitlig bild av dess termiska förhållanden under olika perioder och i olika utföranden.

Temperaturerna som redovisas är bara riktvärden och kan inte ses som representativa temperaturer för ett verkligt växthus. Även om de materialegenskaper och klimatdata som används i modellen motsvarar verkliga förhållanden finns det faktorer i modellen som ger värdena vissa avvikelser från verkligheten. Det är framförallt fuktens och växternas inverkan på växthusets termiska klimat som borde göra att modellen avviker från verkligheten. Fukt och vatten bidrar med att sänka temperaturen då mycket av värmen går åt till att förångning av vattnet.⁶⁰ Även växterna i ett växthus borde bidra till att sänka temperaturen eftersom de genom fotosyntes omvandlar solstrålning till kemiskt bunden energi,⁶¹ till skillnad från växthusets övriga ytor som omvandlar solstrålningen till värme. Detta bör sannolikt sänka växthusets temperaturer och framförallt borde marktemperaturen sjunka eftersom jord har en hög fuktighet och i ett växthus skuggas större delen av marken av växter. Förutom de faktorer som valts att bortse ifrån medför beräkningarna i modellen en viss felmarginal. Ett sådant exempel är att stjärnkopplingen som ligger till grund för strålningsmodellen medför en viss felmarginal vars storlek beror på rumsytornas storlek och förhållande till varandra.⁶² Dock är dessa felmarginaler relativt små. Temperaturerna kan ses som riktvärden för att visa hur en värmelagrande vägg påverkar temperaturen i växthuset.

Den upplevda temperaturen beror på luften och omgivande ytors temperaturer och det bör därför inte läggas för stor vikt vid enskilda ytors temperatur.⁶³

Utifrån klimatdatavärden i kapitel 3.2.4.1 kan slutsatsen dras att en värmelagrande vägg lämpligast placeras på växthusets nordliga sida. Dels för att inte skugga växterna i växthuset men också för att denna sida, förutom marken, är den sida som utsätts för minst strålning. Att placera väggen på den sida som utsätts för minst strålning innebär att den mesta strålningen transmitteras in i växthuset och därför också träffar den värmelagrande väggens sida som är inne i växthuset.

Diagrammen visar tydligt att de termiska förhållandena i ett växthus med en betongvägg skiljer sig från ett växthus som består av endast glasväggar. Betongväggen bidrar med att minska växthusets temperaturskiftningar vilket främst sker genom att minska temperaturoppgångarna hos växthusets ytor och således också hos luften i växthuset. Väggen bidrar också med att fördröja växthusets uppvärmning och förskjuter på så sätt temperatur toppen.

Hos växthuset utan betongvägg är temperaturen som störst då solstrålningen är som intensivast, omkring kl. 12.00, för att sedan avta och vara som lägst under natten eller tidig morgon. Då en betongvägg införs i växthuset blir temperaturens topp lägre och förskjuten med 2 till 4 timmar, ju

⁶⁰ Hagentoft, Carl-Eric, *Vandrande fukt, strålande värme: så fungerar hus*, Studentlitteratur, Lund, 2003 s. 57

⁶¹ Åström, Kenneth, Engström, Christer & Marklund, Kari (red.), *Nationalencyklopedin: ett uppslagsverk på vetenskaplig grund utarbetat på initiativ av Statens kulturråd*. Bd 6, [Eu-Fredk], Bra böcker, Höganäs, 1991

⁶² Davies, Morris Grenfell., *Building heat transfer*, J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004 s. 132-134

⁶³ Hagentoft, Carl-Eric, *Vandrande fukt, strålande värme: så fungerar hus*, Studentlitteratur, Lund, 2003 s. 58

mer värme som tillförs växthuset desto större blir förskjutningen. Växthusets lägsta temperatur inträffar på morgonen då solstrålningen varit frånvarande som längst. Detta är en tendens som tyder på att väggen och markens värmande inverkan på växthuset kan minska växthusets uppvärmningsbehov.

Då växthuset inte har någon värmelagrande vägg får den östra och västra väggen högst yttemperatur. Detta beror troligtvis på hur den långvågiga strålningen utväxlas i växthuset. Då en värmelagrande vägg införs i växthuset får marken störst yttemperatur. Detta kommer sig troligtvis av att marken i modellen har betydligt lägre densitet och lite lägre specifik värmekapacitet än väggen. Detta gör att markens tröghet blir lägre än väggens och temperaturskiftningar i marken blir större och påverkas lättare av omgivningens temperatur. Markens storlek i förhållande till väggens kan också ha en viss inverkan på temperaturen.

Undersöks temperaturerna så ligger alla temperaturer hos växthuset med värmelagrande vägg under växthuset utan värmelagring utom på vintern då samtliga lägsta temperaturer är högre. Hos växthuset med värmelagrande vägg är yttemperaturen hos väggen och marken högre än de övriga temperaturerna då solstrålningen avtar. Detta innebär att väggen och marken har en värmande effekt på växthuset under dessa perioder. Detta kan jämföras med två stora radiatorer som införs i växthuset och vars effekt är beroende hur mycket värme som kunnat lagras under dagen.

I diagrammen som visar väggtemperaturerna syns tydligt väggens inverkan på växthusets tröghet då temperaturerna i väggen skiftar betydligt mindre än temperaturen hos växthusets glasade ytor. Även temperaturen i väggen skiftar beroende på hur långt från ytan den är. Temperaturen i mitten av väggen har mindre skiftningar och topparna och dalarna är tidsförskjutna i förhållande till temperaturerna närmare ytan.

5.1 Vinter

Diagrammen för vintern visar att temperaturen mitt på dagen blir lägre för växthuset med värmelagrande vägg men också att de lägsta temperaturerna blir högre med en värmelagrande vägg.

Om en värmelagrande vägg införs i modellen sänks maxvärdet hos $T_{ytamedel}$ med $2,3^{\circ}\text{C}$ men minimivärdet höjs med $1,0^{\circ}\text{C}$ och medelvärdet sänks med $0,2^{\circ}\text{C}$. Hos lufttemperaturen sänks maxvärdet med $0,8^{\circ}\text{C}$ medan minimivärdet höjs med $0,5^{\circ}\text{C}$ och medelvärdet förblir detsamma. Den operativa temperaturens maxvärde sänks med $1,2^{\circ}\text{C}$ medan minimivärdet höjs med $0,7^{\circ}\text{C}$ totalt sänks medelvärdet med $0,1^{\circ}\text{C}$.

Dessa värden visar på en tendens som är av intresse vid uppvärmning av växthuset eftersom den lägsta temperaturen höjs och således behöver inte lika mycket värme tillföras då detta inträffar. Diagrammet visar också att temperaturen hos den värmelagrande väggens yta är betydligt mer konstant än övriga ytors temperatur. Den skiftar bara med ca 2°C , mellan 2°C och 4°C .

I diagrammet för betongväggens temperatur under vintern kan utläsas att temperaturen ibland sjunker under utomhustemperaturen. Orsaken till detta borde vara att differensen mellan väggtemperaturen och utomhustemperaturen är så pass låg att en snabb temperaturskiftning hos utomhustemperaturen kan nå över väggens temperaturer.

5.2 Vår/höst

Under vår/höst perioden blir inverkan av en värmelagrande vägg tydligare än under vinter perioden. Detta kommer sig främst av att utomhustemperatur har en större variation och att solstrålningen ökar i intensitet men också i mängd då solen är uppe längre.

Om en värmelagrande vägg införs i modellen sänks maxvärdet hos $T_{ytamedel}$ med 12,1 °C och minimivärdet med 2,4 °C samt medelvärdet med 6,7 °C. Hos lufttemperaturen sänks max värdet med 4,9 °C och minimivärdet med 0,7 °C samt medelvärdet med 2,5 °C. Den operativa temperaturens maxvärde sänks med 6,9 °C och minimivärdet med 1,3 °C och totalt sänks medelvärdet med 3,7 °C.

I diagrammet för betongväggens temperatur kan utläsas att temperaturen i mitten av väggen aldrig når under 10°C och således aldrig går under utomhustemperaturen. Temperaturen närmast insidan av väggen når aldrig ner under 11°C och är som högst ca 20°C.

5.3 Sommar

Under sommar perioden blir inverkan av en värmelagrande vägg väldigt tydlig. Temperatur svängningarna hos ett växthus är väldigt stora under denna period då solstrålningen är intensivare och större än övriga perioder. Betongväggens påverkan på växthusets tröghet blir då uppenbar. Detta blir tydligt i växthuset utan betongvägg där vissa ytor kan uppnå väldigt höga temperaturer medan växthuset med betong vägg har mer samlade temperaturkurvor.

Om en värmelagrande vägg införs i modellen sänks maxvärdet hos $T_{ytamedel}$ med 13,1 °C och minimivärdet med 6,2 °C samt medelvärdet med 8,6 °C. Hos lufttemperaturen sänks max värdet med 5,0 °C och minimivärdet med 2,6 °C samt medelvärdet med 3,5 °C. Den operativa temperaturens maxvärde sänks med 7,2 °C och minimivärdet med 3,2 °C och totalt sänks medelvärdet med 4,9 °C.

Värdena ovan visar att de olika växthusens temperaturer närmar sig varandra under sommar perioden. Framförallt blir skillnaden mellan medelvärdena betydligt mindre än hos övriga perioder. Detta har sin grund i att värmeförlusten ökar markant under sommaren. Men ytorna hos växthuset utan värmelagrande vägg kan under sommaren nå mycket högre än temperaturer i växthuset med värmelagrande vägg.

Diagrammet som visar betongväggens temperatur under sommaren visar att temperaturen från mitten av väggen och inåt aldrig underskrider utomhustemperaturen. Temperaturen i mitten av väggen pendlar mellan 16 och 22 °C och temperaturen närmast insidan av växthuset pendlar mellan 17 och 25 °C. Eftersom ett växthus sällan behöver värmas under sommaren är det istället intressant att notera väggens låga temperatur i förhållande till yttemperaturerna hos växthuset utan betongvägg. Detta visar att betongväggen bidrar med att hålla nere temperaturen hos växthuset under sommarperioden.

6 Slutsatser

Modellen som byggts upp för att simulera växthusets termiska klimat bekräftar den inverkan som en värmelagrande vägg kan tänkas ha på ett växthus.

Det termiska klimatet i ett växthus visar sig vara väldigt beroende av yttre faktorer så som solstrålning och utomhustemperatur. Temperaturskiftningarna hos växthusets ytor kan bli väldigt stora under ett dygn vilket också bidrar till att ge lufttemperaturen i växthuset stora variationer. Det framgår tydligt i simuleringarna att solstrålningen har en väldigt stor inverkan på ytornas temperatur och den enda ytan som bidrar till att dämpa temperatursvängningarna något är marken i växthuset.

De höga temperaturerna som uppstår då solstrålningen är som intensivast ger goda förutsättningar för värmelagring och de låga temperaturerna som uppstår då solstrålningen avtagit gör värmen som värmelagret kan tillföra välkommet.

Införandet av en betongvägg har en tydlig påverkan på ett växthus termiska klimat. Med en betongvägg ökar växthusets tröghet vilket innebär att temperaturerna sänks och dess stora svängningar minskar. Under vintern då temperaturen är låg och solstrålningen liten bidrar väggen med att höja lägsta nivån på temperaturerna medan den under övriga perioder sänker både växthusets högsta och lägsta temperatur. Detta resultat visar på att det under kallare delar av året borde gå att spara energi genom att införa en värmelagrande vägg i växthuset eftersom temperaturen då inte behöver höjas lika mycket under dygnets kallare timmar. Under årets varmare perioder visar simuleringarna att temperatursvängningarna hos framförallt lufttemperaturen kan minskas markant. Utan betongvägg skiftar lufttemperaturen med sommarperiodens klimatdata 14,7°C, från 16,3°C till 31,0°C, och med betongvägg är skiftningarna bara 12,3°C, från 13,7°C till 26,0°C. En betongvägg borde därför bidra till ett betydligt behagligare klimat för såväl människor som växter. En tendens som kan utläsas är att ju mer strålning växthuset utsätts för desto mer skiljer sig temperatursvängningarna i växthuset med betongvägg från det utan. En dag med intensiv strålning ger betongväggen en tydligare inverkan på växthusklimatet genom att sänka temperaturerna i växthuset.

Väggens temperaturförhållanden visar tydligt vilken inverkan betongväggen har på växthusets tröghet. De olika kurvorna för temperaturnoderna visar också på vilken inverkan väggens tjocklek har på växthuset. Eftersom temperaturen i mitten av väggen skiftar mindre och långsammare än temperaturerna närmare ytan kommer en tjockare vägg bidra till en ökad tröghet hos växthuset och minska utomhustemperaturens inverkan på väggens insida.

Genom att jämföra markens och väggens temperaturer och skiftningar kan också vissa slutsatser dras om materialets inverkan på växthusets tröghet och den värmelagrande förmågan hos väggen. Eftersom densiteten är betydligt lägre blir dess värmekapacitet också lägre och det krävs inte lika stor mängd energi för att höja dess temperatur. Marken blir då mer känslig för omgivningens temperaturskiftningar och skiftningarna i marken blir större och sker snabbare än hos betongväggen. Dock bör det noteras att modellen inte tagit hänsyn till markens fuktinnehåll vilket borde sänka dess temperatur markant.

En värmelagrande betongvägg kan således antas ha en positiv inverkan på ett växthus termiska klimat och under vissa kallare perioder också bidra med att minska uppvärmningsbehovet.

7 Referenser

Litteratur

Abel, Enno & Elmroth, Arne, *Byggnaden som system*, Formas, Stockholm, 2006

Areskoug, Mats & Eliasson, Per, *Energi för hållbar utveckling: ett historiskt och naturvetenskapligt perspektiv*, 1. uppl., Studentlitteratur, Lund, 2007

Bring, A, *Versatile System Simulation with the BRIS Program. Proceedings of the Fourth Symposium on the Use of Computers for Environment Engineering Related to Buildings*. Ed: Kenchiku Kaikan, Tokyo, Japan, 1983

Burström, Per Gunnar, *Byggnadsmaterial: uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, 2. uppl., Studentlitteratur, Lund, 2007

Carlson, Per-Olof, *Bygga med glas*, Glasbranschföreningen, Stockholm, 2005

Davies, Morris Grenfell., *Building heat transfer*, J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004

Hagentoft, Carl-Eric, *Vandrande fukt, strålände värme: så fungerar hus*, Studentlitteratur, Lund, 2003

Hagentoft, Carl-Eric, *Introduction to building physics*, Studentlitteratur, Lund, 2001

Holman, Jack Philip, *Heat transfer*, 7. ed., McGraw-Hill, New York, 1990

Nilsson, Örjan & Österlund, Michael, *Dynamisk simulering i fysik och teknik*, Studentlitteratur, Lund, 2003

Samuelsson, Lars-Eric & Schenkmanis, Ulf, *Växthus och drivbänkar*, 3., något rev. uppl., Ica, Västerås, 2004

Sandin, Kenneth, *Praktisk byggnadsfysik*, KFS, Lund, 2007

White, Mary Anne, *Properties of materials*, Oxford University Press, New York, 1999

Åström, Kenneth, Engström, Christer & Marklund, Kari (red.), *Nationalencyklopedin: ett uppslagsverk på vetenskaplig grund utarbetat på initiativ av Statens kulturråd. Bd 6, [Eu-Fredk]*, Bra böcker, Höganäs, 1991

Rapporter och artiklar

Akander, Jan, *Värmetröghetens inverkan på energibehovet: studier på ett småhus*, Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm, 1999

Akander, Jan, *The ORC method: effective modelling of thermal performance of multilayer building components*, Diss. (sammanfattning) Stockholm : Tekn. högsk., Stockholm, 2000

Andreasson, Ingmar, Wigström, Peter & Magnusson, Göran, *Korttidslagring av energi i stenbädd för växthus i kombination med yttre solfångare: Short-term storage of energy in rock bed for greenhouses in combination with external solar collector*, Lund, 1984

Davies, Morris Grenfell, Optimal designs for star circuits for radiant exchange in a room, Building and Environment, Volume 18, Issue 3, pages 135-150, 1983

Lantz, Mikael, Larsson, Gunnel & Hansson, Torbjörn, Förutsättningar för förnybar energi i svenska växthusodlingar, Rapport nr 57, Lunds Tekn. högstsk., Lund 2006

Wei, Chen & Wei, Liu, Numerical and experimental analysis of convection heat transfer in passive solar heating room with greenhouse and heat storage, Solar Energy, Volume 76, Issue 5, Pages 623-633, 2004

Internet

<http://www.ssolar.com/Solenergi2010/EnergifaktaDEL1brSolenFramtidensbasenergi/Solinstr%C3%A5ning/tabid/608/Default.aspx> 2010-05-20

<http://www.bygg.org/miljofragor.asp> 2010-05-23

<http://www.nyteknik.se/nyheter/bygg/byggartiklar/article780517.ece> 2010-05-23

<http://www.wij.se/default.asp?HeadPage=349&SubPage=181&Language=sv> 2010-05-23

Bilder

Figur 1. Strålnings våglängder och glasets genomsläpplighet för dessa. Carlson, Per-Olof, Bygga med glas, Glasbranschföreningen, Stockholm, 2005

Figur 2.

<http://www.ssolar.com/Solenergi2010/EnergifaktaDEL1brSolenFramtidensbasenergi/Solinstr%C3%A5ning/tabid/608/Default.aspx> 2010-05-20

Figur 3.

http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Utbildning/ABK100/F8_PM_f_nstefysik.pdf 2010-05-20

Figur 4. Carlson, Per-Olof, Bygga med glas, Glasbranschföreningen, Stockholm, 2005

Figur 5. Abel, Enno & Elmroth, Arne, Byggnaden som system, Formas, Stockholm, 2006

Figur 6. Davies, Morris Grenfell, Optimal designs for star circuits for radiant exchange in a room, Building and Environment, Volume 18, Issue 3, pages 135-150, 1983

Figur 7. Akander, Jan, The ORC method: effective modelling of thermal performance of multilayer building components, Diss. (sammanfattning) Stockholm : Tekn. högstsk., Stockholm, 2000

Figur 8. Egen bild.

8 Bilagor

Bilaga 1. Källkod till växthusmodellen.

```
B=zeros (6, 6);
R= zeros (6, 1);
Tyta = zeros(6, tidssteg);
Tluft = zeros (14, tidssteg);
Lwall = zeros (11, tidssteg);
Lfloor = zeros (11, tidssteg);
Idiff = zeros (1, tidssteg);
Toperativ = zeros (1, tidssteg);
Tytamedel = zeros (1, tidssteg);

%konstanter

boltz = 5.67e-8 %Stefan Boltzmans konstant W/m2*K^4

%Växthusets dimensioner
b=7; %b är placerad på rummets Ö och V sida
l=18; %b är placerad på rummets N och S sida
h=3;

A = [b*1, b*h, l*h, b*h, l*h, b*1] %[Tak, V, S, Ö, N, Golv]

e = [0.83, 0.83, 0.83, 0.83, 0.83, 0.83] %emittans och transmittans

a = [0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1] %absorptans

R = [0.0051, 0.0457, 0.0165, 0.0457, 0.0165, 0.0051]

noms=2 % n=oms/h
V=b*h*l %V=m3
rholuft=1.2 %kg/m3
M=rholuft*noms*V/3600 %M=n*V/3600 [kg/s]

Cpluft = 1010 %Cpluft [Ws/kg*K] för luft, tempberoende (1250 vid 10C)!

for h= 1: tidssteg
Idiff (h) = Isol(h, 1)*A(1)*e(1)+Isol(h, 2)*A(2)*e(2)+Isol(h,
3)*A(3)*e(3)+...
Isol(h, 4)*A(4)*e(4);
end

%värden hos lagringsmedierna

Ltotfloor= 1.5 %golvets djup
Ltotwall= 0.3 %Väggens djup
lambdafloor = 1.3 %golvets värmekonduktivitet
lambdawall = 1.7 %väggens värmekonduktivitet
dxfloor = Ltotfloor/10 %cellernas längd, varje dx ger en
lagringspunkt (X dx = X lagringspunkter)
dxwall = Ltotwall/10 %antalet temperaturpunkter är alltid två
%fler än lagringspunkterna (X dx + 1(Ts) +

l(Tb) = 2+X)
rhofloor = 1460 %golvmaterialets densitet
rhowall = 2200 %väggmaterialets densitet
```

```

Cpfloor = 880 %golvmaterialets specifika värmekapacitet
Cpwall = 840 %väggmaterialets specifika värmekapacitet

kfloor = lambdafloor/(dxfloor^2*rhofloor*Cpfloor) %konstant för golv
kwall = lambdawall/(dxwall^2*rhowall*Cpwall) %konstant för vägg

tstabw= ((3/2)*(dxwall^2)*(rhowall*Cpwall)/lambdawall)*1/3600
tstabf= ((3/2)*(dxfloor^2)*(rhofloor*Cpfloor)/lambdafloor)*1/3600

%klimatdata
vind=3.1

%konstanta motstånd (W/m2*K)

alfalg= (lambdafloor/(dxfloor/2)) %golv

alfalv= (lambdawall/(dxwall/2)) %vägg

alfacelo= 5+4.5*vind-0.14*vind^2 %lovart u<10m/s
alfacela= 5+1.5*vind %läsida u<8m/s
alface= (alfacelo+alfacela)/2 %medelvärde.

for p=1:6
Tyta (p, 1) = 0; %Initialtemperaturer för ytorna
end

Tmedel = ((Tyta(1, 1)+273.14)*A(1)+(Tyta(2, 1)+273.14)*A(2)+(Tyta(3,
1)+273.14)*A(3)+...
(Tyta(4, 1)+273.14)*A(4)+(Tyta(5, 1)+273.14)*A(5)+(Tyta(6,
1)+273.14)*A(6))...
/(A(1)+A(2)+A(3)+A(4)+A(5)+A(6))

for dygn=1:14
for h =1:tidssteg

hr=4*boltz*(Tmedel)^3; %W/m2*K

for p = 1:6

%varierande motstånd (W/m2*K)

alfari(p)= ((hr)/(R(p)*A(p)+((1/e(p))-1)));

if h==1
if dygn == 1
alfaci(p)= 2* abs(Tluft(dygn, h)- Tyta(p, h))^(1/4);

alfak (p)= 2* abs(Tluft(dygn, h)- 20)^(1/4);

alfare(p)= ((0.5*(4*boltz*e(p))*((273.14+Tsky(h)+273.14+Tyta(p,
h))/2)^3)...
+0.5*(4*boltz*e(p))*((273.14+Tute(h)+273.14+Tyta(p, h))/2)^3));
else

alfaci(p)= 2* abs(Tluft(dygn-1, tidssteg)- Tyta(p, tidssteg))^(1/4);
%alfaci anger laminär luftströmning

```



```

alfak (p)= 2* abs(Tluft(dygn-1, tidssteg)- 20)^(1/4);

alfare(p)=((0.5*(4*boltz*e(p)*((273.14+Tsky(p, h)+273.14+Tyta(p,
h+(tidssteg-1)))/2)^3)...
+0.5*(4*boltz*e(p)*((273.14+Tute(h)+273.14+Tyta(p, h+(tidssteg-
1)))/2)^3)));
end
else

alfaci(p)= 2* abs(Tluft(dygn, h-1)- Tyta(p, h-1))^(1/4);

alfak (p)= 2* abs(Tluft(dygn, h-1)- 20)^(1/4);

alfare(p)= ((0.5*(4*boltz*e(p)*((273.14+Tsky(p, h)+273.14+Tyta(p, h-
1))/2)^3)...
+0.5*(4*boltz*e(p)*((273.14+Tute(h)+273.14+Tyta(p, h-
1))/2)^3)));
end
end

konst1= (alfaci(1)*A(1))+(alfaci(2)*A(2))+(alfaci(3)*A(3))+ ...
(alfaci(4)*A(4))+(alfaci(5)*A(5))+(alfaci(6)*A(6))+
M*Cpluft;
konst2= (alfari(1)*A(1)+alfari(2)*A(2)+alfari(3)*A(3)+ ...
alfari(4)*A(4)+alfari(5)*A(5)+alfari(6)*A(6));
for p=1:6
if p>4
konst3(p)= [A(p)*(alfari(p)+alfaci(p))];
else
konst3(p)= [A(p)*(alfari(p)+alfare(p)+alfaci(p)+alface)];
end
end

%Yta 5 och 6 som påverkas av den transmitterade strålningen

K (5, 1) = (Idiff(h))*(A(5)/sum (A))*e(5)+ (Lwall(2,
h))*alfalv*A(5)...
+(Tute(h)*alfaci(5)*A(5)*M*Cpluft)/konst1;

K (6, 1) = (Idiff(h))*(A(6)/sum (A))*e(6)+ Lfloor(2,
h)*alfalg*A(6)...
+(Tute(h)*alfaci(6)*A(6)*M*Cpluft)/konst1;

for n=1:4
%Yta 1-4 som påverkas av den absorberade strålningen

K (n, 1) = Isol(h, n)*a(n)*A(n)+((Idiff(h)-((Idiff(h))*(A(5)/sum
(A))*e(5)+(Idiff(h))*(A(6)/sum (A))*a(6)))*...
(A(n)/(A(1)+A(2)+A(3)+A(4)))*e(n))+ Tute(h)*alface*A(n)...
+alfare(n)*A(n)*Tsky(n, h)+(Tute(h)*alfaci(n)*A(n)*M*Cpluft)/konst1;
end

for n=1:4
for p=1:6

B (n, p) = -((alfaci(n)*A(n))/konst1)*(alfaci(p)*A(p)) -
(((alfari(n)*A(n))/konst2))...

```

```

        *(alfari(p)*A(p));
    end

B (n, n) = konst3(n) - (((alfaci(n)*A(n))^2)/konst1) -
(((alfari(n)*A(n))^2)/konst2);
end

for n=5
    for p=1:6

        B (n, p) = -((alfaci(n)*A(n))/konst1)*(alfaci(p)*A(p)) -
        (((alfari(n)*A(n))/konst2))...
        *(alfari(p)*A(p));
    end

B (n, n) = (alfalv+alfari(5)+alfaci(5))*A(5) -
(((alfaci(n)*A(n))^2)/konst1) - (((alfari(n)*A(n))^2)/konst2);
end

for n=6
    for p=1:6

        B (n, p) = -((alfaci(n)*A(n))/konst1)*(alfaci(p)*A(p)) -
        (((alfari(n)*A(n))/konst2))...
        *(alfari(p)*A(p));
    end

end

B (n, n) = (alfalg+alfari(6)+alfaci(6))*A(6) -
(((alfaci(n)*A(n))^2)/konst1) - (((alfari(n)*A(n))^2)/konst2);
end

B2=inv(B);

for p=1:6

Tyta(p, h)= B2(p, 1:6)*K;
end

Tluft (dygn, h)=((alfaci(1)*A(1)*Tyta(1,h))+ (alfaci(2)*A(2)*Tyta(2,h))+...
(alfaci(3)*A(3)*Tyta(3,h))+ (alfaci(4)*A(4)*Tyta(4,h))+...
(alfaci(5)*A(5)*Tyta(5,h))+ (alfaci(6)*A(6)*Tyta(6,h))+...
Tute(h)*M*Cpluft)/konst1;

Tytamedel(1, h)=(Tyta(1, h)*A(1)+Tyta(2, h)*A(2)+Tyta(3, h)*A(3)+...
Tyta(4, h)*A(4)+Tyta(5, h)*A(5)+Tyta(6, h)*A(6))/(sum (A));
Toperativ (1, h)= (Tytamedel(h)+Tluft(dygn, h))/(2);

%Lagring av värme
%Lagring i vägg (Lwall)

%Tb temperatur på väggens baksida alltså utetemperaturen

Lwall(1, h)=Tyta(5, h);
Lwall(11, h)= Tute(h);

    if h==tidssteg                                %vid t=24 lagras värmen i t=1 (dvs. som
1:a timmen dagen efter)

```

```

for p = 1:9;
    if p==1
        Lwall(p+1,h-(tidssteg-1))= Lwall (p+1,h)+
3600*24/(tidssteg)*kwall*(2*(Lwall(p,h))+Lwall(p+2,h)-3*Lwall(p+1,h));
                                %ger väggens första lagringspunkt
                                %Lwall(p,t)anropar väggens framsida (Ts)
    end
    if p==10
        Lwall(p+1,h-(tidssteg-1))= Lwall (p+1,h)+
3600*24/(tidssteg)*kwall*(Lwall(p,h)+2*(T(p+2,h))-3*Lwall(p+1,h));
                                %ger väggens sista lagringspunkt
                                %Lwall(p+2,t)anropar väggens baksida (Te)
    end
    Lwall(p+1,h-(tidssteg-1))= Lwall(p+1,h)+
3600*24/(tidssteg)*kwall*(Lwall(p,h)-2*(Lwall(p+1,h))+Lwall(p+2,h));
    end
    else
    for p = 1:9;
        if p==1
            Lwall(p+1,h+1)= Lwall(p+1,h)+
3600*24/(tidssteg)*kwall*(2*(Lwall(p,h))+Lwall(p+2,h)-3*Lwall(p+1,h));
                                %ger väggens första lagringspunkt
                                %T(p,t)anropar väggens framsida (Ts)
        end
        if p==9
            Lwall(p+1,h+1)= Lwall(p+1,h)+
3600*24/(tidssteg)*kwall*(Lwall(p,h)+2*(Lwall(p+2,h))-3*Lwall(p+1,h));
                                %ger väggens sista lagringspunkt
                                %T(p+2,t)anropar väggens baksida (Tb)
        end
        Lwall(p+1,h+1)= Lwall(p+1,h)+ 3600*24/(tidssteg)*kwall*(Lwall(p,h)-
2*(Lwall(p+1,h))+Lwall(p+2,h));
    end
    end
end

%värmens vandrar inte ut i första punkten (Ts)
%q=(lambdawall/(dxwall*2))*(Tyta5(1, h)-Lwall(2, h));
%if q > 0
%    Tyta5(1, h+1)=((q*dxwall)/lambdawall)- Lwall(2, h);
%end

%Lagring i golv (Lfloor)

Lfloor(1, h)=Tyta(6, h);
Lfloor(11, h)= 5;

    if h==tidssteg          %vid t=24 lagras värmen i t=1 (dvs. som 1:a timmen
dagen efter)
        for p = 1:9;
            if p==1
                Lflood(p+1,h-(tidssteg-1))= Lflood(p+1,h)+
3600*24/(tidssteg)*kflood*(2*(Lflood(p,h))+Lflood(p+2,h)-3*Lflood(p+1,h));
                                %ger väggens första lagringspunkt
                                %Lwall(p,t)anropar väggens framsida (Ts)
            end
            if p==10
                Lflood(p+1,h-(tidssteg-1))= Lflood(p+1,h)+
3600*24/(tidssteg)*kflood*(Lflood(p,h)+2*(T(p+2,h))-3*Lflood(p+1,h));
                                %ger väggens sista lagringspunkt
                                %Lwall(p+2,t)anropar väggens baksida (Te)
            end
        end
    end
end

```

```

    Lffloor(p+1,h-(tidssteg-1))=Lffloor(p+1,h)+
3600*24/(tidssteg)*kffloor*(Lffloor(p,h)-2*(Lffloor(p+1,h))+Lffloor(p+2,h));
    end
else
for p = 1:9;
    if p==1
        Lffloor(p+1,h+1)=Lffloor(p+1,h)+
3600*24/(tidssteg)*kffloor*(2*(Lffloor(p,h))+Lffloor(p+2,h)-3*Lffloor(p+1,h));
        %ger väggens första lagringspunkt
        %T(p,t)anropar väggens framsida (Ts)

        end
        if p==9
            Lffloor(p+1,h+1)=Lffloor(p+1,h)+
3600*24/(tidssteg)*kffloor*(Lffloor(p,h)+2*(Lffloor(p+2,h))-3*Lffloor(p+1,h));
            %ger väggens sista lagringspunkt
            %T(p+2,t)anropar väggens baksida (Tb)

            end
            Lffloor(p+1,h+1)= Lffloor(p+1,h)+
3600*24/(tidssteg)*kffloor*(Lffloor(p,h)-2*(Lffloor(p+1,h))+Lffloor(p+2,h));
            end

%värmens vandrar inte ut i första punkten (Ts)
% q=(lambda/(dx*2))*(T(1, h)-T(2, h));
%     if q > 0
%         Tyta5(1, h+1)=((q*dx)/lambda)- T(2, h);
%     end

Tmedel = ((Tyta(1, h)+274.14)*A(1)+(Tyta(2, h)+273.14)*A(2)+(Tyta(3,
h)+273.14)*A(3)+...
        (Tyta(4, h)+273.14)*A(4)+(Tyta(5, h)+273.14)*A(5)+(Tyta(6,
h)+273.14)*A(6))...
        /(A(1)+A(2)+A(3)+A(4)+A(5)+A(6));

end
end
end

```

Bilaga 2. Utetemperatur

Tid (h)	Vinter	Vår/höst	Sommar
1	3	5	12
2	3	4	13
3	2	5	13
4	2	5	13
5	2	4	13
6	0	5	12
7	0	7	12
8	-1	8	13
9	-1	9	13
10	0	11	14
11	0	12	14
12	2	13	15
13	3	14	16
14	4	14	18
15	4	14	18
16	2	14	19
17	1	14	19
18	-1	13	18
19	0	12	16
20	1	11	15
21	1	10	15
22	1	8	14
23	2	8	14
24	3	8	14

Bilaga 3. Diffus och direkt solstrålning vinter [W/m²]

Tid (h)	Tak	Väster	Söder	Öster	Norr	Golv
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	5	3	6	6	3	0
10	17	8	90	68	8	0
11	59	18	373	167	18	0
12	81	25	420	88	24	0
13	95	71	536	26	25	0
14	75	174	466	21	21	0
15	25	94	142	11	11	0
16	8	19	18	5	5	0
17	1	1	1	1	1	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
Totalt	364	413	2052	393	115	0

Bilaga 4. Diffus och direkt solstrålning vår/höst [W/m²]

Tid (h)	Tak	Väster	Söder	Öster	Norr	Golv
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	14	8	8	78	48	0
5	80	33	33	320	122	0
6	224	65	70	705	121	0
7	360	87	202	829	91	0
8	496	111	410	833	111	0
9	618	134	608	744	134	0
10	576	154	621	479	154	0
11	590	183	665	319	177	0
12	699	242	793	183	172	0
13	688	453	761	168	168	0
14	490	495	508	154	154	0
15	347	458	320	136	136	0
16	302	525	226	111	111	0
17	160	322	87	70	79	0
18	70	146	38	37	60	0
19	26	45	15	15	28	0
20	4	5	2	2	4	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
Totalt	5744	3466	5369	5185	1870	0

Bilaga 5. Diffus och direkt solstrålning sommar [W/m²]

Tid (h)	Tak	Väster	Söder	Öster	Norr	Golv
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	11	7	7	13	13	0
4	24	14	14	30	25	0
5	43	24	24	72	44	0
6	114	61	65	182	87	0
7	243	121	149	370	136	0
8	343	171	261	451	171	0
9	380	198	339	422	198	0
10	539	200	504	460	200	0
11	723	182	688	372	182	0
12	793	207	756	181	171	0
13	761	413	706	160	160	0
14	644	555	562	154	154	0
15	520	619	401	143	143	0
16	330	489	214	120	124	0
17	222	404	95	84	95	0
18	102	224	41	41	84	0
19	54	82	32	32	54	0
20	33	41	20	20	36	0
21	7	8	4	4	9	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
Totalt	5887	4020	4883	3310	2085	0