

CHALMERS



Massivträ som väggmaterial

- en jämförande studie av energiförbrukning och termisk komfort

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

LENA GOLLVIK

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Byggnadsfysik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2005
Examensarbete 2005:101

EXAMENSARBETE 2005:101

Massivträ som väggmaterial

- en jämförande studie av energiförbrukning och termisk komfort

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

LENA GOLLVIK

Institutionen för Bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Byggnadsfysik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2005

Massivträ som väggmaterial

- en jämförande studie av energiförbrukning och termisk komfort

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

LENA GOLLVIK

© LENA GOLLVIK, 2005

Examensarbete 2005:101

Institutionen för Bygg och miljöteknik

Avdelningen för Byggnadsteknologi

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Chalmers reproservice

Göteborg, 2005

Förord

Det här examensarbetet har utförts på avdelningen för Byggnadsteknologi, Byggnadsfysik vid Chalmers tekniska högskola.

Det ursprungliga initiativet till arbetet kommer från AB Fristad Bygg , som varit intresserade av de termiska egenskaperna hos massiva träelement.

Jag vill ge ett stort tack till Eva-Lotta Wentzel, som har varit min handledare, för stöd och hjälp under arbetets gång. Dessutom vill jag tacka Johan Claesson för flera givande teoretiska diskussioner om Dynamiska termiska nätverk.

Slutligen vill jag även tacka Angela Sasic Kaligasidis för sammanställning av soldata.

Göteborg, oktober 2005

Lena Gollvik

Massive Wood as Wall Material

A comparative study of energy consumption and thermal comfort

Master of Science Thesis in the Master Degree Programme, Civil Engineering

LENA GOLLVIK

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Building Technology

Building Physics

Chalmers University of Technology

Abstract

During recent years wood has become an increasing popular wall material in buildings. This report describes the use of massive wood. These walls are made of boards glued together, and are often, but not always combined with a layer of insulation. In this study, we examine how a specific house made with massive wood without insulation, behaves with respect to annual energy consumption and indoor thermal comfort, compared to three other wall types.

The energy consumption and the thermal comfort are simulated with the computer program Mathcad. The simulations, one for each wall type, are based on the theory of Dynamic Thermal Networks. Within this theory the thermal properties are based on response and weighting functions.

The simulations show that the energy consumption is mostly dependent on the U-value of the wall. The thermal comfort is, on the other hand, dependent on the heat capacity of the wall. The best results, with respect to energy consumption, are achieved when the massive wood is combined with an external insulation layer.

Also walls with the same U-value, yield different results, depending on the actual order of the different wall layers, and their heat capacity. A correlation between good thermal comfort and a slow change of the so-called absorptive response function is found. When the walls' U-values are the same, a slow change of the absorptive response function is also related to lower energy consumption.

Key words: Massive wood, energy consumption, thermal comfort, Dynamic Thermal Networks, heat capacity, wall, building

Massivträ som väggmaterial

- en jämförande studie av energiförbrukning och termisk komfort

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

LENA GOLLVIK

Institutionen för Bygg- och miljöteknik

Avdelningen för Byggnadsteknologi

Byggnadsfysik

Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Det har blivit allt vanligare att bygga hus av trä. En metod är att använda massiva trärelement. Elementen består av flera lager krysslimmade träskivor, och brukar kombineras med utvändig isolering. Det byggs hus även utan extra isolering – med väggar enbart av massivt trä. I det här examensarbetet undersöks hur sådana väggar fungerar med avseende på årlig energiförbrukning och termisk komfort, jämfört med 3 andra väggkonstruktioner.

Ett befintligt bostadshus av massivträ i Fristad utanför Borås har använts som utgångspunkt. Arbetet har utförts som en datorsimulering i Mathcad av energiförbrukning och temperatures variation inomhus för de olika väggmaterialen.

Den dynamiska värmeledningen har beräknats med hjälp av teorin Dynamiska termiska nätverk. Teorin bygger på att väggarnas termiska egenskaper beskrivs av så kallade respons- och viktfunktioner. I arbetet undersöks även om det finns ett samband mellan utseendet på dessa funktioner, byggnadens årliga energiförbrukning och inomhustemperaturens variation.

Simuleringen visar att energiförbrukningen för ett bostadshus till största del beror på väggens U-värde. Däremot är komforten i huset beroende av väggkonstruktionens värmelagrande förmåga. Bäst ur energisynpunkt och komfort fungerar massivträ kombinerat med utvändig isolering.

Det finns en skillnad i energiförbrukning och komfort, även för väggkonstruktioner med samma U-värde, beroende på väggskiktens placering och deras värmekapacitet.

En koppling mellan god termisk komfort och en långsam ändring av det så kallade absorptiva responsflödet har hittats. Då väggarnas U-värden är samma är detta också relaterat till en låg energiförbrukning.

Nyckelord: Massivträ, energiförbrukning, termisk komfort, Dynamiska termiska nätverk, värmelagring, vägg, byggnad

Innehållsförteckning

Förord	I
Abstract	III
Sammanfattning	V
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Metod	2
1.4 Avgränsningar	3
2 Värmelagring	5
2.1 Olika årstider	5
2.2 Placering av material i vägg	6
2.3 Kan man spara energi med hjälp av en tung stomme?	7
3 Värmeledning	9
3.1 Stationär värmeledning	9
3.2 Dynamisk värmeledning	10
4 Dynamiska termiska nätverk	11
4.1 Absorptiva och transmittiva flöden	11
4.2 Dynamiskt randflöde, grundläggande formler	12
4.3 Respons- och viktfunktioner	14
4.3.1 Stegresponsproblem	14
4.3.2 Stegresponsens randflöden	15
4.3.3 Viktfunktioner	15
4.4 Viktning	17
4.5 Diskretisering	18
4.5.1 Tidssteg	20
4.6 Analytisk lösning	20
5 Undersökning av energiförbrukning	21
5.1 Det massiva trähuset i Fristad	21
5.2 De jämförda väggkonstruktionerna	22
5.2.1 Massivträ	22
5.2.2 Lättregelvägg	22
5.2.3 Lättbetong	23
5.2.4 Massivträ + isolering	23
6 Metod och genomförande	25
6.1 Antaganden - yttre klimat	25
6.2 Värmebalans	25
6.3 Indata	26
6.3.1 Solinstrålning Q_s	26
6.3.2 Uppvärmning Q_h	28

6.3.3 Internvärme Q_i	28
6.3.4 Ventilation Q_v	28
6.3.5 Transmissionsförluster genom fönster och dörrar Q_{fd}	29
6.3.6 Dynamisk värmeledning i väggar, grund och tak Q_1	29
6.4 Beräkning av inomhustemperaturen	30
6.5 Beräkningsgång	32
7 Resultat	33
7.1 Årlig energiförbrukning	33
7.2 Komfort och ventilation	34
7.3 Respons- och viktfunktioner	36
7.4 Slutsats	39
8 Studie av termiskt beteende och årlig energiförbrukning för väggar med samma U-värde	41
8.1 De undersökta väggkonstruktionerna	41
8.2 Metod	41
8.3 Resultat	42
8.3.1 Resultat energiförbrukning och termisk komfort	42
8.3.2 Byggnadens totala viktfaktorer	43
8.3.3 Jämförelse energiförbrukning, komfort och viktfunktioner	43
8.4 Slutsats	44
9 Vidare studier	45
10 Referensförteckning	47
Bilaga 1 – Värmeledningsekvationen	49
Bilaga 2 – Absorbtiva och transmittiva flöden	51

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Att bygga hus av trä har på senare tid blivit alltmer populärt. Ändringar av brandnormerna i mitten av 1990-talet har ökat möjligheterna till att bygga trähus även i flera våningsplan. Särskilt har det skett en ökning av byggande med prefabricerade massiva träelement. Den vanligaste typen av sådana element tillverkas genom krysslimning, vilket innebär att skikt av brädor limmas samman med varannat brädeskikt korslagt.

Enligt tillverkarna är fördelarna med att bygga med massiva träelement många: Framställningen av elementen är energisnål jämfört med motsvarande tillverkning av betongelement. Den låga vikten och den höga graden av prefabricering gör monteringen snabb och effektiv. Den goda tillgången på trä i Sverige leder till korta transporter. Miljöegenskaperna anses goda, särskilt under tillverkning, transport och återvinning (Svensk Byggtjänst, 2005).

Massiva träkonstruktioner förespråkas även av tillverkarna för deras värmelagrande förmåga. En effektiv energibesparing i bruksskedet påstås kunna göras – i alla fall då massivträet kombineras med isolering, vilket är det vanligaste (Westra, 2005). Men det byggs även hus enbart i massivträ – utan extra isolering. Fördelarna med denna metod är att elementen kan förberedas med helt färdiga trätytor, både invändigt och utvändigt. Ingen efterbehandling krävs (Byggindustrin, 2004).

I Massivträ Handboken (2002) lovprisas massiva träkonstruktioner, bland annat skrivs:

”Flera mätningar och datasimuleringar har utförts för att fastställa hur det förhåller sig med boendeklimatet i massivträhusen och deras energieffektivitet. Resultaten tyder på att de är både behagliga att bo i och att energiförbrukningen för uppvärmning är låg. En betydande minskning av energiförbrukningen för uppvärmning, i jämförelse med lättväggar och lätta bjälklag, är möjlig att uppnå.”

Ovanstående slutsats kommer enligt Massivträ Handboken från den danska skriften Massivtræ i byggeriet (2001). Där står emellertid:

”Hvis man er opmærksom på de forskelle, der er i isoleringsmængden, har ydervægskonstruktionen med massive træelementer de mindste energitab ved transmission. Hvis man analyserede de samlede energitab og dermed inkluderede andre faktorer som f.eks. varmeakkumulering, er det ikke sikkert, at konstruktionen med massive træelementer ville være bedre end konstruktionen med letbeton.”

I den danska energiundersökningen har det massiva träet respektive lättbetongen kombinerats med isolering och tegel. Väggar av enbart massivträ har undersökts dåligt.

I detta examensarbete är jag intresserad av hur väggar som enbart består av massivträ beter sig; både vad gäller transmissionsförluster och värmeackumulering.

1.2 Syfte

Syftet med undersökningen har varit att jämföra massiva träväggar med andra väggmaterial med avseende på termiska egenskaper och dynamisk värmeförlust, vilket till stora delar motsvarar energiförbrukningen för ett hus.

Väggarnas termiska egenskaper beskrivs av så kallade respons- och viktfunktioner. Syftet har också varit att undersöka om det går att se en koppling mellan utseendet på dessa funktioner, byggnadens årliga energiförbrukning och inomhustemperaturens variation.

1.3 Metod

Ett befintligt bostadshus av massivträ i Fristad utanför Borås har använts som utgångspunkt. I undersökningen jämförs den massiva träväggen med tre andra väggkonstruktioner:

- lättregelvägg från A-hus AB
- lättbetongvägg
- massivträ kombinerad med utvändigt isolering

Väggarnas termiska egenskaper och värmeförluster har beräknats med hjälp av metoden Dynamiska termiska nätverk som är utvecklad av Johan Claesson vid institutionen för byggnadsfysik på Chalmers. Metoden bygger på att den dynamiska värmeledningen beräknas med hjälp av responsfunktioner. En responsfunktion beskriver hur värmeflödena vid väggens ränder blir som funktion av tiden, efter att den ena randtemperaturen plötsligt ändras med ett enhetssteg. Teorin beskrivs närmare i kapitel 4.

Ett Mathcad-program har gjorts för att simulera den årliga energiförbrukningen och temperaturens variation inomhus för de olika väggmaterialen. Modellen är endimensionell och utgår från byggnadens värmebalans. Väggmaterial samt innerväggar och mellanbjälklag ändras, medan grund, fönster och tak är samma i alla fallen. Lättregelväggens responsfunktion är framtagen i HEAT 2¹.

I undersökningen baseras energiförlusterna på utomhustemperaturen och solinstrålningen genom fönstren. Data för hur utomhustemperaturen varierar under ett år i Göteborg (Säve) är hämtat från klimatdatabasen METEONORM 4.0. Soldata kommer från International Building Physics Toolbox.

För att kunna studera kopplingen mellan väggarnas termiska egenskaper, det vill säga deras respons- och viktfunktioner, med årlig energiförbrukning och termisk komfort, har 6 olika väggkonstruktioner med samma U-värde analyserats.

¹ Numeriskt beräkningsprogram som beräknar värmeflöde i 2 dimensioner.

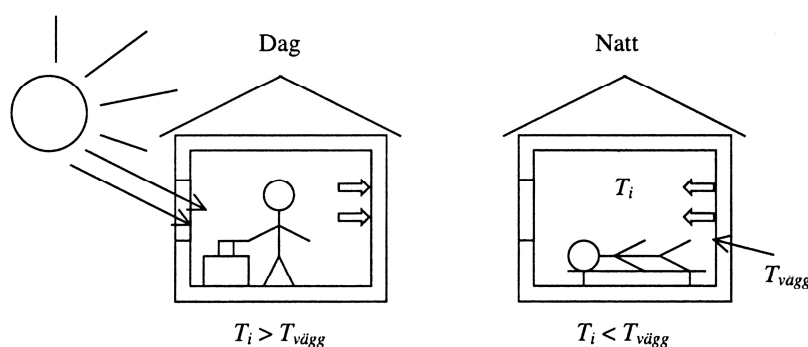
1.4 Avgränsningar

Endast de olika väggkonstruktionernas termiska egenskaper är undersökta och jämförda. För- och nackdelar med avseende på andra faktorer, såsom fukt och beständighet har ej beaktats. Alla väggkonstruktioner är enbart analyserade i Göteborgsklimat. Endast energiförbrukning i bruksskedet är undersökt och gäller för ett bostadshus – hur energiförbrukningen hade varit för en byggnad med annan verksamhet, studeras inte.

I förklaringen av teorin Dynamiska termiska nätverk, har de analytiska lösningarna av differentialekvationerna, för erhållning av responsfunktionerna, utelämnats.

2 Värmelagring

Värmeförlusterna från inomhusluften kan delas upp i det som transmitteras genom klimatskalet, det som lagras i husets stomme och inredning samt de förluster som blir på grund av ventilation. Den lagrade värmen kan komma rummet tillgodo när innetemperaturen sjunker, vilket ger en dämpande effekt på temperaturvariationerna i inomhusluften. Se figur 2.1. Detta kan vara fördelaktigt ur uppvärmnings- och kylningssynpunkt. Tunga material har större värmebuffringsförmåga än lätta material.



Figur 2.1 Den principiella lagringen i stommen. Bild från (Ståhl, 2000).

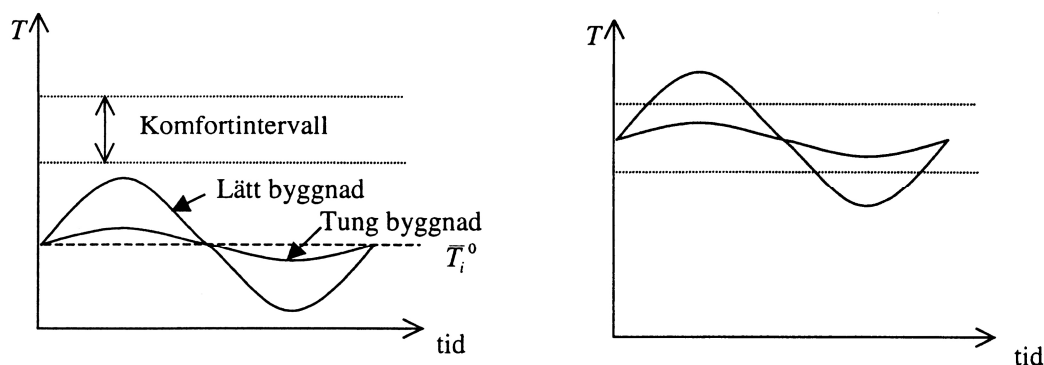
Ett materials förmåga att leda värme beskrivs med hjälp av värmekonduktiviteten λ [W/mK]. Ju lägre värmekonduktivitet desto bättre isolerande förmåga har materialet. Det så kallade U-värdet [W/m²K] används för att jämföra olika väggkonstruktioners isolerande förmåga. Den anger hur stor värmeeffekt som transmitteras genom en kvadratmeter av väggen då temperaturskillnaden mellan ute och inne är en grad. Låga U-värden eftersträvas.

Värmekapaciteten ρc [Ws/m³K] för ett material definieras som materialets specifika värmekapacitet c [Ws/kgK] multiplicerat med dess densitet ρ [kg/m³]. Den beskriver den mängd energi som krävs för att värma en kubikmeter av materialet med en grad.

Den höga värmekapaciteten i en tung stomme gör att värme kan lagras i materialet över tiden. Värmen från rummet lagras i stommen då denna är kallare än inomhusluften och kommer sedan tillbaka till rummet då det omvända råder. Se figur 2.1. Störst betydelse har det för kortare tidsperioder. Framförallt hjälper värmelagringen till att jämna ut temperaturvariationerna över dag och natt. På längre tidsskalor, exempelvis mellan sommar och vinter, är den utjämnande effekten försumbar (Hagentoft, 2002).

2.1 Olika årstider

Figur 2.2 visar temperaturvariationerna inomhus för en lätt respektive tung byggnad som varken är uppvärmd eller kyld, vilket kallas att temperaturen är ostörd. Konstruktionerna har samma U-värde, vilket gör att temperaturen svänger kring samma medeltemperatur. Den högre kurvtemperaturen motsvarar dagen och den lägre natten. I den lätta byggnaden blir temperatursvängningen större än i den tunga byggnaden.



Figur 2.2 Inomhustemperaturens variation för en lätt respektive tung byggnad under ett typiskt vinterdygn (vänster) samt för- och sensommardygnet (höger). Bild från (Ståhl, 2000).

För vinterfallet, då både den lätta och tunga byggnadens temperaturvariation ligger under komfortintervallet, måste värmesystemet i båda fallen vara igång dygnet runt för att en behaglig inomhustemperatur ska uppnås. Se figur 2.2 (vänster). Eftersom temperaturen svänger kring samma medeltemperatur $\bar{T}_i^0$ blir uppvärmningsbehovet totalt sett lika för båda byggnaderna under en vinterperiod. Detta förutsatt att värmetillförseln regleras så att samma inomhustemperatur hålls i båda byggnaderna samt att den interna värmeproduktionen och solinstrålningen är lika.

Det är i för- eller sensommarfallet som värmelagringseffekten i en tung stomme blir positiv. Den tunga byggnadens temperaturvariation ligger inom komfortgränserna under hela dygnet, medan den lätta byggnadens temperatur överstiger komfortintervallet under dagen och understiger den på natten. Se figur 2.2 (höger). Detta gör att den lätta byggnaden behöver kylas på dagen och värmas på natten för att ett behagligt inneklimat ska åstadkommas. Överskottsvärmen vädras eller kyls bort i lätta konstruktioner, medan den lagras i den tunga.

Även under vår och höst har lätta konstruktioner något större värmebehov än tunga konstruktioner. Energibehovet ökar då den ostörda temperaturen korsar komfortintervallet. Därför ger en stabil innetemperatur lägre energibehov eftersom den korsar komfortgränserna färre gånger. Det är bara då de ostörda temperaturerna ligger helt under eller helt över komfortintervallet som lätta och tunga konstruktioner ger samma energiförbrukning (Hagentoft, 1999).

2.2 Placering av material i vägg

Eftersom inomhustemperaturen beror på såväl värmelagring som transmissionsförluster, är det inte självklart vilken väggkonstruktion som ger den lägsta energiförbrukningen.

Tunga material har generellt sämre isoleringsförmåga än lätta material. Däremot är ofta den värmelagrande förmågan bättre hos tunga material. En effektiv konstruktionslösning är att kombinera lätta och tunga material för att på så vis dra nytta av båda de positiva egenskaperna (Bokalders & Block, 2004).

Placeringen av isoleringen respektive den tunga delen har betydelse för hur mycket värme som kan lagras. Om det lätta materialet placeras på insidan och det tunga på

utsidan, det vill säga mot utomhusluften, har värmelagringen i väggen ingen betydelse för byggnadens värmebehov. Bäst effekt fås med det omvända, det vill säga då det tunga materialet placeras på insidan, välexponerad mot inomhusluften, samt välisolerad mot utomhusluften med hjälp av den utvändiga isoleringen. Mer finns att läsa om detta i kapitel 8.

2.3 Kan man spara energi med hjälp av en tung stomme?

Det har gjorts åtskilliga undersökningar om värmelagringen i tunga konstruktioner leder till lägre uppvärmningsbehov. Det har betydelse om man tittar på energiförbrukningen för en byggnad i dess bruksskede eller hela dess livslängd. Tung material är generellt mer energikrävande att framställa än lätta material. Därmed kan ett hus med tung stomme i livscykelperspektiv ha större energibehov än motsvarande hus av lätt stomme, trots att energiförbrukningen i bruksskedet är lägre (Ståhl, 2000).

En förutsättning för att man ska kunna sänka energibehovet i bruksskedet med hjälp av en tung konstruktion, är att det finns överskottsvärme att lagra i stommen. Ju mer överskottsvärme som kan lagras desto, större energibesparing kan göras. Byggnader med stor intern värmealstring koncentrerat till en begränsad del av dygnet kan spara mest. Detta gäller exempelvis kontor och skolor, där det under dagtid finns många människor och teknisk apparatur med stor värmeavgivning. För bostadshus ger en tung stomme främst en jämnare inomhustemperatur, vilket svarar mot bättre termisk komfort. Däremot har den marginell betydelse i energisparande syfte (Hagentoft och Svensson, 2000).

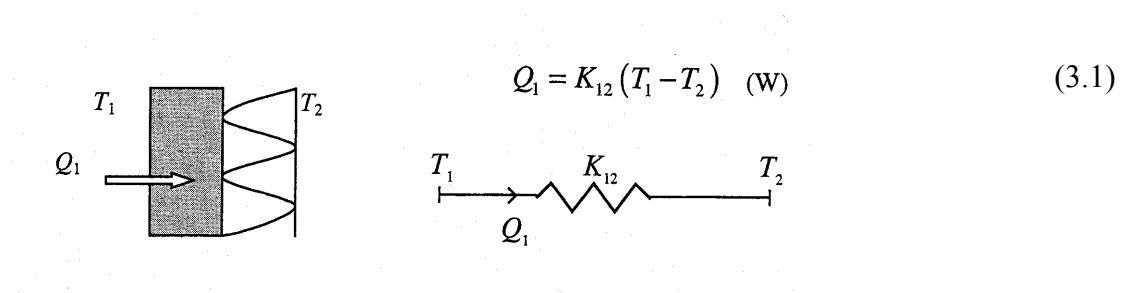
För att man ska kunna dra nytta av värmelagringen i en tung stomme, är det viktigt att ventilationsförlusterna är små samt att byggnaden är välisolerad. Köldbryggor leder till att den lagrade värmen snabbt går förlorad. Den värmelagrande effekten ökar då större del av stommaterialet exponeras mot inomhusluften. Då ytorna döljs av exempelvis golvmattor, bokhyllor och akustikplattor reduceras värmelagringen avsevärt. Även vägg tjockleken har betydelse för stommens buffringsförmåga. De flesta material behöver vara minst 1-2 dm tjocka för att värmelagringen över dygnet ska bli maximal.

Det är inte alltid den höga värmekapaciteten i en tung stomme är önskvärd. Materialets tröghet gör det svårt att snabbt ändra temperaturen i en sådan byggnad. Detta kan vara till nackdel om man till exempel snabbt vill värma upp en kall sommarstuga under den kallare delen av året, eller snabbt sänka nattetemperaturen under sommaren (Hagentoft, 2002).

3 Värmeledning

3.1 Stationär värmeledning

Det stationära värmeflödet Q_1 genom en yttervägg beror på temperaturdifferensen mellan inne och ute ($T_1 - T_2$) och väggens termiska konduktans $K_{12} = 1/R_{12}$. Detta kan tolkas grafiskt med en termisk krets enligt figur 1.



Figur 3.1 Det stationära värmeflödet genom en yttervägg illustrerad som en termisk krets. Bild från (Wentzel, 2002).

Konduktansen K_{12} beror på varje väggs skiktets värmeledande förmåga λ_m , tjocklek d_m , samt sidornas ytmotstånd R_{si} och R_{se} se (3.3). För en vägg med M skikt blir den stationära termiska konduktansen:

$$K_{12} = \frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_M + R_{se}} \quad [\text{W/K}] \quad (3.2)$$

De inre och yttre övergångsmotstånden R_{si} respektive R_{se} samt resistansen R_m för väggs skikt $m = 1 \dots M$ beräknas enligt följande:

$$R_{si} = \frac{1}{A \cdot \alpha_i} \quad [\text{K/W}] \quad R_{se} = \frac{1}{A \cdot \alpha_e} \quad [\text{K/W}] \quad R_m = \frac{d_m}{A \cdot \lambda_m} \quad [\text{K/W}] \quad (3.3)$$

α_i och α_e $[\text{W/m}^2\text{K}]$ är de inre och yttre värmeövergångskoefficienterna. Dessa tar hänsyn till konvektion och strålning vid ytorna. Följande standardvärden brukar användas (Petersson, 2001):

$$\alpha_i = \frac{1}{0.13} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$\alpha_e = \frac{1}{0.04} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3.4)$$

3.2 Dynamisk värmeledning

Då temperaturen varierar får man ett tidsberoende värmeflöde, så kallad dynamisk värmeledning, läs om värmeledningsekvationen i bilaga 1. Denna värmeledning är betydligt svårare att beräkna, eftersom den inte bara beror på de rådande temperaturskillnaderna utan även på temperaturvariationer bakåt i tiden. Konstruktionen har ett så kallat termiskt minne. Även ordningen på de ingående materialskikten har betydelse för hur stort flödet blir.

Dynamisk värmeledning kan beräknas på flera olika sätt. Ett av sätten är att använda sig av Dynamiska termiska nätverk, där man utnyttjar konstruktionens så kallade responsfunktioner för att beräkna värmeflödet. Det är denna teori som har använts i den här undersökningen. En närmare beskrivning av teorin finns i kapitel 4. Man kan även beräkna dynamisk värmeledning numeriskt eller periodiskt.

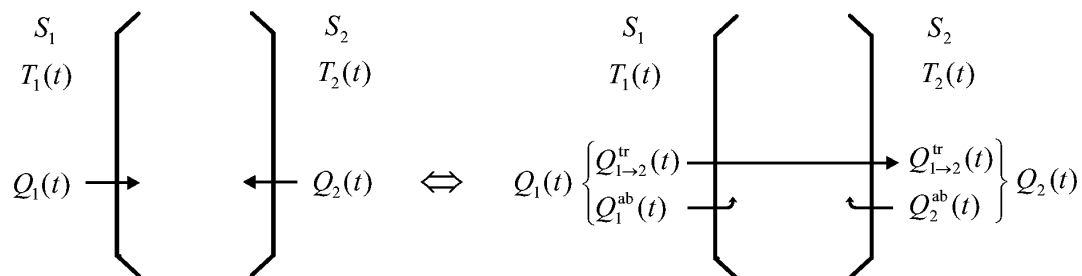
4 Dynamiska termiska nätverk

Teorin Dynamiska termiska nätverk har fått sitt namn från att de dynamiska värmeflödena vid ränderna kan illustreras i en så kallad dynamisk krets. Syftet med teorin är att underlätta förståelsen för hur dynamisk värmeledning går till. Dessutom är teorin praktisk att tillämpa på hela värmebalanser.

Genom Dynamiska termiska nätverk kan man för varje tidpunkt ta fram medeltemperaturer för inne- och uteluften som tar hänsyn till tidigare temperaturvariationer och hur väggen påverkas av dem. Av dessa för väggen ”upplevda” temperaturer beräknas i varje tidpunkt t , de dynamiska randflödena $Q_1(t)$ över randen S_1 och $Q_2(t)$ över randen S_2 . Teorin är utvecklad av Johan Claesson vid institutionen för byggnadsfysik på Chalmers. Detta kapitel bygger framförallt på (Wentzel, 2002), (Claesson, 2003) och (Wentzel & Claesson, 2002) och flertalet diskussioner med Johan Claesson och Eva-Lotta Wentzel. För vidare studier hänvisas till (Wentzel, 2005).

4.1 Absorptiva och transmittiva flöden

Randflödena $Q_1(t)$ och $Q_2(t)$ beror på sidornas temperaturhistoria bakåt i tiden fram till aktuell tidpunkt. Flödet som passerar randen, det admittiva flödet, kan delas upp i ett absorptivt $Q^{ab}(t)$ och ett transmittivt $Q^{tr}(t)$ flöde, se figur 4.1. En utförligare beskrivning över definitionerna av de absorptiva och transmittiva flödena finns i bilaga 2.

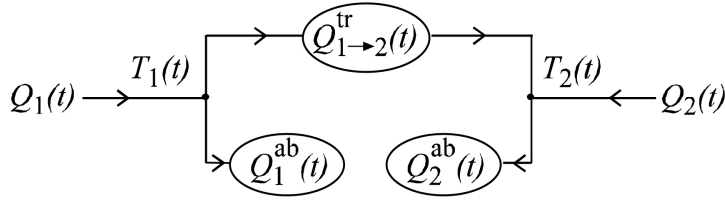


Figur 4.1 Randflödena $Q_1(t)$ och $Q_2(t)$ delas upp i absorptiva och en transmittiva delar.

Randflödena blir summan av de absorptiva och transmittiva flödena för respektive sida:

$$Q_1(t) = Q_1^{ab}(t) + Q_{1 \rightarrow 2}^{tr}(t) \quad Q_2(t) = Q_2^{ab}(t) + Q_{2 \rightarrow 1}^{tr}(t) = Q_2^{ab}(t) - Q_{1 \rightarrow 2}^{tr}(t) \quad (4.1)$$

Figur 4.2 visar den grafiska tolkningen av hur randflödena $Q_1(t)$ och $Q_2(t)$ delas upp i två absorptiva flöden $Q_1^{ab}(t)$, $Q_2^{ab}(t)$ och ett transmittivt flöde $Q_{1 \rightarrow 2}^{tr}(t)$.



Figur 4.2 Schematisk bild av hur randflödena delas upp i två absorptiva flöden och ett transmittivt flöde. Bild från (Claesson, 2003).

4.2 Dynamiskt randflöde, grundläggande formler

De absorptiva och de transmittiva flödena kan enligt teorin för Dynamiska termiska nätverk uttryckas som konduktanser multiplicerade med temperaturdifferenser, på liknande sätt som för det stationära flödet (3.1):

$$\begin{aligned} Q_1^{\text{ab}}(t) &= K_1 \cdot [T_1(t) - \bar{T}_{1a}(t)] & Q_{1 \rightarrow 2}^{\text{tr}}(t) &= K_{12} \cdot [\bar{T}_{1t}(t) - \bar{T}_{2t}(t)] \\ Q_2^{\text{ab}}(t) &= K_2 \cdot [T_2(t) - \bar{T}_{2a}(t)] & Q_{2 \rightarrow 1}^{\text{tr}}(t) &= -Q_{1 \rightarrow 2}^{\text{tr}}(t) = K_{12} \cdot [\bar{T}_{2t}(t) - \bar{T}_{1t}(t)] \end{aligned} \quad (4.2)$$

De totala värmefflödena vid ränderna blir (4.1 och 4.2):

$$\begin{aligned} Q_1(t) &= K_1 \cdot [T_1(t) - \bar{T}_{1a}(t)] + K_{12} \cdot [\bar{T}_{1t}(t) - \bar{T}_{2t}(t)] \\ Q_2(t) &= K_2 \cdot [T_2(t) - \bar{T}_{2a}(t)] + K_{12} \cdot [\bar{T}_{2t}(t) - \bar{T}_{1t}(t)] \end{aligned} \quad (4.3)$$

Ingående storheter i ovanstående uttryck är:

- K_{12} [W/K] den stationära termiska konduktansen mellan de två sidorna, inklusive ytkonduktanserna K_1 och K_2 , se (3.2).
- K_1 [W/K] ytan S_1 's ytkonduktans. $K_1 = 1/R_{si}$ (3.3).
- K_2 [W/K] ytan S_2 's ytkonduktans. $K_2 = 1/R_{se}$ (3.3).
- $T_1(t)$ [K] lufttemperaturen på sida 1.
- $T_2(t)$ [K] lufttemperaturen på sida 2.
- $\bar{T}_{1a}(t)$ [K] absorptivt medelvärde av lufttemperaturen på sida 1 viktad bakåt i tiden med den så kallade absorptiva viktfunctionen $\kappa_{1a}(\tau)$, se (4.4).
- $\bar{T}_{2a}(t)$ [K] absorptivt medelvärde av lufttemperaturen på sida 2 viktad bakåt i tiden med den så kallade absorptiva viktfunctionen $\kappa_{2a}(\tau)$, se (4.4).
- $\bar{T}_{1t}(t)$ [K] transmittivt medelvärde av lufttemperaturen på sida 1 viktad bakåt i tiden med den så kallade transmittiva viktfunctionen $\kappa_{12}(\tau)$, se (4.4).
- $\bar{T}_{2t}(t)$ [K] transmittivt medelvärde av lufttemperaturen på sida 2 viktad bakåt i tiden med den så kallade transmittiva viktfunctionen $\kappa_{12}(\tau)$, se (4.4).

Det absorptiva flödet $Q_1^{\text{ab}}(t)$ vid tidpunkten t är skillnaden mellan det aktuella temperaturvärdet T_1 och det absorptivt bakåtviktade medelvärde av temperaturen på sida 1, multiplicerat med ytkonduktansen K_1 . Det absorptiva flödet beror endast på den egna sidans temperatur T_1 men inte på T_2 . Motsvarande gäller för $Q_2^{\text{ab}}(t)$.

De transmittiva flödena $Q_{1 \rightarrow 2}^{\text{tr}}(t)$ och $Q_{2 \rightarrow 1}^{\text{tr}}(t)$ är lika för båda sidorna, med undantag av tecknet. Dessa beräknas genom att skillnaden mellan sidornas transmittivt bakåtviktade medeltemperaturer multipliceras med den stationära termiska konduktansen K_{12} .

Luftens medeltemperaturer $\bar{T}_{1a}(t)$ och $\bar{T}_{1t}(t)$ på sida 1 och $\bar{T}_{2a}(t)$ och $\bar{T}_{2t}(t)$ på sida 2, kan förenklat beskrivas som de omgivande medeltemperaturer som väggen upplever och som påverkar hur flödet genom väggen blir. Dessa är viktade bakåt i tiden med viktfunktionerna $\kappa_{1a}(\tau)$, $\kappa_{2a}(\tau)$ eller $\kappa_{12}(\tau)$ enligt följande:

$$\begin{aligned}\bar{T}_{1a}(t) &= \int_0^{\infty} \kappa_{1a}(\tau) \cdot T_1(t - \tau) d\tau & \bar{T}_{2a}(t) &= \int_0^{\infty} \kappa_{2a}(\tau) \cdot T_2(t - \tau) d\tau \\ \bar{T}_{1t}(t) &= \int_0^{\infty} \kappa_{12}(\tau) \cdot T_1(t - \tau) d\tau & \bar{T}_{2t}(t) &= \int_0^{\infty} \kappa_{12}(\tau) \cdot T_2(t - \tau) d\tau\end{aligned}\quad (4.4)$$

Tidsvariabeln τ avser att tiden räknas baklänges, dvs från nutid $\tau = 0$ till oändligt långt tillbaka i tiden $\tau = \infty$. $T(t - \tau)$ beskriver således temperaturen vid tidpunkten τ bakåt från den aktuella tiden t . De nedre indexen anger vilken sidas lufttemperatur som avses (1 eller 2) samt hur de är viktade (a eller t). Index 1a och 2a anger att temperaturen på sida 1 respektive 2 är viktade mot de absorptiva viktfunktionerna $\kappa_{1a}(\tau)$ respektive $\kappa_{2a}(\tau)$. Ett t istället för a betyder att temperaturen är viktad mot den transmittiva viktfunktionen $\kappa_{12}(\tau)$. Hur viktfunktionerna beräknas anges i avsnitt 4.3.

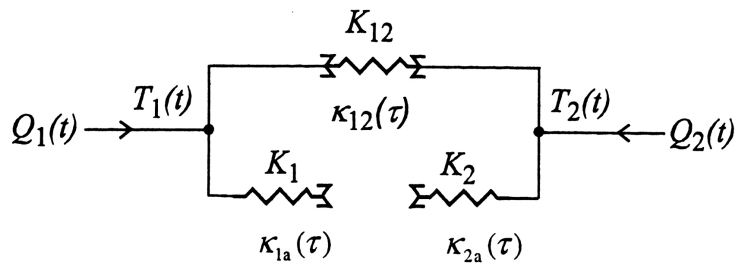
Vi ser att det transmittiva flödet endast beror på differensen mellan sidornas effektiva temperaturer. Temperaturerna var och en för sig påverkar inte:

$$Q_{1 \rightarrow 2}^{\text{tr}}(t) = K_{12} \cdot [\bar{T}_{1t}(t) - \bar{T}_{2t}(t)] = K_{12} \cdot \int_0^{\infty} \kappa_{12}(\tau) \cdot [T_1(t - \tau) - T_2(t - \tau)] d\tau \quad (4.5)$$

Då temperaturen är konstant på en sida, blir det absorptiva flödet noll på den sidan:

$$Q_1^{\text{ab}}(t) = K_1 \cdot [T_1(t) - \bar{T}_{1a}(t)] = K_1 \cdot \left[T_1 - \int_0^{\infty} \kappa_{1a}(\tau) \cdot T_1 d\tau \right] = K_1 \cdot [T_1 - T_1] = 0 \quad (4.6)$$

Randflödena kan illustreras i en dynamisk krets enligt figur 4.3 nedan:



Figur 4.3 Randflödena representerade i en dynamisk krets. Bild efter (Wentzel, 2002).

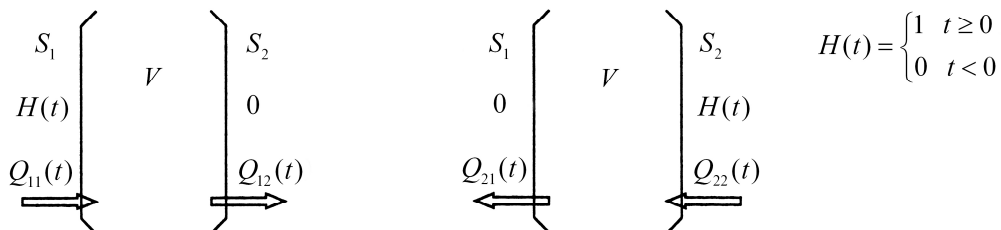
Summatecknen symboliserar viktningen av temperaturerna $T_1(t)$ och $T_2(t)$ med avseende på de viktfunktioner som står under. Dessa är vända mot de nodtemperaturer som viktningen ska ske. De absorptiva komponenterna har bara ett summatecken vänt mot respektive nod, eftersom viktningen bara ska ske på den egna sidan. De absorptiva flödena bestäms i varje tidpunkt t av skillnaden mellan den aktuella temperaturen $T_1(t)$ respektive $T_2(t)$ och den viktade temperaturen $\bar{T}_{1a}(t)$ respektive $\bar{T}_{2a}(t)$.

4.3 Respons- och viktfunktioner

Randflödena tas fram med hjälp av de så kallade viktfunktionerna, som vid viktningen anger vilken betydelse tidigare temperaturer har för det aktuella värmeflödet. För att förstå viktfunktionerna, måste man börja med att titta på väggens responsfunktioner.

4.3.1 Stegresponsproblem

En responsfunktion beskriver hur flödena vid ränderna blir som funktion av tiden, efter att den ena randtemperaturen plötsligt förändras med ett enhetssteg. Temperaturen i väggen och på båda sidor om den antas vara konstant 0 grader innan temperaturändringen. De flöden som uppkommer kallas responsflöden. Beroende på vilken sida om väggen som temperaturändringen kommer att ske, uppstår två så kallade stegresponsproblem enligt figur 4.4. Om stegändringen sker på sida 1, uppstår ett admittivt responsflöde $Q_{11}(t)$ och ett transmittivt responsflöde $Q_{12}(t)$. Om stegändringen istället sker på sida 2, uppkommer på motsvarande sätt responsflödena $Q_{22}(t)$ och $Q_{21}(t)$:



Figur 4.4 De två stegresponsproblemen med de admittiva och de transmittiva responsflödena. Pilarna visar flödenas positiva riktningar. Bild efter (Wentzel, 2002).

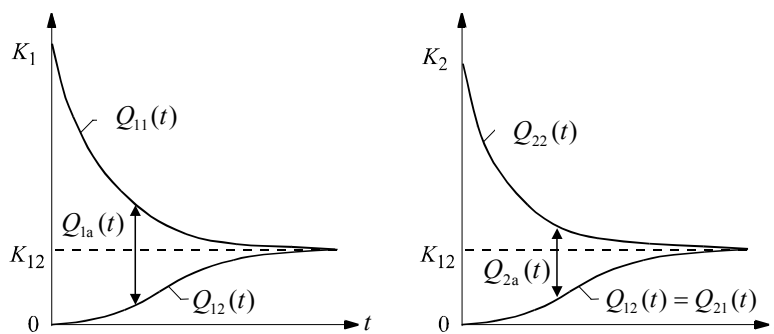
4.3.2 Stegresponsens randflöden

De två transmittiva responsflödena $Q_{12}(t)$ och $Q_{21}(t)$ är alltid lika för alla tider, enligt allmän symmetriprincip (Wentzel, 2002). De två stegresponsproblemen ger därmed upphov till tre responsflöden vid ränderna:

$$Q_{11}(t), \quad Q_{22}(t), \quad Q_{12}(t) = Q_{21}(t) \quad (4.7)$$

De absorptiva responsflödena betecknas $Q_{1a}(t)$ och $Q_{2a}(t)$ och definieras som skillnaden mellan de admittiva och de transmittiva flödena:

$$Q_{1a}(t) = Q_{11}(t) - Q_{12}(t), \quad Q_{2a}(t) = Q_{22}(t) - Q_{12}(t) \quad (4.8)$$



Figur 4.5 De admittiva, transmittiva och absorptiva responsflödenas utseende. Bild efter (Wentzel, 2002).

Figur 4.5 visar de admittiva, transmittiva och absorptiva responsflödenas utseende. Det admittiva flödet $Q_{11}(t)$ börjar med värdet av ytkonduktansen K_1 . Detta eftersom temperaturskillnaden över ytskiktet omedelbart efter temperaturändringen blir $1 - 0$. Därefter sjunker det admittiva flödet för att slutligen plana ut mot det stationära värdet K_{12} . Motsvarande gäller för $Q_{22}(t)$.

De transmittiva flödena $Q_{12}(t)$ eller $Q_{21}(t)$ är noll vid tidpunkten $t = 0$, eftersom det tar en stund innan temperaturändringen märks på andra sidan. Flödena ökar sedan gradvis för att så småningom anta värdet K_{12} . De absorptiva flödena börjar med respektive sidas ytkonduktans och går sedan mot noll. Vi har följande samband:

$$\begin{aligned} Q_{11}(0) = Q_{1a}(0) = K_1 & \quad Q_{22}(0) = Q_{2a}(0) = K_2 & \quad Q_{12}(0) = Q_{21}(0) = 0 \\ Q_{11}(\infty) = Q_{22}(\infty) = Q_{12}(\infty) = Q_{21}(\infty) = K_{12} & \quad Q_{1a}(\infty) = Q_{2a}(\infty) = 0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

4.3.3 Viktfunktioner

Ovanstående responsflöden kan ses som ett termiskt facit på hur en väggkonstruktion reagerar på temperaturändringar. Dessa stegresponslösningar kan sedan genom superponering användas för att få fram lösningar till ett värmeledningsproblem för

vilka randflöden som helst. Detta görs genom att de omgivande temperaturerna viktas bakåt i tiden med viktfunktionerna. Man inför tidsvariabeln τ , eftersom man är intresserad av att tillämpa stegresponsfunktionerna för tider bakåt i tiden. Detta ger i sin tur hur stor inverkan tidigare temperaturer har på det aktuella flödet.

För beräkning av randflödena för en väggkonstruktion behövs de absorptiva respektive transmittiva viktfunktionerna. Viktfunktionerna är ett mått på hur snabbt responsflödet ändras. Dessa erhålls genom att responsflödena deriveras med avseende på τ och divideras med respektive konduktans, på så sätt blir integralen av dem alltid 1 enligt (4.12) och (4.13). De absorptiva viktfunktionerna multipliceras även med -1 , så att värdena inte blir negativa. Vi får:

$$\frac{dQ_{1a}(\tau)}{d\tau} = -K_1 \cdot \kappa_{1a}(\tau) \quad \frac{dQ_{2a}(\tau)}{d\tau} = -K_2 \cdot \kappa_{2a}(\tau) \quad \frac{dQ_{12}(\tau)}{d\tau} = K_{12} \cdot \kappa_{12}(\tau) \quad (4.10)$$

Sätts dessa uttryck in i (4.3) och (4.4) erhålls följande ekvationer för randflödena:

$$\begin{aligned} Q_1(t) &= K_1 \cdot T_1(t) + \int_0^\infty \frac{dQ_{1a}}{d\tau} \cdot T_1(t-\tau) d\tau + \int_0^\infty \frac{dQ_{12}}{d\tau} \cdot [T_1(t-\tau) - T_2(t-\tau)] d\tau \\ Q_2(t) &= K_2 \cdot T_2(t) + \int_0^\infty \frac{dQ_{2a}}{d\tau} \cdot T_2(t-\tau) d\tau + \int_0^\infty \frac{dQ_{12}}{d\tau} \cdot [T_2(t-\tau) - T_1(t-\tau)] d\tau \end{aligned} \quad (4.11)$$

Viktfunktionerna har enheten 1/s, integralen av en viktfunktion blir alltid 1:

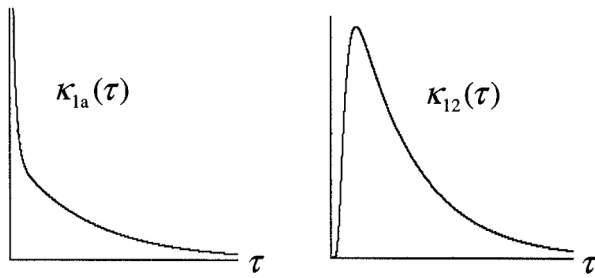
$$\begin{aligned} \frac{dQ_{1a}(\tau)}{d\tau} = -K_1 \cdot \kappa_{1a}(\tau) &\Rightarrow \int_0^\infty \kappa_{1a}(\tau) d\tau = \int_0^\infty \frac{dQ_{1a}(\tau)}{-K_1} = \\ -\frac{1}{K_1} \int_0^\infty dQ_{1a}(\tau) &= -\frac{1}{K_1} [Q_{1a}(\infty) - Q_{1a}(0)] = \frac{0 - K_1}{-K_1} = 1 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Detta ger:

$$\int_0^\infty \kappa_{1a}(\tau) d\tau = \int_0^\infty \kappa_{2a}(\tau) d\tau = \int_0^\infty \kappa_{12}(\tau) d\tau = 1 \quad (4.13)$$

Det allmänna utseendet för en absorptiv och en transmittiv viktfunktion kan ses i figur 4.6. Tittar man på den absorptiva viktfunktionen ser man att denna är störst för tider nära noll, vilket betyder att det absorptiva responsflödet ändras som mest precis efter stegändringen. Därefter sjunker den långsamt mot noll.

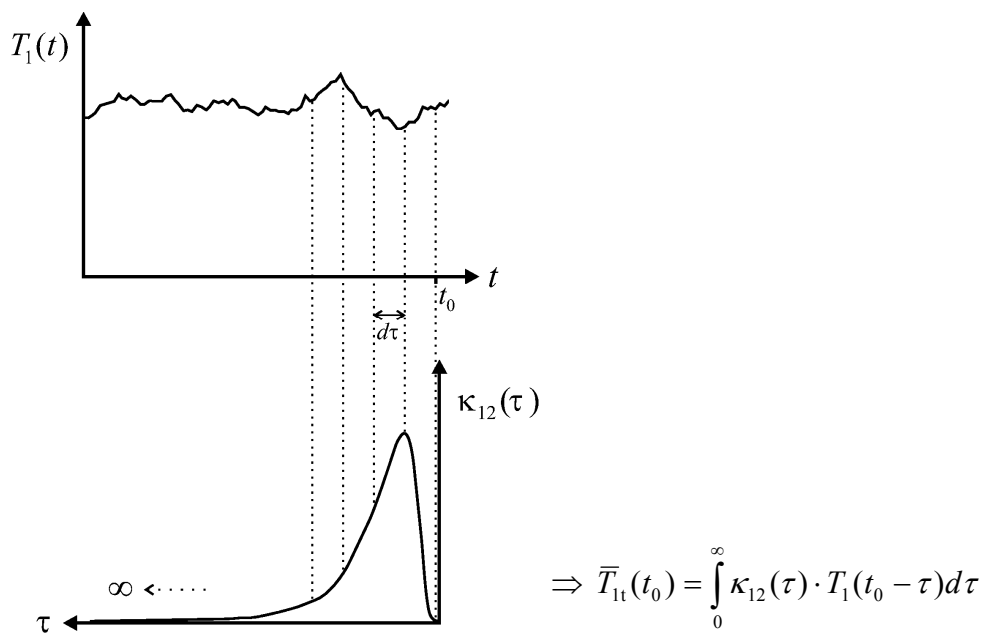
Den transmittiva viktfunktionen börjar vid noll och stiger därefter upp mot ett maximalt värde för att sedan åter sjunka mot noll.



Figur 4.6 De absorptiva och de transmittiva viktfunctionernas principiella utseende. Bild från (Claesson, 2003).

4.4 Viktning

Figur 4.7 visar hur den varierande temperaturen $T_1(t)$ viktas bakåt i tiden med avseende på den transmittiva viktfunctionen $\kappa_{12}(\tau)$ vid tidpunkten t_0 , vilket ger den transmittiva medeltemperaturen $\bar{T}_{1t}(t_0)$:



Figur 4.7 Principen av hur viktningen går till. Detta exempel visar hur temperaturen på sida 1 viktas bakåt i tiden mot den transmittiva viktfunctionen $\kappa_{12}(\tau)$. $d\tau$ går mot noll.

Störst inverkan på det transmittiva medeltemperaturen blir då viktfunctionen når sitt högsta värde. Temperaturen i den tidpunkten (bakåt i tiden) är därför den mest avgörande för det aktuella transmittiva flödet.

Om temperaturen istället viktas mot den absorptiva viktfunctionen har däremot de temperaturer som uppkommit nyligen, störst inverkan på den absorptiva medeltemperaturen. Ju längre tillbaka i tiden som temperaturvariationerna har varit, desto mindre påverkas det aktuella absorptiva flödet.

4.5 Diskretisering

För att värmeflödet genom en vägg- eller huskonstruktion ska kunna beräknas i praktiken, krävs en diskretisering så att numerisk beräkning blir möjlig. Vid diskretiseringen delas viktfunctionerna in i medelvärden över ett tidssteg h . Tiden t beräknas nu $t = nh$ där $n = 0, 1, 2, \dots$. Tiden bakåt i tiden τ blir $\tau = \nu h$ där $\nu = 0, 1, 2, \dots, \nu_s$. Här väljs ν_s så stort att viktfunctionerna når fram till noll.

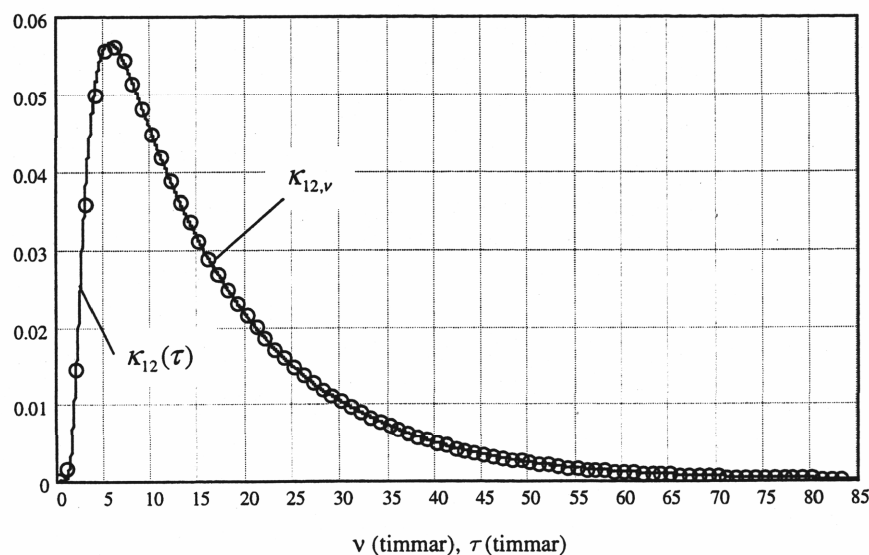
Randflödena blir efter diskretiseringen:

$$\begin{aligned} Q_{1,n} &= \bar{K}_1 \cdot [T_{1,n} - \bar{T}_{1a,n}] + K_{12} \cdot [\bar{T}_{1t,n} - \bar{T}_{2t,n}] \\ Q_{2,n} &= \bar{K}_2 \cdot [T_{2,n} - \bar{T}_{2a,n}] + K_{12} \cdot [\bar{T}_{2t,n} - \bar{T}_{1t,n}] \end{aligned} \quad (4.14)$$

Här avser $Q_{1,n}$ och $Q_{2,n}$ randflödena vid sida 1 och 2, vid tidpunkten $t = nh$, alltså:

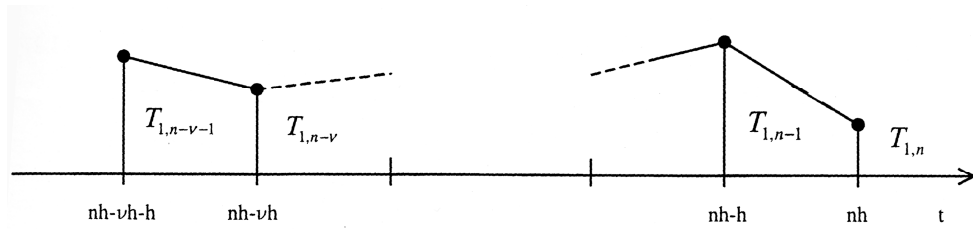
$$\begin{aligned} Q_{1,n} &= Q_1(nh) & T_{1,n} &= T_1(nh) \\ Q_{2,n} &= Q_2(nh) & T_{2,n} &= T_2(nh) \end{aligned} \quad (4.15)$$

De punktvärden som uppstår efter diskretiseringen av viktfunctionerna kallas viktfactorer och är enhetslösa. Viktfactorernas principiella utseende kan ses i figur 4.8. Här visas hur den transmittiva viktfunctionen för en betongvägg approximeras med viktfactorer med tidssteget $h = 1$ timme. Cirklarna motsvarar viktfactorer och den heldragna linjen visar viktfunctionen med enheten $1/h$.



Figur 4.8 En betongväggs viktfunction $\kappa_{12}(\tau)$ approximerad med viktfactorer $\kappa_{12,\nu}$. Bild från (Wentzel, 2002).

Temperaturfunktionerna approximeras till att vara sträckvis linjära över tidssteget h , enligt figur 4.9.



Figur 4.9 Diskretisering av temperaturen med tidssteget h . Bild från (Wentzel, 2002).

Vid diskretiseringen byts integreringen i ekvation (4.4 - 4.5) ut mot summering:

$$\begin{aligned}\bar{T}_{1a,n} &= \sum_{\nu=1}^{\nu_s} \kappa_{1a,\nu} T_{1,n-\nu} & \bar{T}_{1t,n} - \bar{T}_{2t,n} &= \sum_{\nu=0}^{\nu_s} \kappa_{12,\nu} [T_{1,n-\nu} - T_{2,n-\nu}] \\ \bar{T}_{2a,n} &= \sum_{\nu=1}^{\nu_s} \kappa_{2a,\nu} T_{2,n-\nu} & T_{1,n-\nu} &= T_1(nh - \nu h) \quad T_{2,n-\nu} = T_2(nh - \nu h)\end{aligned}\quad (4.16)$$

Summeringen utförs med hjälp av $\nu = 0, 1, 2, \dots, \nu_s$ för $\bar{T}_{1t,n} - \bar{T}_{2t,n}$ och $\nu = 1, 2, \dots, \nu_s$ för $\bar{T}_{1a,n}$ och $\bar{T}_{2a,n}$.

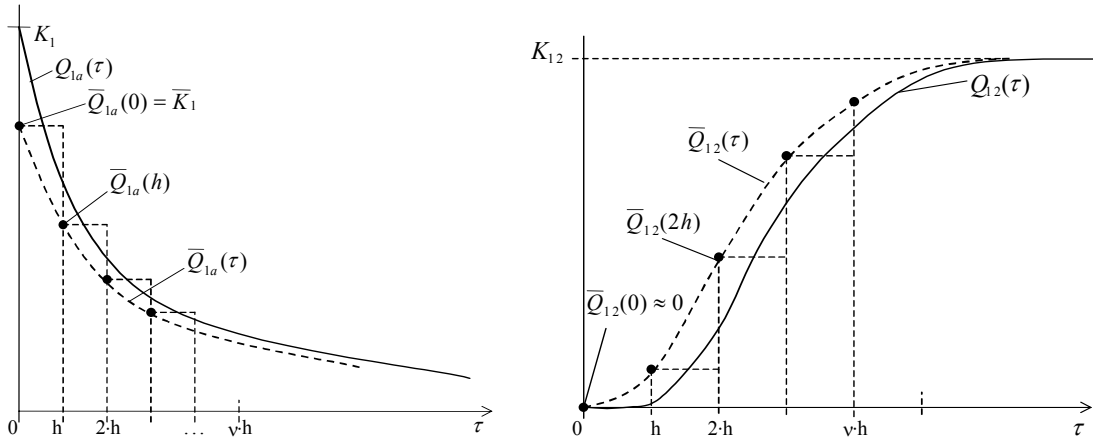
Ytkonduktanserna K_1 och K_2 ersätts med medelvärden $\bar{K}_1$ och $\bar{K}_2$ över tiden $0 < \tau < h$ (4.17), medan K_{12} är samma eftersom medelvärdet går mot det stationära värdet efter lång tid. Se figur 4.10.

$$\bar{K}_1 = \frac{1}{h} \cdot \int_0^h Q_{1a}(\tau) d\tau = \bar{Q}_{1a}(0) \quad \bar{K}_2 = \frac{1}{h} \cdot \int_0^h Q_{2a}(\tau) d\tau = \bar{Q}_{2a}(0) \quad (4.17)$$

Medelvärdena av responsfunktionerna för tidssteget h definieras enligt följande:

$$\begin{aligned}\bar{Q}_{1a}(\tau) &= \frac{1}{h} \int_{\tau}^{\tau+h} Q_{1a}(\tau') d\tau' & \bar{Q}_{12}(\tau) &= \frac{1}{h} \int_{\tau}^{\tau+h} Q_{12}(\tau') d\tau' \\ \bar{Q}_{2a}(\tau) &= \frac{1}{h} \int_{\tau}^{\tau+h} Q_{2a}(\tau') d\tau'\end{aligned}\quad (4.18)$$

Figur 4.10 visar det absorptiva responsflödet $Q_{1a}(\tau)$ och $\bar{Q}_{1a}(\tau)$ och det transmittiva responsflödet $Q_{12}(\tau)$ och $\bar{Q}_{12}(\tau)$ för tidssteget h .



Figur 4.10 De absorptiva och transmitta responsflödena $Q_{1a}(\tau)$ och $Q_{12}(\tau)$, samt medelvärden över tidssteget h . Bild från (Wentzel, 2002).

Viktfaktorerna ges av:

$$\begin{aligned} \kappa_{1a,\nu} &= \frac{\bar{Q}_{1a}(\nu h - h) - \bar{Q}_{1a}(\nu h)}{\bar{K}_1} & \kappa_{2a,\nu} &= \frac{\bar{Q}_{2a}(\nu h - h) - \bar{Q}_{2a}(\nu h)}{\bar{K}_2} & \nu &= 1, 2, \dots, \nu_s \\ \kappa_{12,\nu} &= \frac{\bar{Q}_{12}(\nu h) - \bar{Q}_{12}(\nu h - h)}{K_{12}} & \nu &= 0, 1, \dots, \nu_s \end{aligned} \quad (4.19)$$

4.5.1 Tidssteg

Tidssteget h väljs lagom stort beroende på vilken noggrannhet problemet kräver. Det är viktigt att anpassa ν_s så att summan av viktfaktorerna blir så nära 1 som möjligt:

$$\sum_{\nu=1}^{\nu_s} \kappa_{1a,\nu} \approx 1 \quad \sum_{\nu=0}^{\nu_s} \kappa_{12,\nu} \approx 1 \quad \sum_{\nu=1}^{\nu_s} \kappa_{2a,\nu} \approx 1 \quad (4.20)$$

Dessutom bör h väljas så att den första viktfaktorn för det transmittiva flödet, $\kappa_{12,0}$, blir så liten som möjligt:

$$\kappa_{12,0} = \frac{1}{K_{12}} \cdot \bar{Q}_{12}(h) < 0,001 \quad (4.21)$$

4.6 Analytisk lösning

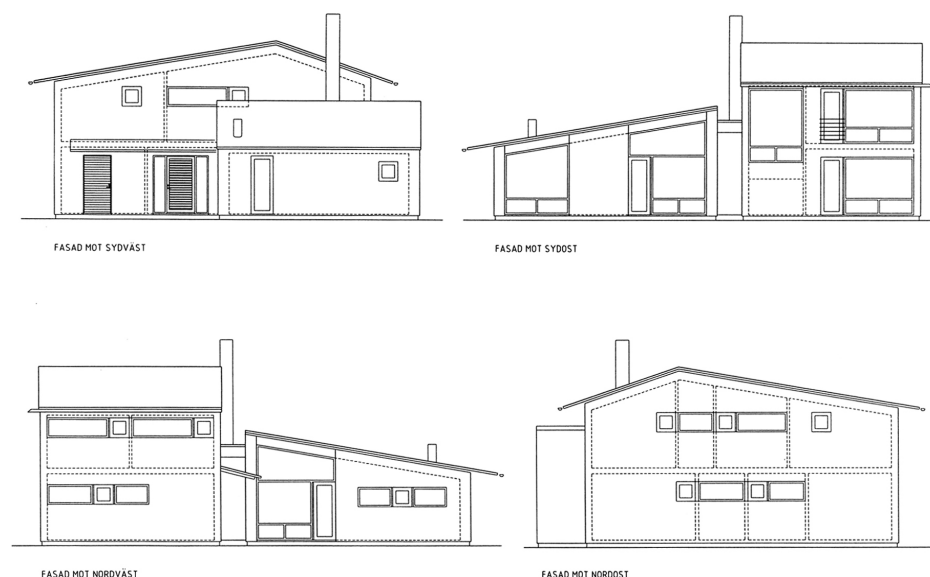
Vikt- och responsfunktionerna för ett endimensionellt värme flöde beräknas analytiskt genom att tillämpa en kombination av Fourier serier och Laplacetransformer. En exakt lösning erhålls relativt snabbt och väggens termiska beteende kan enkelt åskådliggöras grafiskt i form av vikt- och responsfunktioner. Därefter sker en diskretisering så att viktning mot temperaturerna blir möjlig.

Hur den analytiska lösningen går till behandlas inte i den här rapporten, men finns att läsa om i (Wentzel, 2005).

5 Undersökning av energiförbrukning

5.1 Det massiva trähuset i Fristad

Huset som ligger till grund för detta arbete är en enfamiljsvilla på 180 m². Villan är uppförd av AB Fristad Bygg och byggd av helmassiva prefabricerade träelement, utan extra värmeisolering. Det är det första helt massiva trähuset med denna konstruktion som byggts i Norden (Byggindustrin, 2004). Elementen består av flera lager krysslimmade träskivor som fogas samman med not och spont. Tjockleken på ytterväggarna är 248 mm. Innertaket och mellanväggarna består av 96 mm massivträ och mellanbjälklaget av 184 mm massivträ. Figur 5.1 visar husets fasader och deras orientering.



Figur 5.1 Det massiva trähuset i Fristad, som används som utgångspunkt i undersökningen. Ritning från Landströms Arkitekter.

Den låga tillbyggnaden är av lättbetong, men i datormodellen förenklas huset till att bestå av endast ett väggmaterial. Relativt stora delar av huset har fönster. 6,8 m² i sydväst (motsvarar 15 % av fasadytan), 35,6 m² i sydost (68 %), 22,5 m² i nordväst (41 %) och 6,7 m² i nordost (10 %).

Taket består av (utifrån och in):

Sedum, dränerande lager, råspont (22 mm), två lager mineralull (100 respektive 300 mm) samt massivträ (96 mm). $U_{\text{tak}} = 0,091 \text{ [W/m}^2\text{K]}$, då är inte sedum och dräneringslager medräknat.

Grunden är av typen platta-på-mark och består av 100 mm betong ovanpå 300 mm isolering. $U_{\text{grund}} = 0,129 \text{ [W/m}^2\text{K]}$.

Eftersom taket och grunden är så välisolerade, har de minimal inverkan på energiförlusterna – det mesta (5/6) transmitteras genom väggar och fönster.

Huset antas ha 3-glasfönster med U-värdet 1,0 [W/m²K]. Dörrarnas U-värde är lika stort.

5.2 De jämförda väggkonstruktionerna

I undersökningen jämförs den massiva träväggen med tre andra väggkonstruktioner:

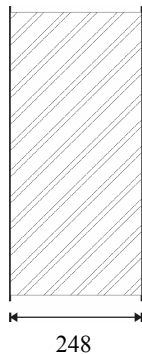
- lättregelvägg från A-hus
- lättbetongvägg
- massivträ kombinerad med utvändig isolering

Innerväggar och mellanbjälklag finns med i energiberäkningen, eftersom de bidrar till värmelagring. Dessa är av samma material som de olika ytterväggarna. De termiska egenskaperna för de material som ingår i de olika väggkonstruktionerna finns i tabell 5.1.

Tabell 5.1 Materialdata

Material	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c [Ws/kgK]
Trä, Massivträ	0,14	500	1500
Lättbetong	0,14	500	1000
Gips	0,22	800	900
Isolering	0,04	150	800
Betong	1,7	2300	900

5.2.1 Massivträ



Ytterväggskonstruktion: 248 mm massivträ

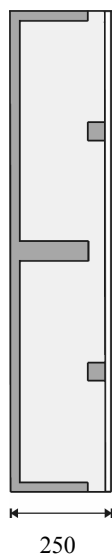
$$U_{\text{massivträ}} = 0,515 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Innerväggar: 96 mm massivträ

Mellanbjälklag: 184 mm massivträ

5.2.2 Lättregelvägg

Lättregelväggen representeras av en typisk vägg från A-hus AB – ett svenskt företag som tillverkar och levererar prefabricerade villor, fritidshus och flerfamiljehus, vars stomme består av trä. Bilden visar hur väggkonstruktionen ser ut efter att den har förenklats. Det mörkgrå är träpanel och träreglar, det ljusgrå isolering och det vita gips. För enkelhets skull, tas inte regler med i innerväggarna och mellanbjälklag. Vidare förenklas mellanbjälklaget till att ha samma uppbyggnad som innerväggen.



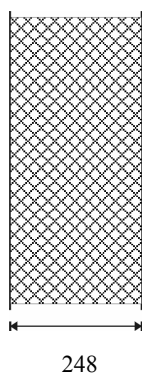
Ytterväggskonstruktion (utifrån och in): 22 mm träpanel, 170+45 mm isolering och reglar, 13 mm gips

$$U_{\text{lättregelvägg}} = 0,183 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Innerväggar: 13 mm gips, 45 mm isolering, 13 mm gips

Mellanbjälklag: 13 mm gips, 120 mm isolering, 13 mm gips

5.2.3 Lättbetong



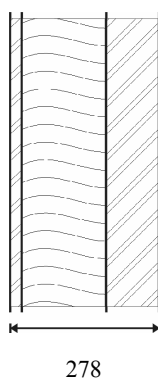
Ytterväggskonstruktion: 248 mm lättbetong

$$U_{\text{lättbetong}} = 0,515 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Innerväggar: 96 mm lättbetong

Mellanbjälklag: 184 mm lättbetong

5.2.4 Massivträ + isolering



Ytterväggskonstruktion (utifrån och in): 22 mm träpanel, 160 mm isolering, 96 mm massivträ

$$U_{\text{trä-isolering}} = 0,199 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Innerväggar: 96 mm massivträ

Mellanbjälklag: 184 mm massivträ

6 Metod och genomförande

Energiförluster för ett hus beror på utomhusklimatet och husets byggnadsfysikaliska konstruktion. Att modellera dessa processer är mycket komplext, varför förenklingar av verkligheten måste göras. En modell kan vara mer eller mindre detaljerad. I denna undersökning har jag försökt att ta med det som är relevant för energiförlusterna och utelämnat det som ej påverkar inomhusklimatet nämnvärt. De indata som funnits tillgängliga har också inneburit begränsningar.

6.1 Antaganden - yttre klimat

Förutom att beakta utomhustemperaturens variation ger hänsyn till yttre påverkan som vind, sol, luftfuktighet och långvågig strålning ett mer verklighetstroget utomhusklimat. Problemet är dock att det är svårt att få tillgång till meteorologiska data för vind, luftfuktighet och molnighet. Förenklingar av utomhusklimatet har fått göras. Följande antaganden har gjorts:

Solstrålning - kortvågig strålning:

Solens uppvärmning av fasader och tak påverkar inte inomhustemperaturen nämnvärt och kan därför helt försummas (Hagentoft, 2001). Däremot har solinstrålning genom fönster stor betydelse för inomhustemperaturen, och är därför medtagen.

Värmestrålning - långvågig strålning:

Den långvågiga utstrålningen är störst från en horisontell yta (exempelvis ett plant tak), eftersom den är vänd direkt mot atmosfären och ej skymd av andra föremål. Atmosfärens inkommande långvågiga strålning är av betydelse främst då det finns låga moln. Detta ger att den långvågiga strålningen (framförallt nattutstrålning) är större vid klar än vid molnig himmel (Petersson, 2001). Eftersom taket i det undersökta huset är så välisolerat, antas att nattutstrålningens inverkan kan försummas.

Mark:

I programmet är inte isoleringsförmågan i marken medtagen, vilket kan liknas vid att huset står på plintar. Detta ger utomhusklimat under grunden, men i och med att grunden är så välisolerad är energiförlusterna genom den försumbar.

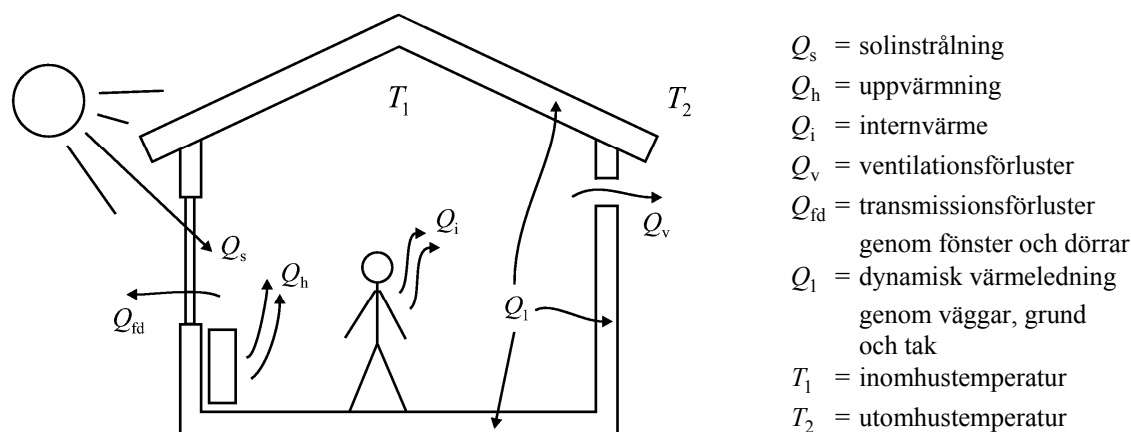
Då beräkningarna påbörjas antas att byggnaden stått uppe en tid, så att obalanser från byggtiden ställt in sig. I undersökningen baseras energiförlusterna på utomhustemperaturen (METEONORM 4.0) och solinstrålningen (IBPT) genom fönstren. Data avser Säve utanför Göteborg.

6.2 Värmebalans

För att man ska kunna utnyttja värmelagringseffekten, måste inomhustemperaturen tillåtas att variera, dock inom inte alltför okomfortabla gränser.

För att kunna beräkna inomhustemperaturens variation samt erforderlig energiförbrukning för en byggnad, utgår man från att värmetillförsel och värmeförluster är lika stora. Detta kallas värmebalansen för en byggnad.

Figur 6.1 och formel 6.1 beskriver hur värmebalansen ser ut i denna modell:



Figur 6.1 Husets värmebalans. Värmetillförsel kommer från solinstrålning, uppvärmning och internvärme. Förlusterna består av ventilation, transmission och absorption.

$$\underbrace{Q_s + Q_h + Q_i}_{\text{tillförsel}} = \underbrace{Q_v + Q_{fd} + Q_l}_{\text{förluster}} \quad (6.1)$$

6.3 Indata

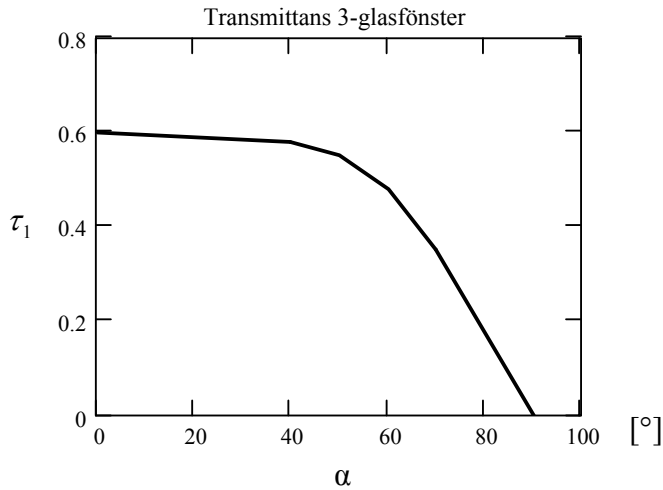
I detta avsnitt beskrivs de olika komponenterna i värmebalansen (6.1) mer ingående.

6.3.1 Solinstrålning Q_s

Solstrålning kan delas upp i direkt och diffus strålning. Den diffusa strålningen, som kommer från alla infallsvinklar, består av spritt ljus från luftmolekylerna och reflekterat ljus från molnen. Andelen diffus strålning är större vid mulen himmel än vid klar himmel, eftersom strålningen då reflekteras mot fler vattenpartiklar (Petersson, 2001). Fördelningen mellan den direkta solstrålningen och den diffusa beror på solvinkeln och molnigheten. Denna information har sammanställts i databasen International Building Physics Toolbox, framtagen för att användas inom byggnadsfysiken. Den direkta solstrålningen I_{dir} och den diffusa I_{diff} , justeras beroende på molnighet, infallsvinkel α , fasadorientering och fönstrens transmittans. Dessa data har jag fått från Angela Sasic Kalagasidis vid institutionen för byggnadsfysik på Chalmers.

Den direkta strålningen I_{dir} blir olika för olika fasader. Beroende på solens infallsvinkel mot fönstret blir transmittansen olika. Ju större infallsvinkel α desto lägre transmittans.

För 3-glasfönster gäller att transmittansen τ_1 blir, se figur 6.2 (ASHRAE Fundamentals, 1997):



Figur 6.2 Transmittansen τ_1 för 3-glasfönster beroende på infallsvinkel α .

Den del av den direkta solstrålningen som transmitteras genom fönstren blir:

$$I'_{\text{dir}} = I_{\text{dir}} \cdot \tau_1(\alpha) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6.2)$$

Transmittansen för diffus strålning beror ej på någon infallsvinkel utan sätts till ett konstant värde. Denna är samma för alla fasader. För 3-glasfönster blir transmittansen $\tau_2 = 0,68$ (Ashrae Fundamentals, 1997). Diffus strålning som kommer in:

$$I'_{\text{diff}} = I_{\text{diff}} \cdot \tau_2 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6.3)$$

Total inkommande strålning blir:

$$I'_{\text{dir}} + I'_{\text{diff}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6.4)$$

Detta multipliceras med en så kallad shading coefficient $SC = 0,69$ som tar hänsyn till fönsterkarmar och fönstrens smutsighet (Ashrae Fundamentals, 1997).

På grund av solavskärmning, exempelvis utstickande taksprång, träd och andra byggnader, antas att solinstrålningen minskas ytterligare. Ett antagande är att 50 % av den direkta strålningen skuggas bort, vilket ger en total instrålningsintensitet I_{tot} enligt följande:

$$I_{\text{tot}} = 0,69 \cdot (0,5 \cdot I'_{\text{dir}} + I'_{\text{diff}}) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6.5)$$

Den totala strålningen Q_s som kommer in i huset blir summan av varje fasads strålningsintensitet I_{tot} multiplicerat med dess fönsterarea A :

$$Q_s(t) = I_{\text{tot}, SO}(t) \cdot A_{SO} + I_{\text{tot}, SV}(t) \cdot A_{SV} + I_{\text{tot}, NO}(t) \cdot A_{NO} + I_{\text{tot}, NV}(t) \cdot A_{NV} \text{ [W]} \quad (6.6)$$

$$A_{SO} = 35,6 \text{ m}^2 \quad A_{SV} = 6,8 \text{ m}^2 \quad A_{NO} = 6,7 \text{ m}^2 \quad A_{NV} = 22,5 \text{ m}^2$$

6.3.2 Uppvärmning Q_h

Värmesystemet är satt till att vara en funktion av innertemperaturen. Detta sätts på med en effekt Q_h då temperaturen inne sjunker under 20 °C enligt följande:

$$\begin{aligned} Q_h(t) &= 4000 \cdot (20 - T_1(t)) \text{ [W]} & \text{då } T_1 < 20 \text{ °C} \\ Q_h(t) &= 0 \text{ [W]} & \text{då } T_1 \geq 20 \text{ °C} \end{aligned} \quad (6.7)$$

6.3.3 Internvärme Q_i

Internvärmen är uppskattad för 2 vuxna och 2 barn som antas bo i huset. Vid vila alstrar varje person 100 W och vid aktivitet 300 W (Petersson, 2001).

Internvärme under ett typiskt veckodagsdygn:

kl 06-08	1200 [W]	Morgonsysslor
kl 08-15	0 [W]	Ingen hemma
kl 15-20	1200 [W]	Eftermiddags- och kvällsaktivitet
kl 20-06	400 [W]	Lugn aktivitet och vila

Internvärme under ett typiskt helgdygn:

kl 09-10	1200 [W]	Morgonsysslor
kl 10-13	300 [W]	Bara några hemma
kl 13-15	1200 [W]	Lunch
kl 15-17	300 [W]	Bara några hemma
kl 17-22	1200 [W]	Eftermiddags- och kvällsaktivitet
kl 22-09	400 [W]	Lugn aktivitet och vila

 (6.8)

I modellen antas att internvärmen Q_i är samma varje vecka hela året.

6.3.4 Ventilation Q_v

Ventilationen i modellen är satt till grundventilation på konstant $n = 0,5$ omsättningar per timme. Då temperaturen inomhus (T_1) stiger över 25 °C ökar ventilationen till 2 omsättningar i timmen. Den extra ventilationen fungerar som kylning, något annat kylsystem finns inte.

$$\begin{aligned} n &= 0,5 \text{ [oms/h]} & \text{då } T_1 \leq 25 \text{ °C} \\ n &= 2,0 \text{ [oms/h]} & \text{då } T_1 > 25 \text{ °C} \end{aligned} \quad (6.9)$$

Kylningsförlusterna Q_v blir:

$$Q_v(t) = K_v \cdot [T_1(t) - T_2(t)] \text{ [W]} \quad (6.10)$$

$$\text{där } K_v(T_1) = \frac{n(T_1)}{3600} \cdot V \cdot \rho c_{\text{luft}} \text{ [W/K]} \quad (6.11)$$

Husets volym $V = 513 \text{ m}^3$.

6.3.5 Transmissionsförluster genom fönster och dörrar Q_{fd}

Värmelagringen i fönster och dörrar antas vara så liten att den kan försummas, endast transmissionsförluster förekommer. Q_{fd} blir direkt proportionell mot den aktuella temperaturskillnaden:

$$Q_{fd}(t) = K_{12fd} \cdot [T_1(t) - T_2(t)] \quad [\text{W}] \quad (6.12)$$

$$K_{12fd} = A_{fd} \cdot U_{fd} \quad [\text{W/K}] \quad (6.13)$$

U-värdet, U_{fd} , är satt till 1,0 [W/m²K] och arean $A_{fd}=75,7 \text{ m}^2$.

6.3.6 Dynamisk värmeledning i väggar, grund och tak Q_1

Den dynamiska värmeledningen i väggarna, grunden och taket beräknas med hjälp av formel (4.14):

$$Q_{1,n} = \bar{K}_1 \cdot [T_{1,n} - \bar{T}_{1a,n}] + K_{12} \cdot [\bar{T}_{1t,n} - \bar{T}_{2t,n}]$$

Beräkningsmodellen är endimensionell, varför väggar, grund och tak räknas ihop till ett enda material. Husets totala transmittiva responsfunktion $Q_{12}(\tau)$, blir summan av väggarnas, grundens och takets transmittiva responsfunktioner $q_{12,vägg}$, $q_{12,grund}$, $q_{12,tak}$ [W/m²K], multiplicerade med respektive areor:

$$Q_{12}(\tau) = q_{12,vägg}(\tau) \cdot A_{vägg} + q_{12,grund}(\tau) \cdot A_{grund} + q_{12,tak}(\tau) \cdot A_{tak} \quad [\text{W/K}] \quad (6.14)$$

$$\text{där } Q_{12,vägg}(\tau) = q_{12,vägg}(\tau) \cdot A_{vägg}, \quad Q_{12,grund}(\tau) = q_{12,grund}(\tau) \cdot A_{grund} \text{ osv.} \quad (6.15)$$

$$A_{vägg}=145,2\text{m}^2 \quad A_{tak}=125,7\text{m}^2 \quad A_{grund}=123,1\text{m}^2 \quad A_{innervägg}=210\text{m}^2 \quad A_{mellanbjälklag}=124\text{m}^2$$

Den totala termiska konduktansen K_{12} blir:

$$K_{12} = A_{vägg} \cdot U_{vägg} + A_{tak} \cdot U_{tak} + A_{grund} \cdot U_{grund} \quad [\text{W/K}] \quad (6.16)$$

$$U_{tak} = 0,091 \text{ [W/m}^2\text{K]}, \quad U_{grund} = 0,129 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Vid beräkning av den absorptiva responsfunktionen $Q_{1a}(\tau)$, finns förutom vägg, grund och tak, även innerväggarna och mellanbjälklaget med, eftersom de bidrar till värmelagringen. Temperaturen antas vara samma i hela huset, vilket gör att inget transmittivt flöde utan endast absorptivt flöde påverkar innerväggarna. Detta simuleras genom att innerväggarnas tjocklek delas på hälften, med ett inre motstånd som är "oändligt", vilket gör att det transmittiva flödet blir noll. Båda sidorna av väggen bidrar till värmelagringen. Motsvarande gäller för mellanbjälklaget. Den totala absorptiva responsfunktionen $Q_{1a}(\tau)$ blir:

$$Q_{1a}(\tau) = q_{1a,vägg}(\tau) \cdot A_{vägg} + q_{1a,grund}(\tau) \cdot A_{grund} + q_{1a,tak}(\tau) \cdot A_{tak} + q_{1a,innervägg}(\tau) \cdot A_{innervägg} + q_{1a,mellanbjälklag}(\tau) \cdot A_{mellanbjälklag} \quad [\text{W/K}] \quad (6.17)$$

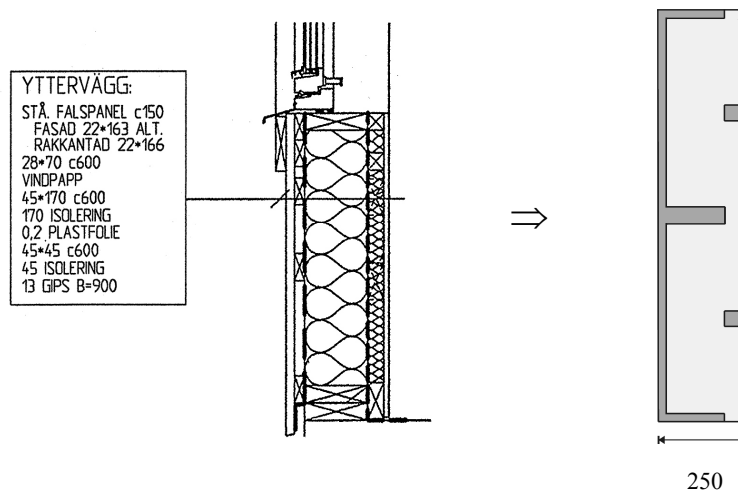
Den totala absorptiva konduktansen $\bar{K}_1$ beräknas därefter med (4.17):

$$\bar{K}_1 = \frac{1}{h} \cdot \int_0^h Q_{1a}(\tau) d\tau = \bar{Q}_{1a}(0)$$

Husets totala viktfaktorer beräknas med hjälp av (4.19):

$$\kappa_{1a,v} = \frac{\bar{Q}_{1a}(vh-h) - \bar{Q}_{1a}(vh)}{\bar{K}_1} \quad \text{och} \quad \kappa_{12,v} = \frac{\bar{Q}_{12}(vh) - \bar{Q}_{12}(vh-h)}{K_{12}}$$

Mathcad-programmet som beräknar responsfunktionerna kan bara räkna på endimensionella homogena väggskikt. På grund av reglarna i lättregelväggen måste därför responsfunktionerna beräknas numeriskt. Detta görs i ett separat program HEAT 2. Figur 6.3 höger visar hur väggen förenklas i programmet.



Figur 6.3 Ytterväggskonstruktionen (från A-hus AB) och hur den förenklas i HEAT 2. Det mörkgrå är träpanel och träreglar, det ljusgrå isolering och det vita gips.

Väggen delas in i många små celler. Därefter beräknas flödet per kvadratmeter in i och ut ur i konstruktionen numeriskt för temperatursteget 1-0 °C. På så sätt erhålls väggens admittiva och transmittiva responsfunktionerna, som i sin tur ger de absorptiva och transmittiva viktfaktorerna, samt $\bar{K}_1$ och K_{12} . Även lättregelväggens U-värde tas fram i detta program.

6.4 Beräkning av inomhustemperaturen

För beräkning av inomhustemperaturen utgår man från värmebalansen (6.1). Vid diskretisering sätts tiden $t = nh$, vilket betecknas med index n . Q_h och Q_v beror förutom på n även på värdet av föregående tidsstegs innetemperatur, $T_{1,n-1}$.

Tillförd energi blir $Q_{s,n}$, $Q_{h,n}(T_{1,n-1})$ och $Q_{i,n}$ (se formlerna 6.6, 6.7 och 6.8).

På förlustsidan finns förutom $Q_{l,n}$ (4.14), även $Q_{v,n}(T_{1,n-1})$ (6.10) och $Q_{fd,n}$ (6.12).

Dessa skrivs:

$$\begin{aligned} Q_{v,n}(T_{1,n-1}) &= K_v(T_{1,n-1}) \cdot [T_{1,n} - T_{2,n}] \\ Q_{fd,n} &= K_{12fd} \cdot [T_{1,n} - T_{2,n}] \end{aligned} \quad (6.18)$$

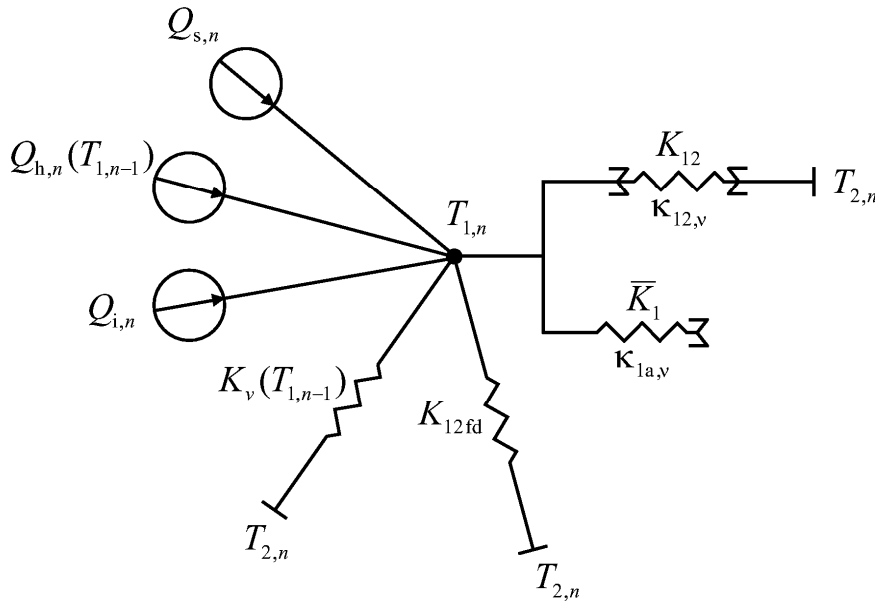
De viktade medeltemperaturerna från (4.16) utvecklas:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{1t,n} - \bar{T}_{2t,n} &= \sum_{v=0}^{\nu_s} \kappa_{12,v} [T_{1,n-v} - T_{2,n-v}] = \kappa_{12,0} \cdot T_{1,n} - \kappa_{12,0} \cdot T_{2,n} + \sum_{v=1}^{\nu_s} \kappa_{12,v} [T_{1,n-v} - T_{2,n-v}] \\ \bar{T}_{1a,n} &= \sum_{v=1}^{\nu_s} \kappa_{1a,v} T_{1,n-v} \end{aligned} \quad (6.19)$$

$T_{1,n}$ [°C] kan nu lösas ut ur (6.1):

$$\begin{aligned} T_{1,n} &= \left[Q_{s,n} + Q_{h,n}(T_{1,n-1}) + Q_{i,n} + K_v(T_{1,n-1}) \cdot T_{2,n} + K_{12fd} \cdot T_{2,n} + \bar{K}_1 \cdot \sum_{v=1}^{\nu_s} \kappa_{1a,v} T_{1,n-v} + \right. \\ &\quad \left. + K_{12} \cdot \kappa_{12,0} \cdot T_{2,n} + K_{12} \cdot \sum_{v=1}^{\nu_s} \kappa_{12,v} (T_{2,n-v} - T_{1,n-v}) \right] \cdot [K_v(T_{1,n-1}) + K_{12fd} + \bar{K}_1 + K_{12} \cdot \kappa_{12,0}]^{-1} \end{aligned} \quad (6.20)$$

Ovanstående formel 6.20 kan också beskrivas som en krets enligt figur 6.4.



Figur 6.4 Krets som visar hur temperaturen $T_{1,n}$ förhåller sig till utomhustemperatur, ventilation, solinstrålning, internvärme och uppvärmning.

6.5 Beräkningsgång

I programmet beräknas först byggnadens totala transmittiva och absorptiva viktfaktorer. Med hjälp av ovanstående formel (6.20) beräknas sedan innetemperaturen $T_{i,n}$ för ett helt år. Begynnelsetemperaturen inne är 20°C .

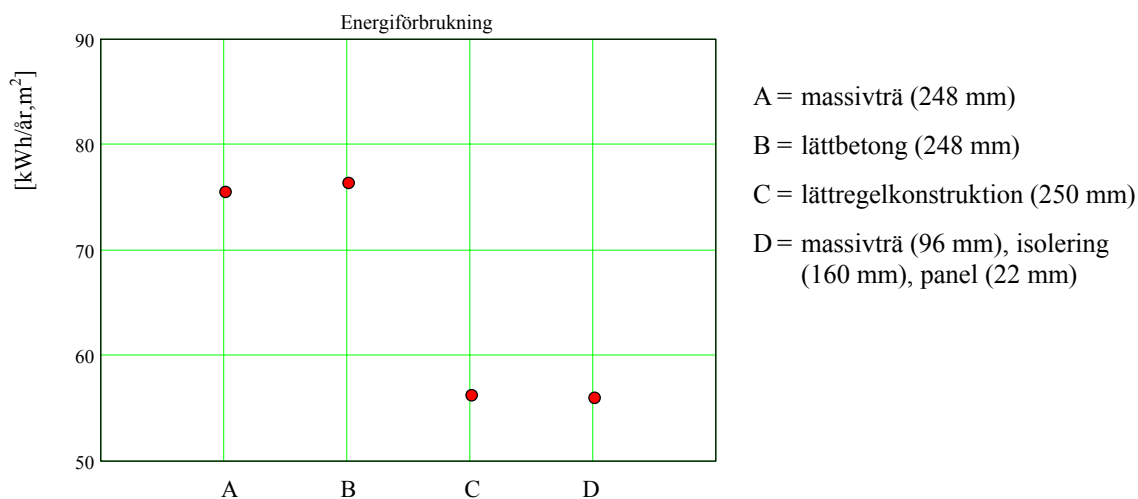
Tidssteget h är satt till 1 timme. Samtidigt beräknas energiförbrukningen Q_h timme för timme.

Årsförbrukning, inomhustemperaturens variation och timmar med extra ventilation (2 oms/timme), tas fram för att sedan kunna jämföras med de andra väggmaterialen.

7 Resultat

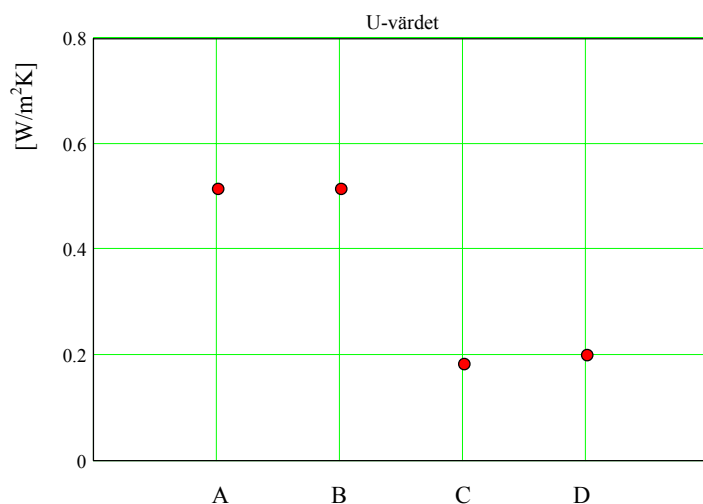
7.1 Årlig energiförbrukning

Programmet har körts för de fyra olika väggkonstruktionerna. Den årliga energiförbrukningen i kWh per kvadratmeter boyta, blir enligt figur 7.1:



Figur 7.1 Energiförbrukningen i kWh/år,m².

Jämför man energiförbrukningen med de olika väggarnas U-värden, ser man att dessa är starkt korrelerade. Se figur 7.2.



Figur 7.2 De olika väggkonstruktionernas U-värden.

Detta visar att energiförbrukningen till största del är en funktion av väggens U-värde. En liten skillnad i energiförbrukning finns dock mellan den massiva träväggen (A) och lättbetongväggen (B), trots att U-värdet är exakt lika stort. Värmekapaciteten är det enda som skiljer A och B åt, den är 50 % större för massivträ än för lättbetong ($7,5 \cdot 10^5$ [Ws/m³K] mot $5 \cdot 10^5$ [Ws/m³K]). Ändå blir skillnaden i energiförbrukning

inte större än drygt 1 %. Olikheten i energiförbrukning mellan lättregelväggen (C) och massivträ+isolering (D) är försumbar, trots att U-värdet är 8,7 % lägre för C än för D.

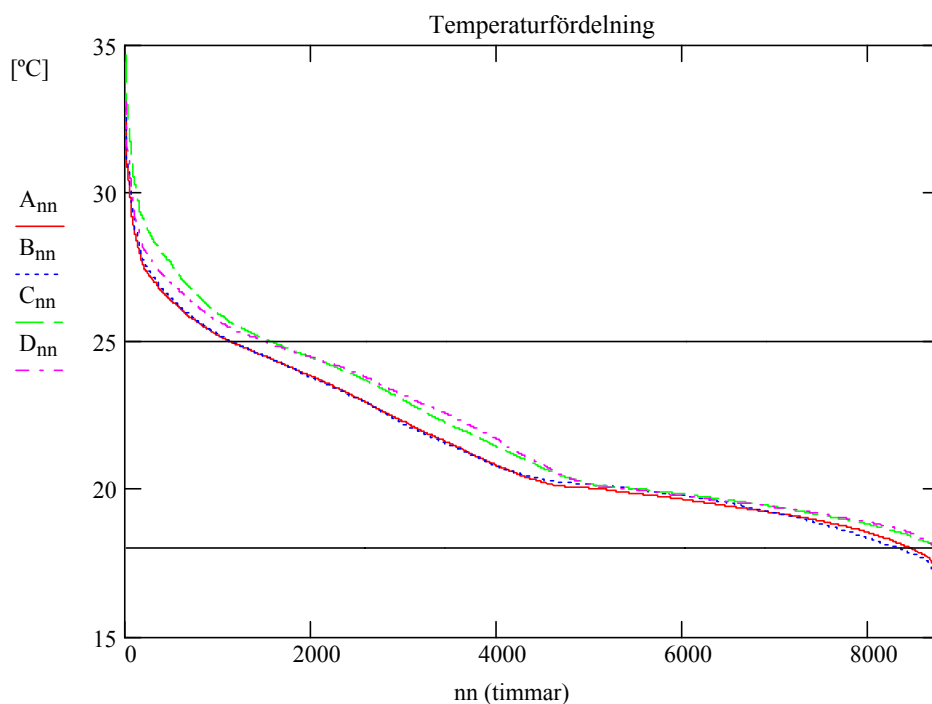
En närmare undersökning av hur skillnaden i energiförbrukning blir för väggar med samma U-värde, finns i kapitel 8.

7.2 Komfort och ventilation

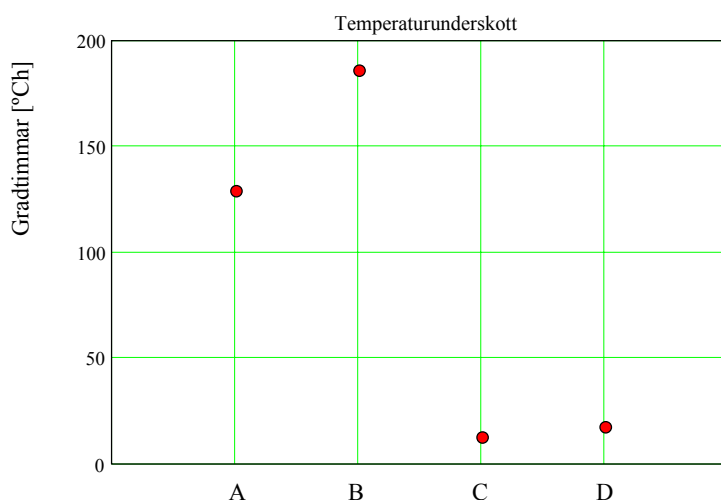
Den största skillnaden mellan A och B, respektive C och D finns inte i energiförbrukningen utan i husets invändiga termiska komfort.

Figur 7.3 visar inomhustemperaturen för alla årets 8760 timmar, sorterade i storleksordning. Med god komfort menas här att innetemperaturen så många timmar som möjligt under året ligger mellan 18 och 25 °C, samt att få timmar med extra ventilation (2 oms/timme) behövs.

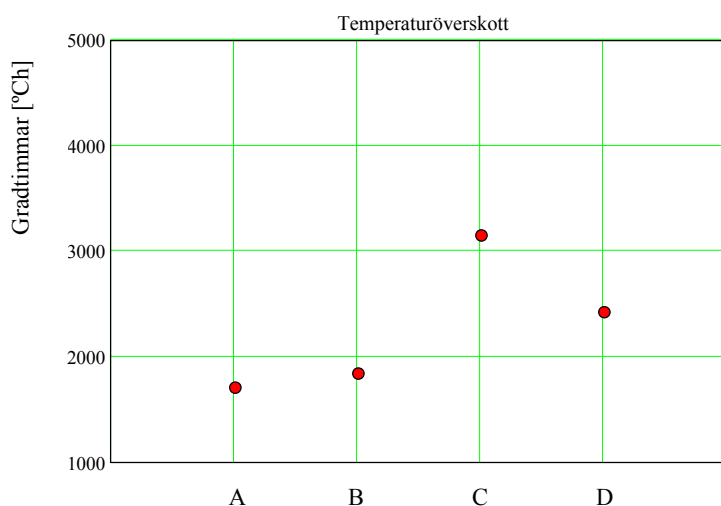
Ett mått på dålig komfort, är ytorna som begränsas av kurvorna och komfortgränserna 18 och 25 °C. Ytorna får enheten gradtimmar [°C · h] och är proportionell mot den överskottsvärme respektive underskottsvärme som uppstår under året. Ju större yta, desto sämre komfort.



Figur 7.3 Inomhustemperaturen för årets 8760 timmar, med temperaturerna sorterade i storleksordning.



Figur 7.4 Temperaturunderskott i gradtimmar [°Ch] för de olika väggkonstruktionerna.



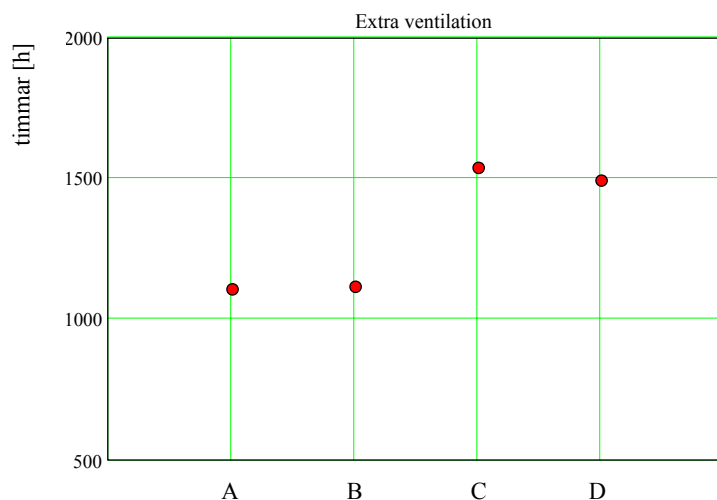
Figur 7.5 Temperaturöverskott i gradtimmar [°Ch] för de olika väggkonstruktionerna.

Figur 7.4 visar antalet gradtimmar per år under 18 °C. Lättbetong och massivträ har betydligt fler gradtimmar än de övriga. Skillnaden mellan massivträ och lättbetong beror på skillnaden i värmekapacitet, eftersom U-värdena är desamma. Huset av lättbetong har 45 % mer underskottsvärme än massivträkonstruktionen. De övriga konstruktionerna understiger alla 18 °C under ytterst begränsad tid.

Motsvarande figur för antal gradtimmar över 25 °C, figur 7.5, visar på större värden och skillnader. Här ser man att massivträ (A) och lättbetong (B) har lägst antal gradtimmar, vilket beror på det låga U-värdet som ger större transmissionsförluster. Deras högre värmekapacitet leder också till bättre värmeutjämning. Figuren visar en stor skillnad mellan lättregelväggen (C) och massivträ+isolering (D). C har 30 % mer överskottsvärme än D, även om U-värdet är i stort sett lika stort. Det är träets förmåga till temperaturutjämning som utgör skillnaden.

Tittar man på antalet timmar med extra ventilation, se figur 7.6, ser man att huset med

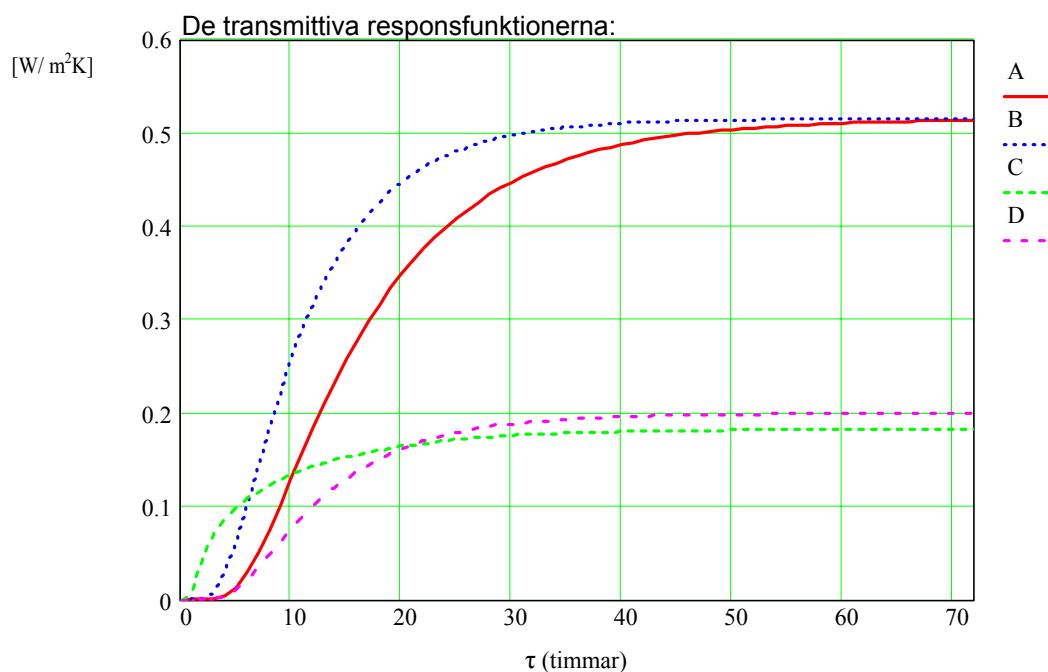
lättnregelväggar (C) behöver ventileras mest av alla konstruktioner. Ändå räcker det inte för att sänka temperaturen.



Figur 7.6 Antal timmar då extra ventilation [2 oms/timme] behövs.

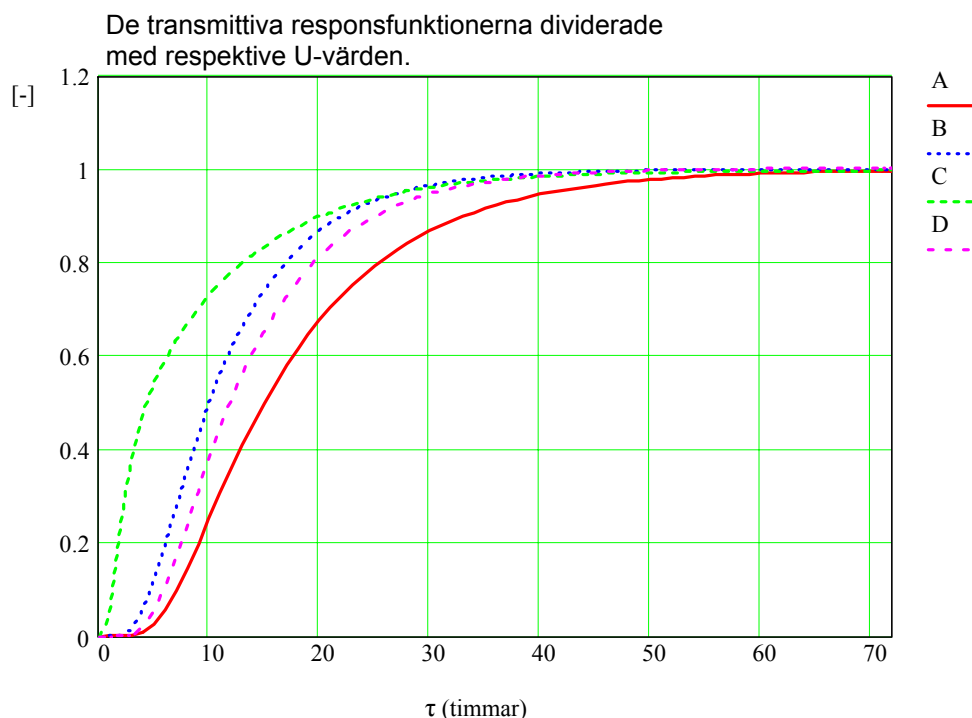
7.3 Respons- och viktfunktioner

Ett av syftena med rapporten har varit att undersöka om det går att se en koppling mellan utseendet på väggarnas respons- och viktfunktioner och byggnadens årliga energiförbrukning samt inomhustemperaturens variation. Figur 7.7 och 7.9 visar de fyra väggarnas transmittiva respektive absorptiva responsfunktioner. Dessa är beräknade analytiskt för 1 kvadratmeter av varje vägg (förutom lättnregelväggens responsfunktioner som beräknats i HEAT 2). Figur 7.8 visar de transmittiva responsfunktionerna dividerade med deras respektive stationära flöden. Figurerna 7.10 och 7.11 visar viktfunktionerna beräknade enligt (4.10).



Figur 7.7 De transmittiva responsflödena $q_{12}(\tau)$ [W/m²K].

Den transmittiva responsfunktionen, figur 7.7, visar hur lång tid det tar för värmeflödet att bli stationärt efter ett temperatursteg. Eftersom responsflödet har beräknats för en kvadratmeter av respektive vägg, blir det stationära flödet samma som väggens U-värde. För att lättare kunna studera hur snabbt kurvorna når det stationära värdet, divideras dessa med sina respektive U-värden, se figur 7.8.



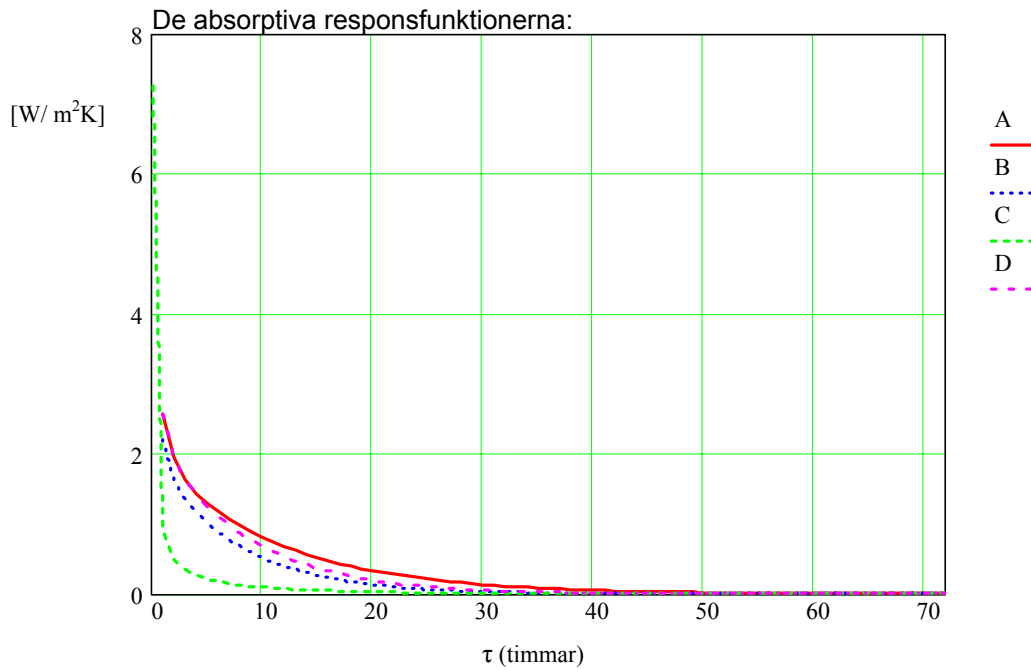
Figur 7.8 Det transmittiva responsflödena $q_{12}(\tau)$ dividerade med respektive U-värden. Funktionerna blir enhetslösa och går alla mot 1.

Man ser att lättregelväggen (C) antar sitt stationära värde först av alla, efter ca 50 timmar. Därefter kommer massivträ+isolering (D) och lättbetong (B) på ca 60 timmar medan massivträ (A) börjar närma sig först vid 70 timmar.

Den största skillnaden mellan väggarna är dock hur lång tid det tar innan stegresponsen ger upphov till ett transmittivt flöde, samt hur snabbt flödet sedan ändras. I figur 7.8 ser man att lättregelväggen (C) är snabbast, följt av B, D och A som är långsammast.

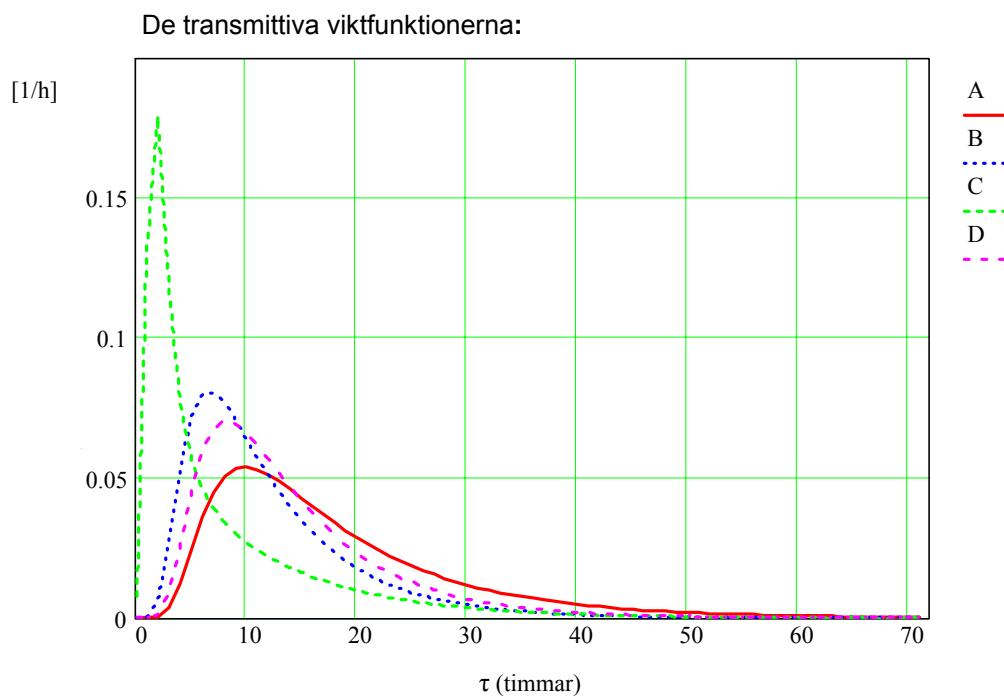
För väggarna A och B beror skillnaden på värmekapaciteten. En högre värmelagrande förmåga leder således till en långsammare ändring av responsflödet. Motsvarande kan man se mellan C och D – eftersom flödet D ändras trögare än C, antas att denna vägg värmeutjämnar bättre.

Av resultaten tidigare i detta kapitel, tyder en högre värmelagrande förmåga på bättre komfort och en aning lägre energiförbrukning – förutsatt att man jämför väggar med samma U-värde.



Figur 7.9 De absorptiva responsflödena $q_{1a}(\tau)$ $[W/m^2K]$.

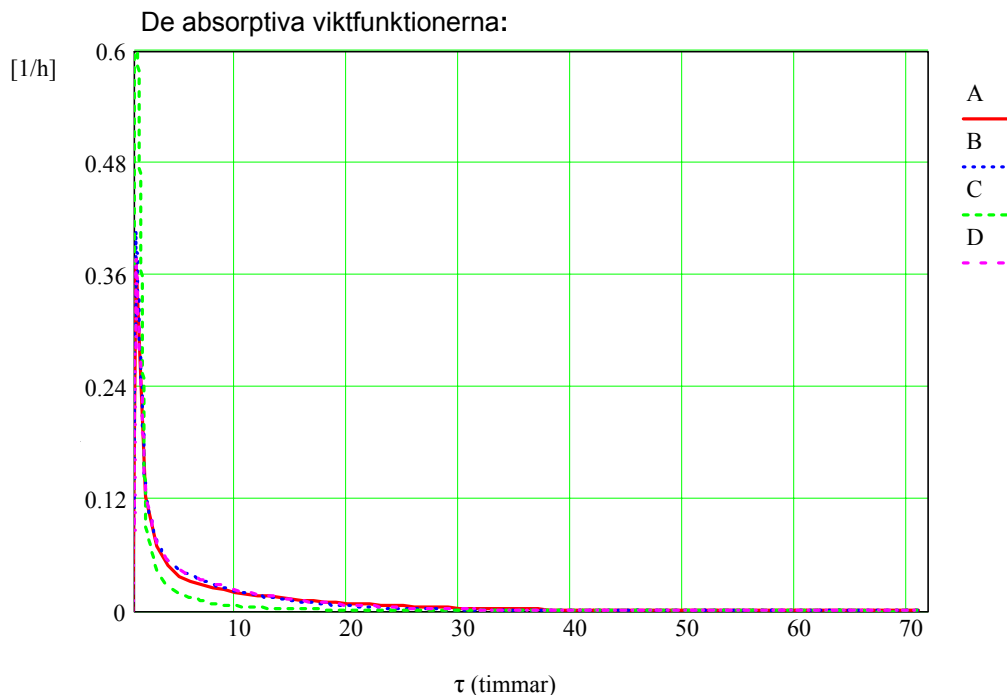
På motsvarande sätt är den absorptiva responsfunktionen, figur 7.9, ett mått på värmekapaciteten. Ju långsammare kurvan faller, desto bättre värmelagrande effekt, vilket motsvarar ackumulerat flöde under längre tid. Även här syns att lättregelväggen (C) har en jämförelsevis dålig värmelagrande förmåga. Bäst är den massiva träväggen (A).



Figur 7.10 De transmittiva viktfunktionerna, $\kappa_{12}(\tau)$ $[1/h]$.

Den transmittiva viktfunktionen är tidsderivatan av den normerade transmittiva responsfunktionen (se 7.8). Den åskådliggör tydligare när responsfunktionerna ändras

som mest (topparna). Ju snabbare kurvan närmar sig noll, desto snabbare når den sitt stationära värde. Ordningen är samma även här.



Figur 7.11 De absorptiva viktfunktionerna, $\kappa_{1a}(\tau)$ [1/h].

$\kappa_{1a}(\tau)$ är tidsderivatan av $Q_{1a}(\tau)$ dividerad med $-K_1$, och visar hur snabbt det absorptiva flödet ändras.

7.4 Slutsats

Simuleringen visar att energiförbrukningen för ett bostadshus till största del beror på väggens U-värde. Däremot är komforten i huset beroende av vilken väggkonstruktion man väljer.

Ur energisynpunkt är det ingen vits att bygga bostadshus helt i massivt trä. Med bara lite tilläggsisolering blir dock massivträet en konstruktion att räkna med. Med 160 mm isolering är den till och med bättre än ett typiskt lättregelvägg. Då massivträ kombineras med isolering drar man nytta av massivträets värmelagrande förmåga samtidigt som U-värdet blir lågt.

Genom att studera väggarnas respons- och viktfunktioner, kan man få vägledning om vilken av väggkonstruktionerna som ger den bästa termiska komforten i huset. Det verkar som att en snabbare ändring av responsflödena motsvarar en sämre värmeutjämnande förmåga, vilket leder till sämre komfort. Kurvorna kan också ge tips om vilken av väggkonstruktionerna som ger lägst energiförbrukning. Det förutsätter dock att U-värdena är relativt lika, eftersom energiförbrukningen främst beror på väggens U-värde.

8 Studie av termiskt beteende och årlig energiförbrukning för väggar med samma U-värde

Min handledare Eva-Lotta Wentzel på institutionen för Byggnadsfysik på Chalmers, har tillsammans med mig undersökt hur årlig energiförbrukning och invändig termisk komfort blir för väggkonstruktioner med samma U-värde, samt om det går att utläsa något samband mellan dessa och väggarnas viktfunktioner. Resultaten har redovisats på en konferens för byggnadsfysik på Island sommaren 2005 (Wentzel & Gollvik, 2005). Figurerna är hämtade från denna publikation.

8.1 De undersökta väggkonstruktionerna

6 väggkonstruktioner med samma U-värde = 0.515 W/m²K har undersökts. Dessa är (skikt från insida till utsida):

1. Gips (13 mm) isolering (63 mm) trä (20 mm)
2. Lättbetong (248 mm)
3. Massivträ (248 mm)
4. Isolering (69 mm) betong (100 mm)
5. Isolering (34 mm) betong (100 mm) isolering (34 mm)
6. Betong (100 mm) isolering (69 mm)

Materialegenskaper för väggskikten i de undersökta väggkonstruktionerna finns i tabell 5.1. 1 symboliserar en typisk lättregelvägg, medan 2 och 3 är samma som B och A i övriga rapporten. 4, 5 och 6 består alla av 100 mm betong och 69 mm isolering, bara placeringen av materialskikten skiljer dem åt. Innerväggar och mellanbjälklag är av samma material som ytterväggarna, men med tjocklekar på 10 respektive 184 cm.

8.2 Metod

Metoden för beräkning av energiförbrukningen är samma som den som beskrivs i kapitel 6. Beräkningen av innetemperaturen $T_{1,n}$ görs på samma sätt, förutom att internvärme ej är tillagt och att uppvärmningen $Q_{h,n}$ sker på annat sätt, se formel 8.1 och 8.2:

$$T_{1,n} = \left[Q_{s,n} + Q_{h,n}(T_{1,n-1}) + K_v(T_{1,n-1}) \cdot T_{2,n} + K_{12fd} \cdot T_{2,n} + \bar{K}_1 \cdot \sum_{\nu=1}^{\nu_s} \kappa_{1a,\nu} T_{1,n-\nu} + K_{12} \cdot \kappa_{12,0} \cdot T_{2,n} + K_{12} \cdot \sum_{\nu=1}^{\nu_s} \kappa_{12,\nu} (T_{2,n-\nu} - T_{1,n-\nu}) \right] \cdot \left[K_v(T_{1,n-1}) + K_{12fd} + \bar{K}_1 + K_{12} \cdot \kappa_{12,0} \right]^{-1} \quad (8.1)$$

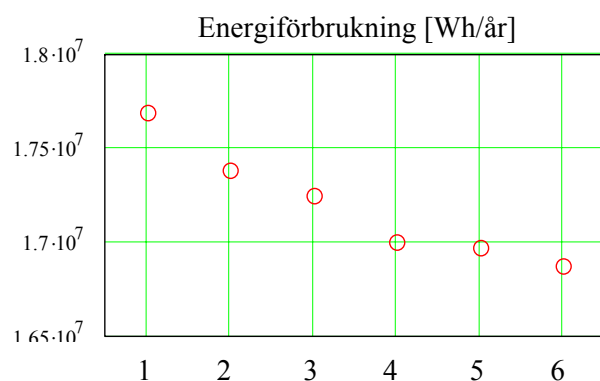
Uppvärmning $Q_{h,n}$ är en funktion av både inomhustemperatur och utomhustemperatur. Värmen sätts på då inomhustemperaturen ligger under 20 °C, och värmer proportionellt mot de transmissionsförluster som uppstår, enligt 8.2 nedan:

$$Q_{h,n} = (K_{12} + K_{12fd} + K_v(T_{1,n-1})) \cdot (20 - T_{2,n}) \text{ [W]} \quad \text{då } T_{2,n} < T_{1,n} < 20^\circ\text{C} \quad (8.2)$$

8.3 Resultat

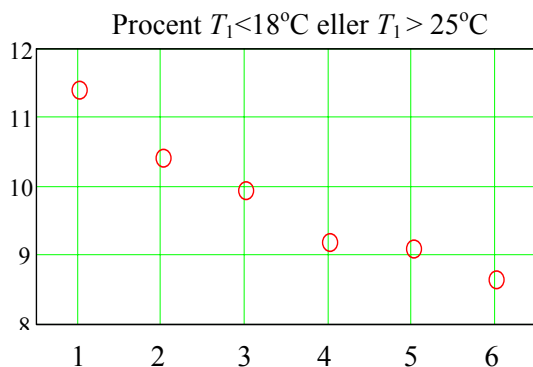
8.3.1 Resultat energiförbrukning och termisk komfort

Figur 8.1 visar hur den årliga energiförbrukningen [Wh/år] blir för de 6 olika konstruktionerna:



Figur 8.1 Energiförbrukningen i Wh/år.

Dålig termisk komfort mäts i den här studien i antal timmar som temperaturen ligger över 25 °C eller under 18 °C. Procentandelen sådana timmar per år, symboliserar husets termiska okomfort och kan ses i figur 8.2:



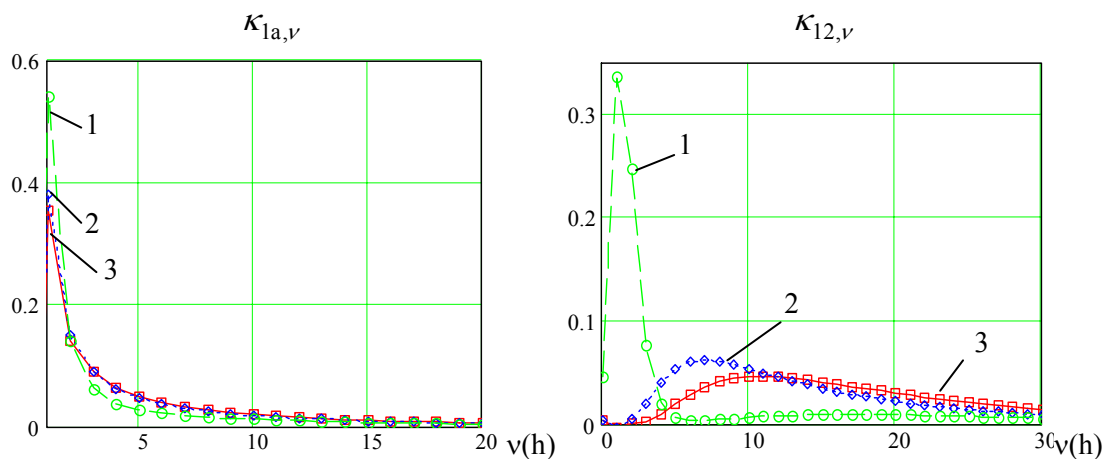
Figur 8.2 Procentandel timmar per år som inomhustemperaturen ligger över 25 °C eller under 18 °C.

Man ser en tydlig koppling mellan energiförbrukningen och förekomsten av oangenäma temperaturer. Skillnaden i energiförbrukning mellan 1 och 6 blir 5 %, trots att U-värdena är samma för alla väggkonstruktioner.

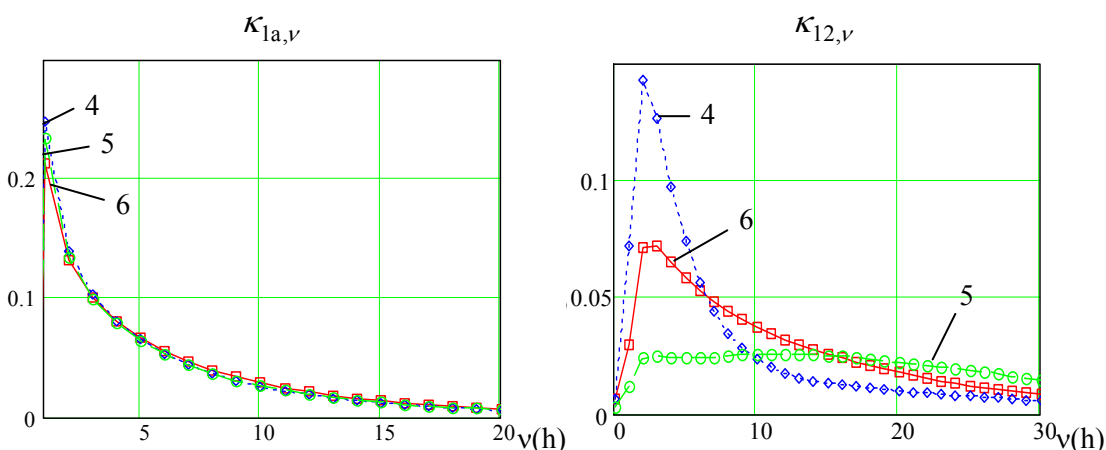
Det är intressant att se hur betong+isolering (4, 5 och 6) skiljer sig åt, bara genom att materialskikten placeras olika. Bäst i både energisynpunkt och termisk komfort, blir då betongen placeras på insidan och isoleringen på utsidan (6). Detta styrker resonemanget i avsnitt 2.2.

8.3.2 Byggnadens totala viktffaktorer

Energiberäkningen baseras på byggnadens totala transmittiva och absorptiva viktffunktioner $\kappa_{12,v}$ och $\kappa_{1a,v}$, enligt avsnitt 6.3.6. Utseendet på dessa visas i figur 8.3 och 8.4.



Figur 8.3 Byggnadens absorptiva viktffaktorer (vänster) och transmittiva viktffaktorer (höger) för väggtyperna gips+isolering+trä (1), lättbetong (2), massivträ (3).



Figur 8.4 Byggnadens absorptiva viktffaktorer (vänster) och transmittiva viktffaktorer (höger) för väggtyperna isolering+betong (4), isolering+betong+isolering (5), betong+isolering (6).

8.3.3 Jämförelse energiförbrukning, komfort och viktffunktioner

Det är svårt att se något samband mellan de transmittiva viktffunktionerna (figur 8.3 och 8.4, höger), energiförbrukningen (figur 8.1) och förekomsten av oangenäma temperaturer (figur 8.2). Konstruktion 6, som visat sig ha de bästa egenskaperna, har en transmittiv viktffunktion som ligger mellan de båda andra betong+isolering konstruktionerna 4 och 5.

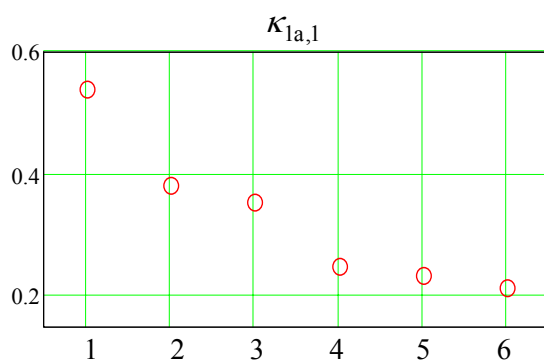
Studerar man däremot hur de absorptiva viktffunktionerna uppför sig (figur 8.3 och 8.4, vänster), ser man en tydlig koppling till energiförbrukningen och dålig termisk

komfort. Likheten ligger i hur snabbt kurvorna ändras. Genom att titta på första absorptiva viktfaktorn $\kappa_{1a,1}$, får man ett konkretare svar på detta.

Det första värdet $\kappa_{1a,1}$ beräknas utifrån $\kappa_{1a,v} = \frac{\bar{Q}_{1a}(vh-h) - \bar{Q}_{1a}(vh)}{\bar{K}_1}$ (4.19) och blir:

$$\kappa_{1a,1} = \frac{\bar{Q}_{1a}(0) - \bar{Q}_{1a}(h)}{\bar{K}_1} = \frac{\bar{K}_1 - \bar{Q}_{1a}(h)}{\bar{K}_1}. \quad (8.3)$$

Ju långsammare den absorptiva responsfunktionen sjunker desto lägre värde får man på $\kappa_{1a,1}$, enligt figur 4.10. Att den absorptiva responsfunktionen sjunker långsamt motsvarar en förmåga till ackumulerat flöde under längre tid, se figur 4.5, vilket är jämförbart med högre värmelagringsförmåga. Figur 8.5 visar de 6 undersökta byggnadernas första absorptiva viktfaktorer $\kappa_{1a,1}$. Man ser att det finns ett starkt samband mellan dessa värden, energiförbrukningen (figur 8.1) och den termiska komforten (figur 8.2).



Figur 8.5 Byggnadernas första absorptiva viktfaktor $\kappa_{1a,1}$.

8.4 Slutsats

Trots att alla undersökta väggkonstruktioner har samma U-värde blir energiförbrukningen ändå olika. Det finns en koppling mellan låg energiförbrukningen, god termisk komfort och ett lågt $\kappa_{1a,1}$. Placeringen av materialskikten har betydelse för energiförbrukningen – bäst är att placera material med hög värmekapacitet på väggens insida, vänt mot inomhusluften.

Av detta kan man dra slutsatsen att väggkonstruktioner med totalt sett högre värmelagringsförmåga kan ge en jämnare inomhustemperatur och en lägre energiförbrukning sett för ett helt år, trots att U-värdena är samma.

Jämförelsen av olika byggnaders $\kappa_{1a,1}$ skulle kunna användas som en första analys av vilken väggkonstruktion som ger lägst energiförbrukning. Det går dock endast att jämföra dessa faktorer då väggarnas U-värden är samma.

I kapitel 7.3 förefaller som om det räcker att studera antingen den transmittiva eller den absorptiva respons-/viktfunktionen för att kunna dra en slutsats om komforten. I 8.3.3 ser man att det endast är de absorptiva respons-/viktfunktionerna som kan analyseras i det syftet, förutsatt att U-värdena är lika stora.

9 Vidare studier

Det vore intressant att undersöka hur massivträ står sig jämfört med andra väggkonstruktioner för en annan typ av verksamhet än boende, till exempel kontor eller skola. Dessa verksamheter har högre internvärmealstring, vilket kanske gör att en större del av värmekapaciteten kan utnyttjas och på så vis ge lägre energiförbrukning och bättre termisk komfort än vad den här simuleringen visar.

Sambanden responsfunktioner/viktfunktioner/viktfaktorer, energiförbrukning och termisk komfort bör studeras vidare. Kanske kan fler samband mellan dessa hittas.

10 Referensförteckning

Referens- och litteraturlista:

ASHRAE Handbook of Fundamentals. 1997. Am. Soc. of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers, Atlanta GA.

Associerede Ingeniører ApS. 2001. *Massivtræ i byggeriet*. Træbranchens Oplysningsråd, Lyngby, Danmark.

Bokalders, V & Block, M. 2004. *Byggeekologi: kunskaper för ett hållbart byggande*. Svensk Byggtjänst Förlag, Stockholm.

Byggindustrin. 2004. *Bygga trähus av platta paket*. Byggindustrin 18/04.

Claesson, J. 2003. *Dynamic Thermal Networks. A Methodology to Account for Time-dependent Heat Conduction*. Proceedings of the 2nd International Conference on Research in Building Physics, Leuven, Belgium.

Hagentoft, C-E. 1999. *Ger en tung stomme lägre uppvärmningsbehov?* Institutionen för Byggnadsfysik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Hagentoft, C-E. 2001. *Introduction to Building Physics*. Studentlitteratur, Lund.

Hagentoft, C-E. 2002. *Vandrande fukt och strålande värme*. Studentlitteratur, Lund.

Hagentoft, C-E & Svensson, C. 2000. *Energieffektivt och god termisk komfort genom värmelagring i byggnaden*. Bygg & Teknik 5/00.

Massivträ Handboken. 2002. *Kap. 5.3 Massivträhusets fukt- och värmetekniska egenskaper*. Hämtat från www.solidwood.nu.

Petersson, B-Å. 2001. *Tillämpad byggnadsfysik*. Studentlitteratur, Lund.

Ståhl, F. 2000. *Inverkan av termisk massa på en byggnads energibehov under dess livscykel, System- och komponentanalys*. Institutionen för Byggnadsfysik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Wentzel, E-L. 2002. *Dynamiska termiska nätverk, Tillämpning på väggar och en hel byggnad*. Institutionen för Byggnadsfysik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Wentzel, E-L. 2005. *Thermal Modeling of Walls, Foundations and Whole Buildings, Using Dynamic Thermal Networks*. Institutionen för Byggnadsfysik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Wentzel, E-L & Claesson, J. 2002. *Heat Loss Dynamics of Walls. An Analysis based on the Theory of Dynamic Thermal Networks*. Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, Norway.

Wentzel, E-L & Gollvik, L. 2005. *Annual Heat Loss of a Building with Different Wall Types. A Study of the Influence of the Shape of the Weighting Functions*. Proceedings of the 7th Synposium on Building Physics in the Nordic Countries, Reykjavik, Iceland.

Webbsidor:

Oy Westra Ab. 2005. *Massivträhus*. Hämtat från www.westra.fi.

Svensk Byggtjänst. 2005. *Tekniknytt - element av massivträ*. Hämtat från www.byggtjanst.se.

Databaser:

IBPT. *International Building Physics Toolbox*. www.ibpt.org/indexall.htm

METEONORM. Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Climatology. Version 4.0. Software and Data on CD-ROM. Meteotest, Switzerland.

Värmeledningsekvationen

Värmeledningsekvationen kan uttryckas som:

$$\nabla \cdot (l \nabla T) = rc \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{B1.1})$$

I ett Cartesiskt koordinatsystem gäller:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (l \nabla T) &= \left(e_x \frac{\partial}{\partial x} + e_y \frac{\partial}{\partial y} + e_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot l \left(e_x \frac{\partial T}{\partial x} + e_y \frac{\partial T}{\partial y} + e_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(l \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(l \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(l \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (\text{B1.2})$$

Då flödet är endimensionellt, exempelvis genom en yttervägg, blir ekvationen:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(l \frac{\partial T}{\partial x} \right) = rc \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

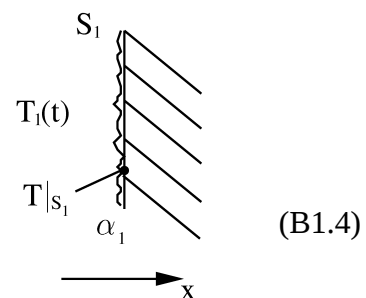
eller

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} = -rc \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{där, } q_x = -l \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (\text{B1.3})$$

Värmeflödet $q_x(x, t)$ [W/m²] går från varmt till kallt, det vill säga är riktad mot temperaturgradienten, med proportionalitetskoefficienten l . Första index x i q_x står för att flödet går i x -riktning. $q_x(x, t)$ är en funktion av x -koordinaten x och tiden t . Variationen av flödet i x -led ger upphov till en temperaturändring, vars storlek beror på materialets densitet och specifika värmekapacitet.

Värmeflödet vid ytan S_1 ges av temperaturdifferensen mellan luft och yta, multiplicerat med värmeövergångskoefficienten a_1 . Detta flöde är lika stort som flödet in i väggen, vid väggytan, $-l \frac{\partial T}{\partial x}$:

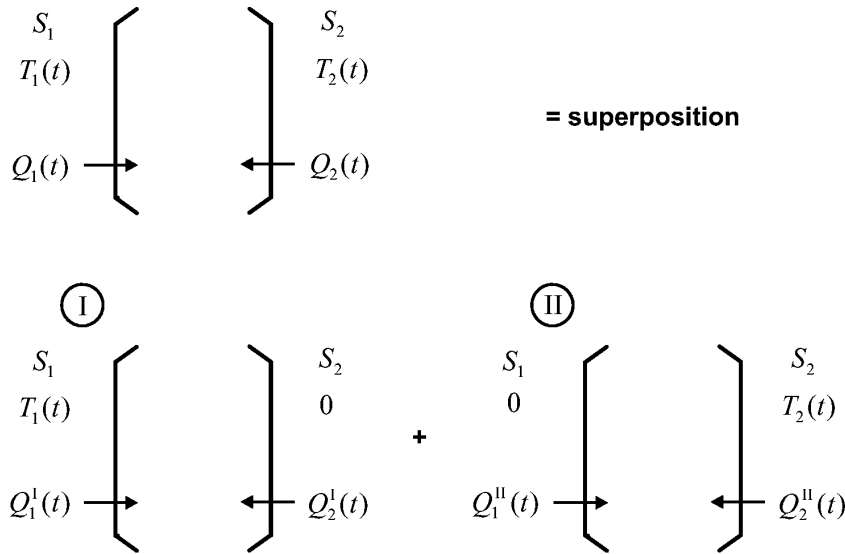
$$(T_1(t) - T|_{S_1}) \cdot a_1 = -l \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{S_1}$$



Absorptiva och transmittiva flöden

Uppdelningen av de två verkliga flödena $Q_1(t)$ och $Q_2(t)$ till de tre teoretiska flödena $Q_1^{ab}(t)$, $Q_2^{ab}(t)$ och $Q_{1 \rightarrow 2}^{tr}(t)$, bygger på superpositionsprincipen enligt figur B2.1.

Uppdelningen är ett sätt att belysa hur beräkningen av randflödena med hjälp av termiska dynamiska nätverk går till. En förutsättning för att ett absorptivt flöde kan uppstå är att temperaturen varierar. Vid konstanta temperaturer, det vill säga stationära förhållanden, blir flödet endast transmittivt enligt ekvation (4.6).



Figur B2.1 Superpositionsprincipen för uppdelning av randflödena in en absorptiv och en transmittiv del.

En vägg med de varierande temperaturerna $T_1(t)$ på vänstra sidan och $T_2(t)$ på den högra, kan enligt superpositionsprincipen delas upp i de två fallen I och II. Fall I beskriver väggen med temperaturvariationen $T_1(t)$ på vänster sida (S_1) och den konstanta temperaturen 0 på höger sida (S_2). I fall II hålls den vänstra sidan konstant ($= 0$) och den högra varierar enligt $T_2(t)$. Summan av fall I och fall II är identiskt med ursprungsfallet.

För randflödena $Q_1(t)$ och $Q_2(t)$ gäller nu:

$$Q_1(t) = Q_1^I(t) + Q_1^{II}(t) = \underbrace{Q_1^I(t) + Q_2^I(t)}_{Q_1^{ab}(t)} - \underbrace{Q_2^I(t) + Q_1^{II}(t)}_{+Q_{1 \rightarrow 2}^{tr}(t)}$$

$$Q_2(t) = Q_2^I(t) + Q_2^{II}(t) = \underbrace{Q_2^{II}(t) + Q_1^{II}(t)}_{Q_2^{ab}(t)} - \underbrace{Q_1^{II}(t) + Q_2^I(t)}_{+Q_{2 \rightarrow 1}^{tr}(t)} \quad (B2.1)$$

där $Q_1^{ab}(t) = Q_1^I(t) + Q_2^I(t)$, $Q_2^{ab}(t) = Q_2^{II}(t) + Q_1^{II}(t)$ och

$$Q_{1 \rightarrow 2}^{tr}(t) = -Q_{2 \rightarrow 1}^{tr}(t) = Q_1^{II}(t) - Q_2^I(t). \quad (B2.2)$$

Randflödena uppdelade i absorptiva och transmittiva flöden blir:

$$Q_1(t) = Q_1^{ab}(t) + Q_{1 \rightarrow 2}^{tr}(t) \quad Q_2(t) = Q_2^{ab}(t) - Q_{1 \rightarrow 2}^{tr}(t) \quad (B2.3)$$

Randflödet $Q_1(t)$ blir summan av flödena över rand 1 i fall I och II. Genom att lägga till och dra ifrån flödet som kommer in över rand 2 i fall I, definieras flödena $Q_1^{ab}(t)$ och $Q_{1 \rightarrow 2}^{tr}(t)$ enligt (B2.2). Det absorptiva flödet $Q_1^{ab}(t)$ definieras som det totala flödet som kommer in i konstruktionen i fall I. Detta beror endast på temperaturvariationen på sida 1, eftersom temperaturen på sida 2 är noll.

Det transmittiva flödet $Q_{1 \rightarrow 2}^{tr}(t)$ blir skillnaden mellan flödet som går in i konstruktionen på sida 1, fall II, och ut på sida 2, fall I.

Motsvarande gäller för flödet $Q_2(t)$ över rand 2.

Sammanfattningsvis kan begreppen admittivt, transmittivt och absorptivt flöde förklaras enligt följande:

De admittiva flödena, $Q_1(t)$ och $Q_2(t)$, är de flöden som tas emot av väggen i varje tidpunkt.

Det transmittiva flödet $Q_{1 \rightarrow 2}^{tr}(t)$ är det flöde som går igenom konstruktionen i varje tidpunkt. Detta är samma för båda sidorna, bara tecknet är olika.

De absorptiva flödena $Q_1^{ab}(t)$ och $Q_2^{ab}(t)$ definieras som skillnaden mellan det admittiva och det transmittiva flödet för respektive rand. Summan av de båda absorptiva flödena ger det ackumulerade flödet. Detta motsvarar energiinnehållet i väggen i varje tidpunkt.