



HÖGSKOLAN  
I HALMSTAD

Byggingenjörprogrammet 180hp

# EXAMENSARBETE



InsuFlex

Framtagning och analys av högpresterande  
isoleringskoncept i sandwichelement

Daniel Samvin och Stefan Markovic

Examensarbete 15hp

Halmstad 2014-06-05



## **Förord**

Examensarbete genomfördes under vårterminen 2014 som en avslutande del till byggingenjörsprogrammet 180 högskolepoäng, med inriktning konstruktion och projektering vid Högskolan i Halmstad. Rapporten motsvarar 15 högskolepoäng och behandlar nytänkande inom väggisolering samt värmesimulering i byggnadsfysik. Vi vill ge ett särskilt tack till David Samvin som har hjälpt och bidragit med utbildning samt djupare förståelse inom simulering- och parameterstyrning. Vi vill även tacka Magnus Wallin från Kingspan som bidragit med värdefull materialdata. Slutligen vill vi ge ett stort tack till vår handledare Margaretha Borgström som har varit ett fantastiskt stöd genom examensarbetet.

Halmstad maj 2014

Daniel Samvin & Stefan Markovic



## **Abstract**

The main objective of this report is development of an insulation-layer of high performance materials for a sandwich structure, which will contribute to an improved U-value and reduced wall thickness. The design is based on an existing sandwich wall, where the authors replaced the original insulation with the developed insulation-layer, to study the walls with equal conditions. The insulating ability is presented through calculations and thermal simulation to analyze the thermal aspects of the stationary conditions and 3D conditions.

A complete insulation combination was developed through extensive studies of material's physical properties, and named "InsuFlex". The insulation-layer was then applied in a sandwich construction for further analysis and thermal simulations. The new design showed improvements in several areas.

**Keywords:** Aerogels, Insulation, Sandwich construction, Thermal conductivity, High performance insulation, Construction technology.

## Sammanfattning

Rapportens huvudsyfte är att ta fram en isoleringskombination av högpresterande material, som ska bidra till ett förbättrat U-värde och reducerad vägg tjocklek. Konstruktionen är baserad på en befintlig sandwichvägg från Strängbetong, där författarna ersatt den ursprungliga isoleringen med det utvecklade isolerskiktet för att slutligen studera väggarna med lika villkor. Den framtagna väggens isoleringsförmåga presenteras genom handberäkningar, där det erhålls U-värde och temperaturfördelningar mellan elementens olika skikt vid stationära förhållanden. Det har även utförts värmesimuleringar för att analysera samma fysikaliska faktorer dock baserat på 3D förhållanden.

I samarbete med företag har flera högpresterande isoleringsmaterial valts ut att ingå i väggkonstruktionen. Genom fördjupade studier av materialens fysikaliska egenskaper kunde en komplett isoleringskombination utvecklas och fick namnet InsuFlex. InsuFlex applicerades sedan i en sandwichkonstruktion för vidare analyser och värmesimuleringar.

De nya väggresultaten visade mycket goda förbättringar av den ursprungliga sandwichväggen, tack vare det utvecklade skiktet av InsuFlex. Genom utförda beräkningar kunde författarna konstatera att isoleringsförmågan förbättrats med 46,5- samt 29 %, samtidigt som tjockleken reducerats med 5,5- samt 16,5 %, i jämförelse med Strängbetongs befintliga produkt. Den nya väggen erbjuder goda förutsättningar att reducera energiförlusterna och komma närmare framtida energikrav. Isoleringmetoden förväntas även kunna appliceras i flera olika konstruktionselement.

**Nyckelord:** Aerogeler, Isolering, Sandwichkonstruktion, Värmekonduktivitet, Högpresterande isolering, Konstruktions teknologi.

# Innehållsförteckning

Förord.....	i
Abstract.....	iii
Sammanfattning.....	iv
1 Inledning.....	2
1.1 Bakgrund.....	2
1.2 Frågeformulering.....	3
1.3 Syfte och mål.....	3
1.4 Avgränsningar.....	3
2 Metod.....	4
2.1 Litteraturstudie.....	4
2.2 Program.....	5
2.3 Utförande.....	6
3 Värme.....	8
3.1 Historik.....	8
3.2 Klimatskärm.....	9
3.3 Värmetransporter.....	10
3.3.1 Värmekonduktivitet.....	11
3.3.2 Värmemotstånd och U-värde.....	11
3.3.3 Värmekapacitet.....	12
3.3.4 Temperaturfördelning i väggar.....	13
3.3.5 Värmetransport i 3D system.....	15
4 Värmeisoleringsmaterial.....	16
4.1 Allmänt.....	16
4.2 PIR-isolering.....	17
4.3 Aerogel.....	18
4.4 Reflekterande isolering.....	19
4.5 OPTIM-R (Vakuumisolering).....	21
4.6 Polyethylene skum (PE).....	22
4.7 Materialdata.....	23

4.8 Konstruktionslim.....	24
5 Sandwichvägg - Strängbetong .....	25
6 InsuFlex i sandwichvägg .....	26
6.1 Allmänt.....	26
6.2 Materialval och Sammansättning.....	26
6.2.1 Uppbyggnad av InsuFlex.....	28
6.2.2 Uppbyggnad av ytterskikt.....	29
6.2.3 Sammansättning av InsuFlex-väggen.....	30
7 Handberäkning.....	31
7.1 Allmänt.....	31
7.2 Resultat.....	31
7.3 Beräkningsgång.....	32
8 Analys .....	37
8.1 Syfte .....	37
8.2 Finita Element Metoden.....	37
8.2.1 Element.....	37
8.3 Genomförande.....	39
8.3.1 Geometri .....	39
8.3.5 Körning.....	42
8.4 Resultat.....	43
8.4.1 Vintertid.....	44
8.4.2 Sommartid .....	47
8.5 Slutsats .....	49
9 Resultat .....	50
9.1 Jämförelse – Beräkningar.....	50
9.2 Jämförelse med Strängbetong-väggen .....	50
9.2 Diskussion.....	51
9.3 Slutsats .....	51
9.4 Förslag på fortsatt arbete.....	52
10 Referenslista.....	53
10.1 Litteraturförteckning .....	53

10.2 Internet .....	54
10.3 Personlig kommunikation .....	55
Bilaga 1 – Temperaturfördelning sektion (A) – Vintertid .....	56
Bilaga 2 - Temperaturfördelning sektion (B) – Vintertid .....	57
Bilaga 3 - Temperaturfördelning sektion (A) – Sommartid .....	58
Bilaga 4 - Temperaturfördelning sektion (B) – Sommartid.....	59
Bilaga 5 – Temperaturjämförelse sektion (A) – Vintertid .....	60
Bilaga 6 – Temperaturjämförelse sektion (B) – Vintertid .....	61
Bilaga 7 – Temperaturjämförelse sektion (A) – Sommartid.....	62
Bilaga 8 – Temperaturjämförelse sektion (B) – Sommartid.....	63



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Fokus på energieffektiva hus har ökat kraftigt under de senaste åren på grund av miljöaspekter, stigande energipriser och strängare krav i BBR. Klimatskalet utgörs till största del av isolerade väggar som är i ständig utveckling. De tekniska isolerlösningarna utvecklas inte i samma takt som kraven gör, vilket skapar ett problem som snabbt måste åtgärdas. Väggar blir allt tjockare för att reducera energiförlusterna. De tekniska isolerlösningarna som förekommer på marknaden kräver mer materialåtgång och ökade transporter som självfallet ökar kostnaderna. Dessa lösningar måste förbättras med enkla och effektiva isoleringsmetoder för att öka väggkvaliteten och efterfrågan.<sup>1</sup> Fokus bör läggas på energieffektiva lösningar som förbättrar konstruktionselement före år 2020, då det sätts nya krav på ”nära-noll energihus”.<sup>2</sup>

Författarna anser att det finns potential och stora möjligheter att utveckla byggnadstekniken genom att minska materialtjockleken och förbättra isoleringsförmågan i väggar. Högrepresterande isolering används redan i dagens byggnader, men om rätt kombination och metod införs ska det gå att åstadkomma förbättrade resultat inom flera områden.

**Arne Elmroth**, professor i byggnadsfysik, har uttalat sig om problematiken i byggnationer och hur det styr samt begränsar byggnadsteknikanvändningen. Han anser att det krävs extrem noggrannhet i utförande och planering om man ska få ett riktigt energisnålt hus. Professor Elmroth har även påpekat hur viktigt det är med ett välisolerat klimatskal som minimerar värmeförlusterna samt ger ett energisnålt hus.<sup>3</sup>

Boverket bestämmer energianvändningen, men ger fortfarande möjlighet till flexibilitet i byggnadsteknik och materialval. Det går att bygga energieffektiva konstruktioner om isoleringsmetoderna och materialen utvecklas. Att ta vara på värmen i en byggnad är ingen enkel uppgift, men utveckling inom området är ett måste för att klara framtida energikrav. Det är viktigt att sätta framtida mål för vidareutveckling inom det tekniska konceptet.

---

<sup>1</sup> <http://www.strangbetong.se/koncept-komponenter/komponenter/fasader/sandwichvaggar/>, (2014-02-12)

<sup>2</sup> <http://www.fastighetstidningen.se/2020-ska-alla-nya-byggnader-klara-lagenergiprestanda/>, (2014-02-25)

<sup>3</sup> <http://www.byggahus.se/bygga/baksidan-av-passivhus>, (2014-02-25)

## 1.2 Frågeformulering

Genom att ställa nedanstående frågor vill författarna visa de punkter som behöver studeras och utvecklas. Avsikten är att undersöka om möjliga lösningar går att tillämpa såväl praktiskt som teoretiskt.

- Går det att ta fram en ny effektiv isoleringskombination för väggar?
- Kan väggjockleken minskas utan att påverka isoleringsförmågan?
- Är den nya isoleringskombinationen tillämpbar i sandwichelement?

## 1.3 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att studera en möjlig lösning som kan bidra till utveckling av byggnadernas klimatskal. Målet är att ta fram en ny metod och kombination av högpresterande isolering som ska kunna appliceras i olika konstruktionsväggar för bostäder. Den nya väggen måste bli tunnare än de befintliga samt kunna prestera bättre ur värmesynpunkt. Väggen ska även jämföras med en sandwichvägg i betong som idag finns på marknaden, för att redovisa de förbättringar författarna tillfört. Rapporten ska redogöra hur en värmesimulering stämmer i verkligheten, jämfört med förenklade metoder som författarna lärt sig i byggingenjörsprogrammet. Den här idén förväntas leda till en förbättring av befintliga resultat för väggelement.

## 1.4 Avgränsningar

Examensarbetet avgränsas till att utveckla en ny isoleringskombination för sandwichkonstruktioner som kallas för InsuFlex. Författarna har analyserat olika högpresterande isoleringsmaterial som sedan sattes ihop till ett komplett isoleringsskikt och applicerades i en sandwichvägg för vidare analyser. Analysen omfattar en handberäkning i stationära förhållanden och en 3D-värmesimulering av väggens totala konstruktion, varav noggranna undersökningar av parametrar i isoleringskombinationen. Författarna vill bevisa fysikaliskt och matematiskt att den slutliga väggen funkar i praktiken, ur värme synpunkt. Författarna ska inte fördjupa sig gällande kramlor och dess infästning i denna rapport, då den endast avser värmeisolering och värmeanalys. Mer om InsuFlex redogörs i kapitel (6).

## 2 Metod

### 2.1 Litteraturstudie

I examensarbetet skapades en sandwichvägg av armerad betong och högpresterande isoleringsmaterial. Underlag behövdes för att styrka den information och analys som examensarbetet bygger på. Genom litteraturstudie presenterades de forskningar som gjorts inom området och vilka grunder idéerna baseras på. Litteratursökningen delades i tre olika grupper som är isoleringsmaterial i sandwichelement, materialparametrar och instruktionsböcker om värmesimulering med multifysikprogram. Grundläggande data erfordrades gällande väggelement och dess material samt fördjupad information inom multifysikberäkning. Litteraturen som användes kommer från pålitliga källor. Information inhämtades via bibliotekets databas vid Högskolan i Halmstad, som erbjöd en cocktail av böcker och vetenskapliga artiklar. Nedan redovisas var informationen söktes:

- Bibliotekets katalog
- Olika databaser, för sökning via ämnesområden, som compendex, DIVA-portalen och artikelsökning.
- Kontakter på CHALMERS där information erbjöds inom multifysikprogram samt tidigare examensarbeten.
- Internetsökning efter artiklar, forskning och föreläsningar.

De val av isoleringsmaterial som har gjorts grundas på den senaste forskning inom högpresterande isoleringsmaterial, eftersom deras överlägsna effektivitet har bevisats. Forskare på CHALMERS tekniska högskola har studerat aerogel och dess isoleringsförmåga samt publicerat flera artiklar inom området.<sup>4</sup>

Andra högpresterande material valdes efter deras höga isoleringsförmåga samt rekommendationer från två företag som är världsledande inom området. Tyvärr finns det väldigt få studier tillgängliga gällande högpresterande isoleringsmaterialens användning i sandwichväggar. Litteraturen var även inte tillräcklig gällande aerogel i väggkonstruktioner, däremot finns det flera företag som forskat inom materialet och dess användningsområden.

---

<sup>4</sup> “*The behavior of aerogel blankets as insulation material in external walls at high temperatures*”, (2012; 147), Pérez, O, C

Forskare i företagen var villiga att dela med sig den informationen, vilket har gjort vägghanalyserna möjliga och arbetet kunde fortsätta som planerat. Företagen Kingspan<sup>5</sup> och Thermisol<sup>6</sup> gav den största delen av det materialdata som blev bas för projektet. Magnus Wallin som är nordisk direktör och forskare inom området för PIR-isolering intervjuades där relevant information samt synpunkter gällande isoleringsmaterialet gavs. Mer om högpresterande isoleringsmaterial presenteras i kapitel (4).

## 2.2 Program

Användandet av relevanta datorprogram är en av de viktigaste beståndsdelarna i examensarbetet, då analyserna kräver avancerad beräkning och simulering inom byggnadsfysik. Högskolan i Halmstad erbjöd flera program med fördjupad utbildning inom dessa, vilket gjorde värmesimuleringen möjlig. Programmen som används i examensarbetet visas nedan:

- **ArchiCAD:** 3D modellprogram, En utbildning är planerad i samarbete med Graphisoft i Malmö inom 3D-modellering.
- **Mathematica:** Beräkningsprogram för ingenjörer. Utbildning genomförs via byggingenjörsprogrammet med erhållen student licens.
- **SolidWorks:** 3D program för modellering och FEM-analyser. En grundutbildning genomfördes och student licens har erhållits av lektor Bertil Nilsson vid Högskolan i Halmstad.
- **Matlab:** Beräkningsprogram och script hantering. Pågående studier inom programmet med erhållen student licens.
- **ComSol:** Ett multifysikprogram med finita elementmetoden. Erhållen utbildning inom programmet med fördjupning inom parameter- och scriptstyrning.

Kunskapen för ovanstående program är goda på grund av att de har använts inom både byggingenjörsprogrammet och arbetslivet.

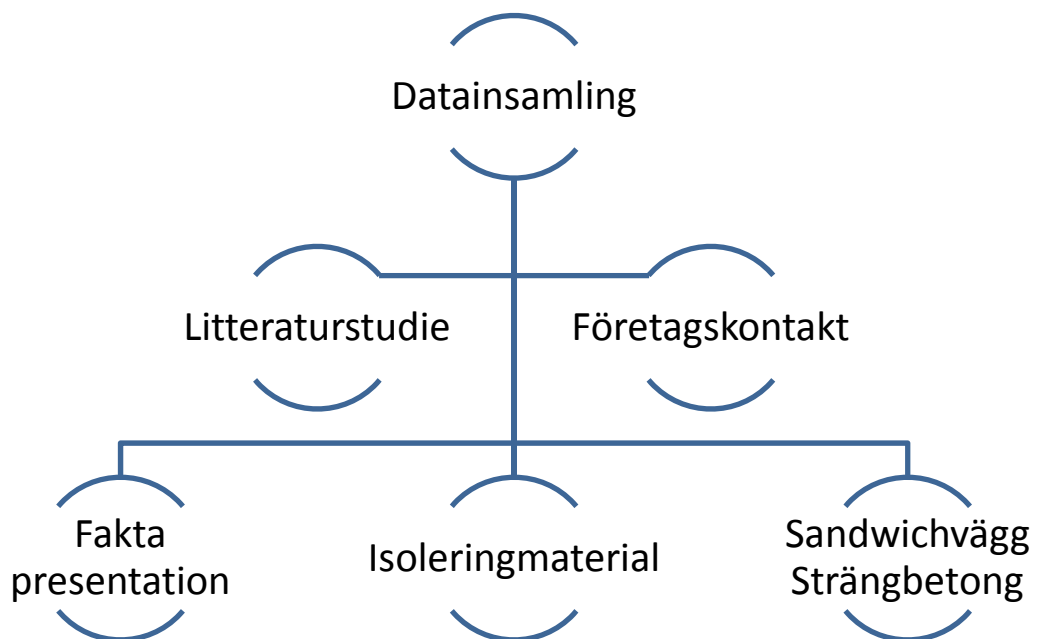
---

<sup>5</sup> <http://www.kingspan.se>

<sup>6</sup> <http://www.thermisol.se>

## 2.3 Utförande

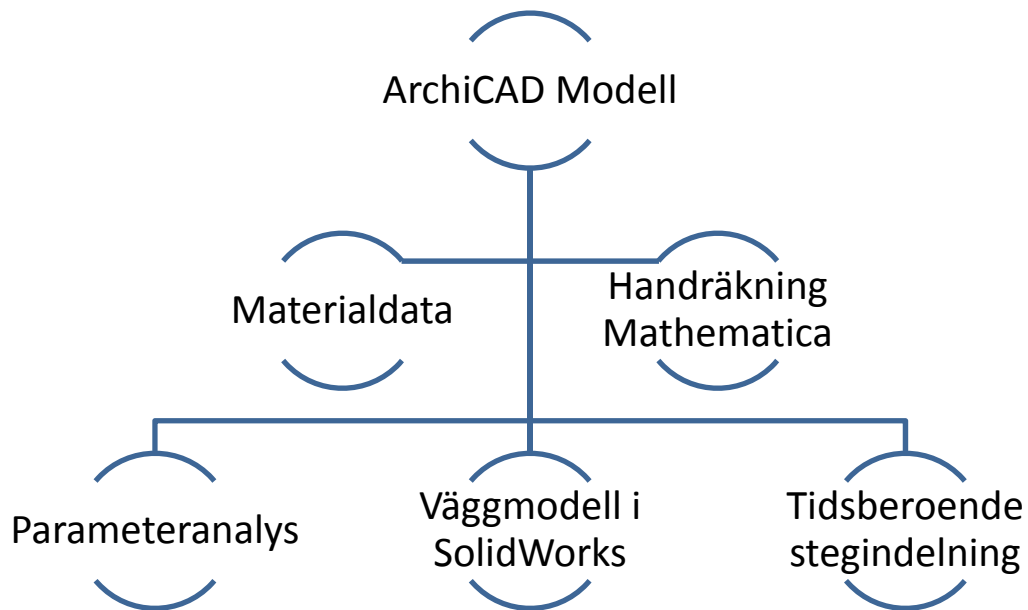
Sandwichkonstruktioner bygger på en enkel princip som baseras på användningen av två lager armerad betong med ett eller flera mellanliggande isoleringsskikt. Rätt val av materialkombination och tjocklek är viktig för att sedan simulera den slutliga väggen. Faktainsamling från websidor, böcker och vetenskapliga artiklar gav grund till rätt val av analys och material i väggkonstruktionen. Först och främst presenterades information om värmelära och dess användning i stationära förhållanden, med syftet att klargöra de relevanta områdena för examensarbetet. Därefter fördelades analysen för materialen i flera olika stadier, i syfte att underlätta arbetet samt dess struktur.



*Figur 2.1 Exempel på process-utförande av den teoretiska referensramen.*

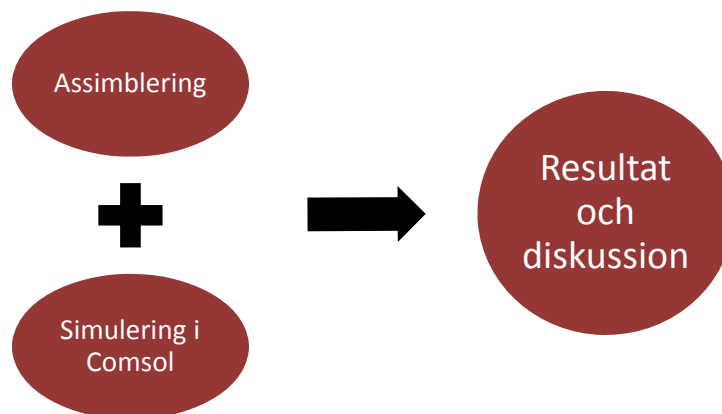
Modell för InsuFlex-väggen skapades därefter i programmet ArchiCAD och blev det första steget av analysfasen för väggkonstruktionen. Handberäkning i stationära förhållanden utfördes i programmet Mathematica för att få inblick av väggens fysikaliska helhet samt värmeegenskaperna av konstruktionsdelarna. När handberäkningen av väggen är klar skapades en 3D-modell i SolidWorks som sedan exporteras till ComSol för vidare analyser.

I figur (2.2), presenteras en systematisk illustration om arbetsgången och beräkningstillvägagångssättet i examensarbetet.



*Figur 2.2 Modell av arbetsgången inför simuleringsprocessen.*

All modellering assemblerades i ComSol, därefter utfördes en tidsberoende värmesimulering, där resultaten jämfördes med Strängbetongs sandwichvägg samt dokumenterades.



*Figur 2.3 Modellen visar slutskedet i Examensarbetet.*

## 3 Värme

### 3.1 Historik

Oljekriserna på 1970 talet orsakade stor skada på världsekonomin och rubbade den utvecklingen som rådde. Människan började tänka om och planera för minskning av oljeberoendet samt strävade efter djupare miljötänk. Som följd av detta ställdes hårdare krav på byggnadernas värmeisolering samt energieffektivisering och kraven har bara skärpts sedan dess. En snabb utveckling var då ett faktum och det ställdes stora krav på byggnaders värmeisoleringsförmåga, för att minska energiförlusterna. Forskare och byggnadsföretag började utveckla olika metoder att återvinna värme, som ventilationsvärmeväxlare, olika typer av värmepumpar och solfångare. Fokus på värmeisolering av ytterväggar ökade kraftigt och medförde snabb utveckling inom området. Isoleringmetoderna varierade från mellanliggande värmeisolering till heltäckande isolerskikt, som kunde appliceras i både nybyggnationer och befintliga byggnader utan byte av fasadmaterial.<sup>7</sup>

Höga krav på energieffektivitet i både ny- och ombyggda hus ställs med mål att kunna halvera den genomsnittliga energianvändningen fram till år 2050.<sup>8</sup> Forskare strävar efter att bygga så energieffektivt så möjligt med god ekonomisk marginal. Professor Arne Elmroth, liksom många andra forskare vill att fokus ska ligga på välisolerade byggnader.<sup>9</sup>

---

<sup>7</sup> Elmroth, A, Roos, A, Skanska, NCC (nov. 2010) "Energieffektiva byggnader: Kretsloppsrådets översikt", Miljöprogram 2010, Stockholm

<sup>8</sup> <http://www.byggstjanst.se/For-alla/Tema1/Energi/Sa-effektivt-ar-dagens-byggande/>, (2014-02-26)

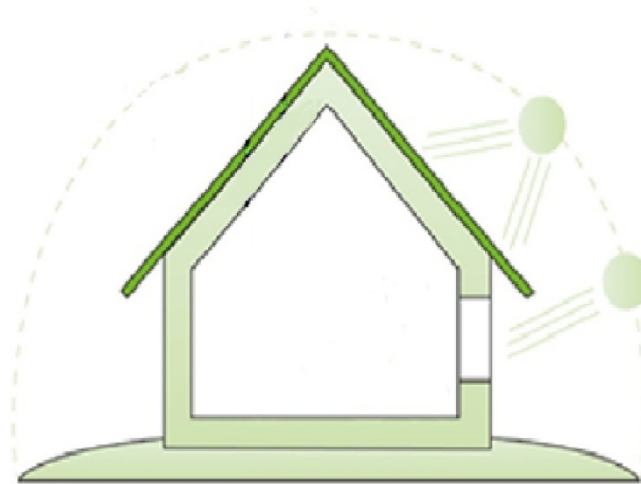
<sup>9</sup> <http://www.byggahus.se/bygga/baksidan-av-passivhus>, (2014-02-25)

### 3.2 Klimatskärm

Byggnadens klimatskärm utgörs av omslutande byggnadsdelar som minskar värmetransporterna från insidan och ut. Klimatskärmen innefattar ytterväggar, tak, golv ytterdörrar och fönster. Boverkets byggregler sätter strikta krav på klimatskärmen och dess täthet, för att minska energiförlusterna.<sup>10</sup>

*”Byggnadens klimatskärm ska vara så tät att krav på byggnadens specifika energianvändning och installerad eleffekt för uppvärmning uppfylls”* (BFS 2008:20).<sup>11</sup>

Vid ny- och ombyggnad strävas det att förbättra konstruktionsdelarnas totala värmeisoleringsförmåga, exempelvis värmeisolering i ytterväggar. Det krävs noggrann planering och extrem precision i utförandet. Viktigaste delen är klimatskärmen, då den har ständig kontakt med utsidan.<sup>12</sup>



**Figur 3.1** En förenklad bild av klimatskärmen.

För bästa resultat ur värmesynpunkt krävs det att byggnaden isoleras väl och att klimatskärmen är lufttätt, vilket är en av de stora utmaningarna i dagens byggen.

---

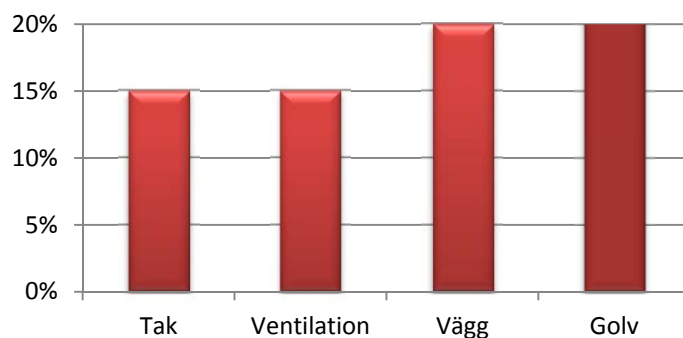
<sup>10</sup> [www.isover.se](http://www.isover.se), ”Krav på klimatskärm”, (2014-02-27)

<sup>11</sup> Boverkets byggregler, BBR avsnitt 9 sid. 24, (2014-02-27)

<sup>12</sup> ”Byggnaders klimatskärm”, Petersson, B, Å, studentlitteratur (2011)

### 3.3 Värmetransporter

Värme kan definieras som den energiöverföring som sker utan något utträttat arbete. Energiöverföringen förändrar den termiska energin hos olika system, som följs av en temperaturdifferens, som i sin tur orsakar värmetransporter.<sup>13</sup>



*Diagram 3.1 Här visas värmeförlusternas andelar i ett hus.<sup>14</sup>*

Värmetransporter i byggnadskonstruktioner innebär överföring av termisk energi från en varmare till en kallare konstruktionsdel och delas i tre olika delar.

- **Konduktivitet:** Har temperaturskillnader som drivkraft. När byggnadsmaterial har direkt kontakt med andra kallare eller varmare material, sker det en värmeöverföring.
- **Konvektion:** Har lufttryckskillnader som drivkraft. När en varm yta värmer upp gasmolekylerna i luften bildas det ett högre lufttryck, som sedan rör sig mot en kallare yta och värmer den.
- **Strålning:** Har temperaturskillnader som drivkraft. Här behövs det inget medium för överföring av termisk energi. Ytor avger strålning, vars mängd är temperaturberoende, vilket är orsaken till värmeförluster vid fönster i byggnader.<sup>15,16</sup>

För att kunna utföra en värmebalansberäkning eller värmesimulering, krävs det en god förståelse av de olika värmetransporterna. En annan viktig aspekt är att förstå hur olika material beter sig i förhållande till varandra, där konduktion, konvektion och strålning kan ske samtidigt.

---

<sup>13</sup> "Heureka", Alphonse, R, Bergström, L, Gunnvald, P, Studentlitteratur (2012)

<sup>14</sup> <http://www.vattenfall.se/sv/yttervagggar-tak.htm>, (2014-02-28)

<sup>15</sup> "Tillämpad byggfysik", Petersson, B, Å, Studentlitteratur (2009)

<sup>16</sup> <http://www.energidirekt.se/index.php/energideklaration/83-olika-former-av-vaermetransport>, (2014-02-28)

### 3.3.1 Värmekonduktivitet

Värmekonduktivitet är materialets förmåga att leda värme och betecknas med ( $\lambda$ ). Värmeledningsförmågan baseras på den totala överföringen av termisk energi genom materialet. Värmeflödet i homogena material vid stationära förhållanden definierar  $\lambda$ -värdet, vars beräkning sker enklast endimensionellt.<sup>17,18</sup>

$$\lambda = \frac{q \times d}{\Delta T} \quad (\text{W/mK}) \quad (3.1)$$

$\Delta T$  = Temperaturskillnad (K)

$d$  = Tjocklek (m)

$q$  = Värmefflödestäthet (W/m<sup>2</sup>)

### 3.3.2 Värmemotstånd och U-värde

Värmemotstånd beskriver byggnadsmaterialens värmeisoleringsgrad och är ett mått på dess motstånd mot värmefflödet genom värmetransporter. Värmemotståndet, även kallat (R-värde) är en funktion av materialets tjocklek dividerat med dess värmekonduktivitet. Vägghkonstruktioner med flera homogena materialskikt har sitt värmemotstånd som summan av alla enskilda materialens R-värde. Utöver värmesistansen för olika skikt tillkommer även värmeövergångsmotstånd vid ytor med luftkontakt som betecknas med  $R_{si}$  för innerytor samt  $R_{se}$  för ytterytor. För korrekta värmemotståndsberäkningar behövs det totala R-värdet som även inkluderar övergångsmotstånden.<sup>19</sup>

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (3.2)$$

$$R = \sum_{i=1}^N R_i = R_1 + R_2 + R_3 + \dots R_n \quad (3.3)$$

$$R_T = R_{si} + \sum_{i=1}^N R_i + R_{se} \quad (3.4)$$

$$R_{si} = 0,13 \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \text{ för innerytor}$$

$$R_{se} = 0,04 \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \text{ för ytterytor}$$

---

<sup>17</sup> "Introduction to Building Physics", Hagentoft, C, E, Studentlitteratur (2001)

<sup>18</sup> "SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut", SP INFO 2000:15, (2007-04-10)

<sup>19</sup> "Tillämpad byggfysik", Petersson, B, Å, Studentlitteratur (2009)

Termen värmeegenomgångskoefficient (U), definieras som inversen av den totala värmeresistansen som används vanligtvis för att beskriva konstruktionsdelens värmeisoleringsgrad, hur välisolerad den är. U-värdet är en viktig term inom byggnadsfysik, då den beskriver konstruktionens värmeförluster.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (3.5)$$

Värmeflödestäthet (q) är lika stort genom alla materialskikten under stationära förhållanden, där q är kvoten mellan temperaturskillnaden och materialets totala värmemotstånd. Beräkningen av värmeflödestätheten för homogena materialskikt är densamma för både en- och flerskiktkonstruktioner.<sup>14,20</sup>

$$q = \frac{T_i - T_e}{R_T} \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.6)$$

Tidigare nämnt i ekvation (3.5), att inversen av det totala R-värdet ger värmeegenomgångskoefficienten. För att få värmeflödet i en vägg multipliceras väggens U-värdet med både aktuell temperaturdifferens för in- och utsida samt väggens aktuella yta.<sup>17</sup>

$$Q = U \times (T_i - T_e) \times A \quad (\text{W}) \quad (3.7)$$

$T_i$  = innertemperatur (°C)

$T_e$  = yttertemperatur (°C)

A = aktuell arean (m<sup>2</sup>)

Konstruktioner med lågt U-värde eller högt värmemotstånd har därmed hög isoleringsförmåga, vars teori används vid dimensionering av konstruktionsdelar.

### 3.3.3 Värmekapacitet

Med värmekapacitet (C), menas den värmemängd som material kan lagra för att kunna höja dess temperatur med en grad per kubikmeter. För att erhålla den totala värmekapaciteten i en yttervägg som är uppbyggd av flera lager, summeras de ingående materialens värmekapacitet till ett enda värde.<sup>21,22</sup>

---

<sup>20</sup> "SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut", SP INFO 2000:17, (2007-03-23)

<sup>21</sup> "Energy effective wall construction for tomorrow's sustainable housing", Freiling, M, Gredin, A, KTH (19-06-2012), serienr: 2012:21

<sup>22</sup> "Tillämpad byggfysik", Petersson, B, Å, Studentlitteratur (2009)

Av praktiska skäl utförs beräkningarna av värmekapacitet med olika förenklade metoder. Nedan visas en förenklad beräkning av värmekapacitet för ett materialskikt.

$$C = c_p \times \rho \quad (\text{Ws/m}^3\text{K}) \quad (3.8)$$

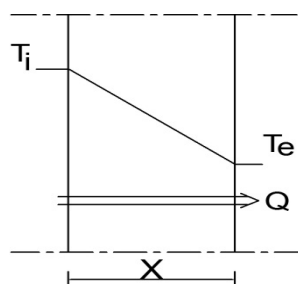
$c_p$  = specifik värmekapacitet  $(\text{Ws/kgK})$

$\rho$  = densitet  $(\text{kg/m}^3)$

Specifik värmekapacitet erhålls från tabeller för olika material i formelsamlingar, där forskare har utfört tester och korrekta beräkningar.

### 3.3.4 Temperaturfördelning i väggar

Väggkonstruktioner består av flera materialskikt med olika värmemotstånd, som fördelar temperaturdifferenser proportionellt till dess R-värde över väggens totala tjocklek. Ingenjörsmässiga antaganden är viktiga för att underlätta praktiska beräkningar gällande temperaturfördelning i de olika materialskikten. Oftast antas att stationära förhållanden råder, även om verkligheten är annorlunda, då yttemperaturen varierar medan innertemperaturen är mer stabil. Materialens förmåga att lagra och leda värmeenergi bestämmer temperaturen inuti väggens olika skikt. Allra viktigast är att bestämma rätt randvillkor som råder över väggen och vilka material som används för att sedan kunna erhålla korrekta värden som i sin tur appliceras i temperaturekvationer.



**Figur 3.2** En förenklad temperaturfördelning i stationära förhållanden.

Temperaturberäkningar som grundar sig på stationära förhållanden och stabila temperaturer, både inomhus samt utomhus, begränsar naturligtvis den rådande verklighetsbilden.<sup>23,24</sup>

<sup>23</sup> "Tillämpad byggfysik", Petersson, B, Å, Studentlitteratur (2009)

<sup>24</sup> "Introduction to Building Physics", Hagentoft, C, E, Studentlitteratur (2001)

Det är däremot praktiskt att använda sig av förenklade handberäkningar, för att få möjlighet att studera de olika materialkombinationernas effekt i den specifika väggkonstruktionen. Handberäkningen sker under förutsättning att det är stationära förhållanden.

$$T_x = T \pm \frac{R_x}{R_{si} + \sum_{i=1}^N R_i + R_{se}} (T_i - T_e) \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.9)$$

$T_x$  = Temperaturen på avståndet  $x$  in i konstruktionen.

$R_x$  = Värmemotståndet för skikten in till gränsytan på avståndet  $x$ .

$T$  = Temperaturen ute eller inne.

Ekvationen ovan har tagits fram med hjälp av värmeledningsekvationen i en-dimensionella system och är en förenkling för att kunna utföra handberäkningar. I ekvation (3.9), går det att beräkna temperaturen för de ingående materialskikten i den specifika väggen. Genom en bestämd mätpunkt i  $x$ -riktning enligt figur (3.2) ovan, erhålls den sökta temperaturen. I vissa fall är det lämpligt att ta hänsyn till varierande temperaturer, men då krävs det mer ingående data och andra förutsättningar. Vid sådana icke stationära förhållanden krävs det mer ingående ekvationer (differential ekvationer), som ger en realistisk verklighetsbild. Datorkraft kan eventuellt behövas för att utföra simuleringar som stämmer bra överens med verkligheten. Mer fördjupning inom området redovisas längre fram i examensarbetet.<sup>25,26</sup>

---

<sup>25</sup> "Energy effective wall construction for tomorrow's sustainable housing", Freiling, M, Gredin, A, KTH (19-06-2012), serienr: 2012:21

<sup>26</sup> "Tillämpad byggfysik", Petersson, B, Å, Studentlitteratur (2009)

### 3.3.5 Värmetransport i 3D system

Finita elementekvationer erhålls med hjälp av Galerkins metod, där värme-konduktivitetens matrisen för ett triangulärt finita element beräknas.<sup>27</sup> Temperaturberoende värmeöverföringar beräknas med en grundläggande ekvation enligt nedan.

$$-\left(\frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} + \frac{\delta q_z}{\delta z}\right) + Q = \rho c \frac{\delta T}{\delta t} \quad (3.10)$$

$q_{x, y, z}$  = Komponenterna i värmevärdet för varje area enhet.

$Q = Q(x, y, z, t)$ , är den inre värmegenererings hastighet per volym enhet.

$\rho$  = Material densitet

$c$  = Värmekapacitet

$t$  = Tid

Fouriers lag definierar värmevärdets komponenter enligt följande:

$$\begin{aligned} q_x &= -\lambda + \frac{\delta T}{\delta x} \\ q_y &= -\lambda + \frac{\delta T}{\delta y} \\ q_z &= -\lambda + \frac{\delta T}{\delta z} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$\lambda$  = Värmeledningskoefficient för material

Värmeledningsekvationen erhålls med Fouriers samband mellan ekvationerna och ger följande:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta z} \right) + Q = \rho c \frac{\delta T}{\delta t} \quad (3.12)$$

Ekvation (3.12) används i simuleringen för den nya väggen. Mer om simuleringen presenteras i kapitel (8).<sup>28,29,30</sup>

---

<sup>27</sup> dixon.hh.se/bertil (2011)

<sup>28</sup> "Applied Partial Differential Equations for Computational Science and Engineering", Hansbo, P, part 1, part 2, (2010-12-09)

<sup>29</sup> "Fourier's Law and the Heat Equation", Chapter Two, (2010)

(<http://me.queensu.ca/Courses/346/L4chapter2.pdf>)

<sup>30</sup> "Finite Element Simulation of Heat Transfer", Bergheau, J-M, Fortunier, R, (2010-01-26)

## 4 Värmeisoleringsmaterial

### 4.1 Allmänt

Värmeisoleringsmaterial är en gemensam beteckning på ett eller flera material, som reducerar värmetransporter eller reflekterar strålning mellan två eller flera konstruktionsdelar med olika temperaturer. Materialen bromsar det oundvikliga värmeflödet olika, beroende på deras värmemotstånd. Det är viktigt att kunna skilja och dra samband mellan olika viktiga egenskaper som materialen har, exempelvis densitet ( $\rho$ ), specifik värmekapacitet ( $c$ ), värmemotstånd (R-värde) och värmekonduktivitet ( $\lambda$ ). Vid låg värmekonduktivitet har materialet hög värmemotstånd, vilket också förknippas med hög isoleringsförmåga.<sup>31,32</sup>

I byggbranschen finns det flera varianter av högpresterande isolering som utvecklas ständigt i samband med skärpta energikrav. Flertal företag använder fortfarande traditionella isoleringsmaterial, som cellplast och mineralull, dock blir det allt vanligare med högpresterande isolering i konstruktioner på grund av dess goda isoleringsförmåga. Forskning inom området sker ständigt och det framställs ofta nya material och metoder som förbättrar klimatskalets isoleringsförmåga. Fokus i allra högsta grad har varit kring värmeisolering, främst kring materialens tjocklek och pris i förhållande till isoleringsförmågan. Nedan beskrivs de högpresterande materialen som används i examensarbetet.<sup>33</sup>

---

<sup>31</sup> "Thermal insulation of buildings", Raynham, E, A, uppladdad, (2011-02-17), London WC2

<sup>32</sup> "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials", Dr. Al-Homoud, M, S, (2004)

<sup>33</sup> "VIP- paneler och högeffektiva isoleringsmaterial", Examensarbete 2012:122 FORSBERG, J, SØRENSEN, R

## 4.2 PIR-isolering

Polyisocyanurat (PIR), är en oljebaserad högpresterande isolering som kan levereras i form av styva skivor. Materialet är brännbart, dock självslocknande och medför ingen brandspridning. PIR består av slutna celler som innehåller drivgas, vilket ger materialet dess goda isoleringsförmåga, dock avtar effekten med tiden.<sup>34</sup>



*Figur 4.1 Styv PIR-isolering för väggar, tak och golv.<sup>35</sup>*

Materialet används främst vid nybyggnationer och renoveringar, men kan även användas vid fogning samt tätning. Andra goda egenskaper är materialets hållbarhet, då den har en livslängd på femtio år, och att den bidrar till tunnare samt effektivare väggar. PIR är ett starkt bidrag till hållbar utveckling, eftersom den har mycket bra egenskaper och kan återvinnas på flera olika sätt.<sup>36</sup>

*Tabell 4.1 Relevanta fördelar och nackdelar för PIR-isolering.*

Material	Fördelar	Nackdelar
Polyisocyanurat (PIR)	<ul style="list-style-type: none"><li>– Styv, stabil, lätt</li><li>– Hög isoleringsförmåga</li><li>– God brandsäkerhet</li><li>– Livslängd på 50 år</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Dålig ljudisolering</li><li>– Dyrare än EPS</li></ul>

---

<sup>34</sup> Elmroth, A, Roos, A, Skanska, NCC (nov. 2010) ”Energieffektiva byggnader: Kretsloppsrådets översikt”, Miljöprogram 2010, Stockholm

<sup>35</sup> [www.kingspaninsulation.se](http://www.kingspaninsulation.se), (2014-03-05)

<sup>36</sup> ”Tillämpning av högpresterande isolering”, (2013-07-12), Touma, S, Jardemyr, P, serienr: 2013;59

### 4.3 Aerogel

Aerogel är ett lätt och nanoporöst material som anses vara ett av de mest lovande högpresterande värmeisolerings materialen för byggnadsapplikationer. Materialet har en mycket låg densitet och ett högt värmeledningsmotstånd.<sup>37</sup>

Den första att undersöka materialet aerogel var Steven Kistler, redan under 1930-talets början, men upptäckte inte dess höga värmemotstånd förrän år 1934. Tillverkningsmetoden kallas för sol-gel-metoden och baseras på superkritisk torkning. Superkritisk torkning innebär att materialet värms upp och sedan avdunstar över materialvätskans kritiska temperatur samt tryck. Fastän materialet har funnits i över 80 år, har det inte använts flitigt inom byggnadsindustrin med tanke på dess höga tillverkningskostnad.<sup>38</sup>



**Figur 4.2** I bilden visas aerogel som laminerad isolerings filt.<sup>39</sup>

I figuren ovan visas ett exempel på aerogel i form av laminerad filt, som kan användas i olika konstruktionselement. Den laminerade filten har flera goda egenskaper såsom ljudabsorberande och flexibel för applicering i komplexa ytor, vilket gynnar dess användning inom flera områden. Materialet är hydrofobt och diffusionsöppet, vilket betyder att den inte är fuktbeständig och drar gärna till sig vätskor och fetter. Filten måste vara absolut torr under installation i olika konstruktionselement.<sup>40</sup>

---

<sup>37</sup> "Thermal conductivities study on silica aerogel and its composite insulation materials", (2011-02-25)

<sup>38</sup> "Literature Review of High Performance Thermal Insulation", (2012), report 2012:2, CHALMERS

<sup>39</sup> "The behavior of aerogel blankets as insulation material in external walls at high temperatures", (2012), Pérez, O,C, Master's Thesis 2012:147, Göteborg

<sup>40</sup> "Praktisk tillämpning av högpresterande material", Eriksson, E, Skanska (2012-03-30) Göteborg

Aerogel ger en stor utbredning inom byggnadstekniken och kan appliceras inom flera konstruktionsområden. Främst används materialet som isolering i väggar och fönster.<sup>41</sup>

**Tabell 4.2** Relevanta fördelar och nackdelar för Aerogel.

Material	Fördelar	Nackdelar
Aerogel laminerad filt	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Lätt och hög isolerande</li> <li>– Ljudabsorberande</li> <li>– mycket god brandsäkerhet</li> <li>– Enkel att fästa på plats</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Svår att tillverka</li> <li>– Ingen bärförmåga</li> <li>– Dyrt</li> </ul>

Kostnaderna är fortfarande höga vad gäller produktionen, men forskningen inom området pågår för att utveckla materialets prestanda samt sänka dess produktionskostnader.

#### 4.4 Reflekterande isolering

Reflekterande isolering framhävs som ett effektivt och billigt material för isolering av klimatskal. Konventionella isoleringsmaterial ska normalt reducera värmetransporter som sker genom konduktivitet och konvektion, medan reflekterande isolering baseras till att reducera värmetransporter som sker via strålning. Isoleringen innehåller ett eller flera lager reflekterande ytor som oftast består av aluminium.<sup>42</sup>

Emittansen är ett viktigt begrepp som beskriver ett materials förmåga att reflektera strålning. Emittansen för ett material är beroende av tre faktorer, reflekterandeförmåga, absorptionsförmåga och transmissionsförmåga. Högre emittans för ett material och en dålig absorptionsförmåga bidrar till en bättre reflekterandeförmåga.<sup>43</sup>

Reduktion av värmestrålning sker effektivast i det första lagret av den reflekterande isoleringen, vilket bryter ca 95 % av strålningen.

---

<sup>41</sup> “*thermal properties of advanced aerogel insulation*”, (2011-06), Cohen, E, Massachusetts Institute of Technology

<sup>42</sup> “*Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials*”, Dr. Mohammad S. Al-Homoud, Building and Environment 40 (2005) 353–366

<sup>43</sup> “*Inventering och utvärdering av högpresterande isolering*”, (2010-03), Clase, M, Skanska Sverige AB

Genom ytterligare lager av reflekterande isolering skapas ytterligare luftutrymmen vilket reducerar värmeomgången som sker via konvektion. Värmskyddets förmåga kan variera under året, med hänsyn till riktningen för värmeflödet, beroende på var i väggen materialet har applicerats. Isoleringens förmåga är även beroende av temperaturdifferensen mellan utrymmena på vardera sidan, en större temperaturskillnad bidrar till en mer fördelaktig isoleringsförmåga. Reflekterande isolering appliceras vanligen i takkonstruktioner med hänsyn till de goda resultat som uppnås, vilket sker när strålningen faller vinkelrät mot den reflekterande ytan. Isoleringen appliceras även i väggkonstruktioner vilket ger effektiv lösning då isoleringen kombineras med produkter som förhindrar konduktivitet och konvektion.<sup>44</sup>



**Figur 4.3** Bild på reflekterande isolering och dess olika lager.<sup>45</sup>

Dagens marknad erbjuder flera typer av reflekterande isoleringsmaterial vilka kan separeras i två grupper. Den ena typen innehåller ett antal skikt av aluminium eller plast-typ reflekterande folie, vilka separeras med skikt av bubbelplast eller något skummaterial men även varianter där dessa kombineras. Den andra gruppen består även av flera skikt aluminium, kraftpapper och plast med interna expansioner.<sup>46</sup>

**Tabell 4.3** Relevanta fördelar och nackdelar för reflekterandeisolering.

Material	Fördelar	Nackdelar
Reflekterande isolering	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Enkel att fästa på plats</li> <li>– Lätt att hantera</li> <li>– Hög reflekterande förmåga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kräver luftspalter för maximalt resultat</li> </ul>

<sup>44</sup> "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials", Dr. Mohammad S. Al-Homoud, Building and Environment 40 (2005) 353–366

<sup>45</sup> <http://www.top3.sg/terreal/roof-tiles/coolmax-insulation/item/151-premium-cp2>, (2014-03-11)

<sup>46</sup> Frawley, Eoghan (Thesis), "Thermal testing of innovative building insulations" (2009), Masters. Paper 33.

#### 4.5 OPTIM-R (Vakuumisolering)

Vakuumisoleringspaneler (VIP) anses idag vara ett av de bästa högpresterande isoleringsmaterialen inom byggindustrin. Isoleringspanelerna har en mycket låg värmeledningsförmåga i förhållande till dess tjocklek som varierar mellan 6 mm till 40 mm. Vakuumisolering bidrar därmed till en effektivare lösning i jämförelse med konventionella isoleringsmaterial.<sup>47</sup>



**Figur 4.4** Här visas ett exempel på OPTIM-R skiva från företaget Kingspan.

Företaget Kingspan har utvecklat en egen produkt som författarna valt att använda i InsuFlex's delen. Produkten kallas för OPTIM-R och är en vakuumisoleringspanel avsedd för väggkonstruktioner. OPTIM-R innehåller ett kärnmaterial med öppen porstruktur som är en förutsättning för att skapa vakuum. Materialet måste därmed erhålla tillräcklig hållfasthet för att motstå kollaps av porerna vid atmosfärstrycket. För att behålla vakuumbilståndet omsluts kärnan med ett lufttätt hölje som består av aluminiumfolie.<sup>48</sup>

**Tabell 4.4** Relevanta fördelar och nackdelar för produkten OPTIM-R

Material	Fördelar	Nackdelar
OPTIM-R	<ul style="list-style-type: none"><li>– Hög isoleringsförmåga</li><li>– Lätta och tunnapaneler</li><li>– Energibesparande</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Isoleringsförmågan avtar med tiden</li></ul>

<sup>47</sup> "VIP- paneler och högeffektiva isoleringsmaterial - Analys och mätningar av Vakuumisoleringspaneler" Examensarbete/Institutionen för bygg- och miljöteknik, Chalmers tekniska högskola 2012:122

<sup>48</sup> "www.kinspaninsulation.co.uk", OPTIM-R External Wall System, (2014-03-16)

## 4.6 Polyethylene skum (PE)



*Figur 4.5 Exempel på polyethylene isolering.*

Det som definierar skumplaster är deras innehåll av många celler eller bubblor. Skumplasters cellstruktur delas upp efter sluten- eller öppen cellstruktur. Skummet har en utmärkt kemisk motståndskraft när den angrips av starka syror och baser. Polyetenskum vars cellstruktur är sluten erhåller flera goda egenskaper, så som låg vikt, absorberar inte vatten, tryck- och vibrations absorberande, kan appliceras på flera ytor samt med flera olika material.<sup>49</sup>

*Tabell 4.5 Relevanta fördelar och nackdelar för polyethylene skum.*

<b>Material</b>	<b>Fördelar</b>	<b>Nackdelar</b>
Polyethylene isolering	<ul style="list-style-type: none"><li>– Flexibel</li><li>– Lättillgänglig</li><li>– God isoleringsförmåga</li><li>– Återvinningsbar</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Isoleringsförmågan avtar om gasen i cellerna försvinner</li></ul>

---

<sup>49</sup> “Effect of Low Density Polyethylene on Polystyrene Foam” Journal of Cellular Plastics 2006 42: 153  
Wong, C-M, Tsai, S-J, Ying, C-H, Lang Hung, M-L

## 4.7 Materialdata

Materialdata är en av de viktigaste delarna i examensarbetet, eftersom de bygger upp grunden för materialanalysen och dess beräkning. Det är svårt att hitta rätt materialdata för de olika isoleringsskikten, eftersom informationen kan vara varierande på grund av deras olika användningsområden. Självklart bidrar vetenskapliga artiklar med mycket relevant information, dock är företagskontakter oundviklig, eftersom en del material används flitigt hos dem.

Egenskaper hos de olika material som används i examensarbetet baseras på samma referenser som presenterats för var och en av materialen. Materialens relevanta egenskaper omfattar i största del det som presenterats i sektion (3.3), där värmelära behandlas, samt kapitel (4) som beskriver materialen.

*Tabell 4.6 Relevanta materialdata för de olika skikten i väggen.*

Material	Tjocklek d [m]	Värme- konduktivitet $\lambda$ [W/mK]	Densitet $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Specifik- värme [J/kg, K]
Aerogel-filt	0,01	0,0135	150	1046
IR-isolering	0,02	0,022	30	1400
OPTIM-R	0,03	0,007	160	-
PE-skum	0,01	0,038	30	1360
Reflekterande isolering	0,01	0,011	31	-
Betong (insida) C20/25	0,15	1,7	2300	1000
Betong (utsida) C20/25	0,075	1,7	2300	1000

## 4.8 Konstruktionslim

Flertalet olika lim-varianter förekommer på byggnadsmarknaden och används inom flera områden. Limmet måste vara starkt, värme- och fuktbeständigt för att tillföra bästa resultat inom både hållfasthet och livslängd.

**X-TACK7**, är ett snabbt härdande konstruktionslim utvecklad att möta kraven för montering inom byggindustrin. X-TACK7 kan användas för fogning och limning av exempelvis betong, aluminium, syntetiska- och porösa material. Produkten är även mycket effektiv för limning av isoleringsmaterial och kan bibehålla sin elastiska förmåga vid 40 mm höjd på limfogen.

Fördelar med X-TACK7:

- Ersätter bult, popnit, skruvar, spikar
- Supersnabb limning och montering med extremt hugg och snabb härdning
- Mycket hög draghållfasthet – 23 kg/cm<sup>2</sup>
- Rinner inte och är UV-stabil. Tål rörelser och vibrationer
- Fäster på fuktiga ytor, härdar även under vatten
- För inomhus- och utomhus användning, luktfri.<sup>50</sup>

Konstruktionslimmet är registrerat i BASTA: s databas som visar att produkten erhåller kriterierna för kemiskt innehåll. Kort citat ur kriteriedokumentet över BASTA-systemets syfte presenteras nedan:

*”BASTA-systemets syfte är att fasa ut ämnen med farliga egenskaper ur byggprodukter. Med byggprodukter avses i BASTA både byggvaror och kemiska produkter. Produkter som registreras i BASTA-registret får inte innehålla ämnen med egenskaper enligt detta kriteriedokument, i halter som är lika med eller överstiger de angivna haltgränserna”.*<sup>51</sup>

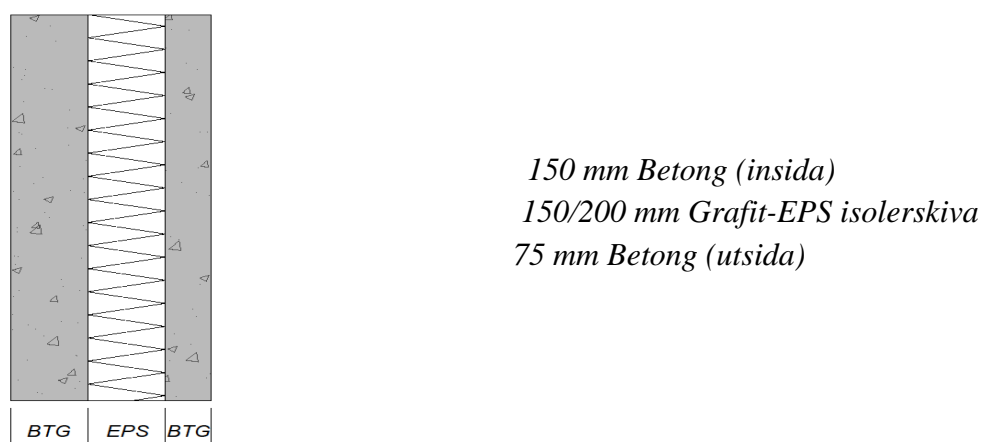
---

<sup>50</sup> <http://www.novatech.nu/Default.aspx?ID=367&ProductID=PROD737>, (2014-03-28)

<sup>51</sup> ”Egenskapskriterier – BASTA”, Alternativ 1 - enligt KIFS 2005:7

## 5 Sandwichvägg - Strängbetong

Tidigare har nämnts att examensarbetet handlar om utvecklingen av ett isoleringskoncept som ska appliceras i en sandwichkonstruktion för vidare analyser. Den nya väggen har jämförts med en sandwichvägg som idag finns på marknaden, för att studera de förbättringar författarna tillfört ur tjocklek- och värmesynpunkt. Sandwichväggen som har ingått i jämförelsen tillverkas av företaget Strängbetong. Företaget erbjuder flertalet lösningar av sandwichväggen som eventuellt kan anpassas till projekten ifråga. Som tidigare nämnt i rapporten består sandwich-elementet av två betongskikt med mellanliggande isolering, där inre betongskivan är den bärande delen. Strängbetongs produktinformation redovisas i figur (5.1).<sup>52</sup>



**Figur 5.1** Sandwichvägg från Strängbetong.

Strukturen som presenteras ovan redovisar en sandwichvägg med isolering av typen grafit-EPS. Det är en nyutvecklad variant av vanlig EPS-cellplast med tillsättning av grafit som bidrar till ökad isoleringsförmåga med 20 %. Den totala tjockleken för sandwichväggen i figur (5.1) är 375 mm och har ett totalt U-värde på 0,2 (W/m<sup>2</sup>K). Strängbetong har även presenterat samma konstruktion där grafit-EPS tjockleken har utökats till 200 mm, vilket ger väggen en ny tjocklek på 425 mm och därmed får ett förbättrat U-värde på 0,15 (W/m<sup>2</sup>K).<sup>53</sup>

Sandwichväggen från Strängbetong var utgångspunkten för en jämförelse med författarnas sandwichkonstruktion som innehåller InsuFlex. Mer information om jämförelsen presenteras i kapitel (9).

---

<sup>52</sup> [www.strangbetong.se](http://www.strangbetong.se)

<sup>53</sup> <http://www.strangbetong.se/koncept-komponenter/komponenter/fasader/sandwichvaggar/>, (2014-02-12)

## **6 InsuFlex i sandwichvägg**

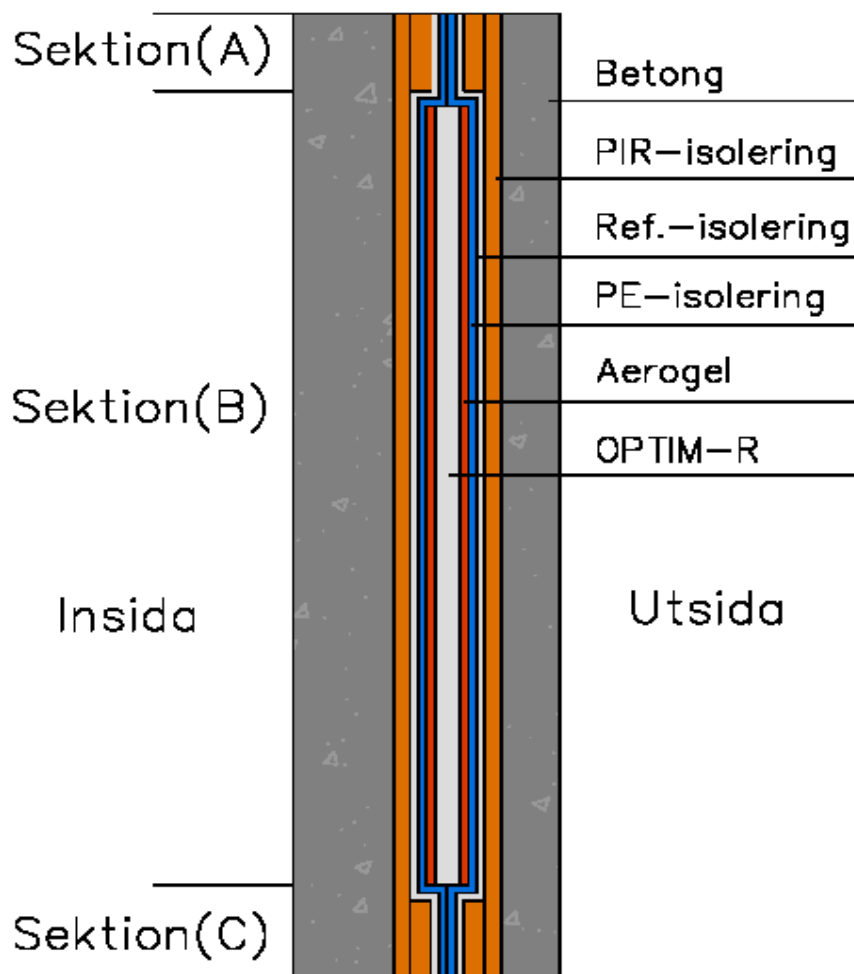
### **6.1 Allmänt**

Isoleringen baseras på en idé som författarna har försökt utveckla under en längre tid. Idén bygger på att ta fram ett isoleringsskikt med en ny materialkombination som sedan appliceras i väggar för att förbättra värmeisoleringsförmågan och minska vägg tjockleken. Författarna har valt att kalla det nya isoleringsskiktet för InsuFlex. Väggen innehåller isoleringsmaterial som är relativt nya på marknaden och används inom byggbranschen. InsuFlex förväntas kunna användas i flera områden inom byggbranschen, exempelvis i flera olika vägg- och takkonstruktioner. Isoleringsskiktet ska kunna appliceras i olika nya betong- samt träregelväggar och dessutom användas som tilläggsisolering i befintliga konstruktioner.

### **6.2 Materialval och sammansättning**

I kapitel (4) presenterades de material som ska ingå i InsuFlex. Materialens samspel till varandra är en viktig aspekt att tänka på för rätt ordning av isoleringsskikten. Varje skikt måste uppfylla flera krav som ställs på grund av både yttre- och inre belastningar, dessutom komplettera egenskaperna för nästa skikt. Mer om materialegenskaper finns i kapitel (4).

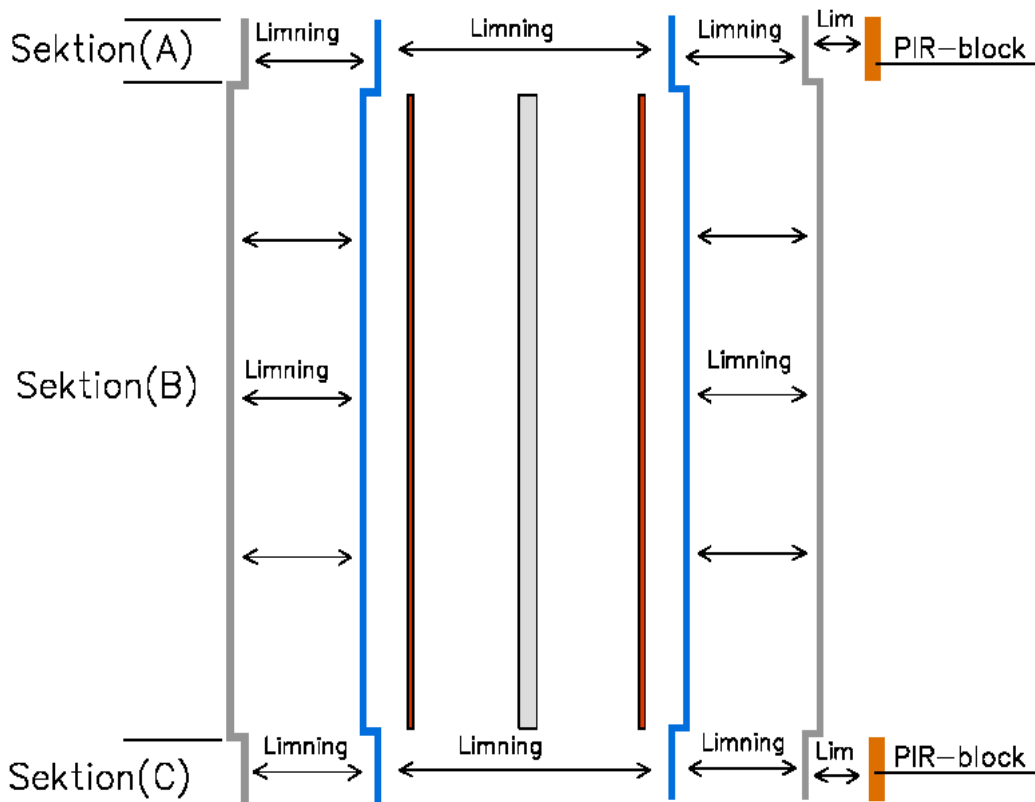
Syftet med väggen i helhet är att den ska ha god värmeisolerande förmåga. InsuFlex i väggens centrum ska även medföra att väggen blir tunnare än den sandwichvägg som författarna jämför med. Väggen är uppdelad i tre sektioner enligt figur (6.1). Orsaken till denna uppdelning är att betongskikten måste fästas ihop med hjälp av kramlor, vilket betyder att isoleringen måste penetreras i flera punkter. Penetreringen kan då skada InsuFlex och medföra stora förluster i isoleringsförmågan. Mer om uppdelningen presenteras nedan.



**Figur 6.1** Här presenteras en bild på InsuFlex i en sandwichkonstruktion.

Genom att skapa sektionerna (A och C) erhålls möjligheten att kunna penetrera isoleringsskikten utan att skada kärnan i InsuFlex. En annan uppgift som sektionerna (A och C) har är att stänga in kärnan i väggen och skydda den. Genom att isolera kärnan från de yttre beståndsdelarna minskar risken för fuktinträning i aerogel, som annars kan ta stor skada. Genom denna metod erhålls även ett bra stöt- och vibrationsskydd för både aerogel och OPTIM-R som lätt kan ta skada vid användning. I figur (6.1) kan läsaren se att penetreringen i sektionerna (A och C) sker utan att medföra skador på sektion (B), samtidigt erhålls en starkare sammanhållning av materialen och kärnan blir totalt innesluten. Materialskikten sätts ihop i tre steg för att underlätta arbetsgången och öka noggrannheten.

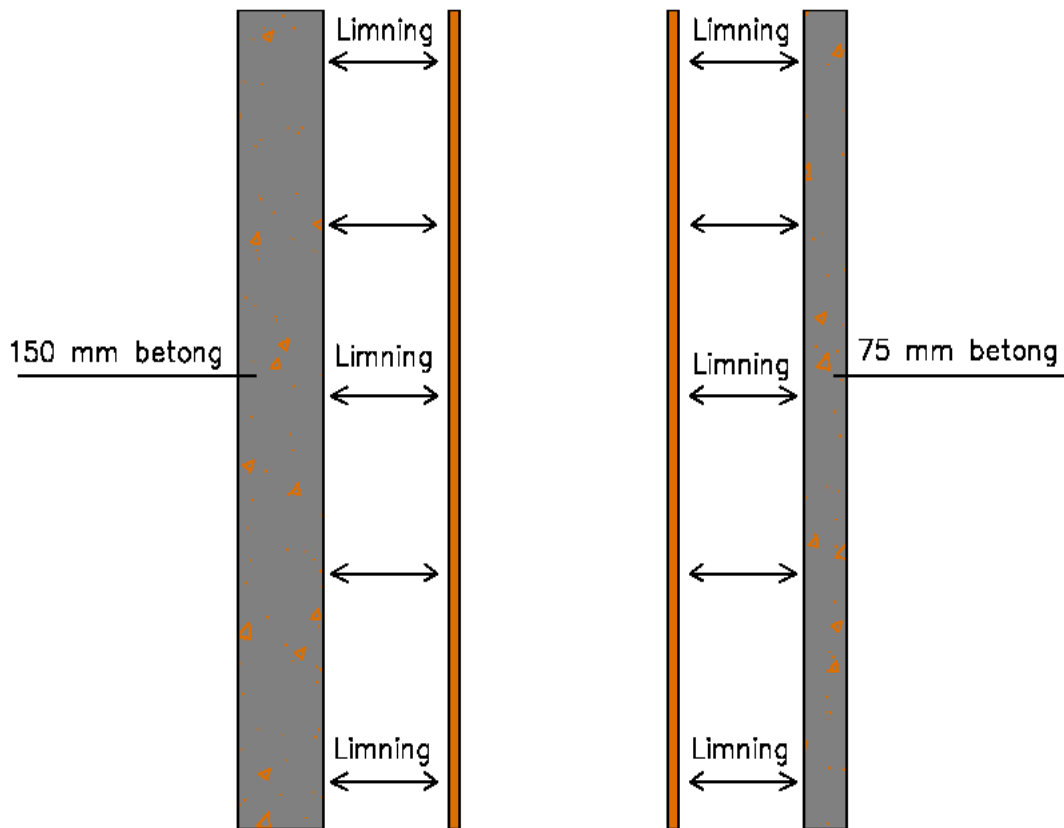
## 6.2.1 Uppbyggnad av InsuFlex



**Figur 6.2** En systematisk illustration för sammansättning av isoleringskudden.

Först och främst tillverkas InsuFlex med de angivna isoleringsmaterialen. Materialskikten sätts ihop efter rangordningen enligt figur (6.1). limningen får absolut inte träffa kärnan, eftersom aerogelskiktet då kan skadas. Den reflekterande isoleringens insida limmas på PE-utsida och därmed skiljs limmet från InsuFlex's kärna. Sedan placeras OPTIM-R i centrum med aerogel på vardera sidan, som följs av de limmade reflekterande- och PE-skikten. I sektionerna (A och C) pressas materialen ihop och limmas på insidan. Även PIR-blocken limmas i sektionerna för att fylla ut tomrummen. Slutligen när limmet har torkat erhålls den sökta InsuFlex som ska appliceras i sandwichväggens centrum. I figur (6.4) illustreras den slutliga modellen för InsuFlex.

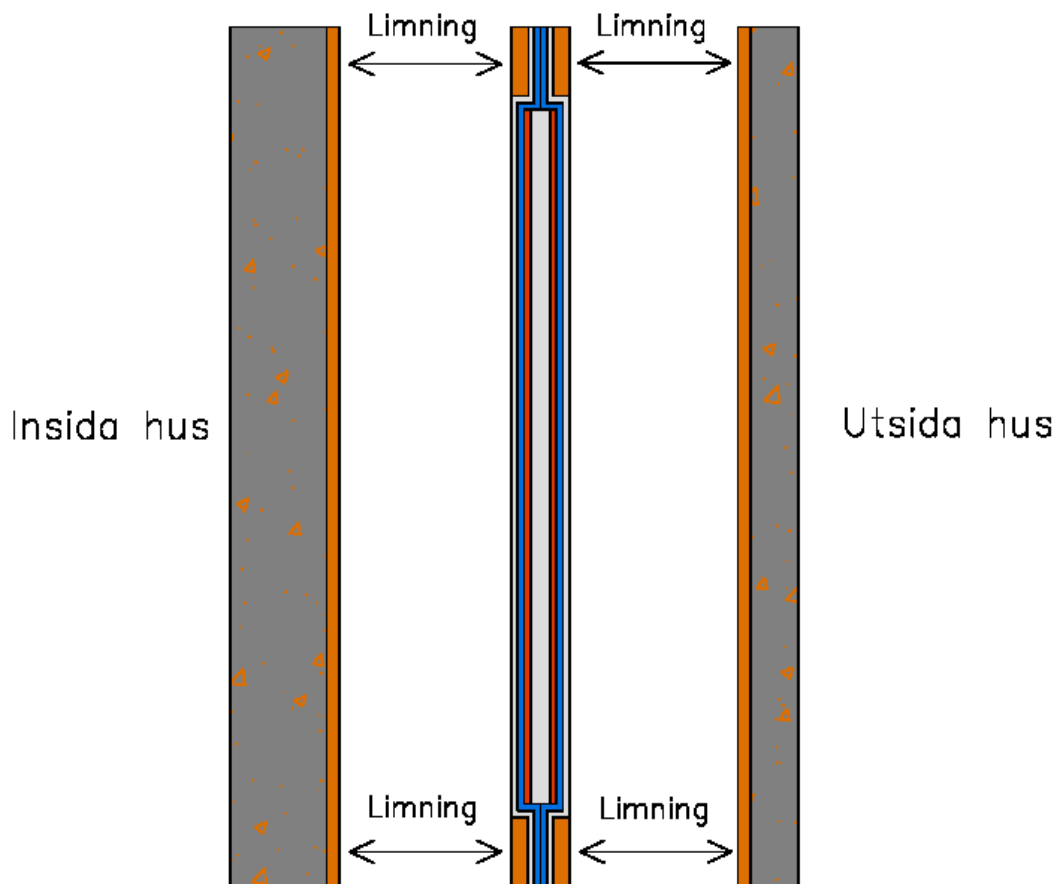
## 6.2.2 Uppbyggnad av ytterskikt



**Figur 6.3** En systematisk illustration för sammansättning av betong/PIR skikten.

När InsuFlex är färdig tillverkad, gjuts 150 mm betong enligt traditionella metoder som används bland annat av företaget Strängbetong. Mer information om gjutningsfasen finns på Strängbetongs hemsida, ([www.strangbetong.se](http://www.strangbetong.se)). När betongen är klar limmas en 20 mm tjock PIR-skiva direkt på betongskiktets insida, för att få en stark sammanhållning. Samma metod används för det andra betongskiktet som har tjockleken 75 mm och även där limmas en 20 mm PIR-skiva på betongens insida. Efter torkning erhålls två isolerade ytterskikt som sedan ska kompletteras med InsuFlex.

### 6.2.3 Sammansättning av InsuFlex-väggen



**Figur 6.4** En systematisk illustration för sammansättning av den totala väggen.

Slutligen sammansätts väggens betonglager på vardera sidan med en mellanliggande InsuFlex. De tre skikten som erhållits limmas därefter i sektionerna (A och C) för att uppnå bättre sammanhållning och hållfasthet. Utöver limningen finns det kramlor som går från det tjocka betonglagret genom sektionerna (A och C), ända in i det tunna betonglagret. Kramlorna penetrerar InsuFlex via PIR-blocken och kan då inte skada InsuFlex's kärnan. Väggen är då komplett och klar för användning.

## 7 Handberäkning

### 7.1 Allmänt

InsuFlex består av flera materialskikt med angiven tjocklek enligt tabell (4.6). De angivna tjocklekarna bestämdes under examensarbetets början där idén skapades. Beräkningar samt analyser bör därför baseras på dessa data.

Handberäkning utförs i stationära förhållanden enligt förenklade metoder som används av byggingenjörstudenter vid Högskolan i Halmstad. Här utförs beräkningar för varje enskilt material och även för väggen som helhet med hjälp av ekvationer och samband som redovisats i värmekapitlet. Målet med handberäkningen var att erhålla flera resultat såsom väggens totala tjocklek, värmeflöde och U-värde. Dessa har sedan jämföras med Strängbetongs sandwichvägg.

### 7.2 Resultat

I handberäkningen erhöles de sökta resultaten för InsuFlex-väggen. Resultaten var som förväntat mycket goda, med en förbättring inom både vägg tjocklek samt U-värde.

Nedan presenteras resultaten:

**Värmeflöde sektion(A)** = 18,5 (W)

**Värmeflöde sektion(B)** = 12,2 (W)

**Medel värmeflöde** = 12,7 (W)

**Väggens totala tjocklek** = 355,0 (mm)

**Väggens totala U-värde** = 0,107 (W/m<sup>2</sup>K)

Temperaturfördelning i väggens olika skikt redovisas i bilagorna (1-4).

## 7.3 Beräkningsgång

### Värmemotstånd (R-värde) och Värmeledningkoefficient (U-värde)

Beräkning av R-värdet för de olika materialen i väggen beräknas enligt ekvationerna (3.2–3.4) och U-värdet erhålls med ekvation (3.5) som finns i sektion (3.3.3). Här används de materialdata som presenterats i sektion (4.7) för att erhålla specifika R-värden för respektive materialskikt och sedan det totala R-värdet samt U-värdet för hela väggen. Svaren avrundas till tre decimaler.

**Ekvation (3.2):** 
$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (\text{m}^2\text{K}/\text{W})$$

**Ekvation (3.5):** 
$$U = \frac{1}{R_T} \quad (\text{W}/\text{m}^2\text{K})$$

Varje material har ett enskilt R-värde samt U-värde, men när de kombineras erhålls ett annat värmemotstånd som sedan ger ett nytt U-värde.

**Aerogel filt:** 
$$R = \frac{0,01}{0,0135} = 0,741$$

**PIR-isolering:** 
$$R = \frac{0,02}{0,0220} = 0,909$$

**OPTIM-R:** 
$$R = \frac{0,03}{0,0070} = 4,286$$

**PE-isolering:** 
$$R = \frac{0,01}{0,0380} = 0,263$$

**Ref. isolering:** 
$$R = \frac{0,01}{0,0110} = 0,909$$

**Betong insida:** 
$$R = \frac{0,015}{1,7000} = 0,088$$

**Betong utsida:** 
$$R = \frac{0,075}{1,7000} = 0,044$$

Väggen har ett erforderligt c/c-mått på 1250 mm.

**Ekvation (3.3):**  $R = \sum_{i=1}^N R_i = R_1 + R_2 + R_3 + \dots R_n \quad (\text{W/mK})$

**Ekvation (3.4):**  $R_T = R_{si} + \sum_{i=1}^N R_i + R_{se} \quad (\text{W/mK})$

I ekvation (3.3) tillförs värmeövergångsmotstånd vid ytor med luftkontakt som sedan visas i ekvation (3.4). Här summeras de ingående materialens värmemotstånd till ett enda värde som beskriver väggen som helhet. InsuFlex är inhomogen, eftersom OPTIM-R och Aerogel finns bara i isoleringens centrum. Detta medför att ekvation (3.4) måste modelleras om lite för att passa in i fallet. Beräkningen måste utföras i tre steg för att underlätta den och erhålla det korrekta R-värdet samt U-värdet för den totala väggen.

Först och främst måste det totala R-värdet summeras för InsuFlex med hjälp av  $\lambda$ -värde metoden. PIR-blocken i sektion (A) är lika tjocka som både OPTIM-R och Aerogel som finns i sektion (B), vilket gör att de kan räknas gemensamt.

**Steg (1):    ( $\lambda$ -värde metoden)**

Ett gemensamt  $\lambda$ -värde måste beräknas för Aerogel och OPTIM-R som författarna betecknar med (OA). Materialen har en total tjocklek på 50 mm.

$$\lambda_{OA} = P_A \times \lambda_{PA} + P_O \times \lambda_{PB}$$

$$\lambda_{OA} = \frac{0,02}{0,05} \times 0,0135 + \frac{0,03}{0,05} \times 0,007 = 0,0096 \quad (\text{W/m}^2\text{K})$$

Sedan ett gemensamt  $\lambda$ -värde för PIR-blocken och (AO), betecknas med (G).

$$\lambda_G = \frac{100}{1250} \times 0,022 + \frac{1150}{1250} \times 0,0096 = 0,0106 \quad (\text{W/m}^2\text{K})$$

Nu kan ett totalt R-värde räknas för  $\lambda$ -värde metoden med hjälp av ekvation (3.4).

$$R_T^\lambda = R_{si} + \sum_{i=1}^N R_i + R_{se}$$

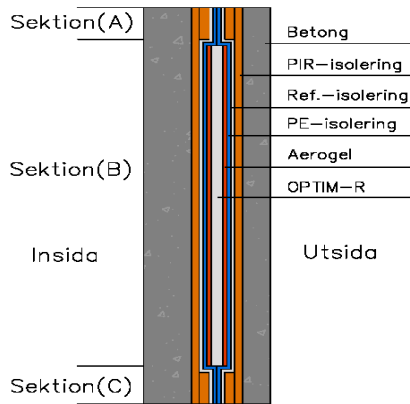
$$R_T^\lambda = R_{si} + BTG_{in} + PIR + Ref. \text{ isolering} + PE + Gemensam (G) + BTG_{ut} + R_{se}$$

$$R_T^\lambda = 0,13 + 0,088 + 4 \times 0,909 + 2 \times 0,263 + \frac{0,05}{0,0106} + 0,044 + 0,04$$

$$R_T^\lambda = 9,181 \quad (\text{m}^2\text{K/W})$$

## **Steg (2): (U-värde metoden)**

Beräkning av det totala R-värdet för sektion (A) och (B), enligt ekvationen ovan.



**Figur 7.1** Vägghälsing med respektive sektioner.

$$R_T^A = R_{si} + BTG_{in} + PIR + Ref. isolering + PE + PIR-block + BTG_{ut} + R_{se}$$

$$R_T^U = 0,13 + 0,088 + 4 \times 0,909 + 2 \times 0,263 + \frac{0,05}{0,022} + 0,044 + 0,04$$

$$R_T^U = 6,737 \text{ (m}^2\text{K/W)}$$

$$R_T^B = R_{si} + BTG_{in} + PIR + Ref. isolering + PE + (AO) + BTG_{ut} + R_{se}$$

$$R_T^U = 0,13 + 0,088 + 4 \times 0,909 + 2 \times 0,263 + \frac{0,05}{0,0096} + 0,044 + 0,04$$

$$R_T^U = 9,673 \text{ (m}^2\text{K/W)}$$

Sammanställning av ( $R_T^A$ ) och ( $R_T^B$ )

$$U_A = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{6,737} = 0,148 \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

$$U_B = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{9,673} = 0,103 \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

$$U_U = \frac{100}{1250} = \frac{1150}{1250} = 0,1066 \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

$$R_T^U = \frac{1}{U_U} = \frac{1}{0,1066} = 9,381 \text{ (m}^2\text{K/W)}$$

### **Steg (3): (U-värde för hela Väggen)**

Beräkning av det totala R-värdet med hjälp av steg (1) och steg (2).

$$R_T = \frac{1}{2} (R_T^U + R_T^\lambda) = \frac{1}{2} (9,381 + 9,181) = 9,281 \quad (\text{m}^2\text{K/W})$$

U-värdet för väggen

$$U_{\text{vägg}} = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{9,281} = 0,107 \quad (\text{W/m}^2\text{K})$$

### **Värmefflöde (Q) och totala väggfjockleken**

I kapitel (3.3.3) analyseras värmefflödestätheten i materialskikten under stationära förhållanden, vars beräkning sker enligt ekvation (3.6). Författarna förklarar att beräkning för homogena materialskikt är densamma för både en- och flerskikt-konstruktioner. För att erhålla värmefflödet (Q) används ett samband mellan ekvationerna (3.6) och (3.7). Nedan redovisas sambandet:

$$\text{Ekvation (3.6):} \quad q = \frac{T_i - T_e}{R_T} \quad (\text{W/m}^2)$$

$$\text{Ekvation (3.7):} \quad Q = U \times (T_i - T_e) \times A \quad (\text{W})$$

Sambandet mellan ekvationerna är enligt följande:

$$\text{Värmefflödet} = \text{Värmefflödestätheten} \times \text{Arean} \implies Q = q \times A \quad (\text{W})$$

Väggen består av tre sektioner, vilket betyder att värmefflödet i dem är olika. Beräkningen bör därför utföras för var och en av dessa sektioner. Författarna räknar med en väggängd på 2500 (mm) och beräkningen utförs med hänsyn till detta för att underlätta analysen.

### **Sektionerna (A och C):**

Beräkningen gäller vintertid.

$$R_T = R_{si} + BTG_{in} + \text{PIR} + \text{PIR-block} + \text{Ref. isolering} + \text{PE} + BTG_{ut} + R_{se}$$

$$R_T = 0,13 + 0,088 + 4 \times 0,909 + 2 \times 0,263 + \frac{0,05}{0,022} + 0,044 + 0,04$$

$$R_T = 6,737 \quad (\text{m}^2\text{K/W})$$

$$U_A = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{6,737} = 0,148 \quad (\text{W/m}^2\text{K})$$

$$\text{Area} = 1,250 \times 2,500 \quad (\text{m}^2)$$

$$T_i = 293,15 \quad (\text{K})$$

$$T_e = 253,15 \quad (\text{K})$$

Slutligen erhålls värmeflödet

$$Q_A = U_A \times (T_i - T_e) \times 1,250 \times 2,500 = 18,5 \quad (\text{W})$$

### **Sektion (B):**

$$R_T = R_{si} + BTG_{in} + \text{PIR} + \text{Ref.} + \text{PE} + \text{Aerogel} + \text{OPTIM-R} + BTG_{ut} + R_{se}$$

$$R_T = 0,13 + 0,088 + 4 \times 0,909 + 2 \times 0,263 + 2 \times 0,741 + 4,286 + 0,044 + 0,04$$

$$R_T = 10,232 \quad (\text{m}^2\text{K/W})$$

$$U_B = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{10,232} = 0,098 \quad (\text{W/m}^2\text{K})$$

$$Q_B = U_B \times (T_i - T_e) \times 1,250 \times 2,500 = 12,2 \quad (\text{W})$$

### **Värmeflöde för hela väggen:**

För att beräkna ett medel värmeflöde divideras andelen för varje sektion på den totala höjden och sedan multipliceras med respektive värmeflöde

$$Q_{\text{medel}} = \frac{100}{1250} \times 18,5 + \frac{1150}{1250} \times 12,2 = 12,7 \quad (\text{W})$$

### **Totala vägg tjockleken:**

Det har ingen betydelse i vilken sektion tjockleken beräknas, eftersom resultatet bli samma även om materialen skiljer. Författarna utför beräkningen genom sektion (B).

$$\text{Tjocklek} = BTG_{in} + \text{PIR} + \text{Ref. isolering} + \text{PE} + \text{Aerogel} + \text{OPTIM-R} + BTG_{ut}$$

$$\text{Tjocklek} = 150 + 2 \times 20 + 2 \times 10 + 2 \times 10 + 2 \times 10 + 30 + 75 = 355,0 \quad (\text{mm})$$

## 8 Analys

### 8.1 Syfte

För att verifiera väggens möjligheter utförs en simulering av väggen med beräkningsprogrammet COMSOL som använder sig utav finita elementmetoden. COMSOL ger möjligheten att utföra analysen i både 2D och 3D.

### 8.2 Finita Element Metoden

Finita elementmetoden, FEM, är en numerisk metod för att finna approximativa lösningar av partiella differentialekvationer. Metoden används i både utformning och analys av komplexa strukturella system. Lösningen erhålls genom att beräkningsmodellen delas upp, diskretiseras, i relativt små element med simpel geometri och beräknas lokalt för varje element, sedan kombineras hela systemet för att finna en lösning. Elementen är sammanbundna i speciella punkter som befinner sig i deras hörn och kallas för noder. Sammansättningen av de enstaka finita elementen kallas för mesh. Den stora utmaningen är att kunna skapa en approximation till den partiella differentialekvationen som är både korrekt och numerisk stabil. Om fallet att approximationen är felaktig blir resultatet totalt oanvändbart och måste modelleras om. I denna rapport används metoden för att beräkna värmeledningen i en sandwichvägg.

#### 8.2.1 Element

Det finns många olika elementtyper för temperaturberäkningar i både två- och tre dimensionella sammanhang. I vardagen används trianglar för skalstruktur och prismor för solider, där alla de oberoende variablerna är temperaturerna, vilket avser de obekanta variablerna i noderna. Författarna har valt att använda sig av triangulärt- och tetraederelement.



*Figur 8.1* Triangulärt- och tetraederelement

Geometrin och antal noder kan variera för olika element, men alla elementformer har en temperaturmotsvarighet med samma geometri och antal noder. Det betyder att om konstruktörer skulle utföra hållfasthetsberäkningar, kan de direkt utföra temperaturberäkningar utan att behöva ändra på elementindelning, det vill säga meshen.<sup>54,55</sup>

### 8.2.2 Lösningmetod

Lösningen i finita element delas i två olika metoder, implicit och explicit. Explicita metoden beräknar endast tillståndet i systemet vid en senare tidpunkt från systemets befintliga tillstånd. Risken för att erhålla fel i resultatet ökar då metoden endast tar hänsyn till vad som sker vid nästa steg. Implicita metoden finner lösningen genom att ta både den aktuella tidpunkten i systemet och den senare. Denna metod kräver mer beräkningstid, men ger ett noggrant resultat.

Sandwichväggen kräver stor noggrannhet för att lösa dess olinjära problem, då väggen är tidsberoende med kontaktvillkor, vilket gör att implicita metoden är lämpligast.

---

<sup>54</sup> "Finita elementmetoden – En kort introduktion till teorin", Nilsson, B, Högskolan i Halmstad, (2013-10-16)

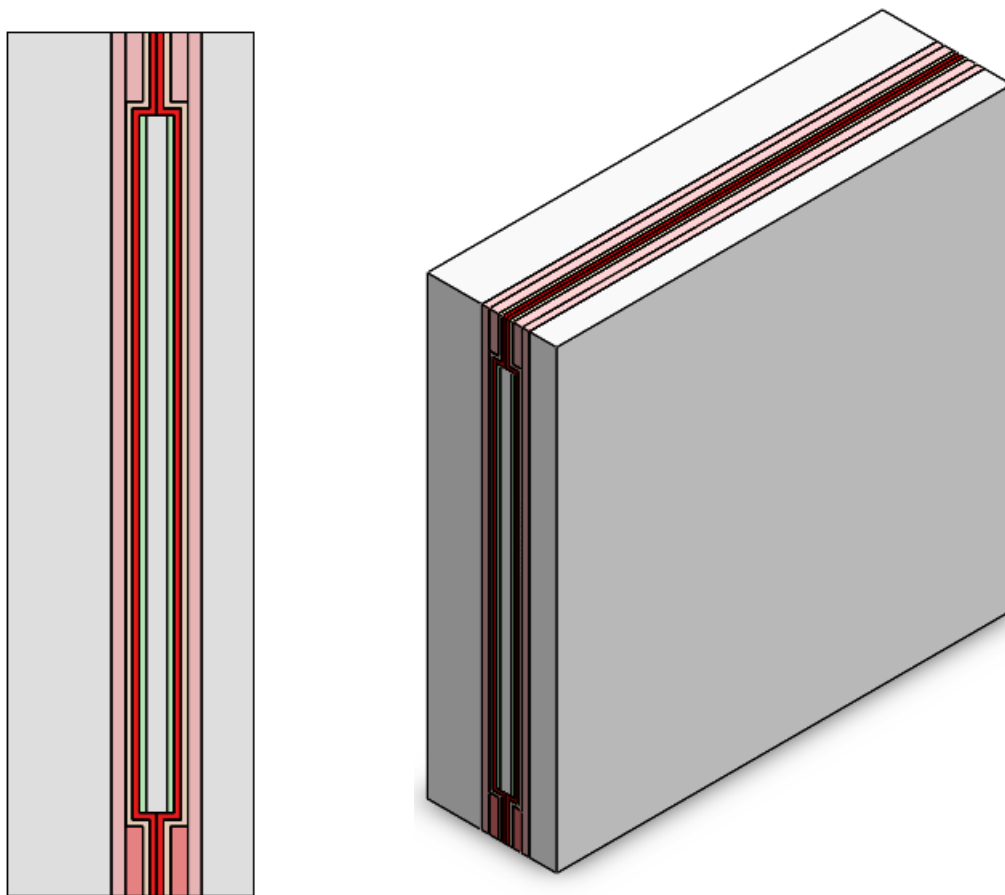
<sup>55</sup> "Applied Partial Differential Equations for Computational Science and Engineering – Part 1: Linear models in continuum mechanics", Hansbo, P, (2010-12-09)

### 8.3 Genomförande

I analysen redovisas två simuleringar med olika randvärden som behandlar Extremsituationer i vinter- samt sommartid. Väggens ingående delar modelleras i COMSOL med hjälp av solider, vars respektive materialparametrar appliceras för att erhålla en så nära verklig bild av slutprodukten.

#### 8.3.1 Geometri

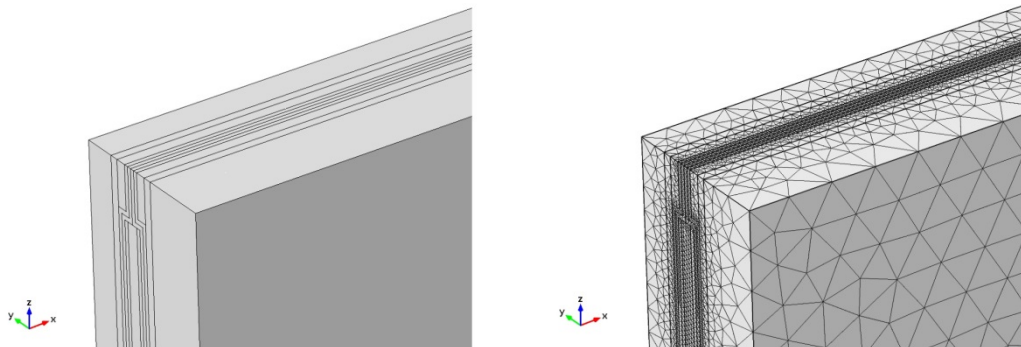
En komplett modell av väggen har skapats med måtten 2,5 x 2,5 x 0,355 (m<sup>3</sup>) och innehåller en InsuFlex med betongskikt på vardera sidan. Geometrin används som en bas för beräkningsmodellen.



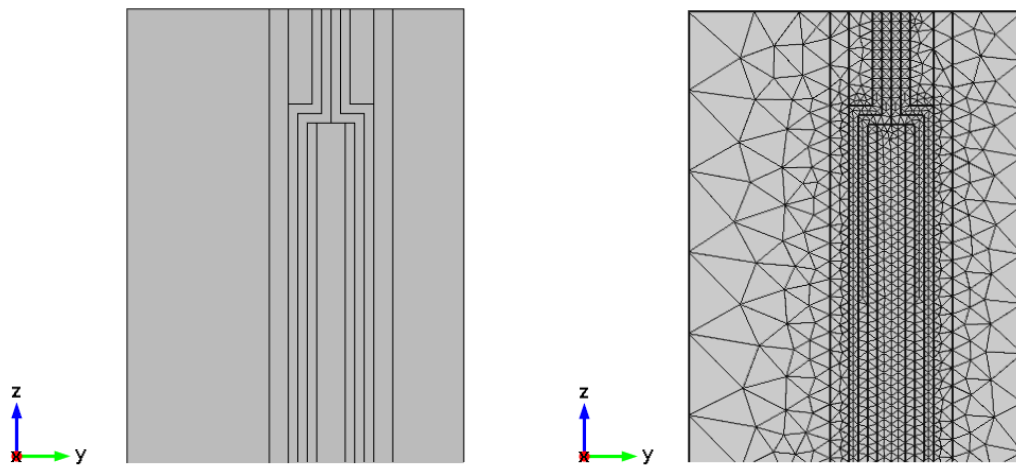
*Figur 8.2 Geometri*

### 8.3.2 Beräkningsmodell

Geometrin delas in i finita element, som beskriver den matematiska beräkningsmodellen, där COMSOL utför analysen med hjälp av värmelednings-ekvationen, se sektion (3.3.6).



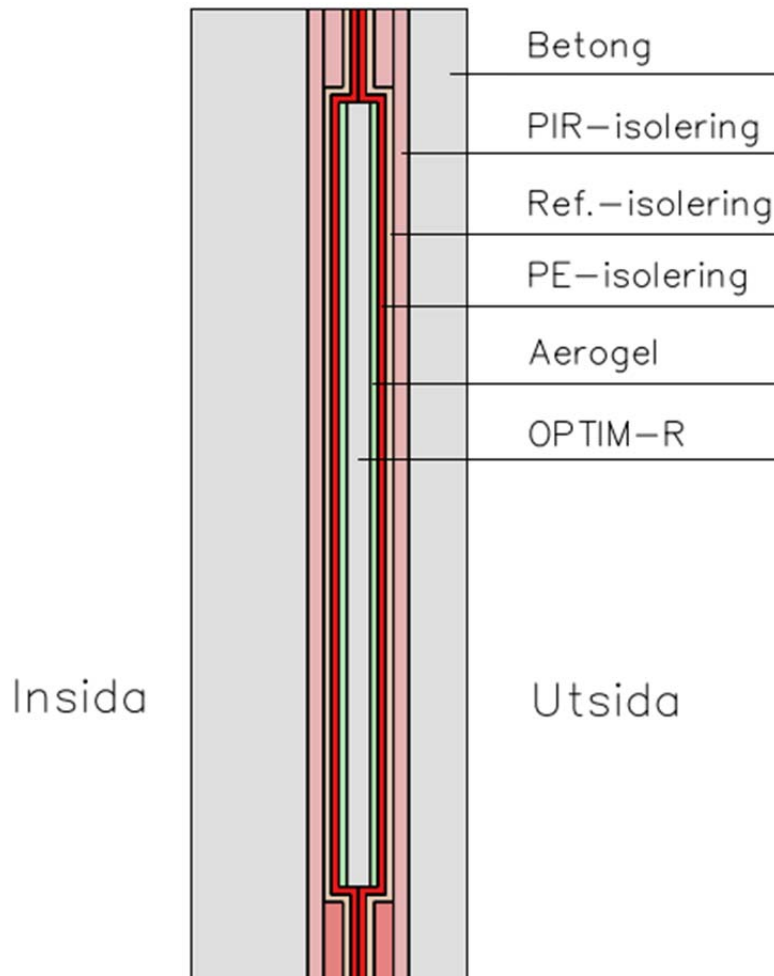
*Figur 8.3 3D bild för grundmodell och meshmodell.*



*Figur 8.4 Tvärsnitt av 3D modell.*

### 8.3.3 Material

För att kunna analysera väggen och erhålla ett korrekt resultat krävs relevanta materialparametrar som densitet, specifik värme och värmekonduktivitet. Dessa importerades direkt från tabell (4.6) och implementerades i beräkningsmodellen. De ingående parametrarna baseras på väggens material enligt figur (8.5).

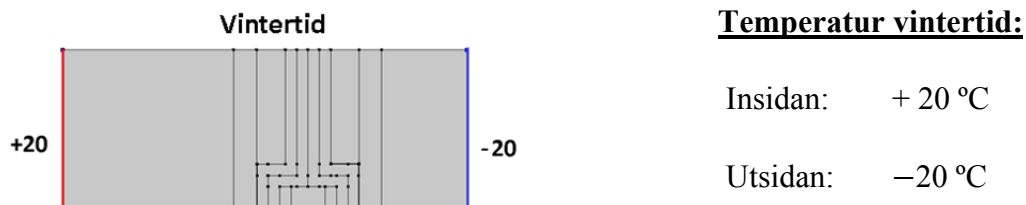


*Figur 8.5 Materialval*

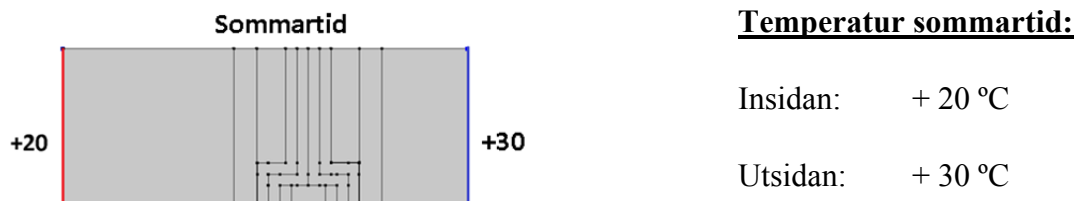
### 8.3.4 Randvillkor

För att få en entydig lösning till differentialekvationen måste randvillkor läggas som extra krav på ekvationen ifråga. Lösningen till differentialekvationen måste uppfylla villkoren vid randen av det området som ekvationen är definierad för. Randvillkoren har en oerhörd stor betydelse för värmeflödet och lösningen av differentialekvationen i väggen. Det ger större förståelse av vad som händer i väggens ytor på både insida och utsida.

Randvillkor för insidan och utsidan redovisas i figur (8.6) och (8.7) som bestämdes efter rådande extremvärden i Sverige och upplevs allt oftare med förändrat klimatsystem.



*Figur 8.6 Första analysen.*



*Figur 8.7 Andra analysen.*

Ett randvillkor för initialtemperaturen är ett krav för en tidsberoende analys vilket ger möjligheten att analysera hur värmespridningen sker och när värmejämvikt uppstår. Konservativt sätts initialtemperaturen till noll °C.

Med hjälp av randvillkoren och värmeledningsekvationen (3.12), ska de sökta resultaten i väggskikten erhållas.

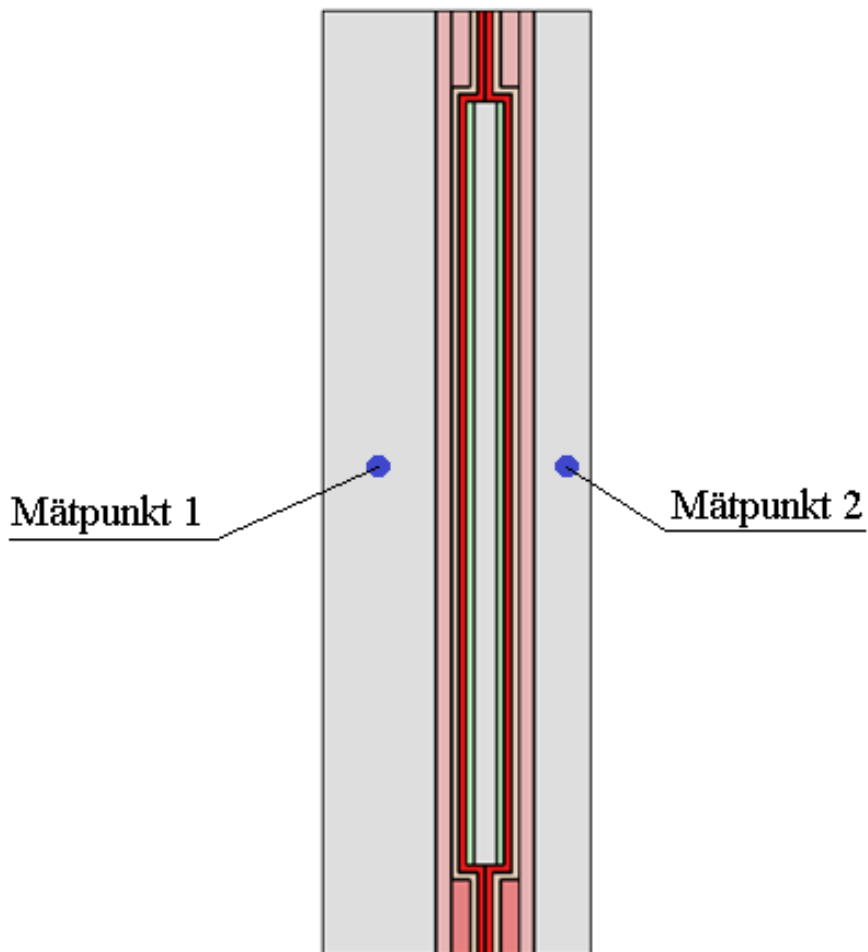
### 8.3.5 Körning

Körningen utfördes för både vinter- och sommartid under förloppet av en vecka om 30 minuters steg. Tidsperiodens längd sattes till en vecka för att kunna fastställa tidpunkten där modellen uppnår jämviktstemperatur.

## 8.4 Resultat

Lösningen av värme- och temperaturfördelningen i sandwichväggen beror på det fysiska tillståndet för varje enskilt material i förhållande till det intilliggande. Författarna har bestämt flera mätpunkter som analyserats och även dokumenterats under simuleringens gång. Mätpunkterna finns i varje materialskikt och även på ytterskiktens ytor som har direkt kontakt med luft.

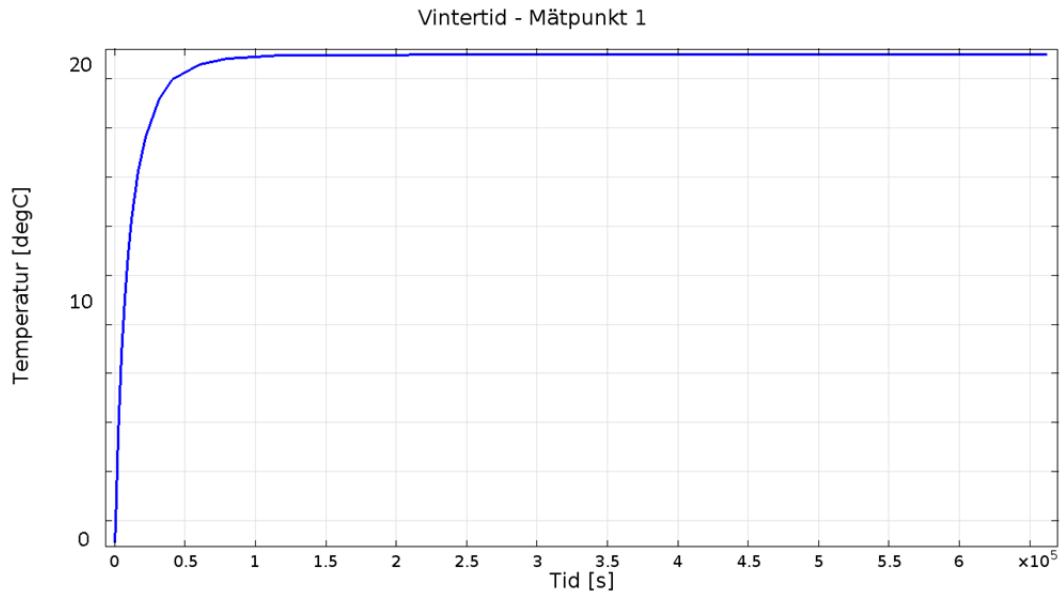
Väggens isoleringsskikt ska förhindra yttemperaturen att helt passera förbi InsuFlex delen. Två mätpunkter väljs ut och sitter i centrum av betongen som omsluter InsuFlex enligt figur (8.8). Temperaturen studeras tills värmejämvikt erhålls.



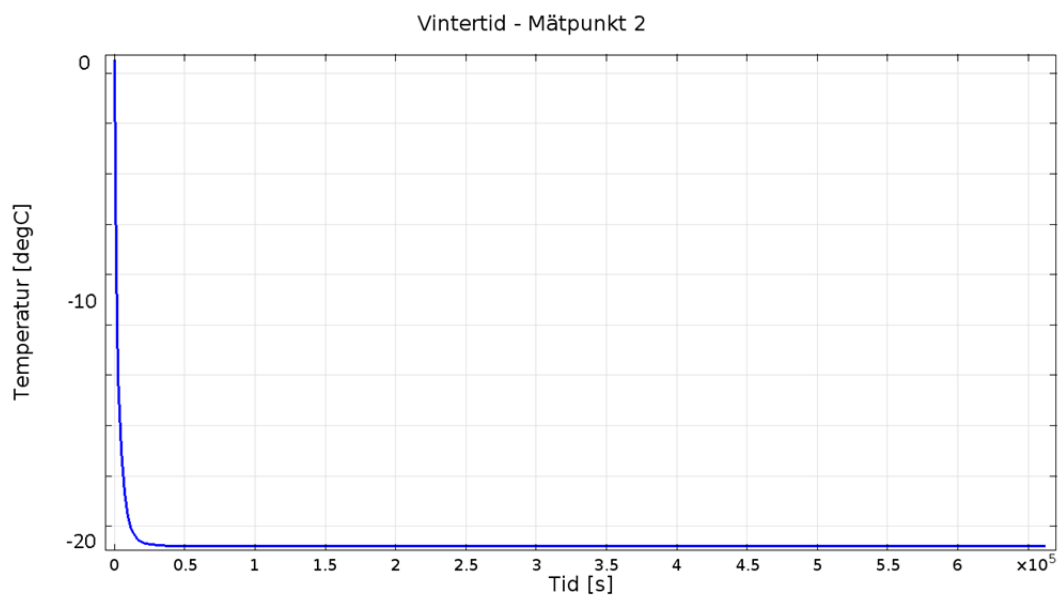
*Figur 8.8 Mätpunkter*

### 8.4.1 Vintertid

Från mätpunkterna placerade enligt figur (8.8) erhålls följande resultat.

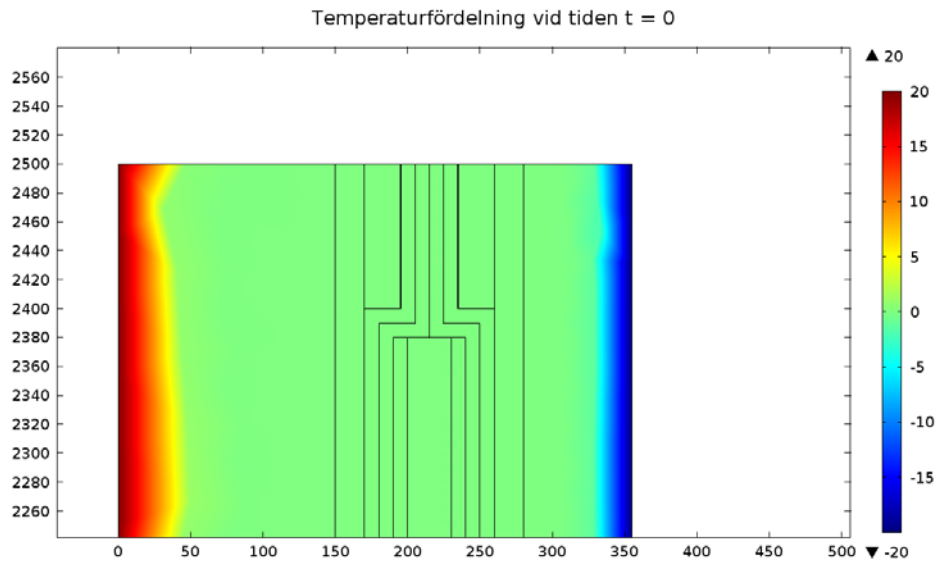


*Figur 8.9 Mät punkt 1, stabilisering av modell*



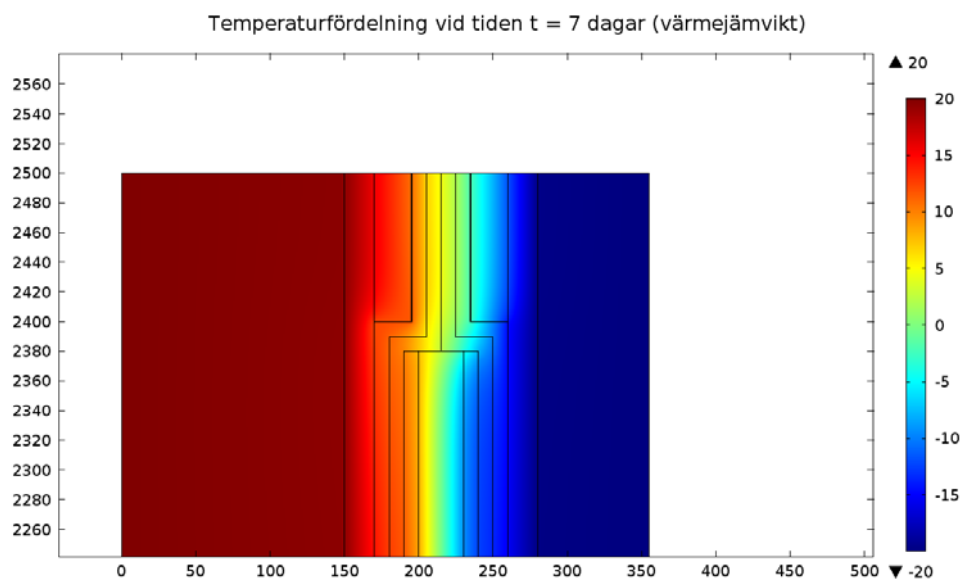
*Figur 8.10 Mät punkt 2, stabilisering av modell*

I figur (8.11) och (8.12) presenteras temperaturfördelningen vid start och slut under vinterförhållanden. Temperaturfördelningen presenteras utifrån de randvillkor som visades tidigare i sektion (8.3.4), med hänsyn till figur (8.6).



**Figur 8.11** Temperaturfördelning vid start

Under simuleringens gång har värmespridningen analyserats för att redogöra InsuFlex's isoleringsförmåga vid kritiskt vinterförhållande tills det att värmespridningen avtar och värmejämvikt råder. När temperaturen har blivit stabil och jämvikt råder erhålls temperaturfördelningen i elementet enligt figur (8.12).

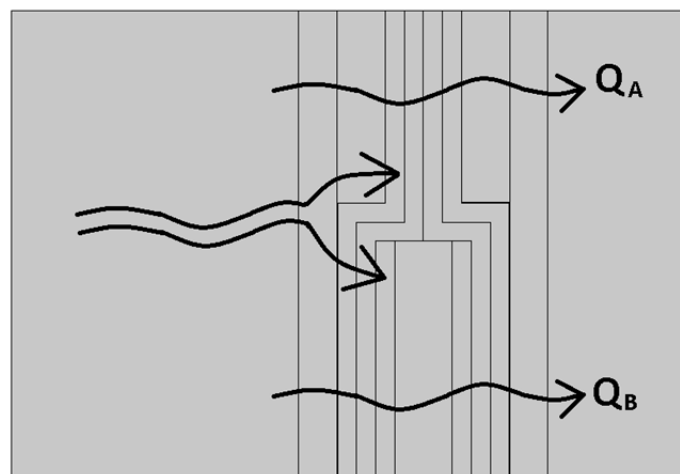


**Figur 8.12** Temperaturfördelning vid slut

Enligt figur (8.12) avviker temperaturfördelningen i sektion (A) i förhållande till sektion (B). Detta beror på att materialkombinationen i respektive sektion skiljer sig iförhållande från den andra. Sektion (A) fungerar som en indirekt köldbrygga och släpper igenom mer värme, dock har den fortfarande god isoleringsförmåga. Anledningen till det ökade värmegenomsläppligheten är att sektion (A) inte innehåller materialen OPTIM-R och aerogel. Däremot kompletteras detta med PIR-block, som medför att en god isoleringsförmåga fortfarande erhålls, dock lite försämrad.

Det sker ingen temperaturförändring i inre betongskiktet, eftersom materialet har en mycket dålig värmeisoleringsförmåga. Temperaturfallet blir i isoleringsskikten och fortsätter till yttre betongskikt som får en slutlig temperatur på minus 20 °C. InsuFlex har i helhet en mycket bra isoleringsförmåga, även om det förekommer köldbryggor. Köldbryggorna blir även större när kramlor appliceras i väggen och penetrerar materialen i sektion (A) och (C). Kramlor och dess inverkan behandlas dock inte i denna rapport.

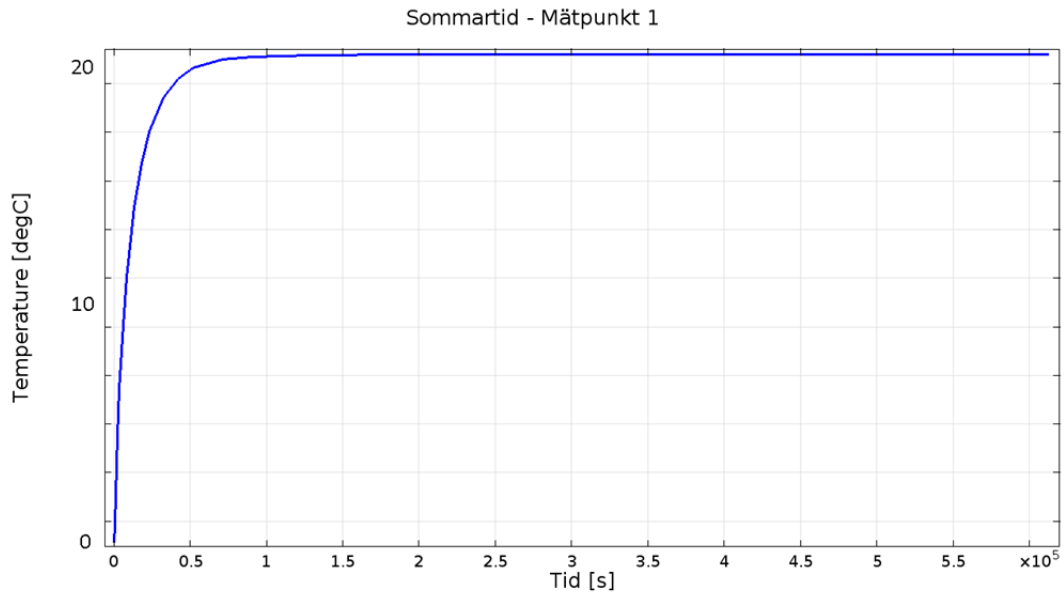
Värmeflödet flyter genom hela InsuFlex-väggen, men skiljer sig lite beroende på sektionen. Eftersom isoleringsförmågan i sektion (A) är lägre, medför det att värmeflödet i sektionen blir högre än sektion (B).



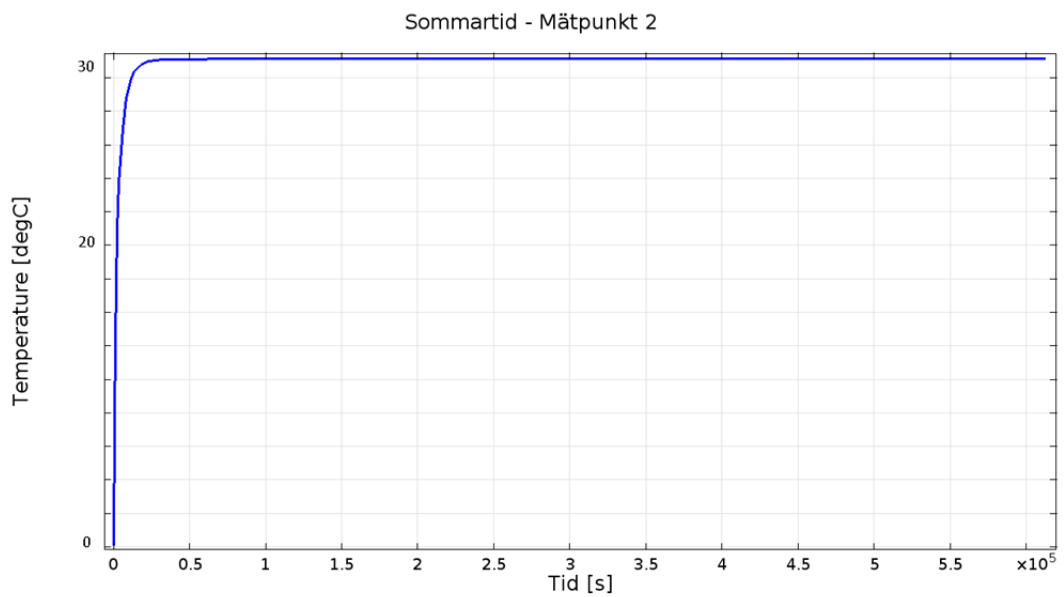
**Figur 8.13** Värmeflödet genom InsuFlex-väggen.

## 8.4.2 Sommartid

Från mätpunkterna placerade enligt figur (8.8) erhålls följande resultat.

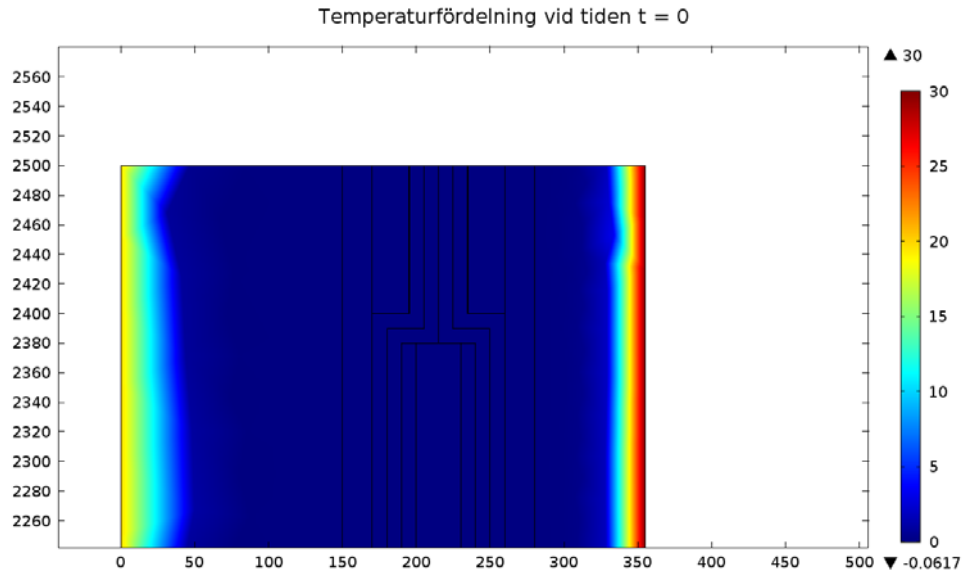


*Figur 8.14 Mät punkt 1, stabilisering av modell*



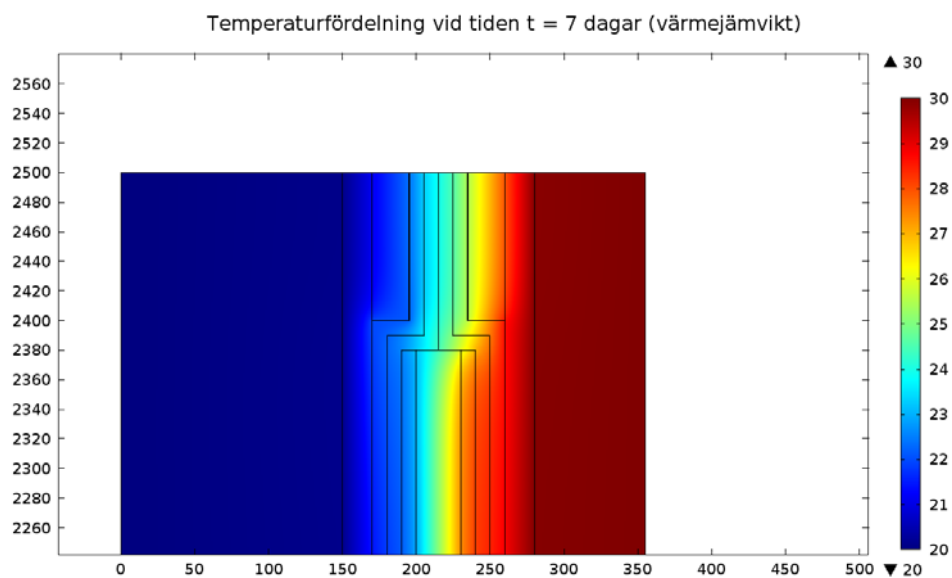
*Figur 8.15 Mät punkt 2, stabilisering av modell*

I figur (8.16) och (8.17) presenteras temperaturfördelningen vid start och slut under sommarförhållanden. Temperaturfördelningen presenteras utifrån de randvillkor som visades tidigare i sektion (8.3.4), med hänsyn till figur (8.7).



**Figur 8.16** Temperaturfördelning vid start

Även här studeras värmespridningen i InsuFlex-väggen med samma princip som tidigare, men under kritisk sommarperiod. När värmen stabiliserats och jämvikt råder erhålls temperaturfördelningen i elementet under sommarförhållandet enligt figur (8.17).



**Figur 8.17** Temperaturfördelning vid slut

En liknande avvikelse i temperaturfördelningen sker i sektionerna under sommartid. Även här beror anledningen på skillnaden i materialkombinationen för respektive sektion.

Det sker ingen temperaturförändring i yttre betongskiktet, eftersom materialet har en mycket dålig värmeisoleringsförmåga. Temperaturfallet blir i isoleringsskikten och fortsätter till inre betongskikt som får en slutlig temperatur på plus 20 °C. Författarna konstaterar att InsuFlex-väggen isolerar mycket bra även under sommartid och med rådande köldbryggor.

### **8.5 Slutsats**

Vid slutet av veckan är värmeflödet stabilt och ingen temperaturförändring sker i väggen. Utifrån resultatet i sektion (8.4) visas tydligt att väggen klarar av att isolera under extremförhållande. InsuFlex fungerar och har en mycket bra isoleringsförmåga, då värmetransporten genom den är minimal.

## 9 Resultat

### 9.1 Jämförelse – Beräkningar

Handberäkningen och simuleringen visade resultat för U-värde, värmeflöde och temperaturfördelning. Temperaturresultaten i simuleringen beror på värmeflödet genom materialen i sektionerna, där värden erhöles med hjälp av parametrarna värmekonduktivitet, specifik värme, densitet, geometri samt randvillkor. Resultaten i handberäkningen och simuleringen stämde bra överens, dock skilde temperaturena något. Temperaturskillnader visas i bilagorna (5 - 8).

Tjockleken är självklart densamma för både beräkningsmetoderna.

### 9.2 Jämförelse med Strängbetong-väggen

Från erhållna resultat i handberäkningen, utförs en jämförelse mellan väggen med InsuFlex och Strängbetongs sandwichväggar, enligt kapitel (5). I tabell (9.1) och (9.2) redovisas resultaten för var och en av väggarna samt de förbättringar som tillförts.

*Tabell 9.1 Jämförelse med Strängbetongs sandwichvägg med 150 mm Grafitt-EPS*

	Strängbetong	Miljövagg	Enhet	Förbättring
U-värde	0,2	0,107	[W/m <sup>2</sup> K]	46,50%
Tjocklek	375,0	355,0	[mm]	5,50%

I tabell (9.1) visar resultaten att väggen med InsuFlex erbjuder nästan dubbelt så bra isoleringsförmåga, dock blev vägg tjockleken endast 5,5 % tunnare.

*Tabell 9.2 Jämförelse med Strängbetongs sandwichvägg med 200 mm Grafitt-EPS*

	Strängbetong	Miljövagg	Enhet	Förbättring
U-värde	0,15	0,107	[W/m <sup>2</sup> K]	29,00%
Tjocklek	425,0	355,0	[mm]	16,50%

I tabell (9.2) är förbättringarna lite annorlunda, då isoleringsförmågan ökat med 29 % och vägg tjockleken blev hela 16,5 % tunnare.

Författarna konstaterar att de finns goda förbättringar i både tjocklek och isoleringsförmåga. Målen enligt kapitel (1) är uppnådda med goda marginaler. Resultaten är även bevisade genom simuleringen, då väggen uppnått värmejämvikt och visade att den isolerar väl.

## **9.2 Diskussion**

Simuleringsresultaten stämmer inte helt med praktiska försök, om det skulle utföras, men resultaten är väldigt nära verkligheten. Författarna gör en ingenjörsmässig bedömning att simuleringen skulle kunna innehålla felmarginal på maximalt 0,5 % gentemot verkligheten. Det är en acceptabel marginalnivå som inte påverkar slutresultaten. Felmarginalen kan bero på brist i både utförande och noggrannhet under tillverkningsprocessen.

I handberäkningen visades mycket goda resultat gällande temperaturresponsen. InsuFlex lever upp till de krav som ställts, men beräkningen har dock utförts i stationära förhållanden och kan skilja sig lite från praktiken. Det blev ändå goda förbättringar när väggen jämfördes med en befintlig sandwichvägg som finns i marknaden och det är ett tecken på att resultaten är acceptabla.

## **9.3 Slutsats**

InsuFlex i sandwichväggar av betong visar goda isoleregenskaper i teorin och kan mycket väl fungera i praktiken också. Resultaten för InsuFlex-väggen var definitivt bättre än Strängbetongs sandwichvägg, men det är värt att tänka på att tillverkningen av InsuFlex är mer krävande. Materialen i InsuFlex är säkerligen lite dyrare, men i det långa loppet lönar det sig säkert med minimala energiförluster.

#### **9.4 Förslag på fortsatt arbete**

Under arbetets gång insåg författarna vilka möjligheter InsuFlex kan tillföra. Resultaten av väggen kunde också bekräfta dessa möjligheter.

Författarna rekommenderar att fler analyser och vidareutveckling av InsuFlex ska genomföras. Nedan presenteras lite förslag på analyser:

- Hållfasthetsanalyser i tre dimensionella förhållanden
- Fuktanalyser i extremförhållanden
- Strålningsanalyser
- Kramlor och dess infästningsmetodik
- Vibrationsanalyser
- Tillverkning av prototyp och genomförande av verkliga tester
- Produktion och ekonomiska analyser

## 10 Referenslista

### 10.1 Litteraturförteckning

Nevander, L-E och Elmarsson, B (1994) ”Fukt handbok: Praktik och teori” Svensk byggtjänst, LTH

Burström, P-G (2010) ”Byggnadsmaterial, Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper” Studentlitteratur AB, Lund

Zenkert, D (1997) “*Sandwich Construction*” ISBN 0 947817964, Engineering Materials Advisory Services Ltd

Petersson, B-Å (2009) “*Byggnaders klimatskärm*” ISBN 978-91-44-05655-5, Studentlitteratur AB, Lund

Bryan, T (2005) “*Construction Technology: Analysis & choice*” ISBN-13: 978-1-4051-2295-5, University of the West of England

Illston, J-M och Domone, P-L-J (2001), Third Edition, “*Construction Materials: Their nature and behaviour*” ISBN 0-419-25850-7, Library of Congress Cataloging in Publication Data

Elmroth, A (2012) “Energihushållning och värmeisolering: Byggvägledning 8” Svensk byggtjänst

Valtin, E (2013) ”Analys av lågenergihus: Energieffektivt klimatskal” Examensarbete via Högskolan i Gävle

Brandt, J (2011) ”*Passivhus med prefabelement*” Examensarbete via Uppsala Universitet

Johansson, J och Bergviken, C (2012) ”*Prefabricerade nära nollenergihus*” Examensarbete via Tekniska högskolan i Jönköping

Karringer, A (2008) ”Passivhus: Studie om miljövänliga och energisnåla bostäder” Examensarbete via LTH

Hagentoft, C, E (2001) ” *Introduction to Building Physics*”, Studentlitteratur, Lund

## 10.2 Internet

”Passivhusens energivinst väger inte upp riskerna”, (06 jan. 2014) Debattartikel, Arkitekten nr 11/09

(<http://www.arkitekt.se/arkitekten/0911/f10310>)

”Kravspecifikation för Passivhus”, (06 jan. 2014), Publicerad (FEBY 06/09)

([http://www.ncc.se/Global/Projects\\_concepts/passivhus/Kravspecifikation\\_Passivhus\\_Juni\\_2009.pdf](http://www.ncc.se/Global/Projects_concepts/passivhus/Kravspecifikation_Passivhus_Juni_2009.pdf))

”Teknik- och systemlösningar för lågenergihus. En översikt”, (06 jan. 2014) SP, Rapport 2011:68: Författare: Sikander, Eva, Ruud, Svein

( <http://www-v2.sp.se/publ/user/default.aspx?RapportId=13008&OmradeId=7> )

”Baksidan av passivhus”, Arne Elmroth (september 2010)

(<http://www.byggahus.se/bygga/baksidan-av-passivhus>)

”Spara energi med värmeåtervinning”

<http://www.värmeåtervinning.se/energi/hushallning/>

”Byggtjänst, Så effektivt är dagens byggande”, (12 nov. 2012)

<http://www.byggtjanst.se/For-alla/Tema1/Energi/Sa-effektivt-ar-dagens-byggande/>

”ISOVER, krav på klimatskärm”

<http://www.isover.se/konstruktionsl%C3%B6sningar/bbr/krav+p%C3%A5+klimatsk%C3%A4rmen>

”NCC och Passivhus”, (06 jan. 2014), Publicerad (11-06-11)

<http://www.ncc.se/sv/Projekt-och-koncept/Grona-koncept/Passivhus/Vad-ar-ett-passivhus>

### **10.3 Personlig kommunikation**

David Samvin, M. Sc inom beräkningsteknik, Structural Analysis Engineering.  
Handledning under arbetets gång.

Dan Rahmqvist, Egenföretagare och kontakt via Graphisoft, Sverige.  
Handledning i programmet ArchiCAD.

Magnus Wallin, Nordisk direktör vid företaget Kingspan, Sverige.  
Bidrog med materialdata för isoleringsskikten.

Bengt Hjort, lektor vid Högskolan i Halmstad, Sverige.  
Handledning vid tillverkning av betongsektioner.

Göran Nilsson, adjunkt vid Högskolan i Halmstad, Sverige.  
Fördjupning inom sandwichkonstruktioner.

Lars Johansson, affärsansvarig vid företaget Strängbetong, Sverige.  
Fördjupning inom sandwichkonstruktioner.

## Bilaga 1 – Temperaturfördelning sektion (A) – Vintertid

Material	d	$\lambda$	R	$\Delta T$	Temperatur
	m	W/m°C	m <sup>2</sup> °C/W	°C	°C
ute					-20
R <sub>se</sub>			0,04	0,30	-19,70
Betong (utsida)	0,075	1,7	0,044	0,34	-19,36
PIR	0,020	0,023	0,870	6,62	-12,74
PIR-Block	0,010	0,023	0,435	3,31	-9,43
Ref. isolering	0,010	0,011	0,909	6,92	-2,51
PE-isolering	0,020	0,038	0,526	4,01	1,49
Ref. isolering	0,010	0,011	0,909	6,92	8,41
PIR-Block	0,010	0,023	0,435	3,31	11,72
PIR	0,020	0,023	0,870	6,62	18,34
Betong (insida)	0,150	1,7	0,088	0,67	19,01
R <sub>si</sub>			0,13	0,99	20
Inne					
R <sub>T</sub>			5,256		

## Bilaga 2 - Temperaturfördelning sektion (B) – Vintertid

Material	d	$\lambda$	R	$\Delta T$	Temperatur
	m	W/m°C	m <sup>2</sup> °C/W	°C	°C
ute					-20
R <sub>se</sub>			0,04	0,16	-19,84
Betong	0,075	1,7	0,044	0,17	-19,67
PIR	0,020	0,023	0,870	3,43	-16,24
Ref. isolering	0,010	0,011	0,909	3,58	-12,66
PE-isolering	0,010	0,038	0,263	1,04	-11,62
Aerogel-filt	0,010	0,0135	0,741	2,92	-8,71
OPTIM-R	0,030	0,007	4,286	16,88	8,18
Aerogel-filt	0,010	0,0135	0,741	2,92	11,10
PE-isolering	0,010	0,038	0,263	1,04	12,13
Ref. isolering	0,010	0,011	0,909	3,58	15,71
PIR	0,020	0,023	0,870	3,43	19,14
Betong	0,150	1,7	0,088	0,35	19,49
R <sub>si</sub>			0,13	0,51	20
Inne					
Summa			10,153		

### Bilaga 3 - Temperaturfördelning sektion (A) – Sommartid

Material	d	$\lambda$	R	$\Delta T$	Temperatur
	m	W/m°C	m <sup>2</sup> °C/W	°C	°C
ute					30
R <sub>se</sub>			0,04	0,08	29,92
Betong (utsida)	0,075	1,7	0,044	0,08	29,84
PIR	0,020	0,023	0,870	1,65	28,19
PIR-Block	0,010	0,023	0,435	0,83	27,36
Ref. isolering	0,010	0,011	0,909	1,73	25,63
PE-isolering	0,020	0,038	0,526	1,00	24,63
Ref. isolering	0,010	0,011	0,909	1,73	22,90
PIR-Block	0,010	0,023	0,435	0,83	22,07
PIR	0,020	0,023	0,870	1,65	20,42
Betong (insida)	0,150	1,7	0,088	0,17	20,25
R <sub>si</sub>			0,13	0,25	20
Inne					
R <sub>T</sub>			5,256		

## Bilaga 4 - Temperaturfördelning sektion (B) – Sommartid

Material	d	$\lambda$	R	$\Delta T$	Temperatur
	m	W/m°C	m <sup>2</sup> °C/W	°C	°C
ute					30
R <sub>se</sub>			0,04	-0,04	29,96
Betong	0,075	1,7	0,044	-0,04	29,92
PIR	0,020	0,023	0,870	-0,86	29,06
Ref. isolering	0,010	0,011	0,909	-0,90	28,17
PE-isolering	0,010	0,038	0,263	-0,26	27,91
Aerogel-filt	0,010	0,0135	0,741	-0,73	27,18
OPTIM-R	0,030	0,007	4,286	-4,22	22,96
Aerogel-filt	0,010	0,0135	0,741	-0,73	22,23
PE-isolering	0,010	0,038	0,263	-0,26	21,97
Ref. isolering	0,010	0,011	0,909	-0,90	21,07
PIR	0,020	0,023	0,870	-0,86	20,21
Betong	0,150	1,7	0,088	-0,09	20,13
R <sub>si</sub>			0,13	-0,13	20
Inne					20
Summa			10,153		

## Bilaga 5 – Temperaturjämförelse sektion (A) – Vintertid

Material	Handberäkning	Simulering
	°C	°C
ute	-20	-20
Ytteryta	-19,70	-20,00
Betong (utsida)	-19,36	-19,50
PIR	-12,74	-12,00
PIR-Block	-9,43	-6,00
Ref. isolering	-2,51	-1,00
PE-isolering	1,49	6,00
Ref. isolering	8,41	9,00
PIR-Block	11,72	13,00
PIR	18,34	19,50
Betong (insida)	19,01	20,00
Inneryta	20	20
Inne	20	20

## Bilaga 6 – Temperaturjämförelse sektion (B) – Vintertid

Material	Handberäkning	Simulering
	°C	°C
ute	-20	-20
Ytteryta	-19,84	-20,00
Betong (utsida)	-19,67	-19,50
PIR	-16,24	-16,00
Ref. isolering	-12,66	-12,50
PE-isolering	-11,62	-11,00
Aerogel-filt	-8,71	-8,50
OPTIM-R	8,18	8,00
Aerogel-filt	11,10	10,00
PE-isolering	12,13	12,00
Ref. isolering	15,71	14,50
PIR	19,14	19,50
Betong (insida)	19,49	20,00
Inneryta	20	20
Inne	20	20

## Bilaga 7 – Temperaturjämförelse sektion (A) – Sommartid

Material	Handberäkning	Simulering
	°C	°C
ute	30	30
Ytteryta	29,92	30,00
Betong (utsida)	29,84	29,50
PIR	28,19	28,00
PIR-Block	27,36	26,00
Ref. isolering	25,63	25,10
PE-isolering	24,63	23,50
Ref. isolering	22,90	22,50
PIR-Block	22,07	21,50
PIR	20,42	20,30
Betong (insida)	20,25	20,00
Inneryta	20	20
Inne	20	20

## Bilaga 8 – Temperaturjämförelse sektion (B) – Sommartid

Material	Handberäkning	Simulering
	°C	°C
ute	30	30
Ytteryta	29,96	30,00
Betong (utsida)	29,92	30,00
PIR	29,06	29,00
Ref. isolering	28,17	28,10
PE-isolering	27,91	27,50
Aerogel-filt	27,18	27,00
OPTIM-R	22,96	23,00
Aerogel-filt	22,23	22,30
PE-isolering	21,97	22,00
Ref. isolering	21,07	21,50
PIR	20,21	20,10
Betong (insida)	20,13	20,00
Inneryta	20	20
Inne	20	20

Byggingenjörer vid Högskolan i  
Halmstad med inriktning inom  
byggkonstruktion och projektering.



Besöksadress: Kristian IV:s väg 3  
Postadress: Box 823, 301 18 Halmstad  
Telefon: 035-16 71 00  
E-mail: [registrator@hh.se](mailto:registrator@hh.se)  
[www.hh.se](http://www.hh.se)