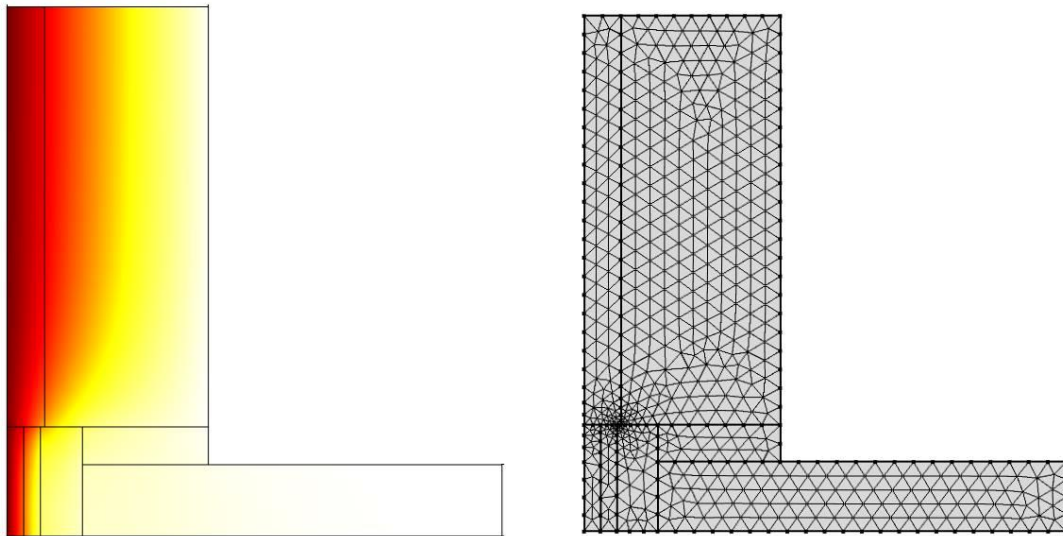


# CHALMERS



## Vakuumisoleringspaneler i anslutningar mellan byggnadselement

Köldbryggeberäkningar och utformning av effektiviseringar

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet  
Byggingenjör*

**MATTIAS HERMANSSON & MIKAEL JOHANSSON**

Institutionen för bygg- och miljöteknik  
Avdelningen för Byggnadsteknologi  
Byggnadsfysik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2014  
Examensarbete 2014:150



**Vakuumisoleringspaneler i anslutning mellan byggnadselement**

Köldbryggeberäkningar och utformning av effektiviseringar

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Byggingenjör*

MATTIAS HERMANSSON & MIKAEL JOHANSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik  
*Avdelningen för Byggnadsteknologi*  
*Byggnadsfysik*

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2014

# Köldbryggeberäkningar och utformning av effektiviseringar

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

© MATTIAS HERMANSSON, MIKAEL JOHANSSON, 2014

Examensarbete/Institutionen för bygg- och miljöteknik,  
Chalmers tekniska högskola 2014:150

Institutionen för bygg och miljöteknik  
Avdelningen för Byggnadsteknologi  
Byggnadsfysik  
Chalmers tekniska högskola  
412 96 Göteborg  
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:

Simulering i COMSOL Multiphysics av en regelvägg, bilden visar på temperaturfördelningen över en vägg med anslutande mellanbjälklag samt en ”mesh” som visar beräkningspunkterna.

Tryckeriets namn/ Institutionen för bygg- och miljöteknik  
Göteborg 2014

# Vakuumisoleringspaneler i anslutningar mellan byggnadselement

Köldbryggeberäkningar och utformning av effektiviseringar

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Byggingenjör*

MATTIAS HERMANSSON & MIKAEL JOHANSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för Byggnadsteknologi

Byggnadsfysik

Chalmers tekniska högskola

## SAMMANFATTNING

Examensarbetets syfte var att, genom användning av Vakuumisoleringspanel (VIP), undersöka och ta fram nya konstruktionslösningar för att förbättra energiprestandan för anslutningar mellan byggnadselement. Detta för att möta det förslag som lagts fram av Eu-kommissionen, att energiförbrukningen för byggnader skall minska med 20 % till 2020. Konstruktionsförslagen som tas upp i rapporten är; ett glasfasadssystem, där vakuumisoleringspaneler appliceras utvändigt, utanpå den täcklist, som i detta system utgör en köldbrygga, En stålregelvägg med anslutande mellanbjälklag eller bärande vägg i betong. Vakuumisoleringspanelerna limmas i denna konstruktion på en aquaboard i konstruktionen och täcker området där köldbryggan uppstår.

Detta gjordes för att påvisa vakuumisoleringspanelernas energieffektivitet i förhållande till andra värmeisolerande material. Studierna som gjorts har avgränsats till att behandla tvådimensionella beräkningar och simuleringar av konstruktionslösningar för statiska förhållanden.

Examensarbetet är utfört i en inledande litteraturstudie som tar upp problematiken med köldbryggor, materialegenskaper, värmetransport, samt de valda konstruktionslösningarnas uppbyggnad och funktion. Litteraturstudien har följts upp med modellering av befintliga konstruktionsdelar samt föreslagna konstruktionslösningar innehållande vakuumisoleringspaneler. De föreslagna konstruktionslösningarna har arbetats fram med hjälp av handledare på WSP, samt flera intervjuer med produkttillverkare för att få tillgång till konstruktioners materialspecifikationer. Simuleringarna gjordes i programmet COMSOL Multiphysics, som löser differentialekvationer, för tvådimensionella modeller. Framtagna simuleringar och beräkningar av föreslagna konstruktionslösningar visar att de praktiska lösningarna har för glasfasadsystemet gett en förbättring på 14.5–44 % och för stålregelväggens anslutningar en förbättring på 62–116 % för de enskilda köldbryggorna. I en exempelfasad som tagits fram, har förbättringen av glasfasadsystemet uppgått till 3–11 % och för stålregelväggen 11–15 % Dessa har sedan analyserats och följts upp av en diskussion kring möjligheten att tillämpa konstruktionslösningarna samt vad det skulle innebära för energieffektiviteten i ett byggnadsprojekt.

Nyckelord: Köldbrygga, VIP, Vakuumisoleringspanel, energieffektivitet



Energy calculations and production of solutions for thermal bridges using vacuum insulation panels

Diploma Thesis in the Engineering Program  
Building and Civil Engineering

MATTIAS HERMANSSON, MIKAEL JOHANSSON

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Building Technology

Building Physics

Chalmers University of Technology

The purpose of this project was to improve upon the energy performance of buildings by using VIP (Vacuum Insulation Panels). This in order to meet the demands set by the European Union to decrease the energy usage for heating of buildings by 20 % by year 2020. This was done by examining thermal bridges in the building envelope. The ones chosen were; a curtain wall with a lean structural construction, the concrete infill wall in a lightweight steel-structure wall and the connection between a concrete structural constructions intermediate floor and main partition wall.

The projects goal was to show the energy efficiency of VIP in comparison to other materials, to develop alternate constructions including VIP and compare them to the conventional ones. Our studies have been limited to working with simulations of these constructions in a 2-dimensional, steady state.

Initially a literary study was conducted in order to evaluate the essential problems of thermal bridges, material properties and heat flow in the chosen structures. Thereafter alternate constructions, including VIP, were developed and modelled in collaboration with WSP group and several interviews with manufacturers for parts of the curtain wall and concrete infill wall.

The heat flow studies were conducted in COMSOL Multiphysics. The results of the conventional, and the alternative construction show that improvement on the curtain wall were 14.5–44 % and 62–116 % for the concrete thermal bridges. In a test façade the performance improvements for the curtain wall were 3–11 % while 11–15 % for the concrete-steel-façade. Heat flow studies were compared in order to analyze and discuss the possibilities of applying these construction methods to the building sector and evaluate the possible energy performance improvements.

Key words: Thermal bridge, heat flow, VIP, Vacuum Insulation Pan





# Innehåll

1	BAKGRUND	1
1.1	Syfte	2
1.2	Avgränsningar	2
1.1.1	Byggmaterial	3
1.1.2	Förenklingar	3
1.3	Metod	3
2	VAKUUMISOLERINGSPANELER (VIP)	5
2.1	Materialegenskaper	6
2.1	Praktisk tillämpning	7
2.1.1	Livslängd	7
3	TILLÄMPAD VÄRMETRANSPORT	8
3.1	Ledning	8
3.1.1	Jämvikt	8
3.1.2	Endimensionellt värmefflöde	8
3.1.3	Tvådimensionellt värmefflöde	10
3.1.4	Numerisk lösning av tvådimensionellt värmefflöde	11
3.2	Konvektion	12
3.3	Håligheter och luftspalter	13
3.4	Strålning	14
4	KONSTRUKTIONSDETALJER LÄMPLIGA FÖR TILLÄMPNING AV VAKUUMISOLERINGSPANELER	16
4.1	Glasfasadsystem	16
4.1.1	Komplettering av glasfasadsystem med Vakuumisoleringspaneler	18
4.2	Stålregelvägg	19
4.2.1	Komplettering av stålregelvägg med Vakuumisoleringspaneler	19
5	COMSOLMODELL OCH BERÄKNINGSGÅNG	21
5.1	Fönster	22
5.1.1	Hantering av argonspalterna mellan glasrutor	22
5.1.2	Hantering av oventilerade luftspalter i ramar	23
5.1.3	Svensk standard för stålregelvägg	27
5.2	Materials värmemotstånd	27
6	RESULTAT OCH ANALYS	29
6.1	Glasfasadsystem	29
6.1.1	Punktköldbryggor till följd av skruvinfästning	31
6.1.2	Exempelfasad med glasfasadsystem	32

6.2	Fördelar och nackdelar med Vakuumisoleringspaneler i 2-glassystem	33
6.3	Fördelar och nackdelar med Vakuumisoleringspaneler i 3-glassystem	34
6.4	Ståregelvägg	35
6.4.1	Exempelsektion med ståregelvägg	36
6.5	Fördelar och nackdelar med Vakuumisoleringspaneler i Ståregelvägg med anslutande mellanbjälklag eller bärande vägg	37
7	ANALYS OCH DISKUSSION	38
7.1	Nutiden och framtiden för Vakuumisoleringspaneler inom byggsektorn	38
7.2	Möjlig ekonomisk inverkan av Vakuumisoleringspaneler	39
8	SLUTSATS	40
8.1	Framtida studier	40
9	LITTERATURFÖRTECKNING	42

## **Förord**

Detta examensarbete omfattar 15 högskolepoäng och är en del av byggnadsingenjörutbildningen på Chalmers tekniska högskola. Examensarbetet utfördes i samarbete med WSP.

Vi vill tacka WSP för tillgång till lokal, utrustning samt våra handledare på WSP; Hans Helling, Henrik Carlsson och Hans Wetterlund som involverat sig i detta examensarbete. Vi vill även tacka vår handledare på Chalmers tekniska högskola, Axel Berge, för all hjälp och ledning i detta arbete.

Göteborg Juni 2014

Mattias Hermansson, Mikael Johansson



# Beteckningar

## Grekiska bokstäver

$\Psi$	(W/(m·K))	Läckflödeskoefficient
$\epsilon$	(%)	Emissionstal
$\sigma$	(W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-4</sup> )	<i>Stefan–Boltzmanns konstant</i>
$\lambda$	(W/(m·K))	Värmeledningsförmåga
$\alpha$	(%)	Absorberad strålning
$\rho$	(%)	Reflekterad strålning
$\tau$	(%)	Transmitterad strålning

## Latinska versaler

A	(m <sup>2</sup> )	Area
E	(J/s)	Effekt
E <sub>b</sub>	(J/s)	Energi som strålas från en svart kropp
P	((Pa) eller (bar))T	Tryck
Q	(W)	Värmeenergi
R	((m <sup>2</sup> ·K)/W)	Värmemotstånd
T	(C eller K)	Temperatur
U	(W/(m <sup>2</sup> ·K))	Värmegenomgångskoefficient

## Latinska gemena

d	(m)	Tjocklek
b	(m)	Bredd
$h_a$	(W/(m <sup>2</sup> ·K))	Koefficient för konvektion
$h_{cd}$	(W/(m <sup>2</sup> ·K))	Koefficient för ledning
$h_r$	(W/(m <sup>2</sup> ·K))	Koefficient för värmestrålning
q	(W/m <sup>2</sup> )	Värmeflödestäthet

## Förkortningar

EPS	Expanderad styrencellplast	PE	Polyeten-plast
EPDM	Etenpropengummi Klass-M	PET	Polyetentereftalat
FEM	Finita elementmetoden	VIP	Vakuumisoleringspanel
PA-plast	Polyamidplast	XPS	Extruderad styrencellplast



# 1 Bakgrund

EU-kommissionen lade år 2008 fram ett förslag på hur minskningar i utsläppen av växthusgaser skulle kunna påverkas fram till år 2020.

En del av förslaget handlar om en stramare lagstiftning för energiförbrukning för byggnader. I dagsläget har en hel del certifieringar i samband med byggnation etablerats tack vare detta. Förslaget innefattar även 3 andra punkter.

- Växthusgaser ska minska med 20 procent till 2020.
- Minst 20 procent av energikonsumtionen år 2020 ska vara förnybar.
- Energieffektiviteten skall öka med 20 procent (Europaparlamentet, 2008).

Uppvärmning av byggnader inom EU uppgår till drygt hälften av energikostnaden för en byggnad, både i privata bostäder och för kommersiella lokaler (IEA/ECBCS, 2005)

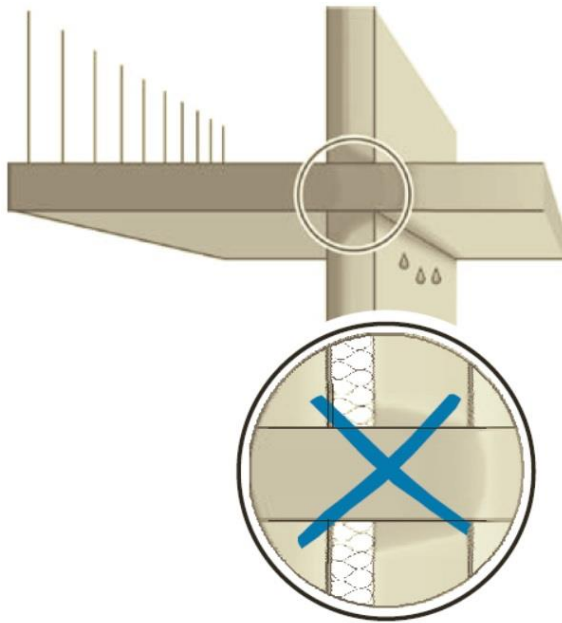
Där finns det mycket potentiell energi som kan vinnas genom att redan vid nyproduktion och tillverkning satsa på ett effektivare sätt att bygga. Idag används konventionell isolering, såsom glasull, stenull, XPS, EPS och cellulosaisolering i större och större mängder. Till följd av dessa stora volymer isolering som skall inneslutas i konstruktionen ökas väggtjockleken. Detta kan i sig medföra en minskad boarea, då huset är maximerat efter tomtstorleken. De logistiska kostnaderna ökar också med ökad isoleringsmängd och detta i sig motverkar strävan att uppnå EU-kommissionens tidigare nämnda förslag.

För att uppnå de mål som satts upp i förslaget och hålla ner de logistiska kostnaderna krävs en mer effektiv isolering, likt vakuumisolering. Vakuumisolering har flera fördelar över konventionell isolering som beskrivs i större utsträckning i kapitel 2.1. Vakuumisoleringspanelerna har framförallt en väldigt låg värmeledningsförmåga, som är det som eftersträvas vid isolering av byggnader. Detta medför både en minskad volym som byggs in i konstruktionen och en minskad transportmängd som krävs. Fram tills idag har en del forskning gjorts inom vakuumisolering och dess användningsområden. Bengtsson och Johansson (2008) har exempelvis tagit fram detaljer för att använda bl.a. vakuumisolering i välisolerade murverkskonstruktioner. Isolering av köldbryggor med extra isolering eller väl utformade köldbryggor medför en stor skillnad i energiförlusterna under byggnadens livslängd (Fredlund, 2014)

Vakuumisolering har ett betydligt högre pris jämfört med konventionell isolering. Vakuumisolering som en heltäckande isolering kan därmed medföra en för stor initialkostnad i produktionen för att satsning skall våga tas. Dock ökar hela tiden kraven på isolerförmågan och steg måste tas för att utveckla och utnyttja de material som finns på marknaden. Att använda isolering inom mindre områden på byggnaden kan skapa tillit till materialet samtidigt som utveckling sker, då det inom en snar framtid kommer krävas. Priset på vakuumisoleringspaneler sjunker kontinuerligt, och efter hand blir det åtråvärt att ha lösningar tillgängliga då detta medför att det blir ännu mer ekonomiskt relevant att använda detta material i produktion. Lösningförslag som kan bli allt mer relevanta ju mer vakuumisoleringen etablerar sig i produktionen, kan exempelvis vara byggnadsdetaljer där köldbryggor uppstår.

En köldbrygga är en del av en byggnad där det sker en högre värmetransport än i konstruktionen omkring. Anslutningar mellan byggnadselement kan orsaka stora köldbryggor och energiförluster för ett hus. Dock är alla ställen i en konstruktion där isolering har minskats köldbrygga. Ett arbete som riktar sig mot att förebygga dessa

köldbryggor genom att anpassa materialvalet och utformningen för dessa känsliga delar är av stor vikt.



Figur 2: Visar ett exempel på köldbrygga: Utkragande betongbjälklag

## 1.1 Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka och ta fram nya lösningar för att förbättra energiprestandan hos anslutningar mellan byggnadselement genom användning av vakuumisoleringspaneler. Arbetet skall undersöka energibesparingar, genom att kontrollera vilken påverkan dessa lösningar har på värmetransporten genom konstruktionen, och därmed energiförlusterna genom dessa köldbryggor. Detta skall i sin tur leda till framtagande av konstruktionsexempel där vakuumisolering används för att isolera köldbryggor.

## 1.2 Avgränsningar

Avgränsningar för vilka konstruktionsdetaljer som skulle utformas är grundat på vilka konstruktioner som är relevanta idag och som skulle ha möjlighet att användas i samband med vakuumisoleringspaneler. Med hjälp av handledning från WSP och från Chalmers tekniska högskola har det avgränsats till 3 detaljer.

1. Karmar i glasfasadssystem
2. Anslutning mellan stålregelvägg och bärande vägg
3. Anslutning mellan stålregelvägg och mellanbjälklag

I glasfasadssystemet är det de långsträckta ramarna kring fönsterkassetterna som potentiellt utgör en stor energiförlust. Detta då det inte finns någon möjlighet till att införa konventionell isolering där. Som grund för utformning av dessa simuleringsdetaljer ligger Schucos fasadssystem FW50+HI, som är ett 2-glassystem, och FW50+SI, som är ett 3-glassystem. Detta val gjordes med fördel då det är en



välkänd tillverkare med höga krav på energieffektivitet såväl som på sina konstruktioner.

För anslutning mellan stålregelvägg till bärande vägg och mellanbjälklag uppstår köldbryggor mellan fasadväggen och de betongelement som utgör den bärande väggen och mellanbjälklaget. Då betongelementen byggs in i fasadkonstruktionen minskar därmed den potentiella tjockleken för isoleringsmaterialet som byggs in i den delen av konstruktionen.

### 1.1.1 Byggmaterial

Valet av byggmaterial för glasfasadsystemet bestämdes av vilka material som Schuco valt att använda i sina konstruktioner.

Vad gäller stålregelväggen, valdes just stålregelvägg för att det är en vanlig typ av konstruktion vid nybyggnation av större bostadshus och kontorslokaler och för stålregelväggar förekommer det ofta anslutningar mellan bärande väggar och mellanbjälklag. Stålregelväggen med anslutning till mellanbjälklag och bärande vägg valdes utifrån standardritningar från WSP.

### 1.1.2 Förenklingar

Alla simuleringar gjordes i 2D. Detta för att endast beräkning av långsträckta linjära punktbryggor behandlas. Då är flödet genom de undersökta konstruktionerna konstanta för hela längden av konstruktionen. Den förbättring som 3D-modeller skulle kunna resultera i, är en bättre förståelse för de punktformiga köldbryggor, som uppstår på grund av skruvar som binder konstruktionen i glasfasaden. Dessa skruvar medför en viss skillnad i värmetransporten genom konstruktionen. Detta har valts att bortse från. Dock kommer simuleringar och kommentarer med vad dessa punktköldbryggor skulle kunna ha för inverkan på den slutgiltiga lösningen att diskuteras och analyseras.

## 1.3 Metod

Examensarbetet genomfördes i fyra steg. Först en inledande litteraturstudie som bestod av fördjupning inom litteratur om vakuumisoleringspaneler, effektivisering av köldbryggor och värmeflöden genom och i konstruktioner.

Detta följdes upp med val av konstruktionsdetaljer som valdes med hjälp av handledare på WSP, där vi utgick ifrån vilka konstruktioner som kan vara relevanta att integrera med vakuumisoleringspaneler. Kunskapen från litteraturstudien och de konstruktionsdetaljer vi valt att behandla, ledde till förslag på hur dessa kunde utvecklas med införande av vakuumisoleringspaneler.

Vidare modellerades de valda detaljerna upp för beräkning i COMSOL, ett program som med hjälp av finita element beräknar värmeflödet genom de modellerade konstruktionsdetaljerna. COMSOL valdes då det inte är bundet till en specifik standard vilket med fördel kan utnyttjas i arbetet då egna modeller och materialegenskaper kan modifieras efter behov.

För beräkning av luftfyllda, oventilerade håligheter i glasfasadskonstruktionen används Svensk Standard: SS EN ISO 10077-2 (2003). Denna beräkningsgång kan ses i kapitel 3.5 Beräkningsgång

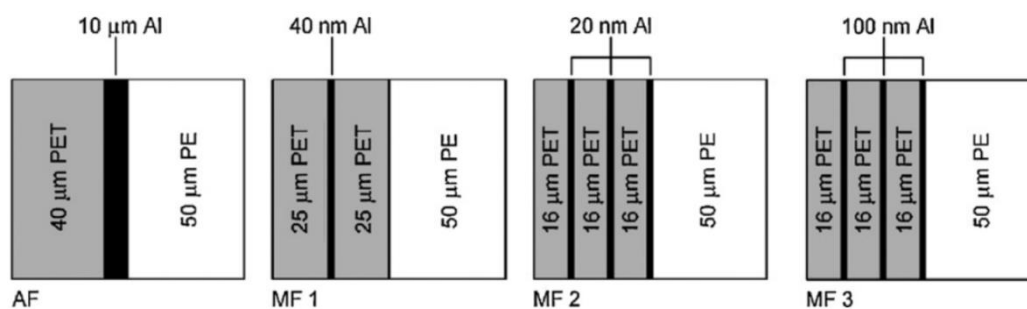
För värmegenomgångsmotstånd valdes värden i enighet med ”*tillämpad byggnadsfysik*” (Petersson, 2009) om annat ej anges.

Slutligen i analysfasen, har allt material sammanställts och en djupare analys gjordes i form av en jämförelse mellan standardritningar och framtagna förslag innehållande vakuumisoleringspaneler, för att titta på vilken skillnad vakuumisoleringspanelerna skulle kunna innebära i de valda konstruktionsdetaljerna ur ett energieffektiviseringsperspektiv. Samtidigt hölls en diskussion angående positiva och negativa sidor kring resultaten av användandet av vakuumisoleringspaneler inom byggsektorn för att visa på om det kan vara ekonomiskt försvarbart och användbart för företag i dagens byggande.

## 2 Vakuumisoleringspaneler (VIP)

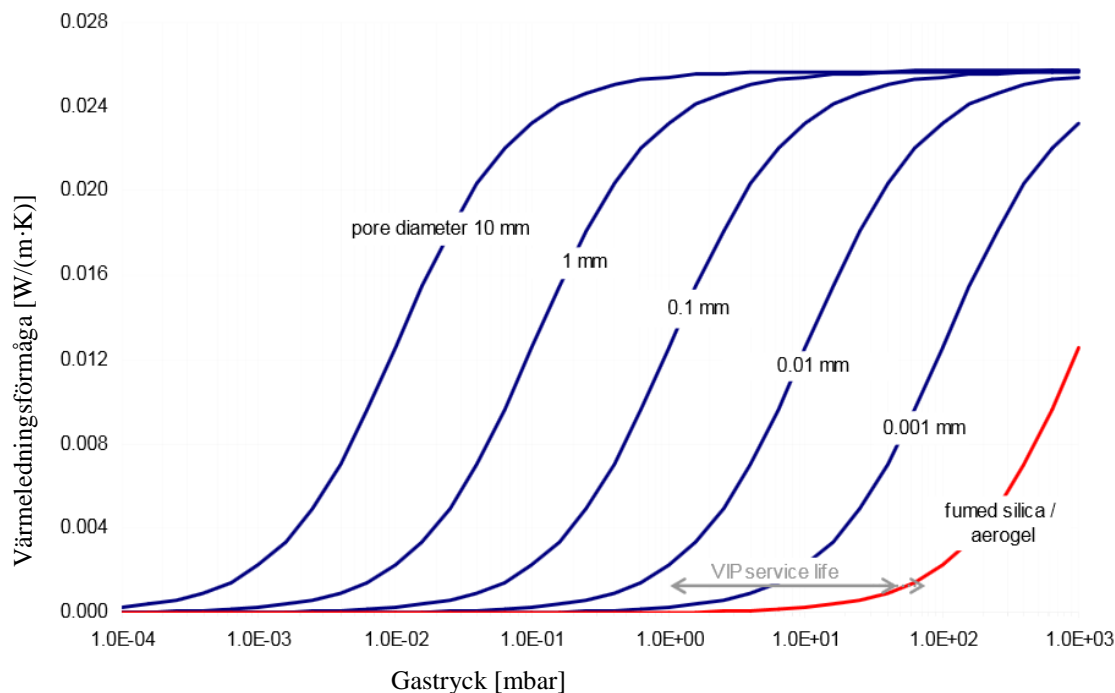
Vakuumisolering är ett högisolerande material som är vanligt förekommande i bland annat frys- och kylskåp. Isoleringen är fortfarande under utveckling när det kommer till byggsektorn. Dock har vakuumisoleringspaneler börjat appliceras som en lösning för väggar med begränsad tillgång till utrymme för isolering eller väggar där estetik ej får påverkas märkvärt, som i Q-märkta hus. Eftersom vakuumisoleringspaneler har över fem gånger större isoleringsförmåga i jämförelse med idag vanligt förekommande konventionella isoleringstyper, klarar den att skapa samma isoleringsförmåga på mindre yta och därmed lösa många av de problem som uppstår i ovan nämnda exempel. (Clase, 2010)

Vakuumisoleringspaneler består av ett poröst kärnmaterial som är inneslutet i ett diffusionstätt hölje. Det diffusionstäta höljet består vanligen av flera lager med polymerlaminat och aluminium vilket visas i figur 2. Detta med syfte att behålla det låga tryck som skapats i kärnan vid tillverkningsprocessen så länge som möjligt för att resultera i en lång livslängd för vakuumisoleringspanelerna. Vid tillverkning av vakuumisoleringspaneler töms panelerna på luft innan kärnmaterialiet försluts i höljet. Denna process resulterar i att ett väldigt lågt atmosfärtryck bibehålls, ner till ungefär 1 % av normalt atmosfärtryck (1 Bar). (Clase, 2010)



Figur 3 : Metalliserat laminat av flera lager som omsluter kärnmaterialiet i VIP. Laminatet är uppbyggt av lager som förekommer i olika tjocklekar och material. (Willems, 2005)

Kärnmaterialiet tillverkas i flera olika varianter, vanligt förekommande är kiseldioxid, då det har låg värmeledningsförmåga och klarar att hålla form och struktur även vid atmosfärtryck. För att vakuumet skall få så stor effekt som möjligt krävs så små porer som möjligt. I figur 3 visas korrelationen mellan gastryck och värmeledningsförmågan genom gasen i en matematisk modell med varierande porstorlek. Det går enkelt att se att en mindre porstorlek och ett lägre tryck medför en lägre värmeledningsförmåga. Då porstorlek och tryck minskas går värmeledningsförmågan ner mot noll. Det finns även utritat inom vilket spann livslängden för vakuumisoleringspanelerna håller sig innan den är förbrukad, vilket innebär att värmeledningsförmågan kommer öka väsentligt då trycket ökar med tiden. (Johansson & Berge, 2012)



Figur 4 : Värmeledningsförmåga genom gasen som funktion av porstorlek och gastryck. De små porerna i samband med lågt tryck ger upphov till en lägre värmeledningsförmåga. (IEA/ECBCS, 2005)

## 2.1 Materialegenskaper

Värmeledningsförmågan för vakuumisoleringspaneler med kiseldioxid som kärnmaterial uppgår till ungefär 0,004 W/(m·K) vid nyproduktion. Värmeledningen genom paneler påverkas starkt av höljet som omsluter kärnmaterialiet. Ett högkonduktivt material som aluminium medför köldbryggor i panelernas ytterkant och mellan panelerna vid installation. Detta tillför 0,001-0,002 W/(m·K) till den totala värmeledningen för vakuumisoleringspanelerna för de höljestjocklekar som har undersökts. Vidare kommer åldrandet av vakuumisoleringspanelen ge upphov till en negativ inverkan på värmeledningsförmågan, eftersom luft långsamt diffunderar in i panelen tills tryckskillnaden är utjämnad. Då trycket i panelerna ökar med tiden ger det en livslängd för vakuumisoleringspanelerna som beror på materialval, klimatförhållande och tillverkningsprocess. Hanteringen och transporten av vakuumisoleringspanelen från fabrik till installation vid ett bygge antas ge en ökad värmeledningsförmåga med 0,001-0,002 W/(m·K). Detta ger en total värmeledningsförmåga för vakuumisoleringspaneler i praktiken på ungefär 0,006-0,008 W/(m·K), beroende på placering och panelstorlek. Observera att detta är uppskattad värmeledningsförmåga för paneler i förhållande till varandra och inte i förhållande till köldbryggor som uppstår mellan konstruktionsdelar och vakuumisoleringspanelerna. (IEA/ECBCS, 2005)

I jämförelse med vanligt förekommande isoleringstyper så är värmeledningsförmågan för vakuumisoleringspaneler mer än fem gånger så effektiv. (se Tabell 1)

Tabell 1 : Materialegenskaper i form av densitet och värmeledningsförmåga vid bestämt tryck och tjocklek, samt livslängd för olika isoleringsmaterial.

Produktnamn	Kärnmaterial	Hölje	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Värmelednings förmåga [W/m <sup>2</sup> ·K]	Tryck [mbar]	Tjocklek [mm]	Livslängd [år]
Va-Q-tec Va-Q-VIP B	Kiseldioxid pulver	3 lager (PET)	200	0,007	0,05-3	20	>30
Isover EPS Isolerskiva S80	EPS Cellplast	-	18	0,038	1000	70	>50
Isover XPS Ultimate UNI	Glasull	-	15-125	0,037	1000	95	>50
Isover Markskiva	Mineralull	-	140	0,038	1000	50	>50

(Gohardani, 2010)

## 2.1 Praktisk tillämpning

Att utnyttja vakuumisoleringspaneler i praktiken kräver god förkunskap om materialet som behandlas. Panelerna är känsliga för mekanisk påverkan, skador på höljet kan punktera vakuumisoleringspanelerna och det medför att tryckförhållandet i kärnan ökar drastiskt. Detta i sin tur medför en högre värmeledningsförmåga (se figur 3), som i sin tur medför betydligt sämre energieffektivitet för konstruktioner vars isoleringslager är uppbyggt av vakuumisoleringspaneler.

Vakuumisoleringspaneler har i dagsläget störst användningsområde i byggnationer där begränsade isoleringsutrymmen utgör en viktig faktor för bygget, då vakuumisoleringspanelerna ger möjlighet till en mycket slankare konstruktion än med traditionella isoleringsmaterial. Men kan även användas vid energieffektivisering i strävan efter mer och mer energieffektiva hus till minsta kostnad.

### 2.1.1 Livslängd

Då balans mellan trycket i vakuumisoleringspanelerna och omgivningens atmosfärtryck eftersträvas av naturlig kraft, sker det en ständig diffusion genom vakuumisoleringspanelens hölje, vilket leder till att trycket i kärnmaterialets porer kommer öka med tiden och resultera i att värmeledningsförmågan för vakuumisoleringspanelen ökar. Det omslutande höljet utvecklas ständigt för att ge vakuumisoleringspanelerna en längre livslängd, vilken för närvarande är mellan 30-50 år beroende på rådande omgivande miljöförhållanden där yttre krafter som starka vindar kan skada höljet. Materialval för vakuumisoleringspanelernas hölje såväl som kärna spelar in på livslängden då olika höljen är olika diffusionstäta och porstorleken på olika kärnmaterial skiljer sig. Tillverkningsprocessens roll i vakuumisoleringspanelernas livslängd är också av betydelse. Här har val av processer och kvalitetssäkring betydelse för pålitligheten av den färdiga produkten och därigenom också livslängden. (Clase, 2010)

### 3 Tillämpad värmetransport

Värmetransport i en konstruktionsdel uppstår när konstruktionsdelen utsätts för en temperaturskillnad. Då det gäller byggnaders klimat handlar det vanligtvis om att skapa en sådan konstruktion så att det interiöra klimatet skiljs från det exteriöra klimatet. Detta för att uppfylla de krav som ställts på inomhusmiljön, såsom temperatur och fukttilstånd. För att förhindra värmeenergi från att flöda inifrån och ut tillämpas olika utformningar av värmeskydd i konstruktionsdelarna. Genom detta minskas värmeflödet genom konstruktionen och därigenom minskar även energiförlusterna.

Värmetransport sker genom värmeledning genom material, strålningsutbyte mellan varma och kalla ytor och värmekonvektion där luft för med sig värme.

#### 3.1 Ledning

Värmeledning innebär att värme leds genom ett material med temperaturdifferens över materialet som drivkraft. I eftersträvan av jämvikt vandrar energin från varmare till kallare delar. I solida material sker ett direkt värmeutbyte genom värmeledning. I porösa material leds värmen även genom strålningsutbyte samt konvektion i gasen som befinner sig i porerna.

Mängden värme som transporteras genom ett material påverkas av värmeledningsförmågan för materialet, dess tjocklek samt temperaturskillnaden över materialet.

##### 3.1.1 Jämvikt

För att bedöma de rådande omständigheterna kring ett valt objekt förutsätts att de är i jämvikt. (Hens, 2012) Detta innebär att de är oberoende av tiden. Denna jämvikt leder till att Temperatur ( $T$ ) omgivande konstruktionen är konstant.

##### 3.1.2 Endimensionellt värmefflöde

Endimensionellt flöde används främst då byggnadsmaterialen är homogena inom sina lager genom hela konstruktionsdelen, vinkelrätt mot flödet. Det antas då att värmefflödet är lika för alla delar av konstruktionen och att det därmed endast sker ett värmefflöde i en riktning, genom konstruktionen. Detta förekommer ofta inom byggnadsfysiken. I kap. 4 (Konstruktionsdetaljer lämpliga för tillämpning av vakuumisoleringspaneler) kan ses vilka konstruktionsdelar som valts inom ramen för detta arbete.

För att exemplifiera denna typ av värmefflöde används figur 4. I och med statiska förhållanden i detta exempel så är temperaturfördelningen över det studerade materialet, med endimensionellt flöde, linjärt mellan de två yttemperaturerna. I figur 4 kan även ses att tjockleken ( $d$ ) är omvänt proportionellt mot flödet ( $q$ ). Då materialet har lägre värmekonduktivitet minskas flödet genom materialet. Det går även att se i ekvation 3.4, att då tjockleken på materialet dubblas, flödet genom materialet halveras. Vakuumisoleringspanelerna har exempelvis väldigt låg värmekonduktivitet

och behöver då inte vara lika tjock som andra material för att få samma värde på värmesistans ( $R$ ) som andra material. Detta förhållande beskrivs av ekv

$$q = \lambda \frac{T_{s2} - T_{s1}}{d} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.1)$$

Där flödet ( $q$ ) är beroende av materialets värmekonduktivitet ( $\lambda$ ) och differensen mellan de två yttemperaturerna ( $T_{s2} - T_{s1}$ ) i omvänt förhållande till tjockleken ( $d$ ) på materialet. Detta är en förenkling av Fouriers första lag (Hens, 2012). Vidare utveckling av formeln ger ekv. (3.1) som använder sig av uttrycket för termisk resistans ( $R=d/\lambda$ ). Där ( $d$ ) är tjockleken på materialet, ( $\lambda$ ) är materialets värmeledningsförmåga, ( $U$ ) är materialets värmegenomgångskoefficient, ( $R$ ) är materialets värmemotstånd

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

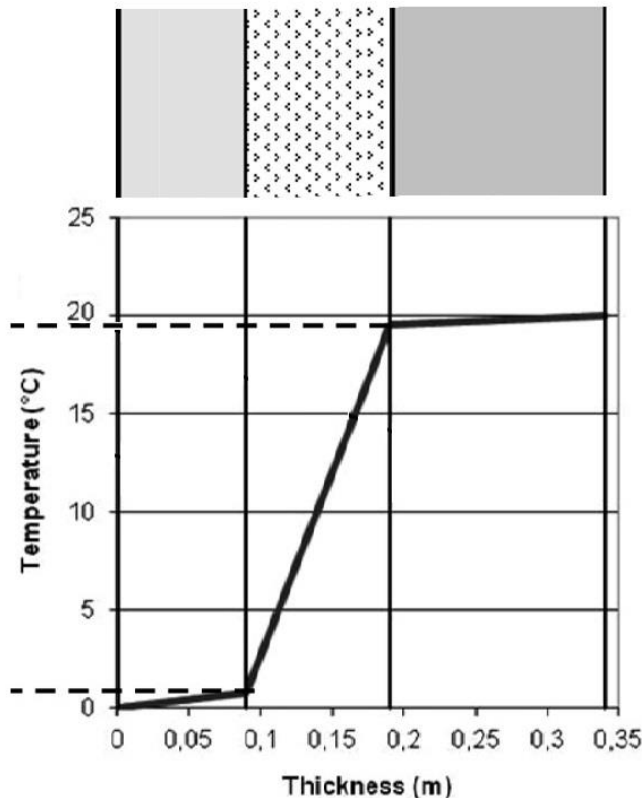
$$R = \frac{1}{U} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}] \quad (3.3)$$

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.4)$$

Där  $d$  är tjockleken på materialet [ $\text{m}$ ],  $\lambda$  är materialets värmeledningsförmåga [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ],  $U$  är materialets värmegenomgångskoefficient [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] och  $R$  är materialets värmemotstånd [ $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ]

Denna princip appliceras sedan på konstruktioner med ett flertal material där den totala termiska resistansen ( $R_T$ ) är summan av alla ingående lagers termiska resistanser. ( $\sum d_i/\lambda_i$ ) I figur 4 kan ses hur den termiska resistansen inverkar på temperaturfördelningen inom en konstruktion med flera lager. Det första, sett från vänster, och sista materialet har liknande resistanser medan det mellersta materialet har en högre termisk resistans och ger därmed upphov till en högre temperaturskillnad än de andra två.

Figur 4 kan liknas vi en väggkonstruktion där det är ett sandwich element som består av ett bärande betonglager, ett isolerande lager och ett ytskikt. Materialet med högt värmemotstånd antas då vara isolering.



Figur 5 Temperaturfördelning i förhållande till tjockleken av konstruktionselementet i en konstruktion med tre ingående material med olika termiska resistanser. (Hens, 2012)

För att få ut värmeflödet,  $Q$  (W) för den totala konstruktionen i fråga, multipliceras konstruktionens värmeflöde,  $q$  (W/m<sup>2</sup>) med arean,  $A$  (m<sup>2</sup>) av konstruktionen. Se ekv. (3.5)

$$Q = q \cdot A \quad [\text{W}] \quad (3.5)$$

Värmemotståndet ( $R_T$ ) kan när det kommer till konstruktioner med flera skikt uttryckas genom ekv. (3.6)

$$R_T = R_{si} + \sum R_i + R_{se} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (3.6)$$

Där  $R_T$  är konstruktionens totala värmemotstånd [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ],  $R_{si} = 0.13$  [ $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ] &  $R_{se} = 0.04$  [ $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ] är värmeövergångsmotstånderna för konstruktionens yttre ytor,  $R_i$  är de olika skiktens värmemotstånd [ $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ]

### 3.1.3 Tvådimensionellt värmeflöde

Konstruktioner som exempelvis hörn där två väggar möts och infästningsanordningar för fönster, har så många olika delar att värmeflödet försöker ta sig den enklaste vägen genom konstruktionen. Flödet genom och mellan de olika delarna beror på de olika



materialen som finns i konstruktionen. Värmeflödet rör sig alltså i flera riktningar till skillnad från det endimensionella värmeflödet där det endast rör sig vinkelrätt konstruktionen. Detta går inte att definiera under endimensionella förhållanden eftersom flödet uppför sig på ett annat sätt när fler dimensioner behandlas, jämfört med en plan endimensionell yta.

I de endimensionella fallen erhålls symmetri i alla dimensioner utom en, där endast den dimension genom vilken flödet går tittas på, medan exempelvis i tvådimensionella förhållanden erhålls symmetri i en dimension där värmeflödet beror på konstruktionens uppbyggnad och värmemotstånden hos de olika materialen.

Detta kan ses då vi tittar på flödet ( $q$ ) som en vektor, med parametrarna  $q_x, q_y$ . Genom derivering av temperaturen i en punkt ( $x, y$ ) i materialet fås då flödet i  $x$ - och  $y$ -led i det tänkta materialet enligt ekv. (3.7), och begränsas enligt materialets konduktiva egenskaper i varje dimension genom användning av materialets värmekonduktivitet ( $\lambda$ ). Om materialet antas ha samma ledningsförmåga i alla de undersökta dimensionerna utlöses denna faktor till en gemensam för alla dimensioner. (ekv. 3.8). Då materialet befinner sig i jämvikt innebär det att temperaturen kring materialet ej varierar med tiden. Detta medför, tillsammans med energiprincipen att all energi som går in i materialet också går ut och därmed sätts förändringen av värmeflödet i ekvation (3.8) lika med noll.

$$\mathbf{q} = -\lambda \left( \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \right) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.7)$$

$$0 = -\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.8)$$

där  $q$  är värmeflödet [W/m<sup>2</sup>],  $T$  är temperatur [K],  $\lambda$  är värmekonduktivitetstalet och  $x, y$  är förflyttning i resp. riktning.

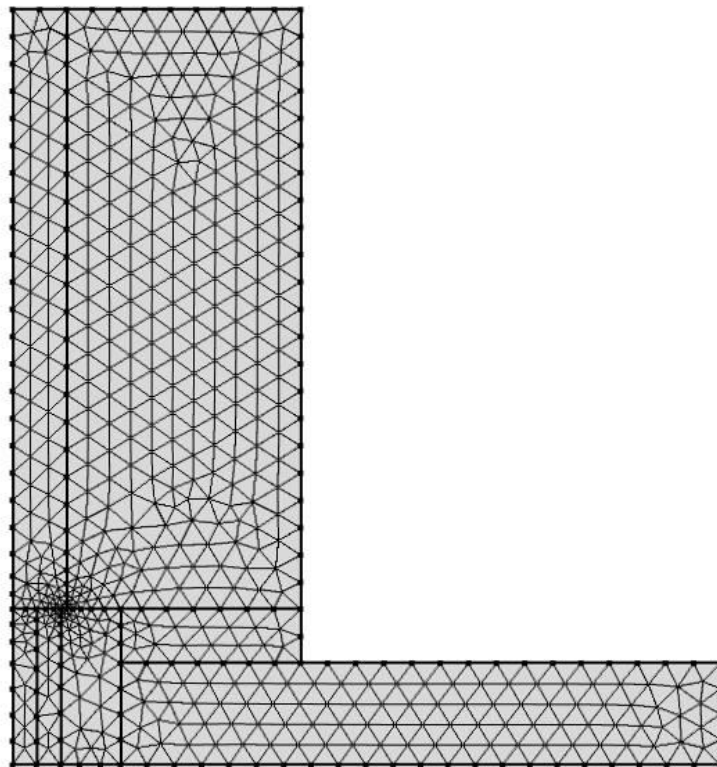
Lösningar för endimensionella fall med ett eller flera lager enligt ekv. (3.8), då endast  $x$ -led beräknas, går att ta fram. Detta för att flödet och de olika värmekonduktiviteterna ofta är konstanta. Detta ger en exakt lösning för det undersökta fallet om  $\lambda$  är konstant. När det gäller två- och tre-dimensionella fall blir framtagningen av en lösning med denna metod mycket svårare och mer tidskrävande. Problem som luftspalter och vinklar, exempelvis hörn, där den inre ytan är mindre än den yttre, ger en svårslöslig geometri. I avsnittet härefter beskrivs metoden för beräkning av flerdimensionella konstruktioner som används av Comsol och kallas: Finita elementmetoden (FEM)

### 3.1.4 Numerisk lösning av tvådimensionellt värmeflöde

För komplexa geometrier går det inte alltid att ta fram en lösning genom att använda ekv. (3.8) För att hantera komplexa två- och tredimensionella modeller behövs datorkraft. Detta görs genom förenklingar av ekv. ovan. Här finns flera modeller för hantering av beräkningarna. Det som används inom ramen för detta arbete, och Comsol, är finita elementmetoden (FEM).

FEM används för att approximera en lösning till de differentialekvationer som beskriver värmefflöde inom ett flerdimensionellt system (ekv 3.7, 3.8). Det går att se det som en uppdelning av en yta eller volym i väldigt många små simplare former. Indelning på detta sätt bryter ner problemet i mindre delar som är lättare att hantera. För att visa detta kan man se till hur beräkning av  $\pi$  med Arkimedes princip går till. Där sker indelning av en cirkel i mindre och mindre trianglar för att sedan beräkna omkretsen för basen av alla trianglar inom cirkeln. Redan vid en indelning på ca.130 trianglar kan  $\pi$  approximeras korrekt upp till tre decimaler. Detta är vad FEM gör förutom att istället för att beräkna omkretsen på en cirkel, så beräknar den exempelvis värmefördelningen inom ett byggnadselement.

Detta system är det som Comsol använder sig av. Genom att dela in geometrin i många små delar kan differentialekvationer (ekv 3.8) lösas för noderna där indelningselementen möts. Genom temperaturskillnaderna mellan dessa noder kan därefter en lösning för ytan approximeras. Nedan, ses en figur (5) tagen ur Comsol, där går det att se indelningen för en konstruktion.



Figur 5 : Bild över en träregelvägg med tillhörande mellanbjälklag, ett antal indelningar som COMSOL beräknar enligt FEM.

## 3.2 Konvektion

Konvektiv värmeöverföring behandlar värme som följer med rörelser i fluider till exempel gaser. I en byggnad är det främst luft.

Värmekonvektion sker på grund av att luften rör sig med sig sitt värmeinnehåll i samband med att skillnad i lufttryck får rörelser i luften att uppstå.

Luftrycksskillnader (P) uppstår där luften har olika tryck på insidan och utsidan av en konstruktion. Denna tryckskillnad kan orsakas på två olika sätt. Den första är naturlig konvektion. Denna konvektion sker på grund av temperaturskillnader i luften. Varm luft har en lägre densitet än kall luft och på grund av detta ändras luftrycket beroende av luftens temperatur. Den andra typen av konvektion är påtvingad konvektion. Denna sker på grund av mekanisk påverkan på luften genom vindar eller ventilationssystem och fläktar av olika slag. Vindtryck uppstår när luftströmmen från vindarna träffar en konstruktionsdel, ett luftryck uppstår vid ytorna i form av ett övertryck vilket ger ett undertryck på insidan av konstruktionsdelen. För inre och yttre övergångsmotstånd har värden enligt Petersson (2009) använts där  $R_{si}$ :  $0.13 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)}/\text{W}$  och  $R_{se}$ :  $0.04 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)}/\text{W}$

Det konvektiva värmeflödet beräknas genom att multiplicera temperaturdifferensen mellan yta och luft med den konvektiva värmeöverföringskoefficienten. Som ses i ekv. (3.9) (Petersson, 2009)

$$q_c = h_a(T_s - T_a) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.9)$$

Där  $q_c$  är det konvektiva värmeflödet [ $\text{W/m}^2$ ],  $T_s$  är ytans och  $T_a$  den omgivande luftens temperatur [K].  $h_a$ , den konvektiva värmeöverföringskoefficienten [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ], beror av omgivande luftens hastighet, och om den är vinkelrät eller parallell den ytan som syftas beräknas.

För naturlig konvektion används enl. Hagentoft (2003) sambandet i ekv. (3.10) nedan. Denna princip för naturlig konvektion är den som används senare i kap. 5. Inom konstruktionen finns inga ventilerade luftspalter, alltså sker endast naturlig konvektion där.

$$h_a = 2 |T_a - T_s|^{1/4} \text{ [W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})\text{]} \quad (3.10)$$

### 3.3 Håligheter och luftspalter

Med hålighet i en byggnadsdel avses här ett område som är luftfyllt och har små dimensioner i förhållande till omgivande konstruktion.

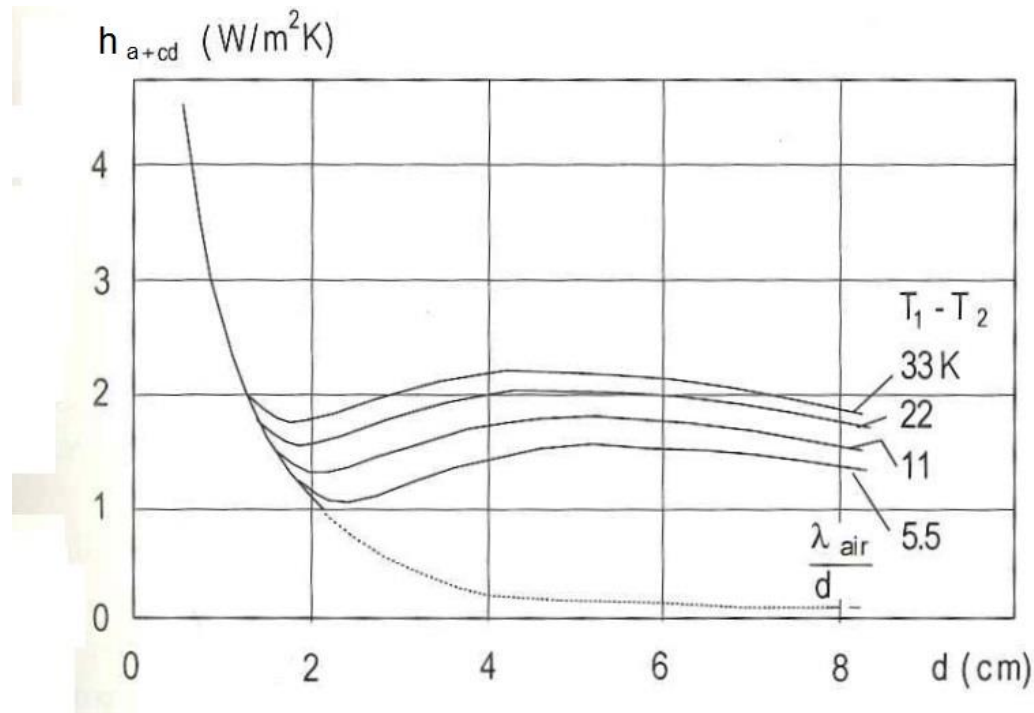
I ventilerade såväl som oventilerade luftspalter sker konvektion mellan alla ytor. Dock har oventilerade luftspalter en väldigt liten skillnad mellan flödet mellan den kalla ytan till gasen i luftspalten och från den varma ytan till gasen. (Hens, 2012)

Då beräkning av värmeflöde för luftspalter sker, görs detta genom att kombinera ledning och konvektion i samma beräkning då det enligt Hagentoft (2003) är svårt att skilja dessa åt. (ekv. 3.11)

$$q_{c+cd} = (h_a + h_{cd}) (T_{s1} - T_{s2}) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.11)$$

Där  $h_{cd}$  är den ledande värmeöverföringskoefficienten [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],  $h_a$  är den konvektiva värmeöverföringskoefficienten [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] och  $T_{s1} - T_{s2}$  är temperaturdifferensen mellan de två värmeledande ytorna [ $\text{K}$ ].

Det har utförts studier på andelen ledning och konvektion som sker i en oventilerad luftspalt beroende på temperaturdifferensen över och tjockleken på luftspalten. Dessa studier visar på att oventilerade luftspalter med dimensioner under 2 cm domineras av ledning medan luftspalter med dimensioner över 4 cm domineras av konvektivt värme flöde. Detta kan ses i figur 6.



Figur 6: Graf över kombinerad Lednings- och konvektionkoefficient i oventilerade vertikala luftspalter beroende på tjockleken och temperaturdifferensen. (Hagentoft, 2003)

### 3.4 Strålning

Temperaturdifferenser mellan olika ytor ger upphov till ett strålningsutbyte där det sker en värmetransport från den varmare ytan till den kallare ytan. Strålningsutbyte i konstruktionsdelar kan exempelvis ske i luftspalter, där det finns en kallare yta utåt och en varmare yta inåt.

Strålningen delas in i 3 olika delar när den når en yta. Absorberad ( $\alpha$ ), reflekterad ( $\rho$ ) och transmitterad ( $\tau$ ) Transmitterad strålning gäller endast för genomskinliga ytor och kommer inte att behandlas i detta arbete. Vid beräkning av glaskassetter i kap 5.1 antas U-värdet som ligger till basen för beräkningen innefatta långvågig strålning

Enligt energiprincipen är  $\alpha + \tau + \rho = 1$  där all energi i form av strålning reflekteras, transmitteras och/eller absorberas. För detta arbete görs formeln om till  $\alpha + \rho = 1$ , då den transmitterade energin antas vara lika med noll

Enligt Stefan-Boltzmanns lag (ekv. 3.12) så är den emitterade energin från en kropp.

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad [\text{J/s}] \quad (3.12)$$

Där  $\sigma$  är Stefan-boltsmanns konstant:  $5.67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$ ,  $A$  är arean [ $m^2$ ],  $T$  är materialets temperatur [K] och emissivitetstalet  $\epsilon$  enl. Kirchhofs strålningslag, är kvoten mellan materialets utstrålade energi ( $E$ ) och maximala möjliga energi utstrålad från en kropp ( $E_b$ ), en så kallad en svart kropp [%].

En svart kropp absorberar och emitterar all strålning som den kommer i kontakt med (dvs.  $a=1$ ,  $t=0$ ,  $r=0$ ) och även om det inte är fysiskt möjligt för en sådan kropp att existera så hjälper den till för att beskriva och förstå verkliga material, där den fördelningen av mängden energi som teoretiskt reflekteras och absorberas varierar beroende på materialets egenskaper och ytskikt. Den ger ett jämförelsevärde vilket man mäter andra material mot.

Inom byggnadsfysiken görs ofta förenklingen att den emitterade och den absorberade energin för ett material är lika ( $\epsilon = \alpha$ ). (Hagentoft, 2003) Ekv. 3.13 är denna förenkling vid karakteristiska byggnadsfysikaliska temperaturer

För strålningen inom ett omslutet område sker utbytet mellan de inverkan materialen i omslutningen. För att få ut den mängd värmeenergi som färdas från den ena ytan till den andra, används vad Hagentoft (2003) kallar en ”synfaktor”. Denna synfaktor är en representation av hur mycket strålning som avges från en yta och tas upp av en annan, utan att reflekteras. Synfaktorn beskriver alltså vad som ses av en yta innan energiutbytet. Energidelningen beror av temperaturskillnader mellan olika ytor, tidsskillnad,  $\epsilon$ , den energi som avges från en yta som träffar en annan yta inom omslutningen. I ekv. (3.13) nedan ses värmeöverföringskoefficienten för strålning representerad, där synfaktorn mellan två ytor ( $F_{1,2}$ ) är den synfaktor som är aktuell för den sökta geometrin. Här är  $\bar{T}_{1,2}^3$  medelvärde mellan de två ytornas temperaturer.

$$h_r = \frac{4\sigma\bar{T}_{1,2}^3}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2} \frac{A_1}{A_2}} \quad (3.13)$$

där  $h_r$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ] är strålningskoefficienten,  $T$  är temperatur [K],  $A$  är area [ $m^2$ ] och  $\sigma$  är Stefan – Boltsmanns konstant:  $5.67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$

Exempelvis skulle två oändligt stora plattor som är svarta kroppar ha en ett maximalt strålningsutbyte. Med maximal menas här att all energi som avges från platta ett upptas av platta två utan att någon energi reflekteras eller transmitteras. Detta skulle sedan fortsätta i all evighet utan någon energiförlust.

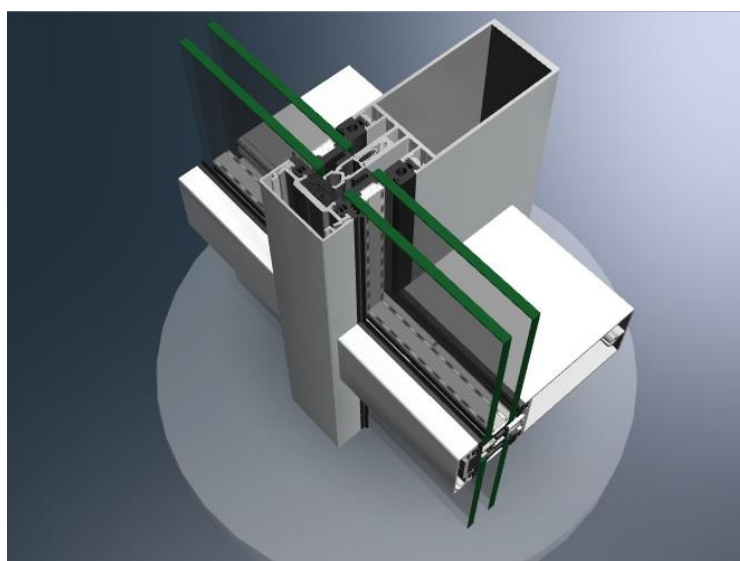
## 4 Konstruktionsdetaljer lämpliga för tillämpning av Vakuumisoleringspaneler

I detta kapitel presenteras de valda konstruktionsdetaljerna; 2-och 3-glasfasadssystem, stålregelväggs anslutning med mellanbjälklag och bärande vägg, samt testade lösningar på dessa med vakuumisoleringspaneler.

### 4.1 Glasfasadsystem

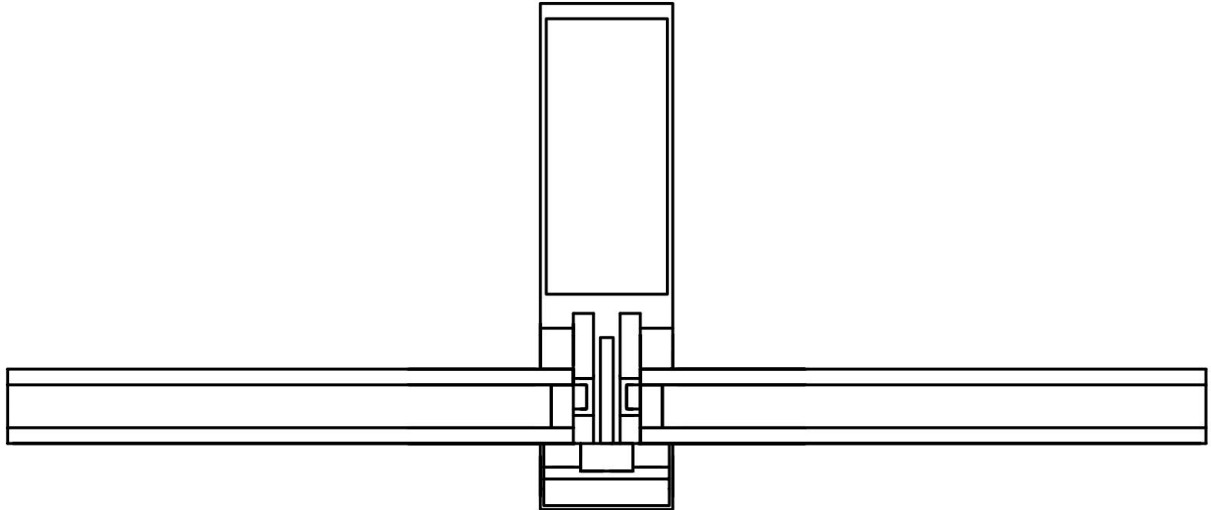
De glasfasadssystem vi har undersökt är ett 2-glas och ett 3-glas system där det uppstår en köldbrygga vid glaskassetternas infästning till den bärande metallkonstruktionen.

Med dagens teknik och isoleringsglas, är det inte säkert att glasfasader är en lika stor energibov som den ofta ges ut för att vara. Dessa fasadsystemens köldbryggor följer de långsträckta lister för infästning som krävs för att hålla glaset på plats. Dessa infästningsanordningar är generellt sett av aluminium eller stål, vilka båda har en betydande förmåga att leda värme. I figur 7 nedan kan ses en typisk infästningsanordning för ett glasfasadssystem med 2-glasfönster. Där kan man också se den potentiella köldbrygga som metallen utgör. Utveckling av infästningen har gjorts genom att se till att de delar som är av metall inte vidrör varandra, bortsett från där skruvarna som spänner ihop konstruktionen är placerade.

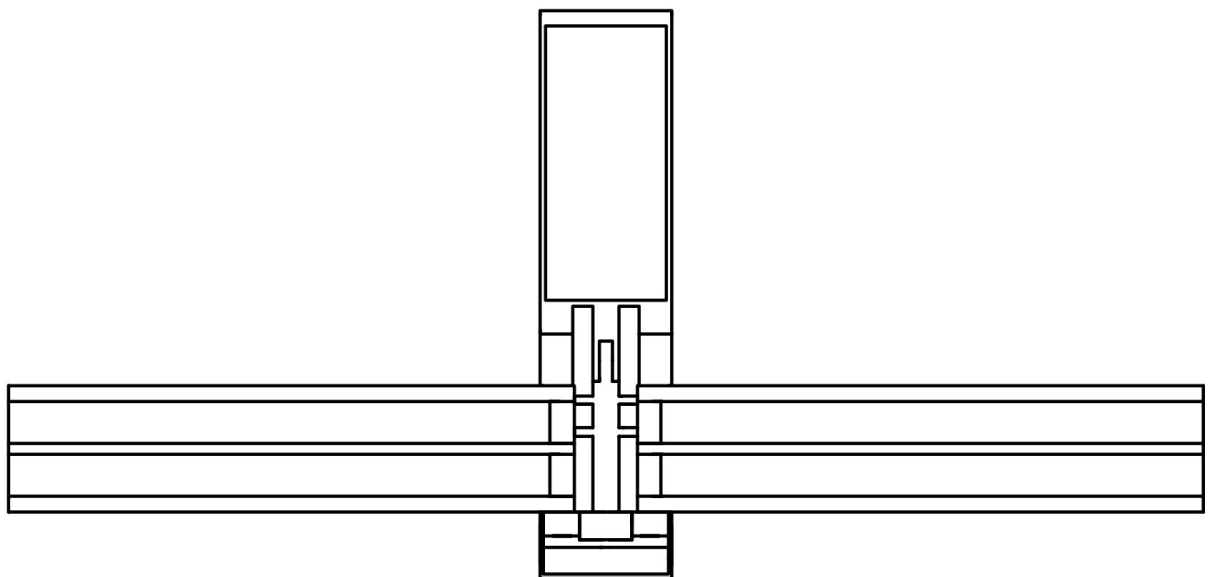


Figur 7: Glasfasadsystem: Schuco Fasader. FW 50+.HI

För att få en komplett bild av värmeflödet i detta system har simuleringar utförts på två ställen längs infästningsanordningen. Dessa två ställen är: den långsträckta köldbrygga som bildas längs med alla infästningslister och de punkt-köldbryggor som uppkommer där skruvarna binder ihop de två list-halvorna. Systemen visas i figur 8 och 9 (för detaljspecifikation se bilaga 1 och bilaga 2).



Figur 8: 2-glas fönsterfasadssystem. (Schuco, 2014)



Figur 9: 3-glas fönsterfasadssystem. (Schuco, 2014)

Det som skiljer systemen åt, förutom glaskassetten, är materialvalet för skruvens infästningslist mellan de två glaskassetterna. I 2-glassystemet (figur 8) är den gjord av aluminium, och i 3-glassystemet (figur 9) utgörs den av PA-plast.

Det testade glasfasadssystem är infästa med hjälp av skruv med cc 250 mm Via vilka en mindre punktköldbrygga uppstår i listsystemet. Vid uppbyggnad av en större glasfasad kan tänkas att dessa köldbryggor kan ha en stor inverkan på den totala energieffektiviteten för glasfasaderna.

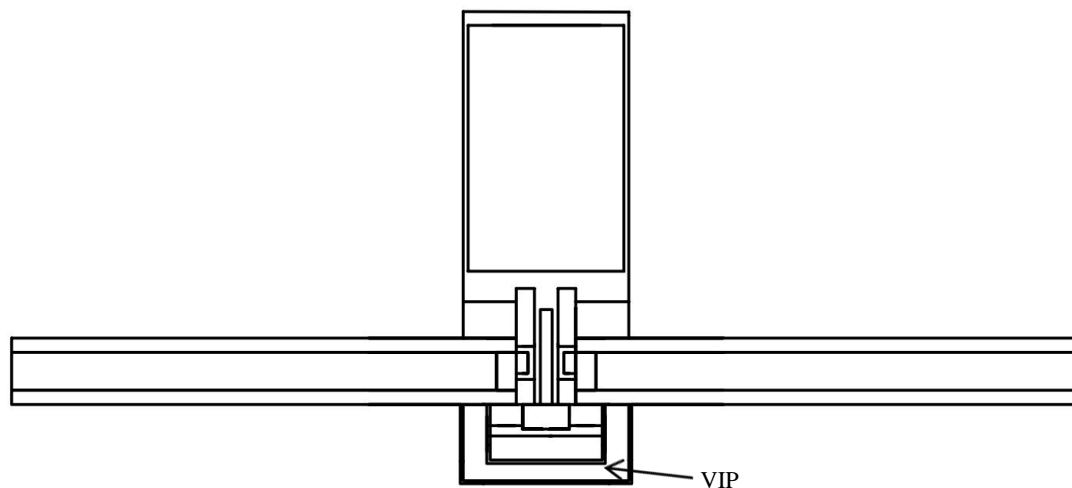
#### 4.1.1 Komplettering av glasfasadssystem med Vakuumisoleringspaneler

För att isolera köldbryggan i glasfasadssystemet sattes isoleringsmaterialet utanpå konstruktionen. Detta för att underlätta att lösningen anpassas till olika typer av ramkonstruktioner. Pietruszka & Gerylo (2010) har utfört studier på hur högvärdig isolering påverkar liknande system genom att göra beräkningar på system där det isolerande materialet har placerats inuti ramkonstruktionen, mittemellan de två fönsterkassetter som utgör fasaden. Dessa försök gav mycket positiva resultat.

I det undersökta fallet i denna studie placerades vakuumisoleringspanelerna externt, som nämnt ovan, också på grund av sin känslighet mot mekanisk påverkan. Risken för punktering minimeras eftersom att vakuumisoleringspanelen kan prefabriceras i den externa listen som med fördel monteras i efterhand. Det innebär att de infästningsanordningar för ramkonstruktionen som skruvas in inte utgör något problem. Mekanisk påverkan från infästningen skulle utgöra ett direkt problem om vakuumisoleringspanelen placerades som i Pietruszka & Gerylos undersökning (2010).

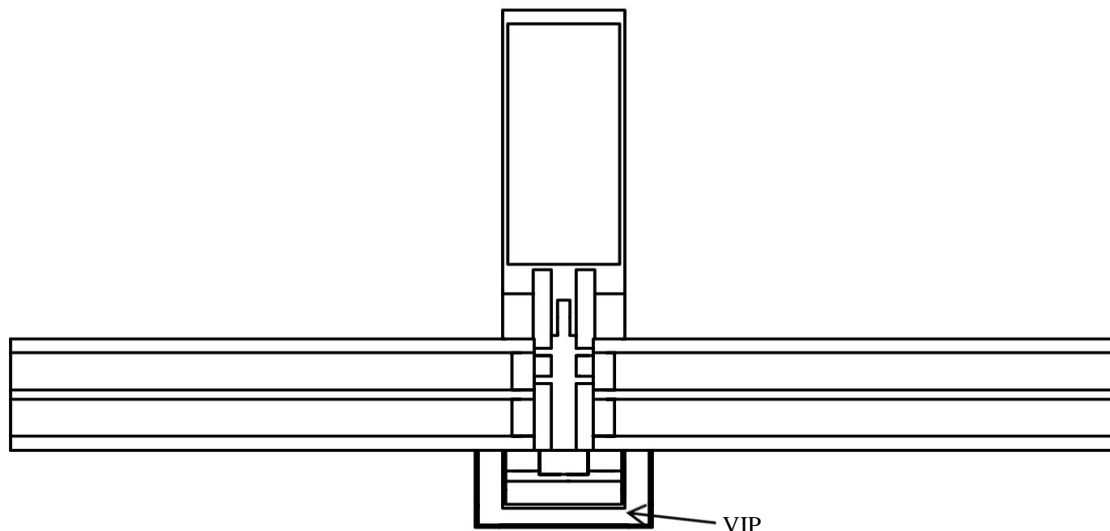
Förslaget som är använt i simulering för detta arbete kan ses i figur 10 och 11 nedan. Som nämnt tidigare har den utformats för att ha så liten påverkan på utseendet och konstruktionen som möjligt, samtidigt som den bryter köldbryggan. Detta har gjorts genom att endast tillföra isolering externt på konstruktionen. Som kan ses medför detta att även skruvarna i infästningarna isoleras och bryter inte längre konstruktionen.

Utformningen av tilläggsisoleringen är anpassad till konstruktionens täcklist. Detta för att få möjlighet att kunna prefabricera denna del och fästa den på konstruktionen med minimal påverkan på såväl konstruktion som arbetsätt. Att vakuumisoleringspanelerna är skyddade under hela arbetsmomentet skulle medföra att det inte krävs specialutbildad personal för att montera dessa delar.



Figur 10: 2-glasfönsterfasadssystem med innehållande VIP.





Figur 11: 3-glasfönsterfasadssystem med innehållande VIP.

## 4.2 Ståregelvägg

Vanligt förekommande ståregelväggar värmeisolerar oftast med mineralull i olika tjocklekar för att uppnå värmeegenskaper enligt ställda krav. Men då anslutningar mellan konstruktionsdelar ofta bidrar till en negativ inverkan på väggens värmeledningsförmåga, ofta genom begränsat utrymme av isolering så uppstår det problematiska köldbryggor i olika konstruktionsanslutningar. Mellanbjälklag och bärande väggar är vanligt förekommande problematiska områden där ett betongelement byggs in i fasadväggen. Detta ger en påvisad minskning av isoleringstjockleken.

I försöket har en bärande vägg och ett mellanbjälklag simulerats. Dessa är framtagna m.h.a. handledare; Hans Helling och Henrik Carlsson, på WSP för att få en vanligt förekommande konstruktionstyp. De är även framtagna så att de skulle kunna vara en del av samma konstruktion. Stommen för ståregelväggen är baserad på data för och befintliga regler, lister och profiler tagna ur Lindabs befintliga sortiment (Eriksson, 2014).

### 4.2.1 Komplettering av ståregelvägg med Vakuumisoleringspaneler

Genom att införa vakuumisoleringspaneler på de köldbryggor som uppstår kan köldbryggan till stor del brytas.

För att bryta köldbryggan som bildas i av de genomgående betongelementen har vakuumisoleringspanelerna limmats till aquaboarden som är en gipsskiva som är en del av fuktspärren i konstruktionen. Aquaboarden går att se i förstoringen på figur 12. Vakuumisoleringspanelens storlek begränsas i detta fall av z-reglarnas cc-avstånd som även det ses i förstoringen på figur 12. Detta avstånd kan ökas vid behov genom att använda kraftigare regler som klarar ett längre cc-avstånd. För att förstå effekten av vakuumisoleringspanelerna har två fall undersökts; med ett och två lager (20 mm tjock) vakuumisoleringspanel. Uppbyggnaden av anslutningen mellan ståregelväggen och mellanbjälklag samt bärande vägg visas i figur 12.

## 1:

8 FASADSKIVA

25 HATTPROFIL EUROPROFIL VFL 100/25-0,7  
s1200 VERTIKALA VID SKIVSKARVAR

25 HATTPROFIL EUROPROFIL VFL 70/25-0,7  
s1200 MELLAN SKIVSKARVAR

VINDSKYDD MONTERAS MED ÖVERLAPP  
OCH TEJPADE SKARVAR

70 Z-REGEL, HORISONTELL

70 MINERALULL

12 AQUABOARD OUTDOOR

200 STÅLREGLAR s600 VERTIKALA

200 MINERALULL

0,2 PE-FOLIE

45x70 s450 HORISONTELLA

45 MINERALULL

13 GIPS

## 2:

8 FASADSKIVA

25 HATTPROFIL EUROPROFIL VFL 100/25-0,7  
s1200 VERTIKALA VID SKIVSKARVAR

25 HATTPROFIL EUROPROFIL VFL 70/25-0,7  
s1200 MELLAN SKIVSKARVAR

VINDSKYDD MONTERAS MED ÖVERLAPP  
OCH TEJPADE SKARVAR

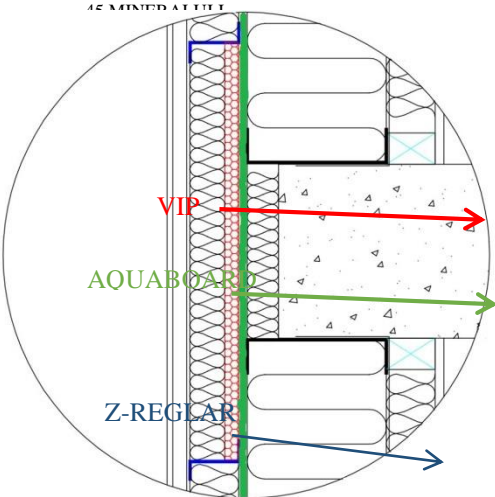
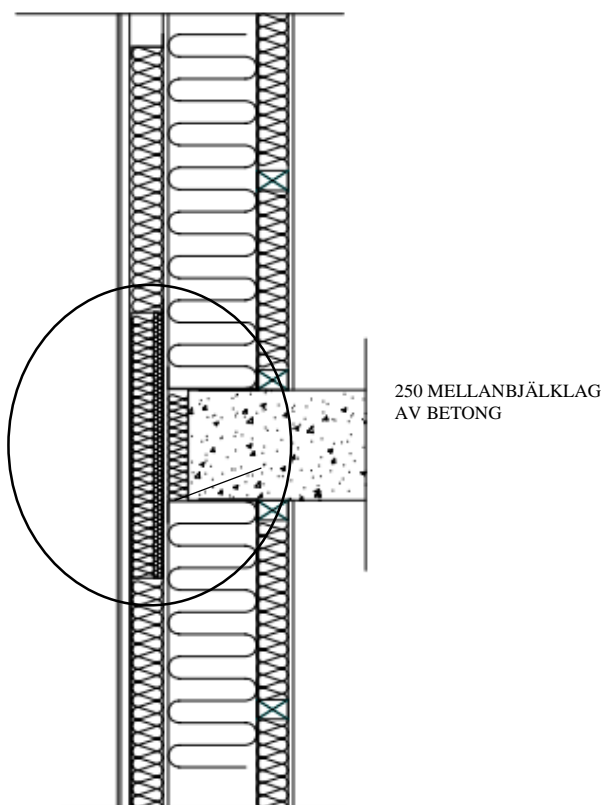
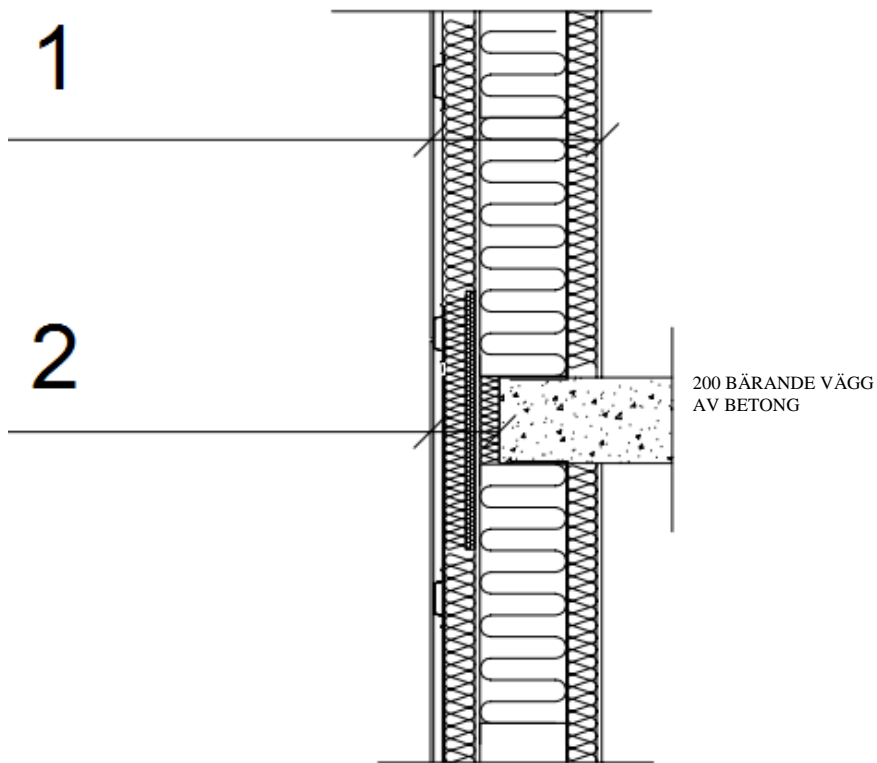
70 Z-REGEL, HORISONTELL

50 MINERALULL

20 VIP LIMMAS TILL AQUABOARD

12 AQUABOARD OUTDOOR

45 MINERALULL

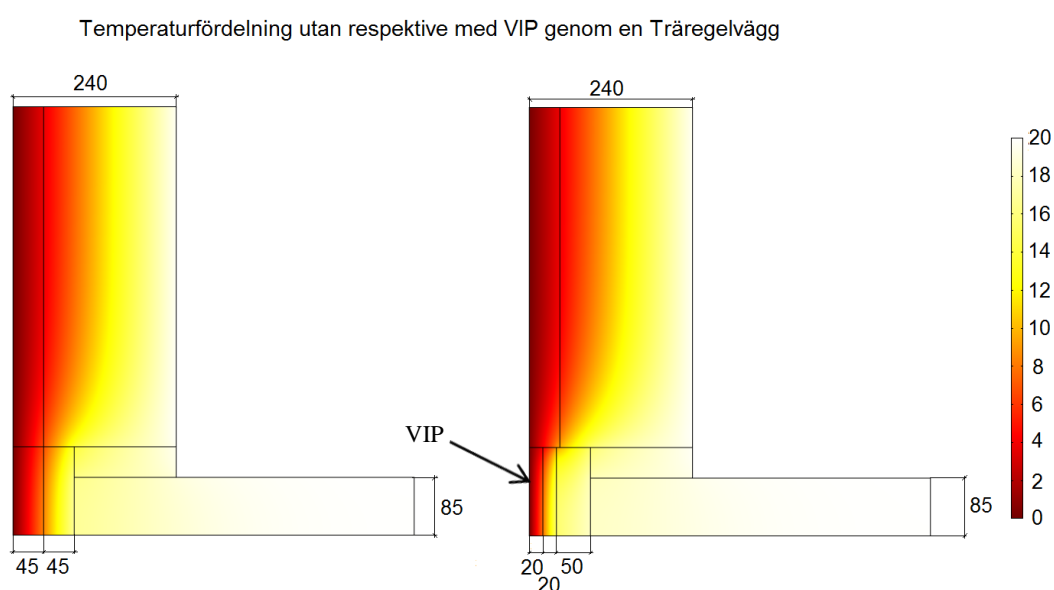


Figur 12: Ritning av stålregelvägg med mellanbjälklag samt ritning av stålregelvägg med bärande vägg. Samt förstoring av anslutning där det visas var VIP är placerad och vart z-reglarna, som bestämmer storleken av VIP, är placerade.

## 5 Cmsolmodell och beräkningsgång

Simuleringar i COMSOL har utförts för att beräkna temperaturfördelningen över olika byggnadskonstruktioner, med respektive utan vakuumisoleringspaneler, i kritiska punkter. Genom simuleringar fås direkta värden för isoleringens effekt på energiförlusterna fram, vilket möjliggör en jämförelse mellan olika byggnadskonstruktionslösningar och materialval.

Figur 13 visar en simulering av temperaturfördelningen för en träregelvägg (utetemperatur 0 °C och innetemperatur 20 °C) till vänster är en konstruktion med konventionell isolering och till höger samma konstruktion men där vakuumisoleringspaneler kompletterar isoleringen kring köldbryggan mellan vägg och mellanbjälklag av betong.



Figur 13: Temperaturfördelning genom en isolerad träregelvägg utan VIP, respektive med 2 VIP.

För modellering av vakuumisoleringspanelens omslutande hölje i COMSOL Multiphysics så har värmeledningsförmågan för aluminium använts. Detta då, som visas i figur 2 kap. 2, det förekommer i de flesta fall av vakuumisoleringspaneler tillsammans med PET i olika lagrade variationer. Vi valt att representera denna köldbrygga som uppstår i detta omslutande hölje med 100 nm aluminium. Detta värde är högre än det värde man kan vänta sig av höljet där varvning av aluminium och PET används. Vi anser dock att denna förenkling är tillräcklig för att ge ett gott resultat. Inom höljet har modellerats ett material med en värmeledningsförmåga:  $\lambda = 0.004$

Vid framtagning av adiabatiska gränser har Svensk Standard: SS-EN ISO 10077-2 (2003) används. Dessa standardiserade mått på avstånd mellan köldbrygga och de adiabatiska gränserna, 1000 mm för stålregelväggens interaktioner med betongstommen och 190 mm för glasfasaden, är framtagna för att värmeledningen inom ramen för dessa gränser skall ha blivit endimensionell.

För inre och yttre övergångsmotstånd har värden enligt Petersson (2009) använts där  $R_{si}: 0.13 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$  och  $R_{se}: 0.04 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$

I COMSOL har även använts den temperaturdifferens på inne och utetemperatur som använts i exemplet i figur 13: Inomhus temperatur 20 °C och utomhustemperatur 0 °C

Simulering av konstruktionsdetaljer med tillämpade materialegenskaper ger beräkningsresultat för hur mycket värme som transporteras genom väggen i W/m. I simuleringarna är utetemperaturen antagen till 0 °C och innetemperaturen till 20 °C vilket medför att det genomsnittliga Läckflödeskoefficienten: PSI ( $\Psi$  -värdet) för konstruktionsdelen kan beräknas enl. ekv. (5.1) Detta ger ett mått på hur mycket energi som strömmar ut genom köldbryggan och beräknas genom att subtrahera flödet genom en konstruktionsdel utan köldbrygga från flödet genom en konstruktionsdel med köldbrygga. Detta värde tas ut ur COMSOL för att ge ett jämförelsevärde mellan de olika variationerna med resp. utan vakuumisoleringspaneler av konstruktionerna

$$\Psi = \frac{q}{\Delta T} [W/(m \cdot K)] \quad (5.1)$$

Där är värmeflödestätheten [ $W/m^2$ ] och  $\Delta T$  är temperaturskillnaden över materialet [K]

Vid beräkningar av köldbryggor ska olika standarder utnyttjas beroende på vilken konstruktionsdel som behandlas. Genom att använda det standardiseringsorgan som Svensk Standard utgör så kan en jämförelsestudie utföras på ett rättvist sätt. Här används SS-EN ISO 10077-2 (2003) för glasfasadsystemen och SS-EN ISO 10211(2007) för mellanbjälklag och bärande vägg.

## 5.1 Fönster

Enligt Svensk Standard för glasfasadsystem finns det flera viktiga aspekter som kommer spela in på resultatet. Vid simulering och beräkning av köldbryggor genom fönster och glas så ska glaskassetten sträcka sig >190 mm i symmetri från det som utgör köldbryggan (Svensk Standard, 2003). Detta för att resultera i rimliga värden på värmeledningsförmågan.

### 5.1.1 Hantering av argonspalterna mellan glasrutor

För att uppskatta argonets värmekonduktion så används Mitt-U-värdet för fönstren, vilket sedan reduceras med övergångsmotstånd och värmemotståndet i glaset. Detta används därpå för att få en bra representation av Argonets inverkan i de oventilerade spalterna mellan glaset i fasaden.  $\lambda$ -värdet för glaset som används är taget från Tillämpad Byggnadsfysik (Pettersson, 2009) I dessa beräkningar fås  $\lambda_{argon} = 0.020998$  för 2-glasfönster och  $\lambda_{argon} = 0.02$  för 3-glasfönster

#### 2-Glasfönster

$$\frac{1}{U_{mitt}} = R_{se} + \frac{d_{glas}}{\lambda_{glas}} + \frac{d_{argon}}{\lambda_{argon}} + \frac{d_{glas}}{\lambda_{glas}} + R_{si}$$

$$\rightarrow \lambda_{argon} = 0.020998$$

$U_{mitt}: 1.06 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$d_{glas}: 0.006 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$R_{se}: 0.04 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$
$\lambda_{glas}: 1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$d_{argon}: 0.016 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$R_{si}: 0.13 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$

### 3-Glasfönster

$$\frac{1}{U_{mitt}} = R_{se} + \frac{d_{glas\ 1}}{\lambda_{glas}} + \frac{d_{argon}}{\lambda_{argon}} + \frac{d_{glas\ 2}}{\lambda_{glas}} + \frac{d_{argon}}{\lambda_{argon}} + \frac{d_{glas\ 3}}{\lambda_{glas}} + R_{si}$$

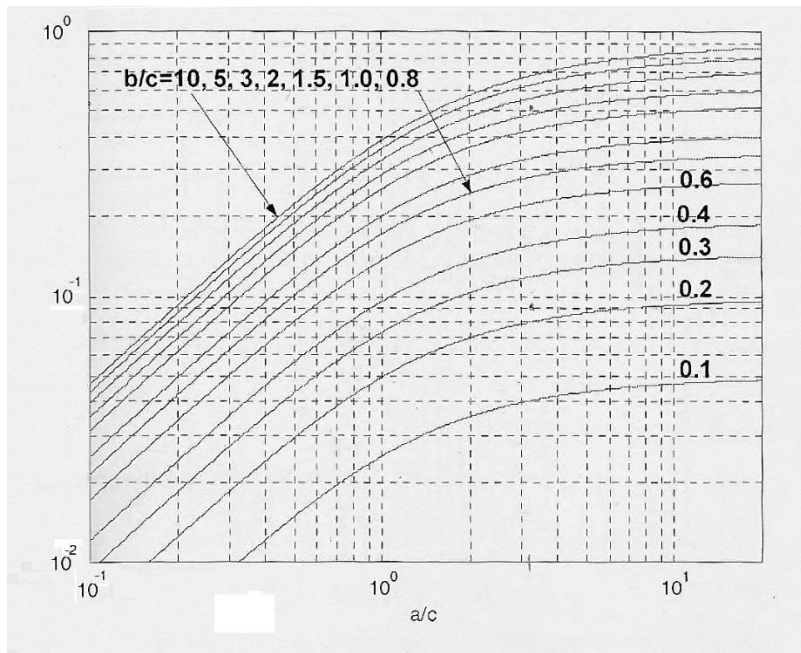
$$\rightarrow \lambda_{argon} = 0.02$$

$U_{mitt}: 0.56 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$d_{glas\ 1,3}: 0.006 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$R_{si}: 0.13 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$
$\lambda_{glas}: 1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$d_{glas\ 2}: 0.006 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$R_{se}: 0.04 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$
	$d_{argon}: 0.016 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	

U-mittvärdet antas vara baserat på beräkningar som innefattar strålning.

#### 5.1.2 Hantering av oventilerade luftspalter i ramar

Vid beräkningar av de oventilerade rektangulära luftspalterna används figur (14) för att bedöma synfaktorn för ett rektangulärt tvärsnitt där höjden på de rektangulära ytorna går mot oändligheten. Detta för att få fram en synfaktor för strålningsutbytet mellan de två sidor på en rektangulär hålighet inom en konstruktion.



Figur 14: Synfaktor mellan två rektangulära ytor. (Hagentoft, 2003)

Denna synfaktor medför att Stefan-Boltzmanns lag förändras genom att ersätta arean ( $A$ ) på rektangeln med synfaktorn ( $F$ ), som ingår i  $h_r$  enl. ekv. (5.2), för det önskade tvärsnittet (i detta fall med en höjd som går mot oändligheten). Dessutom ersätts emissivitetstalet ( $\epsilon$ ) med emissivitetstalet mellan de två ytorna ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ) i ekv.5.2. Då fås vid förenkling ekv. (5.3) härfter.

$$h_r = \frac{4\sigma\bar{T}_{1,2}^3}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2} \frac{A_1}{A_2}} \quad (5.2)$$

$$E = h_r T_m \text{ [W/s]} \quad (5.3)$$

$T_m$  = medeltemperaturen av de två ytorna [K]

$h_r$  = Enl. ekv. (3.10)

För framtagning av ekvivalenta värmegenomgångskoefficienter för de luftfickor och luftspalter som finns i ramen av glasfasaden, så används Svensk Standard: SS-EN ISO 10077-2:2003. Alla tillslutna håligheter inom konstruktionen är enligt denna oventilerade ”om de är helt stängda eller endast ansluten till interiör eller exteriör med en slits som ej överstiger 2 mm. Annars skall håligheten hanteras som en ventilerad hålighet.”

Enligt SS skall ett ekvivalent  $\lambda$ -värde beräknas genom ekv. (5.3), (5.4)

$$\lambda_{eq} = \frac{d}{R_s} \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]} \quad (5.4)$$

$$R_s = \frac{1}{h_a + h_r} \text{ [(m}^2 \cdot \text{K)/W]} \quad (5.5)$$

$d$  = dimensionen i värmeriktningen. [m]

$R_s$  = termiskt motstånd enligt ekv. (5.5) [(m<sup>2</sup> · K)/W]

$h_a$  : Konvektionskoefficient där då bredden ( $b$ ) på håligheten överstiger 5 mm

definieras som:  $\max\left\{\frac{C_1}{d}; C_3\right\}$  där  $C_3=1.57$  W/(m<sup>2</sup> · K) och  $C_1=0.025$

W/m · K. I övriga fall definieras  $h_a$  som  $\frac{C_1}{d}$

$h_r$  : koefficient för värmestrålning

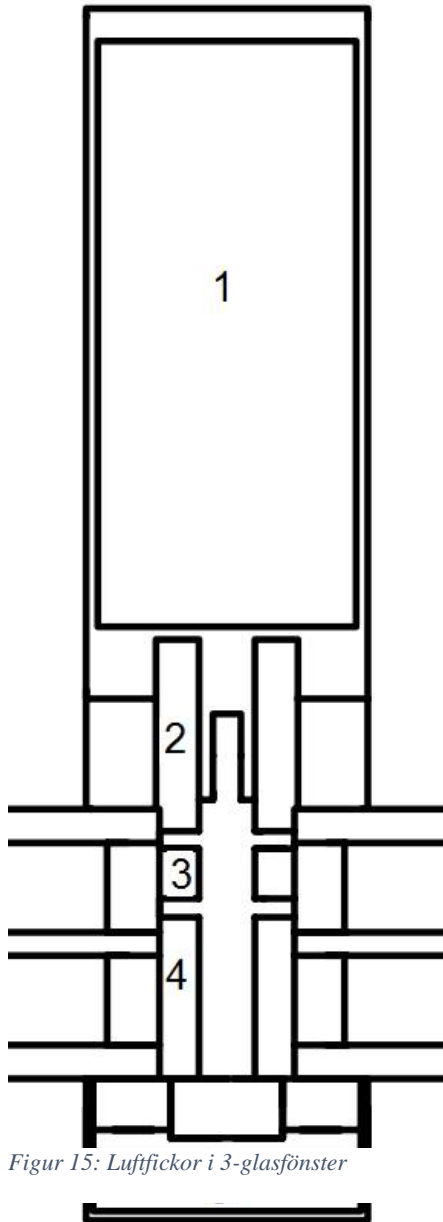
$$h_r = C_4 \left( 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2} - \frac{d}{b} \right)$$

$$C_4 = 2.11 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

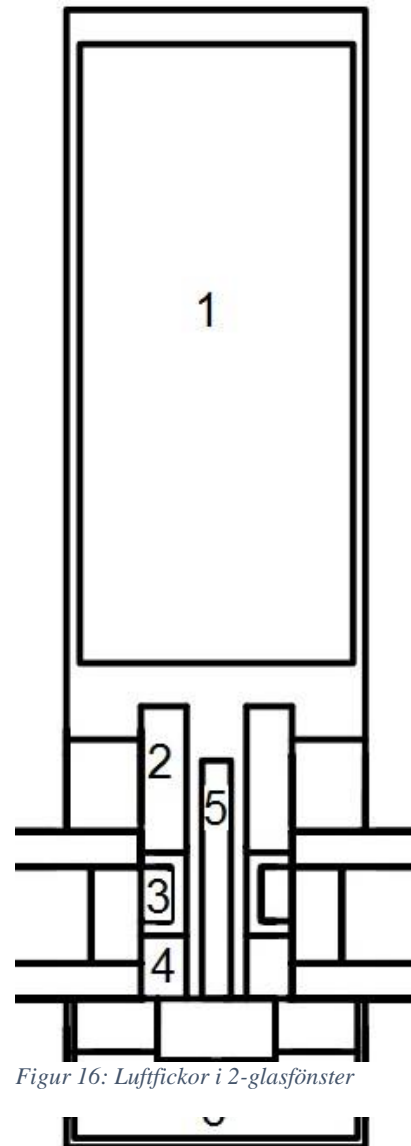
Här syftar termen  $h_r$  till synfaktorn för en hålighet med en rektangulär tvärsnitt.  $C_4$  är en sammanställning av ett flertal konstanter: Stefan-Bolzmanns konstant, strålning mellan ytor inom tvärsnittet genom förenkling av ekv. (5.2) där emissionstalen är antagna till:  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$  samt att medeltemperaturen ( $T_m$ ) är antagen till 283 K

Inom dessa föreskrifter måste alla mått överskrida 2 mm för att inte klassas som en egen luftficka.

Detta medför då definitionen av en rad olika luftfickor vilket visas i figur 15 och 16, samt tabell 2 och 3, för de olika konstruktionsdetaljerna. Dessa är modellerade efter glasfönsterfasadkonstruktionerna beskrivna i kap 4.1



Figur 15: Luftfickor i 3-glasfönster



Figur 16: Luftfickor i 2-glasfönster

Tabell 2: Antalet luftfickor i 2-glassystemets infästning med tillhörande dimension och värmemotstånd.

Nr.	$b \cdot d$ (mm)	$\lambda$ [ $W/(m \cdot K)$ ]
1.	46 x 104	0.24
1. (med VIP)	65.8 x 103.9	0.23
2.	7.6 x 34	0.255
3.	7.0 x 8.8	0.176
4.	7.0 x 28.8	0.254
5.	5.0 x 40.0	0.158

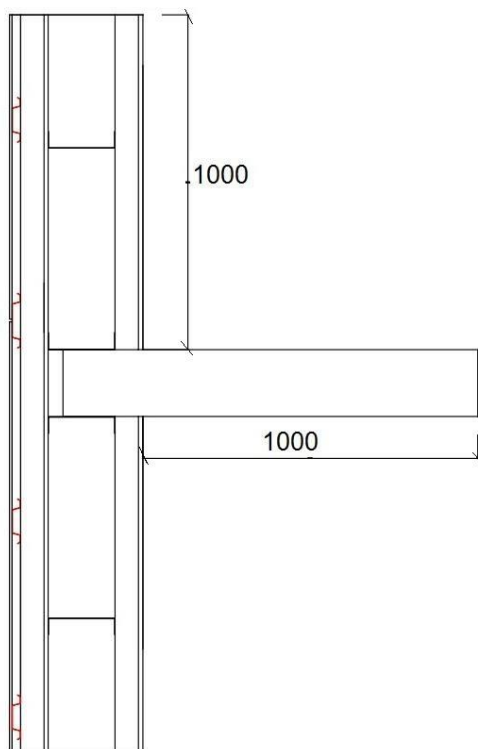
Tabell 3: Antalet luftfickor i 3-glassystemets infästning med tillhörande dimension och värmemotstånd.

Nr.	$b \cdot d$ (mm)	$\lambda$ [ $W/(m \cdot K)$ ]
1.	46 x 104	0.24
1. (med VIP)	65.8 x 103.9	0.23
2.	7.6 x 24.6	0.25
3.	5.0 x 9.0	0.186
4.	7.6 x 10.5	0.193
5.	5.0 x 40.0	0.26
6.	47.4 x 10.0	0.158



### 5.1.3 Svensk standard för stålregelvägg

Vid simulering och beräkning av stålregelväggskonstruktioner är det inte lika många aspekter som måste beaktas som i ett glasfasadsystem. Enligt SS-EN ISO 10211 (2007) måste minst 1000 mm av konstruktionen i symmetri kring den del som utgör köldbryggan tas med. Detta kan ses i den studerade stålregelväggen i figur 17 nedan. Detta är för att värmeflödet ej påverkas av köldbryggan efter detta mått.



Figur 17: Stålregelvägg med anslutande mellanbjälklag, mellanbjälklag samt väggar sträcker sig 1000 mm i symmetri kring köldbryggan.

## 5.2 Materials värmemotstånd

Vid vald simuleringsmodell med COMSOL så har materials värmeledningsförmågor definierats enligt tabell 4. Dessa används för att i programmet definiera de specifika värmeledningsförmågor som enskilda material har i konstruktionen. Detta för att COMSOL skall kunna beräkna värmeflödet mellan och genom dessa.

<i>Material</i>	$(\lambda)$ [W/(m·K)]	<i>Material</i>	$(\lambda)$ [W/(m·K)]
<i>Aluminium</i>	160.0 <sup>7</sup>	<i>Glas</i>	1.0 <sup>7</sup>
<i>Luft</i>	0.026 <sup>7</sup>	<i>PA-plast</i>	0.25 <sup>2</sup>
<i>Superspacer</i>	0.051 <sup>1</sup>	<i>Rostfritt stål</i>	17 <sup>7</sup>
<i>EPDMI-plast</i>	0.245 <sup>2</sup>	<i>Argon</i>	0.02 <sup>5</sup>

<i>Slitsade stålreglar</i>	$8^3$	<i>Z-reglar</i>	$60^3$
<i>Hattprofiler</i>	$60^3$	<i>Träreglar</i>	$0.14^7$
<i>Isolering</i>	$0.036^7$	<i>Aquaboard</i>	$0.25^6$
<i>VIP</i>	$0.004$	<i>Gips</i>	$0.22^7$
<i>Fasadskiva</i>	$0.6^4$	<i>Betong</i>	$0.8^7$
<i>PVC-U</i>	$0.17^2$		

Tabell 4: Värmeledningsförmåga för alla använda materialen som använts för simuleringar av valda konstruktionsdetaljer.

<sup>1</sup> (Svensson, 2014)

<sup>2</sup> (Schuco, 2014)

<sup>3</sup> (Eriksson, 2014)

<sup>4</sup> (Ivarsson, 2012)

<sup>5</sup> Enligt kapitel 3.5.2

<sup>6</sup> (Tizianel & Walker, 2008)

<sup>7</sup> (Petersson, 2009)

## 6 Resultat och analys

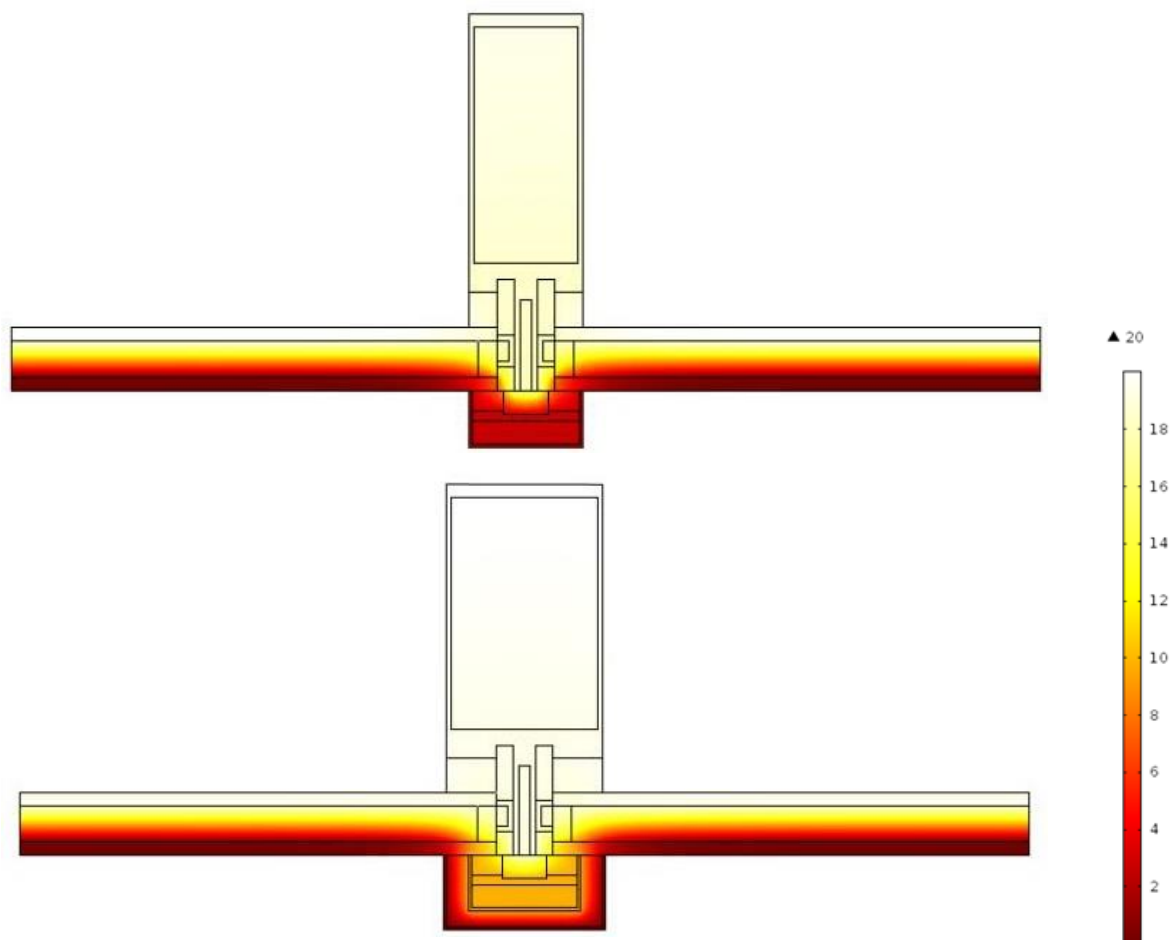
De beräknade resultaten av glasfasadssystem och stålregelvägg med respektive utan vakuumisoleringspaneler redovisas i detta kapitel. Detta genom tabellerna där en jämförelse mellan framtaget PSI-värde för de olika konstruktionsexemplen med och utan vakuumisoleringspaneler utförs enligt den modell som är beskriven i kap 5 och ekv: 5.1

### 6.1 Glasfasadssystem

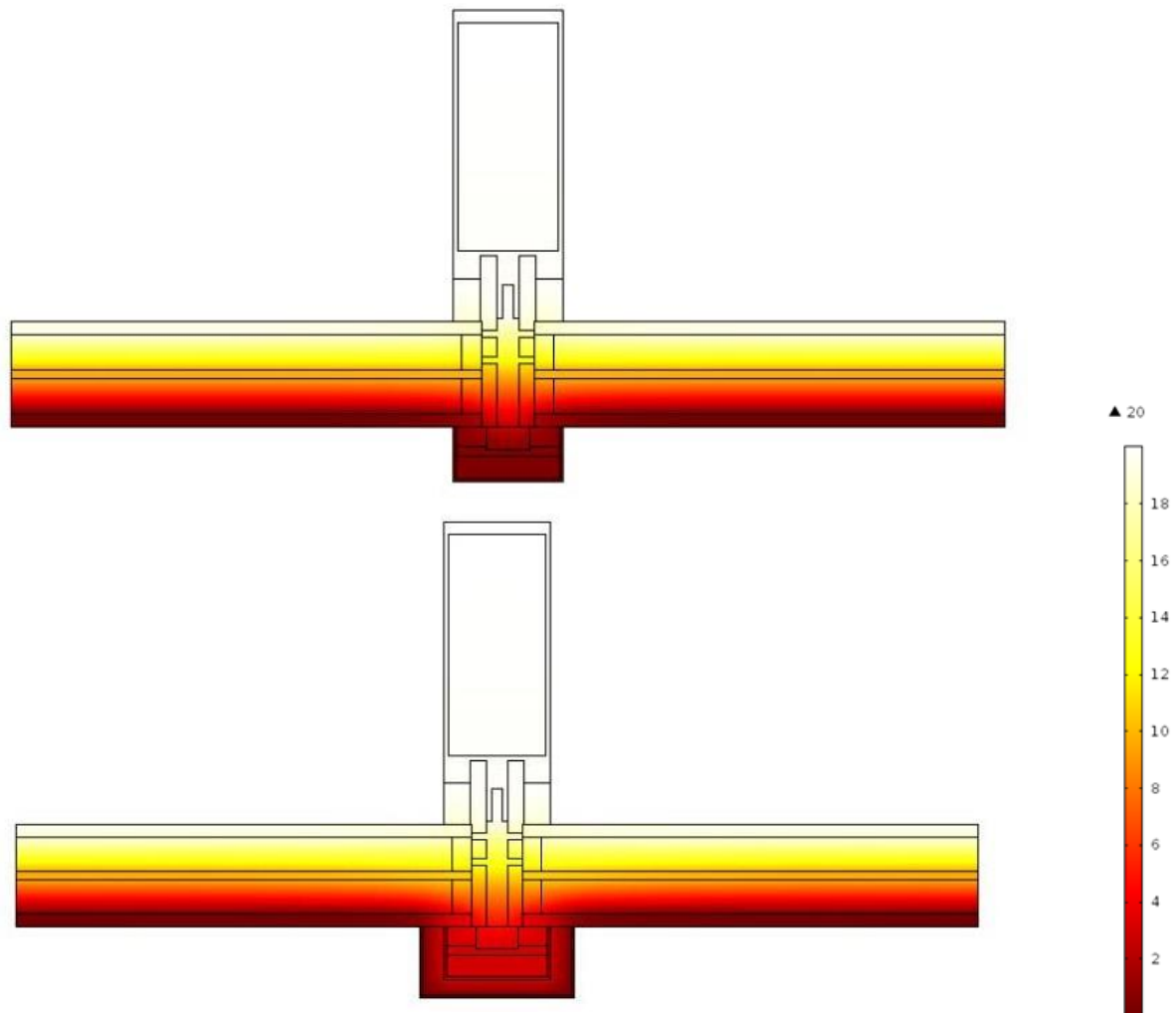
Nedan följer figur 18 – 21, samt en temperaturskala till höger. Här kan vi se 2- och 3-glasfasadssystem med och utan vakuumisoleringspaneler som undersökts och simulerats, bilderna visar på temperaturfördelningen över fasadsystemen där man kan se temperaturen variera beroende av material och köldbrygga. Här går det att se hur vakuumisoleringspanelen hindrar värmeflödet genom köldbryggan. Den värme som tränger in i den bärande konstruktionen är eliminerad från 2-glassystemet. Dock så är värmeflödet genom fönsterkassetten opåverkad. I 3-glassystemet är färgförändringen nästintill oförändrad för blotta ögat. Den faktiska förändringen får att se i tabell 5 nedan. I tabell 5 ser vi att det har skett en förbättring av båda systemen. Dock är resultatet mer positivt för 2-glassystemet med en procentuell förbättring på 44 % medans 3-glassystemet endast hade en förbättring på 14.5 %

Tabell 5 : Värde för den linjära köldbryggan (PSI-värde) som infästningslisten utgör i glasfasadsystemen.

2-glas	PSI [W/(m·K)]	3-glas	PSI [W/(m·K)]
Utan VIP	0.471	Utan VIP	0.126
Med VIP	0.311	Med VIP	0.110
% förbättring	44		14.5



Figur 18: 2-glasfasadsystem med tillhörande infästningslist exklusivt VIP ovan och inklusivt VIP nedan.



Figur 19: 3-glasfasadsystem med tillhörande infästningslist exklusive VIP ovan och inklusive VIP nedan.

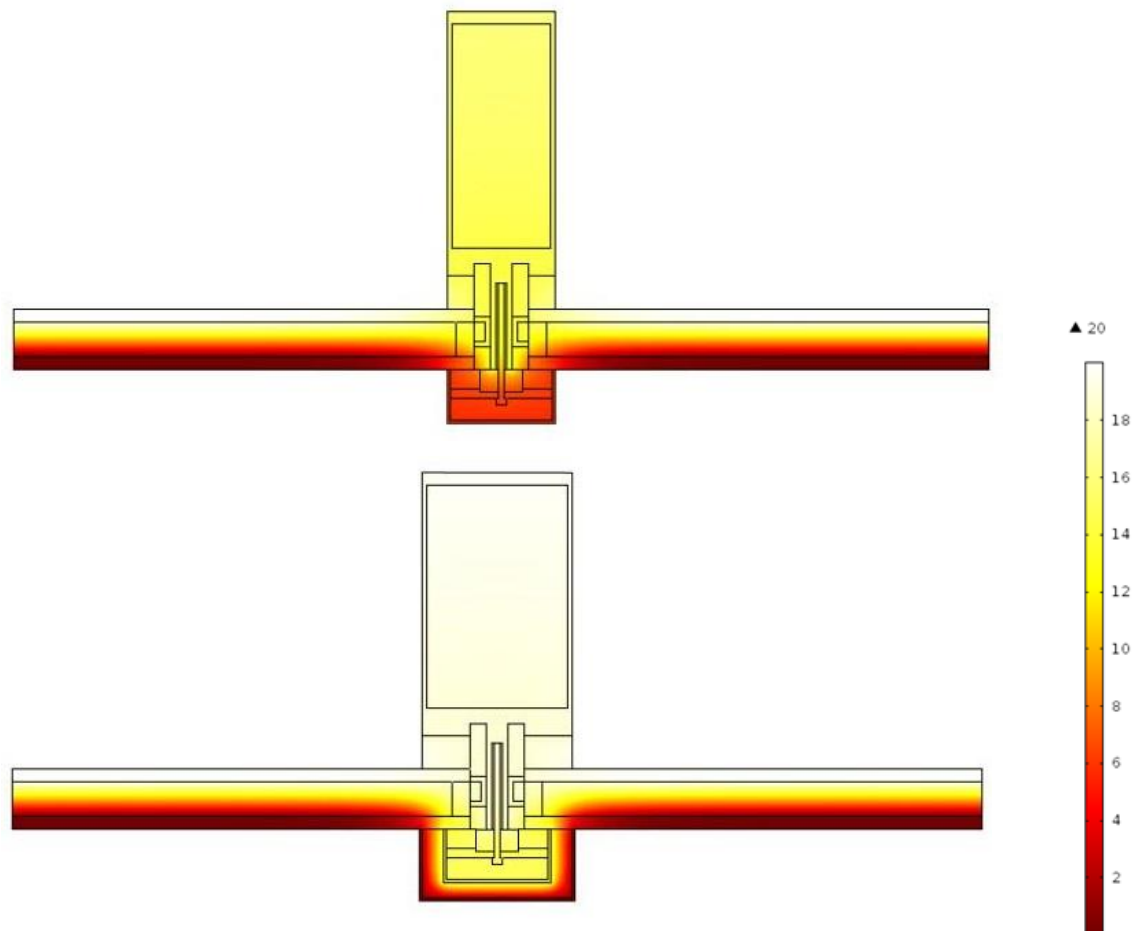
Framtagna lösningsförslag på hur vakuumisoleringspaneler kan appliceras i ett glasfasadsystem som redan ställer höga krav på energieffektivitet har påvisat att det kan förbättras ytterligare med hjälp av vakuumisoleringspaneler. Värdena för 2-glassystemet ser ut att göra en stor skillnad. Då förbättringen i 3-glassystemet inte är lika stor ska det tas hänsyn till att modellen utgår från glasfasadsystem som redan ställer väldigt höga krav på energieffektivitet.

Applicering av vakuumisoleringspaneler på 2-glasfasadsystem ger i jämförelse med ett 3-glassystem en större skillnad i effektivisering. Eftersom 3-glaskonstruktionen redan är så pass energieffektiv, är det svårt att få ner energiförlusterna genom infästningsramen ytterligare i det valda konstruktionsförslaget. Dock så påverkas även 3-glasfasaden av punktköldbryggorna som uppstår vid infästningsskruvarna.

### 6.1.1 Punktköldbryggor till följd av skruvfästning

Vid test av energieffektiviseringen för skruvfästningarna i glasfasaderna går det att se att introduktion av vakuumisoleringspaneler har stor betydelse. Eftersom infästningarna sker med cc 250 mm så uppstår det en stor mängd punktköldbryggor på ett helt fasadsystem. I dessa punktköldbryggor är det en stor skillnad mellan att utnyttja vakuumisoleringspaneler jämfört att inte använda vakuumisoleringspaneler.

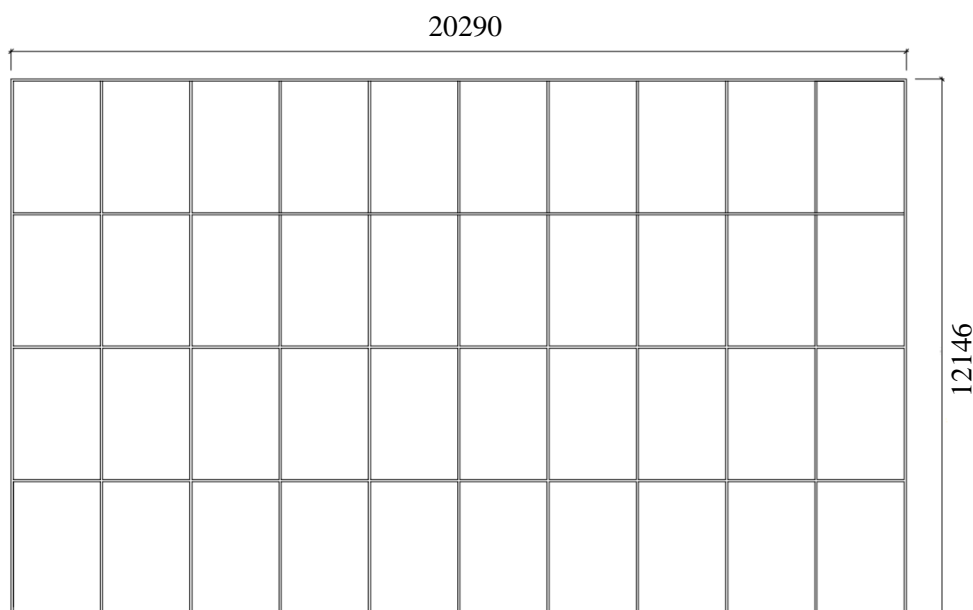
Detta visas för 2-glas fasadsystem i figur 22 och 23. Vidare modellering och analys där både långsträckta- och punktköldbryggor används behövs dock.



Figur 20: 2-glasfasadsystem med tillhörande infästningslist och skruvinfästning, exklusive VIP ovan och inklusive VIP nedan.

### 6.1.2 Exempelfasad med glasfasadsystem

För att uppskatta energibesparingarna har en exempelfasad tagits fram. Figur 24 visar ett glasfasadsystem uppbyggt av fönsterstorlekar i dimension 2000x3000 mm. Framtagna beräkningar av PSI-värde för de linjära köldbryggor, i samband med U-värde till  $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  för fönster som valts enligt Pilkington Optitherm, S3, gör det möjligt att beräkna energieffektiviteten för exempelfasaden. (Pilkington, 2014)



Figur21: Exempel av ett 2-glas fasadssystem, uppbyggt av 40 fönster i dimension 2000x3000 mm.

Energiberäkningar för exempelfasaden behandlar de linjära köldbryggor som uppstår på grund av infästningsanordningen. Resultatet visar på energieffektiviteten utan hänsyn till de punktköldbryggor som uppstår till följd av skruvinfästningar.

Vi antar en utetemperatur på 0°C och en innetemperatur på 20°C. Med hjälp av temperaturskillnaden, arean och värmegenomgångskoefficienten för fönstret fås ett värde för den värmeenergi som släpps genom allt glas i fasaden. Då vi vet PSI-värdena med och utan vakuumisoleringspaneler för infästningslisterna och hur många meter köldbrygga infästningslisterna utgör i fasaden får vi fram ett värde för värmeenergi som släpps igenom infästningslisterna.

Detta ger som vi ser i tabell 6 att 2-glassystemet minskar sin energiförbrukning med 11 % och 3-glassystemet minskar sin med 3 %

Tabell 6 Energieffektivisering av exempelfasad

	Värmeenergi utan VIP [W]	Värmeenergi med VIP [W]	U-värde för fasaden utan VIP [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	U-värde för fasaden med VIP [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	% förbättring
2-glasfasad	7355	6518	1,49	1,32	11
3-glasfasad	4813	4665	0,98	0,95	3

## 6.2 Fördelar och nackdelar med Vakuumisoleringspaneler i 2-glassystem

I konstruktionslösningen med 2-glasfönster som är baserat på Schucco-system har konstruktionens värden förbättrats avsevärt. PSI-värdet förbättras från 0,471 W/(m·K)

till  $0,311 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , vilket innebär en effektivisering på ungefär 34 % för den linjära köldbryggan, då vakuumisoleringspaneler använts i konstruktionen.

Vid vår framtagna exempelfasad så kan vi se att ett 2-glassystem för denna fasadstorlek på cirka  $20 \times 12$  meter ger en energibesparing på 837 W.

Det generella U-värdet med köldbryggorna inräknade beräknades hamna på  $1,49 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  utan vakuumisoleringspaneler och  $1,32 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  med vakuumisoleringspaneler, vilket medför en förbättring av det totala u-värdet med  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Vid större byggnader med glasfasad så kan det innebära en stor energibesparing då vakuumisoleringspaneler används.

Dock kan andra modifikationer av systemet vara bättre lämpade. Exempelvis kan man ändra materialen i infästningslisten på samma sätt som för 3-glassystemen, där materialet för skruvinfästningen har ett lägre värmemotstånd, vilket nämnts i kapitel 4.1. Detta kan innebära att applicering av vakuumisoleringspaneler inte är ekonomiskt försvarbart och att effektiviseringen inte är tillräckligt stor. En kombination av båda skulle ge ett ännu bättre värde när det kommer till energieffektiviseringen. Men det krävs vidare studier för att uppskatta storleken på förbättringen.

### **6.3 Fördelar och nackdelar med Vakuumisoleringspaneler i 3-glassystem**

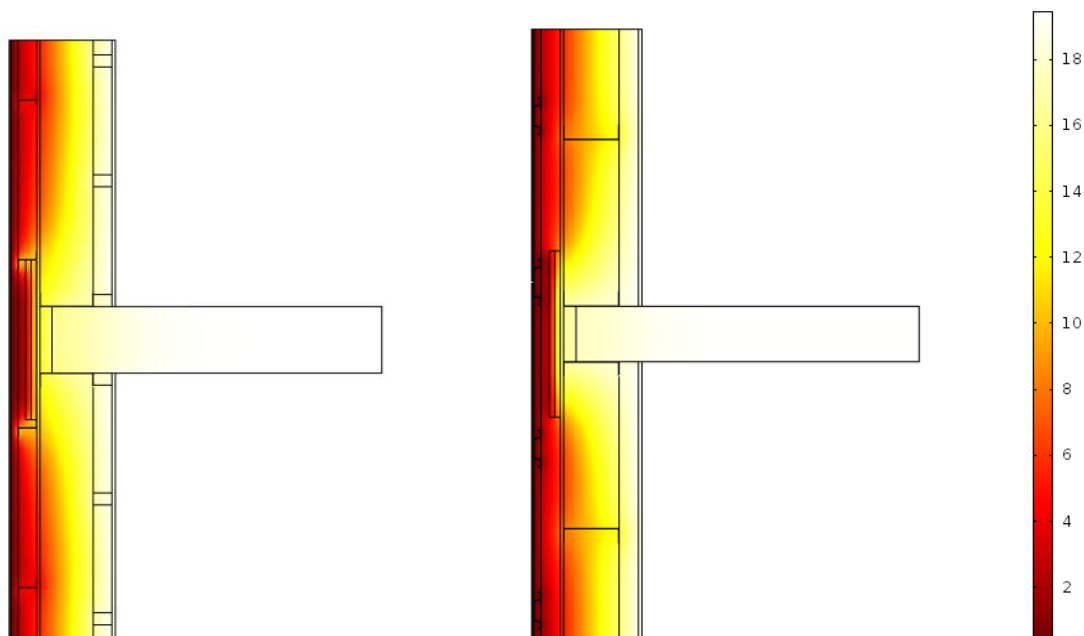
I 3-glassystemet har en del i infästningsanordningen bytts ut från aluminium till PA-plast. Detta ger en förbättring av värmemotståndet för denna del. Detta är av värde i denna konstruktion eftersom 3-glasen är mer energieffektiva än 2-glasen, vilket kommer ställa högre krav på att minimera köldbryggan som uppstår. Detta, i sin tur, kom att leda till att föreslagen lösning med vakuumisoleringspaneler inte påverkar resultatet i någon betydande mening. Konstruktionen blir lite effektivare, som kan ses i tabell 7, men värdet för förbättringen är troligtvis inte av någon större vikt för helheten av konstruktionen då skillnaden mellan PSI-värdena med respektive utan vakuumisoleringspaneler endast är  $0,016 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 13 %. Av detta vaga resultat för den undersökta konstruktionslösningen kan man anta att applicering av vakuumisoleringspaneler på det undersökta sättet inte bidrar till en tillräcklig energieffektivisering för att utnyttjas i praktiken.

Det ska även tas hänsyn till att de punktköldbryggor som uppstår av skruvinfästningarna inte varit med i den tvådimensionella beräkningsmodellen. Det kan komma att bidra till ytterligare en förbättring vid användning av vakuumisoleringspaneler. Vi antar dock att det, även med den aspekten inräknad, fortfarande inte resulterar i en tillräckligt stor förändring för att göra en markant skillnad på resultatet.



## 6.4 Ståregelvägg

I figur 25 visas uppbyggnad samt temperaturfördelning över den simulerad ståregelväggen med tillhörande anslutningar till mellanbjälklag och bärande vägg.



temperaturfördelning över ståregelvägg med tillhörande mellanbjälklag samt anslutning till en bärande vägg.

Tabell 7: Värde för den linjära köldbryggan (PSI-värde) som mellanbjälklag och bärande vägg utgör i en ståregelvägg.

Mellanbjälklag	PSI [W/(m·K)]	Bärande vägg	PSI [W/(m·K)]
Utan VIP	0.07	Utan VIP	0.056
Enkel VIP	0.026	Enkel VIP	0.007
Dubbel VIP	0.011	Dubbel VIP	-0.009*
% förbättring enkel VIP	62	% förbättring enkel VIP	88
% förbättring dubbel VIP	84	% förbättring dubbel VIP	116

\*Negativt värde innebär att anslutning av en bärande vägg med dubbel VIP mellan fasadvägg och bärande vägg ger en bättre värmeisolerande effekt än vid en fasadvägg utan bärande vägg och VIP, det vill säga en homogen ståregelvägg.

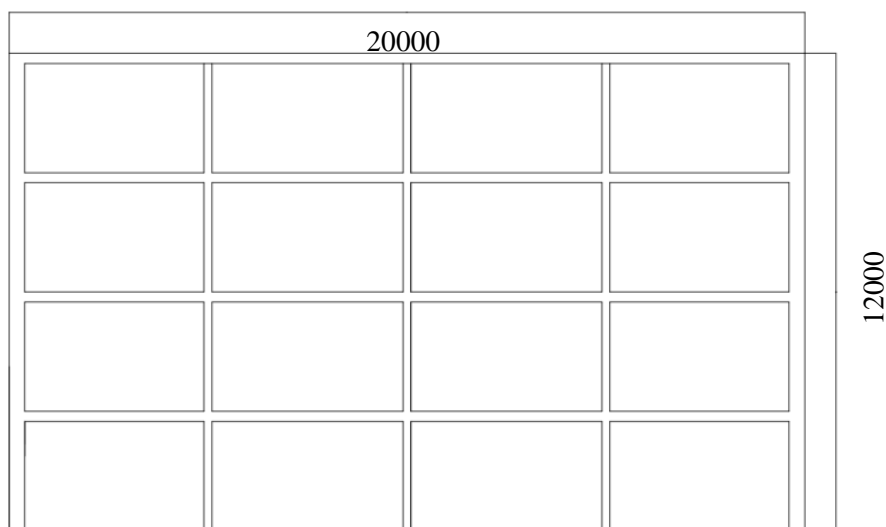
För den bärande väggen så kan köldbryggan brytas helt med hjälp av vakuumisoleringspaneler och anslutningspunkten för bärande vägg och fasadvägg där köldbryggan i vanliga fall uppstår kan göras effektivare än den generella väggen. Hela

problemet med köldbryggor elimineras nästan då dubbla vakuumisoleringspaneler används. Med enkel vakuumisoleringspanel blir värdet nästan så bra som om hela konstruktionen skulle vara en homogen vägg utan någon anslutning mellan fasad- och bärande vägg.

Vid mellanbjälklaget så uppstår vissa problem. Då betongbjälklaget har en större tjocklek än den bärande väggen kan värmen transporteras ut med sidorna av vakuumisoleringspanelerna genom z-reglarna. Storleken på vakuumisoleringspanelerna begränsas som tidigare nämnts av z-reglarnas cc-avstånd. Detta innebär mellanbjälklagskonstruktionen inte resulterar i lika stor energieffektivisering som med den bärande väggen, men fortfarande en betydande förbättring i förhållande till ursprungligt värde där vakuumisoleringspaneler inte använts.

### 6.4.1 Exempelsektion med stålregelvägg

Figur 26 visar ett exempel på en sektion av en stålregelvägg som är utformad med tre mellanbjälklag och tre bärande väggar. Tidigare framtagna PSI-värden för köldbryggor till följd av mellanbjälklag och bärande väggar samt ett antaget U-värde, för stålregelvägg ger möjlighet att beräkna energieffektiviteten för sektionen likt i glasfasadssystemet i kap 6.1.2. U-värdet:  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  är antaget enligt modell från Isover (Isover, 2007)



Figur 23: Exempelfasad uppbyggd av 3 mellanbjälklag samt 3 bärande väggar.

Tabell 8: Effektivisering av exempelfasad

Stålregelfasad	Värmeenergi [W]	U-värde [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]	% förbättring
Utan VIP	798	0,2	0
Enkel VIP	710	0,18	11
Dubbel VIP	680	0,17	15

U-värdet för denna exempelvägg med tre mellanbjälklag och tre bärande väggar ger en maximal skillnad på  $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  i förhållandet mellan att inte applicera några vakuumisoleringspaneler alls och att applicera ett dubbelt lager vakuumisoleringspaneler. Dubbla vakuumisoleringspaneler ger resultatet  $0,172 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Förbättring för enkel vakuumisoleringspanel uppgick till 11 % medan denna siffra för dubbel vakuumisoleringspanel är 15 % detta går att se i tabell 8

## **6.5 Fördelar och nackdelar med Vakuumisoleringspaneler i Stålregelvägg med anslutande mellanbjälklag eller bärande vägg**

Det mellanbjälklag och den bärande vägg som modellerats visar på att det går att energieffektivisera med hjälp av vakuumisoleringspaneler på grund av det begränsade isoleringsutrymmet där ett betongelement fästs in i väggen. För köldbryggan som uppstår till följd av anslutning till ett mellanbjälklag ger dubbel vakuumisoleringspanel en procentuell förbättring på 84 % för den linjära köldbryggan. För bärande väggar uppgår motsvarande värde för den linjära köldbryggan till 116 %.

Genom att kolla på föreslagen exempelfasad på  $12 \times 20 \text{ m}$ , (kap. 6.1.2) där en sektion tagits ut, innehållande tre stycken mellanbjälklag respektive bärande väggar, påvisas att energiförbrukningen kan sänkas från ungefär  $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  till  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Det vill säga en energieffektivisering på 15 %, vilket för ett större byggnadsprojekt med stålregelstomme kan medföra en stor energibesparing.

Som visats i tidigare beräkningar i kapitel 6.4, skiljer sig inte energieffektiviseringen mellan att använda en vakuumisoleringspanel och två vakuumisoleringspaneler i lika stor utsträckning som det blir mellan att inte applicera någon vakuumisoleringspanel och att applicera en vakuumisoleringspanel. Det tillkommer dock andra aspekter som inte rapporten tar upp, som att köldbryggan i den högkonduktiva film som omsluter kärnmaterialet kan brytas genom att lägga ett dubbelt lager med vakuumisoleringspaneler, där skarvarna överlappar. Då enkel vakuumisoleringspanel används skulle det vid praktisk tillämpning kunna innebära att anslutningarna i skarvarna mellan vakuumisoleringspanelerna kan resultera i en negativ inverkan på systemets värmeledningsförmåga. Resultaten i detta arbete ger därför indikationer på att anslutningarna med enkel vakuumisoleringspanel inte är en praktisk tillämpning.

## 7 Analys och Diskussion

Vakuumisoleringspaneler har i detta arbete använts för att förbättra vanligt förekommande köldbryggor. Det har visats att användning av vakuumisoleringspaneler har flera fördelar. Högt värmemotstånd medför en förbättring av de isolerande skikten utan att öka konstruktionens tjocklek.

Ett problem är dock att det aluminiumhölje som omsluter vakuumisoleringspanelerna även har negativa effekter. Delvis i form av det högkonduktiva lager som höljet utgör. Detta lager skapar en köldbrygga kring panelen. Dessa effekter kan till stor del motverkas genom att använda så stora paneler som möjligt, minskas antalet skarvar där det högkonduktiva lagret sträcker sig genom isoleringen. Då man använder flera lager vakuumisoleringspaneler i en konstruktion kan man motverka det högkonduktiva lagrets negativa effekter genom att placera panelerna växelvis så att skarvar mellan paneler aldrig går igenom hela isoleringslagrets tjocklek.

I teorin så är vakuumisoleringspaneler ett högpresterande material som skulle kunna förbättra alla områden med begränsad möjlighet/tillgänglighet till isoleringstjocklek och isoleringsmängd. I praktiken så blir det mer problematiskt då man vid utformningen av en konstruktion med vakuumisoleringspaneler måste ta hänsyn till aspekter som mekanisk påverkan, produktionsmöjligheter, livslängd, underhållskostnad och andra aspekter. Dock finns det stora möjligheter för att utnyttja det högpresterande materialet på olika sätt, exempelvis genom våra valda konstruktionsmodeller.

Enligt visade beräkningar och simuleringsmodeller kan man utgå från att vakuumisoleringspaneler kan utnyttjas på ett sätt som ökar energieffektiviteten kring köldbryggor. Genom att titta på exemplet med stålregelvägg i anslutning till en bärande vägg, kapitel 6.4, kan man se att vakuumisoleringspanelerna ger en så stor förbättring att köldbryggan får bättre energivärden än den homogena väggen den är en del av.

I mer komplexa konstruktionssystem som glasfasadssystemet i kapitel 4.1, kan vakuumisoleringspaneler vara svårare att utnyttja till sin fulla potential. Detta då vi i rapporten velat visa på ett exempel av konstruktionslösning som troligtvis är möjlig att konstruera och utveckla i praktiken. Vakuumisoleringspanelerna är därför fästa på utsidan av fasadssystemet. Detta medför att inverkan av vakuumisoleringspanelerna begränsas.

### 7.1 Nutiden och framtiden för Vakuumisoleringspaneler inom byggsektorn

Diskussioner om hur utvecklingen av dessa fasader kommer att se ut i framtiden är av stor vikt. Effektivisering av fönster utförs hela tiden, och desto mer fönsterkassetterna förbättras, desto större roll kommer köldbryggan att spela in i energiåtgången. Det innebär att en möjlig efterfrågan för en konstruktionslösning där högvärdigisolering används, i både glas- och regelfasaderna, tänkas komma att uppstå när det ställs ännu högre krav på energieffektiviteten hos byggnader och byggnadskomponenter.

I dagsläget är det dock svårt att göra en ekonomisk kalkyl på besparing från att använda vakuumisoleringspaneler i någon konstruktion. Den ekonomiska kalkylen

skulle behöva behandla både vakuumisoleringspanelernas livslängd, dvs. hur värmemotståndet kommer att påverkas med tiden, för att få ett värde på energibesparingen över en längre tid. Detta kommer att variera till skillnad från vår studie som gjorts där vi fokuserat på stationära förhållande, det vill säga där temperaturer i och kring konstruktionen inte varierat med tiden.

De tidsberoende faktorerna kan vara svåra att beräkna på grund av att livslängden för vakuumisoleringspanelerna kan variera, och det finns inga konkreta riktvärden kring hur länge en vakuumisoleringspanel verkligen kan vara i bruk. Detta ger komplikationer på den ekonomiska analys eftersom att man inte kan få något exakt värde på hur mycket energieffektiviteten kommer försämrats med tiden.

Efter att tryckutjämning uppnåtts i vakuumisoleringspanelerna så ska det göras en värdering kring utbytbarheten för dem. Trots att vakuumisoleringspanelerna fortfarande är effektiva i förhållande till de vanlig förekommande isoleringsmaterialen som används idag, även då trycket utjämnats i en vakuumisoleringspanel och den anses vara förbrukad. När tryckutjämning uppnåtts kan man anta att byte av nuvarande vakuumisoleringspaneler mot nya är av intresse. Byte av vakuumisoleringspaneler medför ett projekt i varierande storlek och omkostnad beroende vilket konstruktionssystem man applicerat vakuumisoleringspaneler i och var den är placerad i konstruktionen.

Som exempel jämför vi här våra två valda konstruktionsdetaljer. Glasfasadsystemet och stålregelvägg med mellanbjälklag eller bärande vägg. I glasfasadsystemet, där vi kom fram till ett konstruktionsförslag där vakuumisoleringspaneler kan antas vara prefabricerade i de utvändiga listerna som omsluter infästningslisterna, kan det ses som ett tämligen enkelt projekt att byta ut listerna mot nya. I stålregelväggen kan vi anta att fasadskivor och andra byggnadsmaterial som ligger över vakuumisoleringspanelerna måste demonteras, varpå nya vakuumisoleringspaneler installeras. Detta skulle troligtvis medföra en större omkostnad gällande utbytet av vakuumisoleringspanelerna, än vid ett glasfasadsystem av vårt exempel.

Alla dessa aspekter måste tas hänsyn till vid eventuell projektering med vakuumisoleringspaneler. Det kan vara en anledning till varför vakuumisoleringspanelerna inte är mer exploaterade idag. Det medför en risk för företag att använda material likt vakuumisoleringspaneler, där det inte finns tillräckligt med dokumenterade resultat för att säkert räkna på investeringen.

## **7.2 Möjlig ekonomisk inverkan av Vakuumisoleringspaneler**

När det kommer till den ekonomiska aspekten, så kan den ses på flera sätt. Enligt en utvärdering av Skanska, där försäljningskostnader för ökad boarea tack vare minskad konstruktionstjocklek, gjordes så framgick det att vakuumisoleringspaneler har en positiv inverkan (Clase, 2010) Denna studie tog dock ej hänsyn till en ökad produktionskostnad eller livslängden på vakuumisoleringspanelerna. I fallen som avses i detta arbete skulle dock påverkan på försäljningsbar boarea vara minimal. Istället skulle en studie rörande energibesparingar under en längre tid vara av värde vid utvärdering av tilläggsisolering av köldbryggor.

## 8 Slutsats

Studierna i detta examensarbete visar på att vakuumisoleringspaneler, inom de avgränsningar som gjorts, har ett stort användningsområde när det kommer till vissa konstruktionsdetaljer med begränsad möjlighet till isoleringstjocklek. Vid jämförelse av köldbryggorna som uppstår för de olika konstruktionerna så får vi en procentuell förbättring för exempelfasaden (kap. 6.1.2 & 6.2.1) med 2-glassystem med vakuumisoleringspaneler en energieffektivisering på ungefär 13 % för fasaden, till skillnad från 3-glassystemet där energieffektiviseringen endast uppgick till 3 %.

För exempelsektionen med stålregelvägg och anslutning till mellanbjälklag och bärande vägg gav applicering av vakuumisoleringspaneler en procentuell energieffektivisering på 15 % för hela sektionen innehållande 3 mellanbjälklag och 3 bärande väggar.

Vissa konstruktionsdetaljer finns redan lösningar för att öka energieffektiviteten i så pass stor grad att det kan vara svårt att tjäna energi på att använda vakuumisoleringspaneler. I de glasfasadssystem som undersökts kan så vara fallet. När det går från 2-glas till 3-glassystem och bytet av materialet i skruvfästningen utförs, resulterar det i att vakuumisoleringspanelerna medför en obetydlig förbättring för konstruktionens energieffektivitet. Vidare kan vi anta att om det funnits ett värde i att förbättra energieffektiviteten för köldbryggan i 2-glaskonstruktionen, kan samma materialutbyte utföras som för 3-glaskonstruktionen.

Studien har dock inte tittat närmare på de punktköldbryggor som uppstår till följd av skruvfästningar. Men enligt överslagsberäkningar som gjorts för punktköldbryggorna antas det ändå inte resultera i någon större skillnad i energibesparing med eller utan vakuumisoleringspaneler.

I den andra konstruktionen som undersökts; stålregelvägg med anslutande mellanbjälklag eller bärande vägg, hade vakuumisoleringspanelerna en större inverkan. Resultatet av beräkningar och simuleringar visar på att värdena för en stålregelvägg med ett anslutande byggnadselement likt bärande vägg eller mellanbjälklag, kan förbättras i den grad att en köldbrygga aldrig uppstår i konstruktionen. I ett av fallen blev resultatet så pass effektivt så att värmemotståndet för delen där anslutningen befinner sig är högre än den homogena stålregelväggen.

Under arbetets gång, har vi genom kontakt med företag märkt att de generellt tycker att många delar är ovissa när det kommer till vakuumisoleringspaneler, företagen vill inte ta risken att använda ett material som är så komplext och ovanligt i byggsektorn. Trots det har de flesta en positiv inställning till utvecklingen och framtiden för högpresterande material likt vakuumisoleringspaneler.

### 8.1 Framtida studier

De slutsatser arbetet lett till ger svar på det syfte som formulerats, dock så skulle arbetet kunnat utformas till att exempelvis endast behandla en konstruktionslösning, likt glasfasadsystemen, och på så sätt möjliggöra en djupare analys där punktköldbryggor kan räknas in för att uppnå ett värde som behandlar alla delar för konstruktionen.

Detta examensarbete har fokuserat på två valda, vanligt förekommande, konstruktionsexempel på köldbryggor. Fler studier bör genomföras där andra köldbryggor undersöks, för att skapa en helhetssyn över vilka köldbryggor som är mest lönsamma att tilläggsisolera med vakuumisoleringspaneler.

Vidare bör en ekonomisk analys över lönsamheten på tilläggsisolering med vakuumisoleringspaneler göras. Där bör aspekter som livslängd, merkostnad i produktion och "payback-tid" undersökas. Detta skulle ge en mer fullständig bild över de problem och aspekter man tar sig an då det väljs att investera i tilläggsisolering med vakuumisoleringspaneler.

## 9 Litteraturförteckning

- Bengtsson, E., & Johansson, J. (2008). *Bärande murverk - välisolerade typdetaljer*. Göteborg: Chalmers.
- Binz, A., & et al. (2005). *Vacuum Insulation - Panel Properties and Building Applications*. Switzerland: Annex 39.
- Clase, M. (2010). *Inventering och Utvärdering av Högpresterande Isolering*. Göteborg: Skanska Sverige AB.
- Eriksson, N. (den 11 04 2014). Försäljningsansvarig Lindab. (M. Johansson, Intervjuare)
- Europaparlamentet. (2008). Hämtat från Europaparlamentet-webbplats: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20080121STO19278+0+DOC+XML+V0//SV> den 15 02 2014
- Fredlund, B. (2014). *Lunds tekniska högskola*. Hämtat från lth.se: [http://www.bkl.lth.se/fileadmin/byggnadskonstruktion/education/VSMF01/FA\\_relA\\_sning\\_2\\_KA\\_ldbryggor.pdf](http://www.bkl.lth.se/fileadmin/byggnadskonstruktion/education/VSMF01/FA_relA_sning_2_KA_ldbryggor.pdf) den 18 03 2014
- Gohardani, N. (2010). *Vakuumisolering vid Byggnadsrenovering och Tilläggsisolering*. Kungliga Tekniska Högskolan.
- Hagentoft, C.-E. (2003). *Introduction to Building Physics*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Hens, H. (2012). *Building Physics. Heat, Air and Moisture*. Leuven: Wilhelm Ernst & Sohn.
- IEA/ECBCS, A. (2005). *VIP - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications*. Subtask A report.
- Isover. (2007). *Konstruktionslösningar - Ytterväggar*. Hämtat från <http://www.isover.se/>: [http://www.isover.se/files/Isover\\_SE/Om\\_Isover/Kontakta\\_oss/Broschyren\\_Byggt/IsoverBoken%20200709/konstr\\_yttervaggar.pdf](http://www.isover.se/files/Isover_SE/Om_Isover/Kontakta_oss/Broschyren_Byggt/IsoverBoken%20200709/konstr_yttervaggar.pdf) den 05 05 2014
- Ivarsson. (2012). *Equitone Natura Produktdatablad*. Hämtat från <http://www.ivarssonsverige.se>: <http://www.ivarssonsverige.se/EQUITONE-natura-18221.aspx> den 10 04 2014
- Johansson, P., & Berge, A. (2012). *Vacuum Insulation Panels in Buildings*. Göteborg: Chalmers University of Technology.
- Petersson, B.-Å. (2009). *Tillämpad Byggnadsfysik (4:2 uppl.)*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Pietruszka, B., & Gerylo, R. (2010). *Implementation of nanoporous thermal insulations to improve the energy efficiency of curtain walling structures*. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University.
- Pilkington. (2014). *Pilkington Optitherm™ S3*. Hämtat från <http://www.pilkington.com/>: <file:///C:/Users/Tias/Downloads/Optitherm%20S3%20Data%20Sheet.pdf> den 20 04 2014
- Schuco. (2014). *FW 50+.HI: Systemlösningar för vertikalfasader och glastak CAD Data*. Hämtat från <http://www.schueco.com>:



[http://www.schueco.com/web/se/architekten/fassaden/produkte\\_ar\\_f/facades/mullion\\_transom\\_facades/schueco\\_fw\\_50plus\\_hi/](http://www.schueco.com/web/se/architekten/fassaden/produkte_ar_f/facades/mullion_transom_facades/schueco_fw_50plus_hi/) den 08 03 2014

Schuco. (2014). Teknisk Avdelning Schuco. (M. Johansson, Intervjuare)

Svensk Standard. (2003). *Termiska egenskaper hos fönster, dörrar och jalousier - beräkning av värmegenomgångskoefficient - Del 2: Numerisk metod för karm och båge*. Stockholm: SIS Förlag AB.

Svensk standard. (2007). *Köldbryggor i byggnadskonstruktioner - Värmeflöden och yttemperaturer - Detaljerade beräkningar*. Stockholm: SIS Förlag AB.

Svensson, Å. (2014). Produktion Pilkington. (M. Hermansson, Intervjuare)

Tizianel, J., & Walker, C. (2008). *GTEC Aqua Board Technical Data Sheet*. Hämtat från <http://www.nevilllong.co.uk>:  
<http://www.nevilllong.co.uk/sites/default/files/products/downloads/aquaboard.pdf> den 05 04 2014

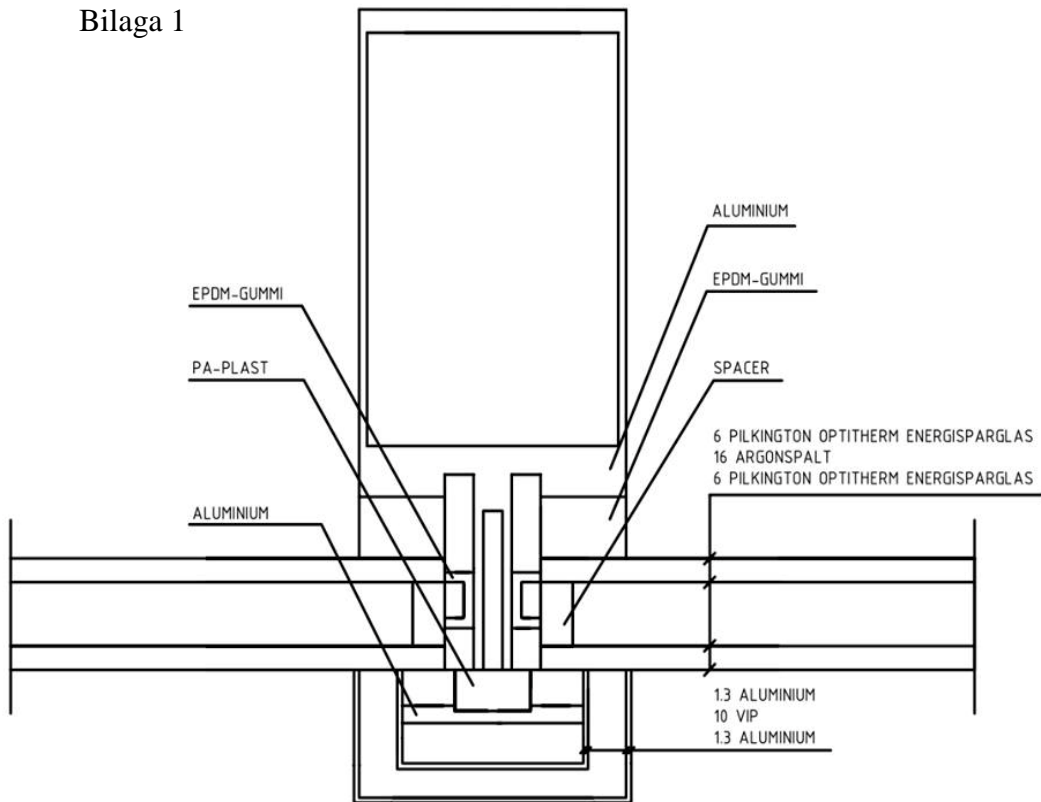
Willems, M. S. (2005). Numerical investigation on thermal bridge effects in vacuum insulating elements. *Proceedings of the 7th International Vacuum Insulation Symposium*.

Program:

Comsol Multiphysics 4.3 (2014) COMSOL AB

# Bilagor

Bilaga 1



Bilaga 2

