CHALMERS

Studie av vakuumisoleringspaneler i ytterväggskonstruktioner

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Byggingenjör

ANDREAS AGSTRAND & LEO ODBY

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Byggnadsfysik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2011

Examensarbete 2011:117

EXAMENSARBETE 2011:117

Studie av vakuumisoleringspaneler i ytterväggskonstruktioner

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

ANDREAS AGSTRAND & LEO ODBY

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Byggnadsfysik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2011

Studie av vakuumisoleringspaneler i ytterväggskonstruktioner

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

ANDREAS AGSTRAND & LEO ODBY

© ANDREAS AGSTRAND & LEO ODBY, 2011

Examensarbete / Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2011:117

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

Omslag:
Montering av vakuumisoleringspaneler. Bilden är ifrån ett projekt där vakuumisoleringspaneler monteras i ett landshövdingehus. Projektet är ett samarbete mellan Familjebostäder, Chalmers och Sveriges tekniska forskningsinstitut.
Foto: Pär Johansson 2010-09-22.

Chalmers reproservice / Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2011

Studie av vakuumisoleringspaneler i ytterväggskonstruktioner
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

ANDREAS AGSTRAND & LEO ODBY
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Byggnadsfysik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Byggnader, och då särskilt driften av dessa, står för en stor del av vår totala energiförbrukning. Ökade energikostnader och miljöengagemang har under de senaste åren ökat intresset för ämnet. Nya restriktioner och mål för att energieffektivisera i byggsektorn har fattats. En primär åtgärd för att uppnå en sänkt energiförbrukning i byggnader är att minska behovet av tillförd värme. Detta kan göras genom en förbättrad värmeisolering, men med dagens traditionella isoleringsmaterial innebär detta en förtjockning av klimatskalen. En förtjockning av klimatskalen innebär i sin tur en ökad total materialåtgång samt en minskad sälj- eller uthyrningsbar boyta vid en låst yttre byggnadsarea. Vid en behövlig energieffektivisering av bl.a. miljonprogrammen existerar inte alltid utrymme för en tjock tilläggsisolering.

Syftet med studien är att teoretiskt utreda och beräkna om det finns en potential, och om det är ekonomiskt försvarbart, att komplettera det konventionella isoleringsmaterialet mineralull med vakuumisoleringspaneler (förkortat VIP) i ytterväggar. Vidare är syftet att öka kunskapen om VIP.

Rapporten inleds med en teoridel där bakgrundsfakta, byggnadsfysikaliska teorier och krav, mineralull, vakuumisoleringspaneler, referensobjektet samt fem alternativa förslag på ytterväggskonstruktioner med VIP presenteras. Teoridelen ligger till grund för beräkningar med hänsyn till U-värde, fukttillstånd och materialkostnad för de framtagna ytterväggarna. En av väggkonstruktionerna har teoretiskt integrerats i referensobjektet varpå byggnadens genomsnittliga U-värde har beräknats. Väggkonstruktionerna har sedan jämförts med referensväggen och utvärderas sinsemellan.

Resultatet visar att det finns en byggnadsfysikalisk potential i att komplettera mineralull med VIP, men att den faktiska kostnaden bör utredas vidare. En väl utförd väggkonstruktion kan spara mycket utrymme i förhållande till sin materialkostnad. Osäkerheter som existerar idag är panelernas livslängd och hanteringen i byggskedet. I dagsläget innebär detta en ökad ekonomisk risk, men i och med att panelerna och hanteringen av dessa utvecklas avtar denna risk och vidare undersökningar är att önska.

Nyckelord: Byggnadsfysik, Energieffektivisering, fukt, HEAT2, Höjdenvändan, Klimatskal, Köldbryggor, Vakuumisoleringspaneler, VIP, värmeisolering

Study of vacuum insulation panels in exterior wall construction

Diploma Thesis in the Engineering Programme
Building and Civil Engineering

ANDREAS AGSTRAND & LEO ODBY
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of Building Technology
Building Physics
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Buildings and particularly the operation of these, is accounting for a large proportion of our total energy consumption. Rising energy costs and environmental awareness in recent years has increased interest in the topic. New restrictions and goals for energy efficiency in the construction sector have been taken. A primary measure to achieve reduced energy consumption in buildings is to reduce the need for the added heat. This can be done by increasing the isolation, but with today's traditional insulation, this means a thickening of the building envelope. A thickening of the building envelope, in turn, increases the total material consumption and reduces the salable or rentable floor space with a locked external floor space. At the necessary energy efficiency of the old building stock there is not always room for a thick insulation. The purpose of this study is to theoretically calculate and investigate whether there is a potential, and if it is economically feasible, to supplement the conventional mineral wool insulation with vacuum insulation panels (VIP for short) in the external walls. A further aim is to increase the knowledge of VIP.

The report begins with a theory part where the background facts, building physical theories and requirements, mineral wool, vacuum insulation panels, the reference object, and five alternative proposals on the exterior wall constructions with VIP is presented. The theory part is the basis for calculations with regard to the U-value, moisture conditions and material costs for these project walls. One of the wall structures has been integrated within the reference object to calculate the thermal bridges and the building's U-value. The wall constructions were then compared with the reference wall and evaluated with each other.

The result shows that there is a technical potential to supplement the mineral wool with VIP, but that the actual cost should be further investigated. A good wall design can save a lot of space in relation to its material cost. Uncertainties that exist today are the lifetimes of the panels and management in the construction stage. In the current situation, this means an increased financial risk, but as the panels and their management are developing this risk is decreasing and further investigations are to be desired.

Key words: Building envelope, building physics, energy efficiency, Höjdenvändan, moisture transfer, thermal bridges, thermal insulation, Vacuum Insulation Panels, VIP

Innehåll

SAMMANFATTNING I
DIPLOMA THESIS IN THE ENGINEERING PROGRAMME II
ABSTRACT II
INNEHÅLL III
FÖRORD VI
BETECKNINGAR VII

1 INLEDNING 1
1.1 Syfte 1
1.2 Avgränsningar 2
1.3 Metod 2
1.4 Rapportens disposition 2

2 TEORI 4
2.1 Grundläggande begrepp för energieffektivt byggande 4
2.1.1 Kyotopyramiden 4
2.1.2 Byggnadens klimatskärm 5
2.1.3 Boverkets krav 5
2.2 Byggnadsfysikaliska teorier 6
2.2.1 Värmeförluster genom klimatskärmen 6
2.2.2 Köldbryggor 7
2.2.3 Fuktsäkerhet 8
2.3 Isoleringsmaterial 10
2.3.1 Mineralull 10
2.3.2 Vakuumisoleringspaneler 11
2.4 Referensobjektet 18
2.4.1 Höjdenvändan 19
2.5 Beskrivning av väggkonstruktioner 20

3 BERÄKNINGAR 23
3.1 Beskrivning av beräkningsmetoder 23
3.1.1 Värmemotstånd 23
3.1.2 Köldbryggor 24
3.1.3 Fukttillstånd 26
3.1.4 Ekonomi 28

4 RESULTAT 30
4.1 Väggkonstruktion 1 30
4.2 Väggkonstruktion 2 32

4.3 Väggkonstruktion 3 34
4.4 Väggkonstruktion 4 36
4.5 Väggkonstruktion 5 38

5 ANALYS 40
5.1 Värmegenomgångskoefficient 40
5.2 Fukttillstånd 40
5.3 Ekonomi 40
5.4 Isoleringsmaterialet 41

6 SLUTSATSER 43

7 REFERENSER 44

BILAGOR 48
Bilaga 1: Vakuumisoleringspaneler 48
Panel A 48
Panel B 49
Bilaga 2: Beräkningar av värmemotstånd och U-värden 50
Väggkonstruktion 1 50
Väggkonstruktion 2 54
Väggkonstruktion 3 57
Väggkonstruktion 4 61
Beräkningar av linjeköldbryggor för väggk. 4 65
Beräkning av U_m för väggk. 4 integrerad i referensbyggnad. 80
Väggkonstruktion 5 82
Bilaga 3: Fuktberäkningar 85
Väggkonstruktion 1 86
Väggkonstruktion 2 89
Väggkonstruktion 3 90
Väggkonstruktion 4 91
Väggkonstruktion 5 92
Bilaga 4: Materialkostnader väggkonstruktioner 93

Förord

Denna rapport är ett examensarbete om 15 högskolepoäng vid avdelningen för Byggnadsteknologi, institutionen för Bygg- och Miljöteknik, vid Chalmers tekniska högskola. Examensarbetet har utförts under våren 2011 i samarbete med Skanska Bostad Göteborg. Rapporten är en studie av vakuumisoleringspaneler i ytterväggskonstruktioner.

Vi vill här passa på att tacka våra handledare och andra kunniga personer som har hjälpt oss under arbetets gång. Vår handledare och examinator på Chalmers, Professor Carl-Eric Hagentoft, har varit till hjälp vid diverse byggnadsfysikaliska funderingar och beräkningar. Pär Johansson, doktorand på Chalmers, som varit till stor hjälp under hela arbetets gång, introducerat oss för programmet HEAT2 och bidragit med information angående vakuumisoleringspaneler. Vår handledare på Skanska, Ralf Gustafson, som bidragit med information och kontakter. Kurt Möller på WSP som ställt upp på intervju. Tack också till alla er andra som bidragit med funderingar och svarat på våra frågor.

Vi anser oss ha införskaffat värdefull kunskap inför arbetslivet och hoppas att arbetet kan komma till nytta hos såväl uppdragsgivare som gemene läsare.

Göteborg maj 2011

Andreas Agstrand & Leo Odby

Beteckningar

Nedan förklaras de begrepp som används i rapporten

Latinska

A_{om}	Sammanlagd area för omslutande byggnadsdelars ytor mot uppvärmd inneluft (m^2)
G	Invändig fuktproduktion (g/h)
$K´$	Konduktans (W/K)
m	Mögelpotential (-)
n	Luftomsättning (O/h)
q	Värmeflödestäthet (W/m^2K)
Q	Energimängd (kWh)
R	Värmemotstånd (m^2K/W)
R_{se}	Yttre värmeövergångsmotstånd (m^2K/W)
R_{si}	Inre värmegenomgångsmotstånd (m^2K/W)
R_T	Totalt värmemotstånd (m^2K/W)
R_T^U	Totalt värmemotstånd, U-värdesmetoden (m^2K/W)
R_T^λ	Totalt värmemotstånd, λ -värdesmetoden (m^2K/W)
RF	Relativ fuktighet (%)
T	Temperatur (C°)
T_e	Temperatur utomhus (C°)
T_i	Temperatur inomhus (C°)
U	Värmegenomgångskoefficient för en byggnadsdel (W/m^2K)
U_m	Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient för en byggnads klimatskärm (W/m^2K). Definieras enligt BBR06 som $$U_m = \frac{\sum U_{korr,i}\ A_i + \sum \psi_k\ l_k + \sum \chi_j}{A_{om}}$$
V	Volym (m^3)
v	Ånghalt. Mängd vattenånga som luften innehåller (g/m^3 eller kg/m^3)
v_e	Ånghalt utomhus (g/m^3 eller kg/m^3)
v_i	Ånghalt inomhus (g/m^3 eller kg/m^3)
v_s	Mättnadsånghalt. Maximala ånghalt för luft vid en viss temperatur (g/m^3 eller kg/m^3)

Grekiska

Δ_{kant}	Tillskottet i värmeledningsförmåga från panels kanter (W/mK)
Δv	Skillnad i ånghalt (g/m^3 eller kg/m^3)
λ	Värmeledningsförmåga för ett material (W/mK)
λ_c	Värmeledningsförmåga i centrum av vakuumisoleringspanel (W/mK)
$\lambda_{c;0}$	Värmeledningsförmåga i centrum av vakuumisoleringspanel, begynnelsevärde (W/mK)
$\lambda_{c;p}$	Värmeledningsförmåga i centrum av vakuumisoleringspanel efter invändig tryckökning (W/mK)
$\lambda_{c;p;lim}$	Maximalt tillåten värmeledningsförmåga i centrum av vakuumisoleringspanel efter invändig tryckökning (W/mK)
λ_{eff}	Effektiv värmeledningsförmåga för vakuumisoleringspanel (W/mK)
$\lambda_{eff;lim}$	Maximalt tillåten effektiv värmeledningsförmåga för vakuumisoleringspanel (W/mK)
λ_f	Värmeledningsförmåga för panels barriärfilmsmaterial (W/mK)
$\rho_{g;l}$	Invändigt lufttryck ($m$bar)
$\rho_{g;l;0}$	Invändigt lufttryck, begynnelsevärde ($m$bar)
$\rho_{g;l;lim}$	Maximalt tillåtet invändigt lufttryck ($m$bar)
ψ	Värmegenomgångskoefficient för en linjär köldbrygga (W/mK)

Prefix

m	milli (10^{-3})
µ	mikro (10^{-6})
n	nano (10^{-9})

1 INLEDNING

Inom EU står byggnader för cirka 40 procent av den totala energiförbrukningen (Energimyndigheten, 2010a). En stor del av förbrukningen, ca 85 %, går åt till byggnaders uppvärmningsbehov. För att bland annat minska energiåtgången har Europaparlamentet röstat igenom ett direktiv som innebär att alla byggnader uppförda efter år 2020 ska vara näranollenergibyggnader (SABO, 2010). En näranollenergibyggnad definieras av att årsbehovet av energi är nära noll. Årsförbrukningen av energi påverkas av flera faktorer, bland annat hur effektivt byggnadens isolering och uppvärmningssystem är.

Utöver detta finns även Boverkets mål till 2020 och 2050 som innebär att energianvändningen i bostäder och lokaler skall sänkas med 20 respektive 50 procent i förhållande till användningen 1995 (Naturvårdsverket, 2011).

Förutom de miljömässiga besparingarna som finns att göra, finns även ett ekonomiskt intresse på grund av förväntade ökade energipriser.

För att uppnå ovanstående mål krävs en energieffektivisering av det totala byggnadsbeståndet. En primär åtgärd är att minska behovet av tillförd värme i bostäder och lokaler, vilket kan göras genom en ökad isolering. Med dagens konventionella isoleringsmaterial innebär detta en förtjockning av klimatskalet. En förtjockning av klimatskalet innebär i sin tur en ökad total materialåtgång och en mindre sälj- eller uthyrningsbar boyta vid en låst yttre byggnadsarea. Vid en behövlig energieffektivisering av bl.a. miljonprogrammen existerar inte alltid utrymme för en tjock tilläggsisolering.

Vakuumisoleringspaneler (förkortat VIP) är en relativt ny högpresterande isoleringsprodukt inom byggbranschen. Dess exceptionellt låga värmeledningsförmåga innebär att isoleringstjockleken kan reduceras, samtidigt som dagens ökande energikrav kan uppfyllas.

1.1 Syfte

Syftet med studien är att teoretiskt beräkna och utreda om det finns en potential, och om det är ekonomiskt försvarbart, att komplettera det konventionella isoleringsmaterialet mineralull med vakuumisoleringspaneler i ytterväggar. Vidare är syftet att öka kunskapen om VIP.

Fem stycken alternativa ytterväggskonstruktioner som inrymmer VIP jämförs med en befintlig ytterväggskonstruktion som inrymmer mineralull. I studien undersöks hur fukttillståndet och värmeflödet i ytterväggen påverkas beroende på var och hur vakuumisoleringspanelerna appliceras i konstruktionen. Alla väggkonstruktioner har ett liknande totalt värmemotstånd men väggkonstruktionen som inrymmer mineralull har en större väggtjocklek på grund av mineralullens högre värmeledningsförmåga. Ytterväggarna som inrymmer VIP har en tunnare väggtjocklek vilket resulterar i en större sälj- eller uthyrbar bostadsarea, om disponibel markanvändning är begränsad. VIP är dock ett dyrare isoleringsmaterial än mineralull så syftet är att vikta ihop kvadratmeterpriset för materialet i en yttervägg som inrymmer VIP med den ekonomiska förtjänsten av den ökade bostadsarean under en tidsperiod som motsvarar VIP teoretiska livslängd. Resultatet ska sedan jämföras med kvadratmeterpriset för materialet i ytterväggen som inrymmer mineralull.

1.2 Avgränsningar

I studien har beräkningar av värme- och fukttransporter genom de alternativa utfackningsväggarna utförts för stationära förhållanden. Då referensbyggnaden är belägen i Lerum har månadsmedelvärden för Göteborg använts vid tillämpning av aktuella lufttemperaturer samt luftfuktighetstillstånd. Vidare har den ekonomiska aspekten av ökade materialkostnader som kompenseras med vunnen boyta beräknats med hjälp av Payback-metoden.

1.3 Metod

Den teoretiska grunden till rapporten har inhämtats från forskningspublikationer, tidigare examensarbeten, gällande föreskrifter vid utformning av byggnader samt kurslitteratur från studier vid Chalmers Tekniska Högskola. Viss information har hämtats från tillverkare och distributörer av vakuumisoleringspaneler och mineralull, för att fungera som exempel till teorin. Vidare har intervjuer och möten med specialister inom berörda områden bidragit med ytterligare förklaring och förståelse. Personal på Chalmers har underlättat arbetsgången och bidragit med information om vakuumisoleringspaneler.

Vidare har Skanska bistått med information och ritningar över referensobjektet Höjdenvändan i Lerum. Fem stycken alternativa ytterväggskonstruktioner innehållandes vakuumisoleringspaneler har tagits fram utifrån gällande förutsättningar. Avsikten har varit att de alternativa ytterväggskonstruktionerna med VIP skall ha ett likvärdigt värmemotstånd som referensväggen samt att studera inverkan av var i konstruktionen VIP appliceras. De alternativa ytterväggskonstruktionerna har sedan utretts med hänsyn till värmemotstånd, fukttillstånd och ekonomi. Vidare har inverkan av linjeköldbryggor på byggnadens genomsnittliga värmegenomgångskoefficient för ytterväggskonstruktion nummer fyra beräknats. Beräkningar har gjorts för hand samt i beräkningsprogrammen HEAT2 och BidCon.

Slutligen har resultaten analyserats och väggkonstruktionernas styrkor/svagheter samt vakuumisoleringspanelers potential i byggbranschen diskuterats.

1.4 Rapportens disposition

Huvuddelen av rapporten kan delas upp i tre övergripande delar enligt nedan:

Kapitel 2 – TEORI utgör en introduktion till den bakomliggande fakta som anses nödvändig för läsarens förståelse. Här presenteras grundläggande begrepp för energieffektivt byggande. Gällande byggnadsfysikaliska förutsättningar, krav och definitioner förklaras. Egenskaper och bakomliggande teori hos det konventionella isoleringsmaterialet mineralull samt vakuumisoleringspaneler presenteras. Referensobjektet och framtagna ytterväggskonstruktioner redovisas.

Kapitel 3 – BERÄKNINGAR redovisar beräkningsmetoder och beräkningsgång med hänseende till värmemotstånd, köldbryggor, fukttillstånd och ekonomi. Fullständiga beräkningar finns i *Bilagorna*.

Kapitel 4 – RESULTAT redovisar resultat från de beräkningar som gjorts för respektive väggkonstruktion.

I den avslutande delen ***Kapitel 5 – ANALYS*** och ***Kapitel 6 – SLUTSATSER*** analyseras resultaten från föregående kapitel. Väggkonstruktionernas uppbyggnad samt vakuumisoleringspanelers möjligheter och begränsningar diskuteras. Rapportens referenser återfinns i ***7 – REFERENSER***. I ***BILAGOR*** redovisas alla beräkningar i detalj.

Vi rekommenderar att rapporten läses i sin helhet då referenser görs från olika kapitel, men *Kapitel 2* kan även fungera för sig självt och rekommenderas för alla som är intresserade av energieffektivt byggande och vakuumisoleringspaneler.

2 TEORI

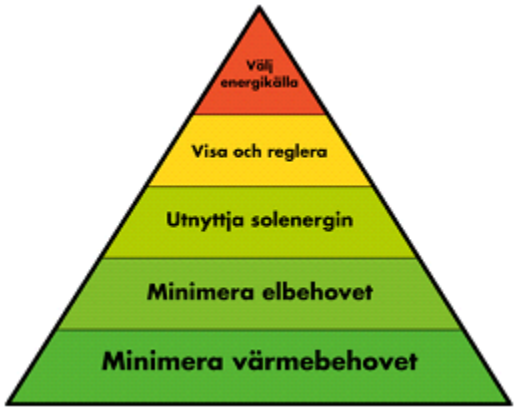
2.1 Grundläggande begrepp för energieffektivt byggande

2.1.1 Kyotopyramiden

Energianvändningen i Sverige brukar fördelas i tre sektorer: bostäder och service, industri samt transporter. Av den totala energianvändningen i Sverige går ca 39 procent av energin till sektorn: bostäder och service där ca 60 procent av energianvändningen används till uppvärmning och varmvatten. För uppvärmning av hus och arbetslokaler kommer energin främst via fjärrvärmenät, eluppvärmning eller genom förbränning av olja eller biomassa (Energimyndigheten, 2010b).

Oavsett vilken källa energin för uppvärmning av byggnader kommer ifrån ska syftet alltid vara att minimera värmebehovet för att kunna optimera energianvändningen. En modell som illustrerar strategin för energioptimering är Kyotopyramiden (se Figur 1) som har utvecklats i enighet med Kyotoprotokollets målsättningar.

Kyotoprotokollet har sitt ursprung från 1997 och är ett internationellt avtal mellan flera länder i världen. Avtalet trädde i kraft 2005 och har som målsättning att minska de globala utsläppen av växthusgaser. Kyotopyramiden är en modell som stegvis illustrerar i vilken ordningsföljd energioptimerande åtgärder ska utföras för energieffektiva byggnader. Modellen är utvecklad i enighet med Kyotoprotokollets målsättningar (Paroc AB, 2011).



Figur 1 *Kyotopyramiden. Modellen illustrerar lämplig strategi för effektiv energioptimering av byggnader. (Paroc AB, 2011)*

Grunden i pyramiden visar att en första prioritet för energieffektivt byggande är att minimera värmebehovet. I tillägg till detta, som inte framgår i Kyotopyramidens grundsten, bör också kylbehovet minimeras. Det finns många orsaker som påverkar värme- och kylbehovet i en byggnad, nedan följer några exempel.

- Placeringen av byggnaden i förhållande till utomhusklimatets påverkan av väder och vind.
- Byggnadens geometriska utformning, eftersom en större area på klimatskärmen leder till mer värmeförluster vid lägre utomhustemperatur. Den geometriska formen har också betydelse för hur stora köldbryggor byggnaden erhåller.

- Byggnadens klimatskärm bör vara lufttät och välisolerad så att värmeförlusterna minimeras.
- För att reducera kylbehovet kan solavskärmningar monteras vid utsatta fönster.
- Värmeåtervinning i ventilationssystemet med hjälp av FTX-system.

2.1.2 Byggnadens klimatskärm

Byggnadens ytterväggar ingår, tillsammans med yttertak, fönster, dörrar och yttre golvkonstruktioner, i byggnadens klimatskärm. Klimatskärmens primära funktion är att säkerställa ett skydd mot yttre påverkan från nederbörd, vind och temperaturvariationer, och skapa förutsättningar för en god inomhusmiljö samt en effektiv energihushållning. Vidare ska klimatskärmen klara av andra krav som ställs på belastningar i form av ljud, brand och hållfasthet etc. (Peterson, 2007).

Kvalitén på klimatskärmen avgör förutsättningarna för att erhålla en energieffektiv byggnad. En välisolerad klimatskärm med ett högt värmemotstånd minskar transmissionsförluster i form av värme ut ur byggnaden, när utomhustemperaturen är lägre än inomhustemperaturen, vilket medför att behovet av värmeenergi som behöver tillföras byggnaden för att säkerställa en god termisk komfort minskar (Abel och Elmroth, 2008).

Förutom att en välisolerad klimatskärm eftertraktas, så ställs det också krav på klimatskärmens lufttäthet och fuktskydd. Otätheter i exempelvis ytterväggar kan leda till att kall utomhusluft kommer in i byggnaden via konvektion, d.v.s. då tryckdifferensen utomhus kontra inomhus är drivkraften. När den kalla luften utifrån blandas med den varma inomhusluften sänks lufttemperaturen inomhus då det går åt värmeenergi för att värma den lägre tempererade utomhusluften vilket resulterar i att mer värme måste tillföras byggnaden för att den termiska komforten ska upprätthållas. En annan risk som uppstår vid en otät klimatskärm är att varm och fuktig inomhusluft vandrar ut i den kallare delen av konstruktionen och kondenserar mot ytor som har lägre temperatur än luftens daggtemperatur eller orsakar lokalt hög relativ fuktighet. En tät klimatskärm möjliggör också en kontrollerad styrning av byggnadens ventilationssystem.

2.1.3 Boverkets krav

Boverket är en statlig förvaltningsmyndighet som är ansvarig för ämnen som berör samhällsplaneringen, byggande och boende i Sverige. Boverket har bland annat som uppgift att verka för en utökad kunskap hos kommuner, myndigheter och andra aktörer som arbetar med ärenden som ingår i myndighetens verksamhetsområde (Boverket, 2011a). För att främja en hög kvalitet på byggnadsstandarden samt underlätta för en hållbar samhällsbyggnad ger Boverket ut samlade föreskrifter, Boverkets byggregler (BBR), där krav och råd framförs gällande svenska byggnader. Det finns många krav som berör energihushållningen i byggnaden, bland annat ställs det krav på klimatskärmens värmeisolering som karaktäriseras av klimatskärmens värmegenomgångskoefficient. I Tabell 1 redovisas Boverkets krav på högst tillåtna U-värden för byggnadens omslutande byggnadsdelar.

Tabell 1 BBR-krav på högst tillåtna U-värde (W/m^2K) för respektive byggnadsdel. (Elmroth. 2009, s 39)

U_i	Byggnad med annat uppvärmningsätt än elvärme	Byggnad med elvärme där A_{temp} är 51-100 m^2
U_{tak}	0,13	0,08
$U_{vägg}$	0,18	0,10
U_{golv}	0,15	0,10
$U_{fönster}$	1,3	1,1
$U_{ytterdörr}$	1,3	1,1

Boverket ställer också krav på byggnadens genomsnittliga värmegenomgångskoefficient, U_m, som inkluderar byggnadens samtliga omslutande delar inklusive köldbryggor. Eftersom byggnaden har en lång brukstid samt att kostnaden för efterföljande förbättringsarbeten är relativt hög så är det angeläget att klimatskalets energiprestanda också klarar rimliga krav som kan komma i framtiden (Elmroth 2009, s. 91). I Tabell 2 redovisas Boverkets krav på högst tillåtna genomsnittliga U-värde för byggnadens sammanlagda area för omslutande byggnadsdelars ytor mot uppvärmd inneluft, A_{om}, inklusive köldbryggor.

Tabell 1 BBR-krav på högst tillåtna genomsnittliga U-värde (W/m^2K) för byggnadens sammanlagda area för omslutande byggnadsdelars ytor mot uppvärmd inneluft, A_{om}. (Elmroth. 2009, s 92).

	Byggnad med annat uppvärmningsätt än elvärme	Eluppvärmd byggnad
U_m för bostäder	0,50	0,40
U_m för lokaler	0,70	0,60

2.2 Byggnadsfysikaliska teorier

2.2.1 Värmeförluster genom klimatskärmen

Värmeförluster genom klimatskärmen kan ske på flera sätt och med olika sorters drivkrafter. Den totala värmetransporten genom klimatskärmen kan sägas ske på tre olika sätt: ledning, strålning och konvektion (Peterson, 2007).

Ledning av värmeenergi genom klimatskärmen sker när det uppstår en temperaturdifferens på ömse sidor av konstruktionen. Temperaturdifferensen är alltså drivkraften och värmen leds från den sidan av konstruktionen med högre temperatur till den sidan med lägre temperatur. Hur stor värmeflödestätheten genom

konstruktionen blir beror förutom på temperaturskillnaden över konstruktionen, också på konstruktionsmaterialets värmeledningsförmåga samt tjocklek. Storleken av värmeflödestätheten påverkas också av konstruktionsmaterialets specifika värmekapacitet och densitet. Materialets massa gör att värmetransporten genom tunga delar i konstruktionen fördröjs vid temperaturvariationer (Peterson, 2007).

Strålning utsänds mellan ytor med olika temperaturer och ger upphov till en värmeöverföring från den ytan med högre temperatur till den ytan med lägre temperatur. Exempelvis sker långvågiga strålningsutbyten mellan ytor som gränsar till luftspalter i fönster, ytterväggar och yttertak (Peterson, 2007). Strålningsutbytet mellan de boende och kalla invändiga rumsytor som exempelvis fönster eller en dåligt isolerad vägg kan upplevas som drag och försämra komforten inomhus.

Konvektion av värme innebär att värmen förflyttas via en gas eller vätska på grund av tryckdifferenser, i byggnadsfysiska sammanhang är det vanligtvis luft som överför värme. På grund av skillnader i lufttryck uppstår luftströmmar som för med sig värmeenergi från materialytor och transporterar den vidare. Man skiljer på naturlig konvektion och påtvingad konvektion. Naturlig konvektion innebär att luften strömmar av sig själv på grund av densitetsskillnader som i sin tur beror på luftens temperaturskillnader. Påtvingad konvektion kan uppstå på grund av yttre påverkan, till exempel av vindtryck eller fläktar (Peterson, 2007).

Hur stor värmetransmissionen genom en konstruktion är kännetecknas av konstruktionens värmegenomgångskoefficient som betecknas U-värde. Konstruktionens U-värde är inversen av dess värmemotstånd och definieras som den värmemängd som per tidsenhet passerar genom en ytenhet av konstruktionen när skillnaden i lufttemperatur är en grad på respektive sida om konstruktionen (Abel och Elmroth 2008, s. 223).

2.2.2 Köldbryggor

Med köldbryggor menas normalt enskilda delar i konstruktionen där ett material med låg värmeledningsförmåga övergår till ett material med högre värmeledningsförmåga, d.v.s. det uppstår en brygga där värmen enklare kan ledas ut till den sida där temperaturen är lägre. Exempelvis uppstår det mindre köldbryggor i ytterväggar där isoleringsmaterial alterneras med bärande reglar. Köldbryggor av större storlek uppstår ofta där:

- yttervägg möter grund
- utkragande balkonger
- mellanbjälklag möter yttervägg
- vägg möter tak
- bärande innervägg möter yttervägg
- fönster och dörrar ansluter mot yttervägg
- ytterväggshörnen

Köldbryggor leder till ökade värmeförluster och dess betydelse för byggnadens totala värmemotstånd ökar i takt med att klimatskärmens isoleringsförmåga ökar. Därför är

det av stor betydelse att minimera köldbryggor i moderna välisolerade byggnader (Abel och Elmroth, 2008).

För beräkningar av köldbryggor i studiens väggkonstruktioner har HEAT2 använts. HEAT2 är ett tvådimensionellt beräkningsprogram som kan visualisera värmeflöden och temperaturkurvor i exempelvis en simulerad väggkonstruktion (Blocon, 2011). Beräkning av köldbryggor förklaras närmare i kap 3.1.2.

2.2.3 Fuktsäkerhet

Mer än 80 procent av alla byggskador i Sverige anses bero på fukt - direkt eller indirekt (Nilsson, 2006). I och med dagens byggteknik med energieffektiviserande klimatskal blir fuktsäkerheten en ännu större riskaspekt. När klimatskalen blir tätare och isoleringen ökar ändras också de fuktttekniska förutsättningarna. En ökad isolering leder till ett lägre värmeläckage, och därmed fås en annorlunda temperaturfördelning med en kallare ytterkonstruktion som resultat. En ökad lufttäthet hindrar fukt- och värmetransport via konvektion genom konstruktionen. Används dessutom vakuumisoleringspaneler fungerar dessa som ett extra tätskikt och fuktvandring i konstruktionen försvåras ytterligare då panelernas barriärfilmer har en mycket låg permeabilitet motsvarande en PE-folie (Johansson, 2011). Detta i sin tur kan leda till en ökad risk för kritiska fukttillstånd i form av högre relativa fuktigheter och/eller försämrad uttorkning av konstruktionen. Noterbart är här att en ökad lufttäthet också ger en positiv effekt ur fukthänseende i form av ett minskat fuktläckage via konvektion.

Om ett skadligt fukttillstånd uppstår kan byggnadens beständighet, inomhusmiljö och/eller energianvändning påverkas negativt.

Krav

Skador och dålig inomhusmiljö kan uppstå pga. fukt. Uppkomst av skadlig fukt skall enligt Boverket därför förhindras. Boverkets krav på fuktskydd och fuktsäkerhet finns i Boverkets byggregler (BBR), avsnitt 6:5 Fukt. Avsnittet syftar till ”att begränsa mängden fukt i byggnadens konstruktion och dess utrymmen så att dessa inte tar skada av fukt” (Boverket, 2008).

I avsnitt 6:5 punkt 6.51 står följande gällandes allämna krav på fuktförhållanden:

”*Byggnader skall utformas så att fukt inte orsakar skador, elak lukt eller hygieniska olägenheter och mikrobiell tillväxt som kan påverka människors hälsa*” (Boverket, 2008)

För att upprätthålla en byggnads funktion och beständighet måste alltså en tillfredsställande fuktteknisk funktion upprätthållas. Med det menas att fukttillstånden i konstruktionen alltid skall vara lägre än de kritiska fukttillstånden. Uttrycken definieras i BBR, avsnitt 6:5 punkt 6:511:

”Fukttillstånd – Nivå på fuktförhållanden i ett material. Fukttillståndet för materialet kan beskrivas som fukthalt, fuktkvot, relativ fuktighet m.m.”

”Kritiskt fukttillstånd – Fukttillstånd vid vilket ett materials avsedda egenskaper och funktion inte uppfylls.”

Fukttillståndet kan beräknas och jämföras mot det kritiska fukttillståndet för att bedöma om det föreligger risk för skadlig fukt. En ny uppdaterad utgåva av BBR

trädde i kraft 1 juli 2008 och innehöll bl.a. en förändring i avsnitt 6:5 punkt 6.52: krav på högsta tillåtna fukttillstånd i material och byggnadsdelar.

I avsnitt 6:5 punkt 6:52 står följande angående högsta tillåtna fukttillstånd:

"Vid bestämning av högsta tillåtna fukttillstånd ska kritiska fukttillstånd användas varvid hänsyn tas till osäkerhet i beräkningsmodell, ingångsparametrar eller mätmetoder. För material och materialytor, där mögel och bakterier kan växa, ska väl undersökta och dokumenterade kritiska fukttillstånd användas. Om det kritiska fukttillståndet för ett material inte är väl undersökt och dokumenterat ska en relativ fuktighet(RF) på 75 % användas som kritiskt fukttillstånd."(Boverket, 2008)

Vidare står det i punkt 6:53 angående fuktsäkerhet:

"*Byggnader ska utformas så att varken konstruktion eller utrymmen i bygganden kan skadas av fukt. Fukttillståndet i en byggnadsdel ska alltid vara lägre än det högsta tillåtna fukttillståndet om det inte är orimligt med hänsyn tillbyggnadsdelen avsedda användning. Fukttillståndet ska beräknas utifrån de mest ogynnsamma förutsättningarna*" (Boverket, 2008)

Fuktkällor

För att bedöma fukttillståndet i en konstruktion bör förekommande fuktkällor bestämmas. "Med fuktkällor menas sådana belastningar som har med vatten och vattenånga att göra" (Peterson, 2007). Genom att bestämma förekommande fuktkällor kan aktuella fuktbelastningar beräknas. Fuktbelastningarnas storlek, varaktighet och frekvens bestäms utifrån lokala förhållanden. De fuktkällor som främst verkar på en konstruktion är:

Luftfukt avser vattenångan i luften utomhus och inomhus. Den mängd vattenånga som luften innehåller benämns ånghalt v och redovisas i kg/m^3 eller g/m^3. Ånghalten utomhus v_e varierar med tid och plats. Mängden vattenånga som luften kan innehålla är beroende av luftens temperatur och den maximala ånghalt som kan innehållas i luft vid en viss temperatur benämns mättnadsånghalt v_s. Den relativa fuktigheten RF är kvoten av ånghalten och mättnadsånghalten. När den relativa fuktigheten uppnår 100 %, eller med andra ord då den aktuella ånghalten når mättnadsånghalten för rådande temperatur T_x uppstår kondens d.v.s. vattnet fälls ut från luften och övergår i vätskefas – fritt vatten. Ånghalten inomhus v_i utgörs av fukten som följer med utomhusluften in genom ventilationen samt ett fukttillskott från de aktiviteter och verksamheter som sker inomhus (Peterson, 2007). Ånghalten inomhus kan uttryckas enligt ekvation 2.1

$$v_i = v_e + \Delta v \tag{2.1}$$

Fukttillskottet Δv varierar beroende på typ av verksamhet, levnadsvanor, typ av lokal/bostad samt från vinter till sommar. Fukttillskottet kan uttryckas enligt ekvation 2.2

$$\Delta v = \frac{G}{n \cdot V} \tag{2.2}$$

Där G är den invändiga fuktproduktionen (g/h), n luftomsättningen i lokalen/bostaden och V är luftvolymen inomhus.

Byggfukt avser den mängd vatten och vattenånga som efter inbyggnad skall lämna materialen tills fuktjämnvikt med omgivningen nås (Peterson, 2007). För en nyuppförd byggnad tillkommer alltså byggfukt som ett extra fukttillskott i konstruktionen. Byggfukt uppkommer under byggtiden dels då vatten tillförs i överskott vid exempelvis betonggjutning och dels via uppfuktade material som byggs in i konstruktionen. Om materialen inte skyddas mot nederbörd kan fukthalten öka ytterligare. För att minimera risken för byggfukt gäller det att ”bygga torrt” och/eller låta byggfukten torka ut innan konstruktionen förses med täta skikt.

Nederbörd avser regn, snö eller hagel och belastar främst byggnaders horisontala ytor. Vertikala ytor belastas då regn förekommer i samband med vind, så kallat slagregn. På grund av luftströmningar runt byggnader varierar mängden slagregn på de vertikala ytorna, och belastningen blir ofta störst vid fasadens kanter (Peterson, 2007).

Markfukt avser markvatten och vattenångan i marken. Byggnadsdelar belägna under grundvattensnivån utsätts för vattentryck och byggnadsdelar belägna ovanför denna kan utsättas för fuktbelastning genom kapillärsugning.

Läckage avser eventuella läckage av vatten eller luftfukt från exempelvis trasiga rör eller hushållsmaskiner.

Fukttransport

Fukt är vatten och kan uppträda som vattenånga, fritt vatten eller is. Fukttransporter i material och konstruktioner sker främst i ång- och vätskefas. Fukttransporter i ångfas sker genom diffusion och konvektion. I vätskefas transporteras fukt genom kapillärsugning (Peterson, 2007).

Diffusion är vandring av vattenmolekyler från ett område med högre ånghalt till ett område med lägre ånghalt. Vattenmolekylerna söker jämvikt och går från en högre koncentration till en lägre koncentration tills dess att jämvikt uppnås. Oftast är ånghalten inomhus högst vilket innebär att fukten vandrar inifrån huset ut genom klimatskalet.

Konvektion är transport av vattenånga till följd av lufttrycksskillnader. Strömningar bildas i luften som medför att fukt transporteras från ett område till ett annat. Differensen i luftryck är beroende av temperaturskillnader och luftens hastighet. För att stoppa fuktvandring genom konvektion används lufttäta material i konstruktionens insida samt ett invändigt undertryck i byggnaden.

Kapillärsugning är vattentransport i materials porsystem som sker när material har kontakt med vatten. Hur stor och snabb kapillärsugningen kan bli beror på porsystemets struktur. Mindre porer medför ökad sugförmåga då stigkraften är omvänt proportionell mot rörets radie.

2.3 Isoleringsmaterial

2.3.1 Mineralull

Mineralull är ett gemensamt namn på isoleringsmaterialen sten- och glasull vars råvaror till största delen består av sten respektive sand. Vid tillverkning av mineralull smälts råvarorna för att därefter spinnas till långa fibrer som besprutas med ett bindemedel. Därefter följer en härdningsprocess där isoleringen passerar en ugn så att

bindemedlet kan härda varpå isoleringen slutligen kapas till rätt storlek (Saint-Gobain Isover AB, 2011). Mineralull är främst ett värmeisoleringsmaterial då den färdiga produkten har en låg värmekonduktivitet som ligger kring 0,036 W/mK (Peterson, 2007). Den färdiga produkten är porös och består till mest del av luft vilket bidrar till den låga värmekonduktiviteten då produkten har en förmåga att hålla luften stilla i isoleringen och att minska värmestrålningen (Saint-Gobain Isover AB, 2011). Mineralullen kan dock anses luft- och ånggenomsläpplig vilket medför att ett vindtätt material bör appliceras efter det yttersta skiktet av mineralull för att förhindra konvektionsströmmar genom materialet. För att reducera varm och fuktig luft från att vandra ut i konstruktionen appliceras en ångspärr i den inre delen av konstruktionen.

Mineralullen tillverkas i olika densiteter vilket påverkar dess värmekonduktivitet. Till väggkonstruktioner används normalt lättisolering med densiteten 20-50 kg/m^3. Mineralull med högre densitet, 100-150 kg/m^3, behövs för att förhindra att deformation i materialet uppstår, exempelvis under markplatta eller i tak (Peterson, 2007).

I tillägg till mineralullens värmeisolerande egenskap så har isoleringsmaterialet hög temperaturtålighet vilket leder till att materialet kan användas när det ställs krav på konstruktionens förmåga att utstå brand. Ytterligare egenskaper hos mineralull är att det även ljudisolerar, lätt att bearbeta vid montage då materialet lätt kan kapas till rätt dimensioner samt att mineralullen inte i sig möglar då det är ett oorganiskt material.

Figur 2 *Glas- och stenull i standardformat anpassade för att appliceras mellan reglar. Glasullen blir gul efter tillsatser av bindemedel medan stenullen är grå eller brunaktig i färgen. (Saint-Gobain Isover AB, 2011)*

2.3.2 Vakuumisoleringspaneler

Vakuumisoleringspaneler, förkortat VIP, är ett av de mest högpresterande värmeisoleringsmaterialen på marknaden idag. Traditionella isoleringsmaterial så som mineralull och cellplast har en värmeledningsförmåga mellan 33 och 40 *m*W/mK. Nyproducerade vakuumisoleringspaneler har en värmeledningsförmåga mellan 3 och 5 *m*W/mK, och ca 8 *m*W/mK efter 25 års åldrande med diffusion av luft och vattenånga in i panelen. Panelerna är känsliga mot mekanisk åverkan och en punkterad panel förlorar sitt vakuum vilket resulterar i att värmeledningsförmågan ökar till ca 20 *m*W/mK (Simmler & Brunner, 2005).

Till detta kommer värmeförluster i form av köldbryggor runt om panelerna som bör tas i beaktande. Storleken av dessa värmeförluster beror på barriärfilmens sammansättning, panelens dimensioner och angränsande material (ANNEX 39A, 2005)). Detta ger en inverkan på den effektiva värmeledningsförmågan.

Sammantaget får man ett isoleringsmaterial med ca 3-6 gånger lägre effektiv värmeledningsförmåga gentemot dagens traditionella isoleringsmaterial, vilket medför att konstruktioner kan göras avsevärt tunnare och samtidigt uppfylla dagens ökande energikrav. Detta ger ett antal fördelar:

- Ökad inkomstbringande boyta vid låst yttre byggnadsarea.
- Minskad övrig materialåtgång i konstruktionen.
- Minskad materialtransport.
- En ökad hanterbarhet i form av minskade stomdimensioner.

Panelerna lämpar sig även bra för att bryta köldbryggor och som tilläggsisolering vid begränsat utrymme.

Nackdelar som dessa fördelar ställs emot är:

- Det i dagsläget höga priset.
- Det låsta panelformatet utan möjlighet till måttanpassning på plats.
- Panelernas ömtålighet.

Figur 3 *En jämförelse i tjocklek mellan mineralull och vakuumisoleringspanel med likvärdig termisk prestanda. (Cauberg et al, 2005)*

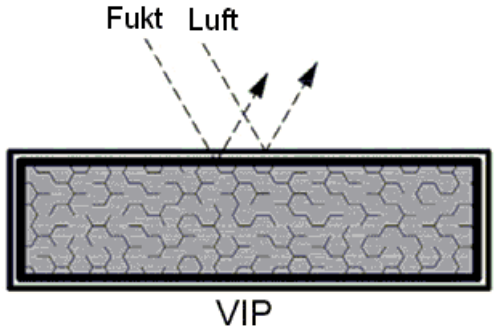
Uppbyggnad

Vakuumisoleringspaneler använder sig likt en termos av vakuum för att isolera mot värmeöverföring. Termosens konstruktion bygger på att det vakuumomslutande höljet är cylindriskt eller sfäriskt och därmed kan bära upp det utvändiga atmosfärstrycket, ca 10,3 ton/m^2, utifrån. Då vakuumisoleringspaneler i de flesta fall är plana har inte det vakuumomslutande höljet i sig tillräcklig bärkraft för tryckskillnaderna. Tryckskillnaderna tas istället upp invändigt av ett finporöst material som töms på luft för att skapa ett vakuum inuti panelerna.

Tekniken har funnits sedan 1970-talet och har främst använts inom kylindustrin (vip-bau, 2011). Den har nyligen börjat appliceras i byggbranschen, främst i Tyskland och Schweiz, där den större delen av produktionen sker (ANNEX 39B, 2005).

Som kärnmaterial i vakuumisoleringspaneler kan olika typer av pressade pulver, glasfibrer eller öppenporiga skum användas. Öppenporiga polystyrenskum har tidigare använts som kärnmaterial i vakuumisoleringspaneler inom kylindustrin. I och med introduceringen inom byggindustrin, och dess krav på en ökad livslängd, har nanokonstruerade porösa material som förångad kiseldioxid (fumed silica) använts då dessa är särskilt finporösa med en porstorlek av ca 100 nanometer (Fricke et al, 2005). Dessa är mindre känsliga mot en tryckökning inuti panelen och har en relativ god värmeisoleringsförmåga, ca 20 *m*W/mK, även vid normalt atmosfärstryck som uppstår vid en punktering av panelen. Material med större porstorlek ställer betydligt högre krav på det invända gastrycket för att en med byggbranschens mått önskad livslängd skall uppnås (vip-bau, 2006).

För att behålla ett vakuum inuti panelen är kärnan omsluten av en barriärfilm. Materialen som används i barriärfilmen kan vara metallfolier, polymerfilmer eller kombinationer av metall och polymerfilmer. Beroende på vilka material som används fås olika egenskaper för barriärfilmen. Metaller ger en mycket låg vatten- och gaspermeabilitet men leder värme bra. Polymera material som plastfilmer ger ett högt värmemotstånd och bidrar därmed inte till några köldbryggor, men permeabiliteten är inte tillräckligt låg med dagens polymerteknik (Thorsell, 2006). De två vanligaste barriärfilmsmaterialen är laminerade aluminiumfilmer (AF) och metalliserade polymerfilmer (MF). Ofta är barriärfilmens struktur en multilagerbeläggning tillverkad genom laminering för att ge en mängd funktioner så som låg vatten- och gaspermeabilitet, värmemotstånd, skydd mot mekanisk åverkan etc.



Figur 4 *En förenklad bild av barriärfilmens huvudsakliga funktion. (Baetens et al, 2005)*

Värmeledningsförmåga

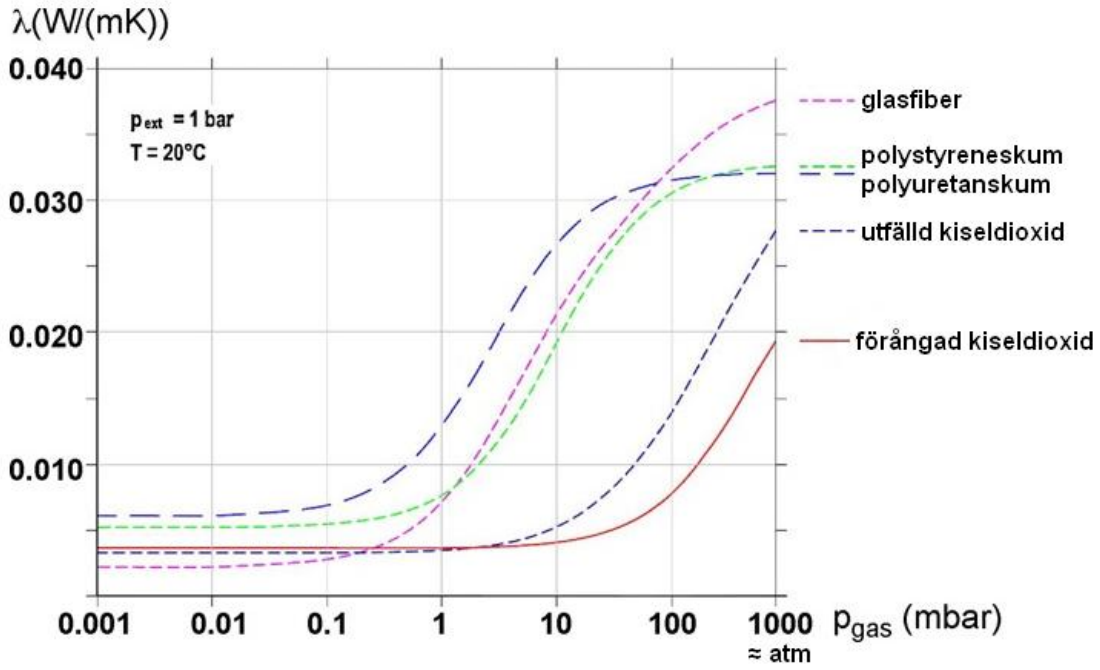
Värmeflödet i det finporösa kärnmaterialet kan delas in i fyra olika processer: strålning mellan porernas ytor, värmeledning genom kärnmaterialets skelett, värmeledning genom gasen i porerna och konvektion av gasen i porerna (Baetens et al, 2005). Det totala värmeflödet Q_{total} (W) blir således summan av de fyra olika processerna enligt ekvation 2.3.

$$Q_{total} = Q_{strålning} + Q_{konduktion,fast} + Q_{konduktion,gas} + Q_{konvektion} \quad (2.3)$$

Värmeledningsförmåga genom gasen i ett poröst medium bestäms av antalet gasmolekyler samt av antalet ”väggar” på vägen från den varma till den kalla sidan (vip-bau, 2006). Detta innebär följande:

Med ett minskat lufttryck, det vill säga en minskad mängd luftmolekyler, minskar också det totala värmeflödet genom att konduktionen $Q_{konduktion,gas}$ och konvektionen $Q_{konvektion}$ inuti porerna avstannar. Vid ett perfekt vakuum existerar ingen materia och därmed ingen konduktion eller konvektion i porerna. Endast strålning, som inte är beroende av materia för att transportera värme, existerar. Med minskande porstorlekar ökar antalet ”väggar” som värmen måste passera innan den tar sig igenom panelen. Idealet vore ett material med en porstorlek av 10 *n*m eller mindre, vilket skulle minska den gasformiga ledningsförmågan till noll även vid ett invändigt tryck motsvarande atmosfäriska förhållanden (Baetens et al, 2005).

Vid ett invändigt tryck av 1 *m*bar i en kärna av förångad kiseldioxid blir värmeflödet i gasen (genom konvektion och konduktion) praktiskt taget försumbart. Konduktionen genom kärnmaterialets skelett uppgår till ca 2-3 *m*W/mK och strålningen till ca 1 *m*W/mK (Simmler & Brunner, 2005). En nyproducerad panel kan således ha ett lambdavärde så lågt som 3-4 *m*W/mK i centrum av panelen. Se Figur 5 nedan.



Figur 5 *Värmeledningsförmåga hos olika kärnmaterial som en funktion av lufttrycket. (Simmler et al, 2005)*

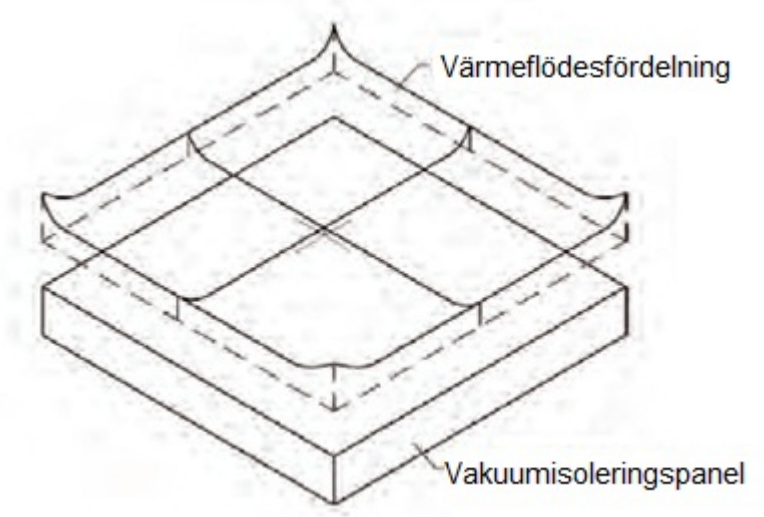
Effektiv värmeledningsförmåga

Lufttrycket inuti nyproducerade paneler är enligt tillverkarna under 5 *m*bar vilket motsvarar ca 1/200 av det normala atmosfärstrycket. Trycket ökar dock under tid och därmed ökar även värmeledningsförmågan. På grund av tryckskillnaderna tränger atmosfäriska gaser och vattenånga genom barriärfilmen vilket leder till ett ”vakuumförfall”. Porösa material har också en viss egenproduktion av gaser, dock är denna mycket låg för förångad kiseldioxid (fumed silica) som vanligen används

(Grynning et al, 2005). Omfattningen av tryckökningen beror på kompositionen av den omslutande barriärfilmen, panelens dimensioner och de yttre påfrestningarna. Laminerade aluminiumfilmer har en låg permeabilitet och panelen åldras därför långsammare än vad den gör med en barriärfilm bestående av metalliserad polymerfilm. För paneler med aluminiumfolie kan ett designvärde av 6 *m*W/mK för värmeledningsförmåga i centrum av panelen $\lambda_{c;p}$ efter 25 år användas. För paneler med metalliserade polymerfilmer kan ett något högre designvärde av 8 mW/mK användas. Värdena gäller för paneler med en tjocklek av minst 20 mm och en bredd av 250 mm eller mer (Simmler & Brunner, 2005). Diffusion av luft och vatten sker främst i panelens kanter därför är stora skivor att föredra.

Paneler med aluminiumfolie har trots detta en större inverkan på den effektiva värmeledningsförmågan då linjeköldbryggorna längs med panelens kanter blir betydligt större. Dessa kan vara upp till 50 gånger större än hos paneler med metalliserade polymerfilmer (Baetens et al, 2005). Paneler med aluminiumfolie är också känsligare mot mekanisk åverkan (Clase & Lindén, 2010).

Köldbryggor uppstår runt om panelen eftersom värmeledningsförmågan längs med panelernas kanter är högre än värmeledningsförmågan i panelens centrala del λ_c. Värme transporteras längs med kanterna genom den omslutande barriärfilmen som har ett lägre värmemotstånd än kärnmaterialet. Det kan även bildas små luftspalter emellan intilliggande paneler som inverkar på värmeförlusten. Detta påverkar därmed den egentliga värmeledningsförmågan λ_{eff} som då blir högre än den angivna värmeledningsförmågan som representerar panelens centrala del. (Ghazi Wakili et al, 2005). Se Figur 6 nedan.



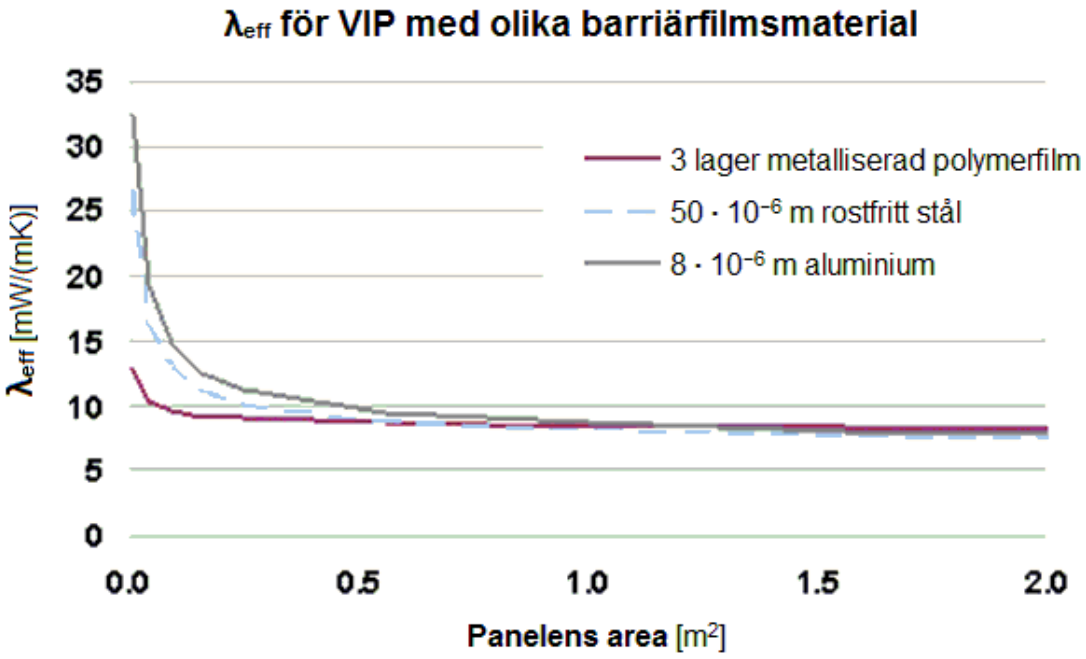
Figur 6 *Illustration av värmeflödets fördelning i en kvadratisk VIP. Lägg märke till att värmeflödet är större längs med panelens kanter och som störst vid panelens hörn. (Grynning et al, 2005)*

Tillskottet i värmeledningsförmåga ifrån panelens kanter Δ_{kant} (W/mK) kan uttryckas enligt ekvation 2.4 (Ghazi Wakili et al, 2005).

$$\Delta_{kant} = \psi(d) \cdot d \cdot p/A \qquad (2.4)$$

Där ψ(d) är den linjära värmegenomgångskoefficienten (W/mK), d är tjockleken (m) på panelen i värmeflödets riktning, p är omkretsen (m) av panelen och A är ytan (m^2) av panelen vinkelrätt mot värmeflödets riktning. För att minimera värmeförluster genom ledning i barriärfilmens kanter bör man sträva efter att använda sig av paneler med låg omkrets i förhållande till area (p/A). Det vill säga att panelernas areor bör vara så stora som möjligt och att en kvadratisk form är att föredra (Ghazi Wakili et al, 2005).

Den linjära värmegenomgångskoefficienten ψ(d) är beroende av panelens tjocklek d, värmeledningsförmågan i centrum av panelen λ_c, tjockleken av barriärfilmen t_f och barriärfilmens värmeledningsförmåga λ_f. Enligt undersökningar och beräkningar av Schweiz federala laboratorier för materialvetenskap, EMPA, presenteras ett ”säkert” designvärde för linjeköldbryggor ψ(d) = 0,07 W/mK för paneler med aluminiumfolie och 0,01 W/mK för paneler med metalliserade polymerfilmer (Simmler & Brunner, 2005). Enligt en undersökning av Ghazi Whakili 2004, hade den bäst presterande barriärfilmen, en flerskiktigt metalliserad polymerfilm med en aluminiumtjocklek av 90 *n*m, en linjär köldbryggskoefficient Ψ(d)=0,006 W/mK (Thorsell, 2006). I ANNEX 39A undersöktes den effektiva värmeledningsförmågan för olika barriärfilmsmaterial hos en panel med dimensionerna 1,00 x 0,50 x 0,02 m^3. Hos en panel med tre lager metalliserade polymerfilmer var den linjära värmegenomgångskoefficienten ψ(d) = 0,006 W/mK. Motsvarande panel med en barriärfilm av $8 \cdot 10^{-6}$ m aluminium hade en linjär värmegenomgångskoefficient ψ(d) = 0,033 W/mK.



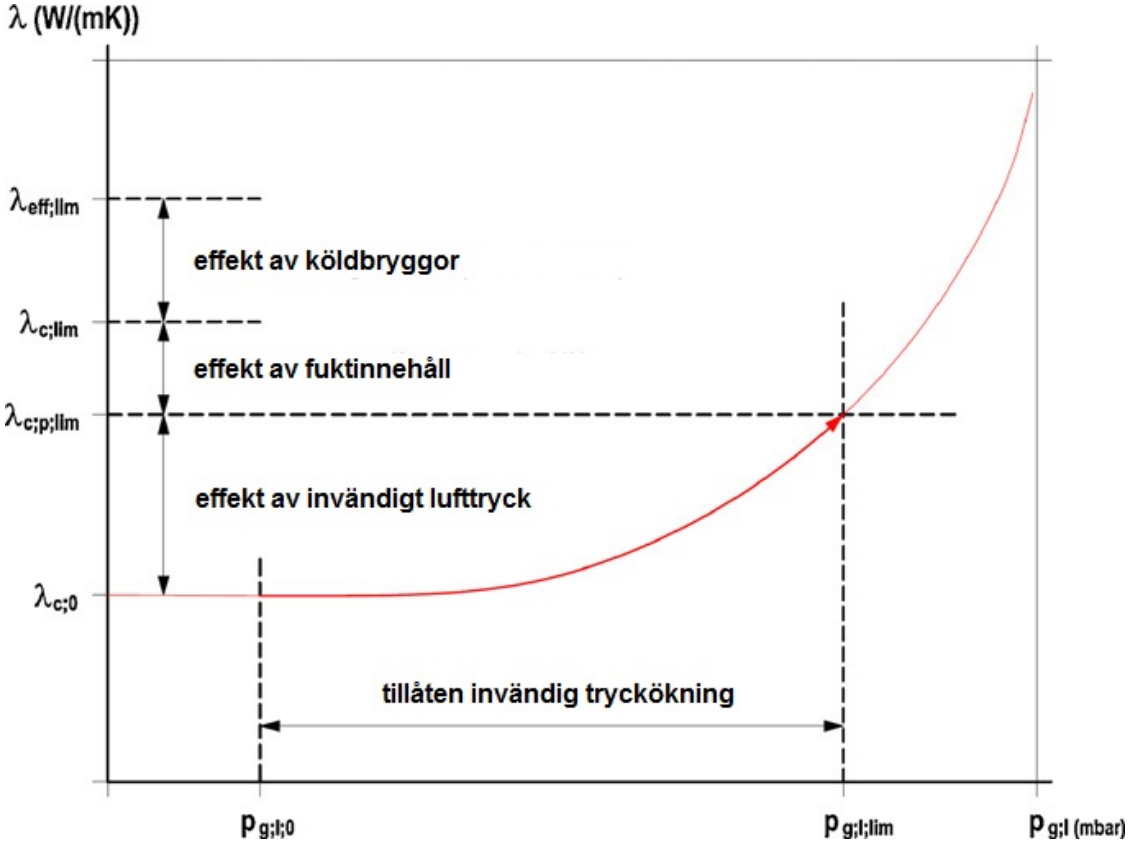
Figur 7 *Effektiv värmeledningsförmåga λ_{eff} för paneler med olika barriärfilmsmaterial och areor. Värmeledningsförmågan i centrum av panelerna efter 25 års åldrande är uppskattad till 8 mW/mK för panel med metalliserade polymerfilmer och 6 mW/mK för panel med rostfritt stål eller aluminiumfolie.(vip-bau, 2011)*

Den egentliga värmeledningsförmågan λ_{eff} kan beräknas enligt ekvation 2.5 där det korrigerade lambdavärdet med hänsyn till åldring av panelen adderas med tillskottet ifrån panelens kanter.

$$\lambda_{eff} = \lambda_{c;p} + \Delta_{kant} = \lambda_{c;p} + \psi(d) \cdot d \cdot p/A \qquad (2.5)$$

Livslängd

En vanlig definition för en panels livslängd är ”den tid som förflutit från tidpunkten av tillverkningen t_0 till den tidpunkt den effektiva värmeledningsförmåga λ_{eff} hos vakuumisoleringspanelen har överskridit ett visst gränsvärde $\lambda_{eff;lim}$” (Baetens et al, 2005). Livslängden beror med andra ord på hur lång tid det tar innan panelen uppnår det satta gränsvärdet.



Figur 8 *Definition av en panels livslängd. Där $\lambda_{c;p;lim}$ är den högsta tillåtna värmeledningsförmågan i centrum av panelen och uppnås när det invändiga lufttrycket har uppnått ett visst gränsvärde $p_{g;l;lim}$. (Tenpierik et al, 2007)*

Generellt brukar ett gränsvärde för värmeledningsförmågan på ca 0,008 W/mK för centrum av panelen $\lambda_{c;p;lim}$ anges, vilket uppstår då trycket inuti panelen uppnått ca 100 *m*bar (Thorsell, 2006). Den effektiva värmeledningsförmåga $\lambda_{eff;lim}$ som tillåts innan livslängden anses nått sitt slut är alltså större än det satta gränsvärdet för

centrum av panelen. För en panel med ett initiellt invändigt tryck av 1 *m*bar som uppnår slutet av sin livslängd när trycket uppnår 100 *m*bar, skulle en önskad livslängd på 50 år innebära en maximal tryckökning av ca 2 *m*bar/år. För trefaldigt metalliserade filmer på polymerunderlag, kunde enligt tillverkare en förväntad tryckökning i storleksordningen 0,01-1 *m*bar/år förväntas i en panel med dimensionerna 1 m x 1 m x 0,02 m (Ehrmanntraut, 2003). Enligt tillverkaren Va-Q-Tec blir den invändiga tryckökningen ca 1 *m*bar/år i paneler avsedda för byggindustrin (Va-Q-Tec, 2011). Detta är dock en förenkling och hänsyn bör tas till högre temperatur- och/eller fuktförhållanden samt eventuella defekter vid kant/söm. I dagsläget talar man om livslängder mellan 30-50 år beroende på typ av panel och de yttre förutsättningar den ställs inför (ANNEX 39A, 2005). En vakuumisoleringspanels livslängd kan sammanfattningsvis bero på följande faktorer (Thorsell, 2006):

Krav på minimiprestanda en högsta tillåten värmeledningsförmåga innebär en högsta tillåten tryckökning i panelen. Ju högre den tillåtna tryckökningen är desto längre blir panelens livslängd.

Panelens storlek styr förhållandet mellan volym/sömlängd och volym/barriäryta. En ökad volym innebär att luft- och fuktinsläppet genom panelens sömmar och barriärfilm ger upphov till en lägre tryckökning.

Komponentval värmeledningsförmågan varierar med lufttrycket på olika sätt för olika kärnmaterial. Ett mindre tryckkänsligt kärnmaterial ger en längre livstid. En barriärfilm med låg permeabilitet ger en långsammare tryckökning och därmed en längre livstid.

Tillverkningskvalité eventuella otätheter eller defekter i barriärfilmen ökar permeabiliteten och därmed minskar livslängden.

Användningsförhållanden Högre temperatur- och fuktförhållanden ger ett ökat insläpp av luft och vatten till kärnan, därmed en kortare livstid .

Hantering panelerna är känsliga och kan skadas vid tillverkning, frakt och/eller montering med en ökad permeabilitet och därmed en kortare livslängd som följd.

2.4 Referensobjektet

För att enklare åskådliggöra frågeställningen i studien har författarna till studien valt att utgå ifrån ett referensobjekt i form av en redan projekterad byggnad. Resultaten av de alternativa ytterväggskonstruktionerna i studien har jämförts med referensbyggnadens ytterväggg med hänsyn till U-värde, materialkostnad samt väggtjocklek. En av de alternativa väggkonstruktionerna har också integrerats i referensbyggnaden varpå ett genomsnittligt U-värde har beräknats för hela referensbyggnaden. Valet av aktuell referensbyggnad har gjorts på grund av dess bärande stomme som består av stålpelare samt innerväggar, bjälklag och markplatta av betong. Eftersom referensbyggnaden har en bärande stomme har inga hållfastberäkningar gjorts för ytterväggarna vilket har resulterat i att studien kunnat fokusera på de värme- och fukttekniska förhållandena i ytterväggskonstruktionerna samt den ekonomiska frågeställningen i studien.

2.4.1 Höjdenvändan

Referensobjektet är bostadsområdet Höjdenvändan i Lerum. Området är under byggnation och väntas stå klart till hösten 2011. Området är Sveriges första flerbostadshusområde med plusvärme och byggs av Skanska Hus Göteborg på uppdrag av det kommunala bostadsbolaget Förbo. Området består av fyra byggnader med två våningsplan varav åtta hyreslägenheter ryms i vardera byggnad. En av dessa byggnader har valts ut och använts som referensbyggnad i studien. I Figur 9 visas en översiktlig bild av Höjdenvändan och i Tabell 3 följer faktauppgifter gällande byggnadens U-värden m.m.

Figur 9 Översiktsbild av bostadsområdet Höjdenvändan i Lerum. (Förbo, 2011)

Tabell 2. Data för referensbyggnadens U-värden, totala köldbryggor samt inomhustemperatur. (WSP, 2010)

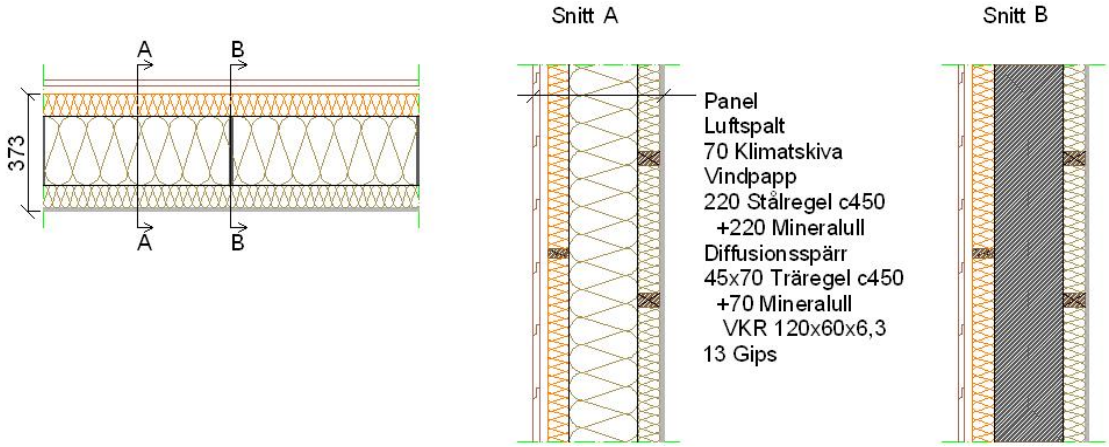
		Väggar	Tak	Markplatta	Fönster	Dörrar
U-värde [W/m^{2}K]		0,12	0,09	0,11	0,9	1,0
Köldbryggor [W/K]	43					
Inomhustemperatur [˚C]	21					

2.5 Beskrivning av väggkonstruktioner

Då referensbyggnadens stomme utgörs av bärande innerväggar av betong samt bärande stålpelare av VKR-modell, har ytterväggarna konstruerats som utfackningsväggar. Samtliga ytterväggar är placerade så att väggens installationsskikt befinner sig i liv med de bärande pelarna, d.v.s. de bärande stålpelarna döljs i installationsskiktet. Vidare så är alla ytterväggar inklusive referensbyggnadens yttervägg måttsatta från insida gips till insida luftspalt. Vakuumisoleringspanelerna i väggkonstruktion 1-5 är illustrerade med röd färg .

Ursprunglig väggkonstruktion

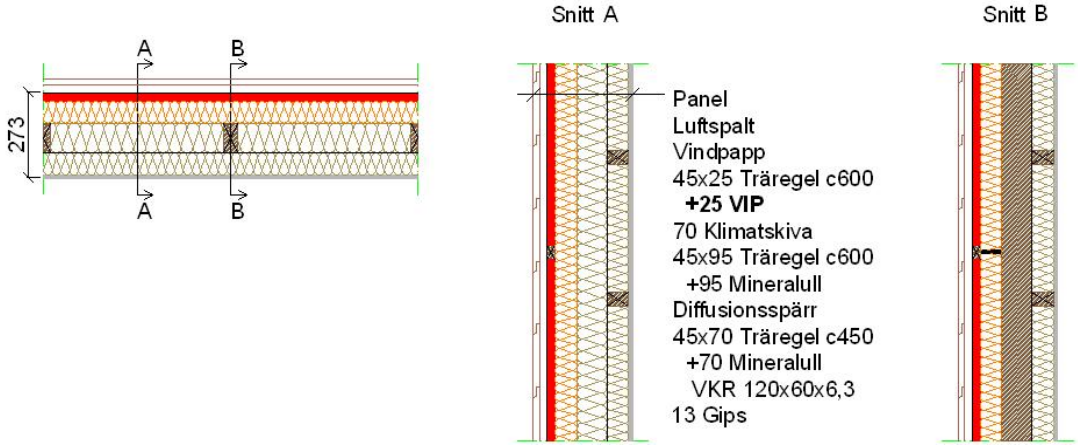
Den ursprungliga väggkonstruktionen har en tjocklek på 373 mm samt en värmegenomgångskoefficient på 0,12 W/m^{2}K. Isoleringsmaterialet består av mineralull varav den yttre isoleringen är en hårdare klimatskiva. Regelsystemet består av vertikala stålreglar och horisontella träreglar.



Figur 10 Ursprunglig väggkonstruktion i referensobjektet.

Väggkonstruktion 1

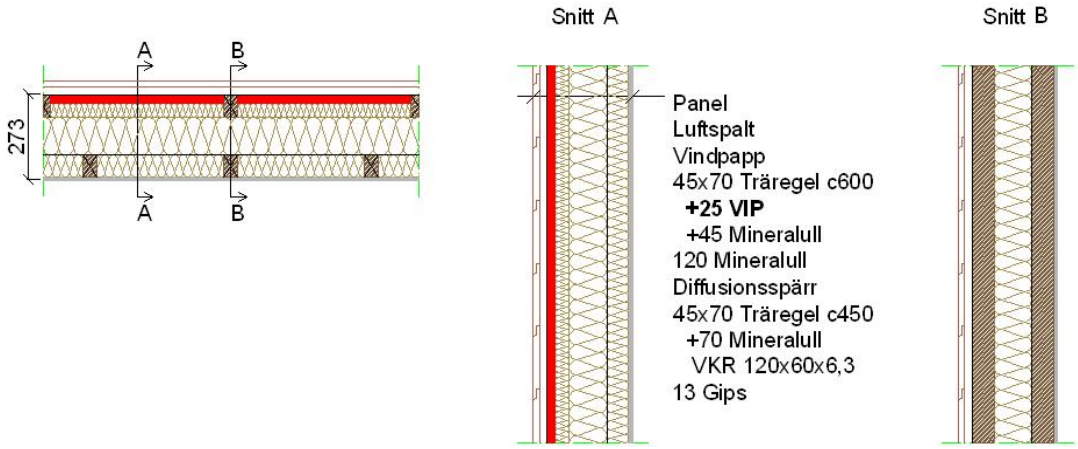
Väggkonstruktion 1 har en tjocklek på 273 mm. VIP är placerad mellan vindpapp och klimatskiva och står på horisontella bärläkt som fästs genom klimatskiva och distanser vidare in i de vertikala reglarna. I installationsskiktet är ett horisontellt regelsystem monterat.



Figur 11 Väggkonstruktion 1.

Väggkonstruktion 2

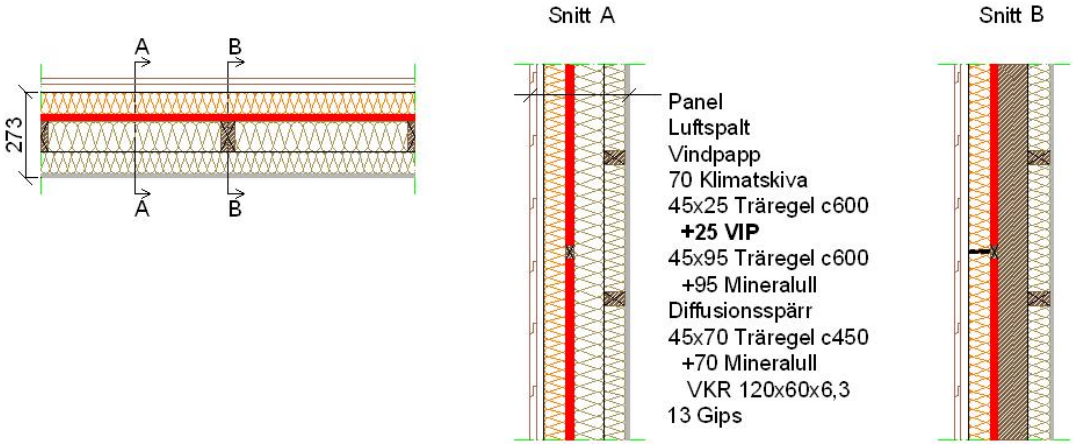
Väggkonstruktion 2 har en tjocklek på 273 mm. VIP är placerad mellan vindpapp och mineralull ståendes mellan de vertikala reglarna. I installationsskiktet är ett vertikalt regelsystem monterat.



Figur 12 Väggkonstruktion 2.

Väggkonstruktion 3

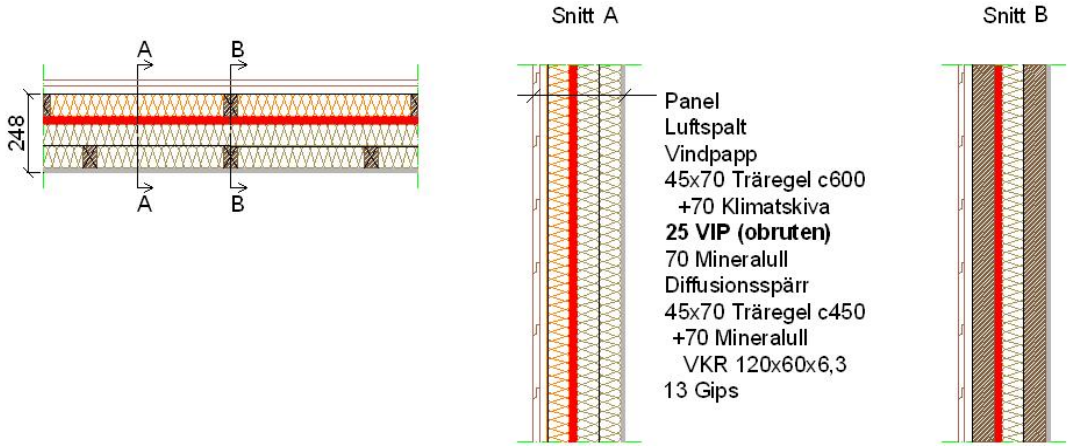
Väggkonstruktion 3 har en tjocklek på 273 mm. VIP är placerad mellan två mineralullsskikt och står på horisontella bärläkt. Den yttre mineralullen som angränsar mot luftspalten är en klimatskiva och är fäst med distanser och plastbrickor in via de horisontella bärläkterna och vidare in i de vertikala reglarna. I installationsskiktet är ett horisontellt regelsystem monterat.



Figur 13 Väggkonstruktion 3.

Väggkonstruktion 4

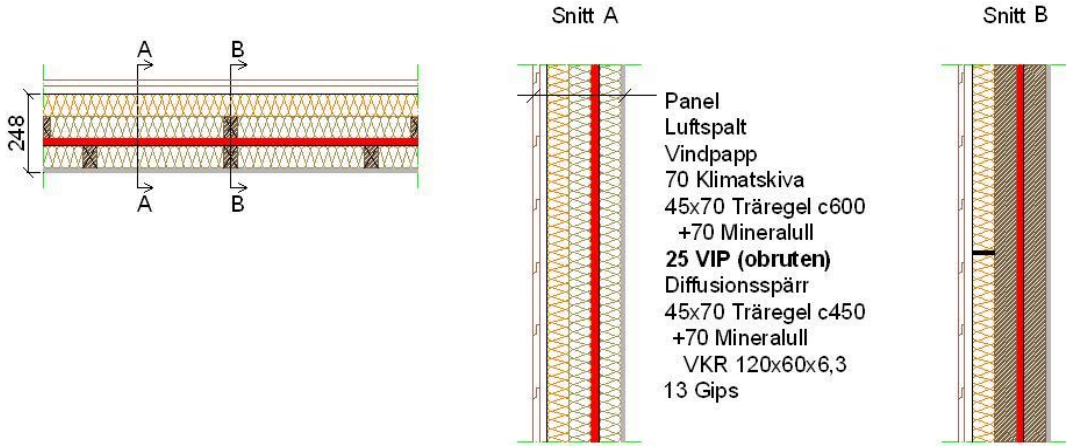
Väggkonstruktion 4 har en tjocklek på 248 mm. VIP är placerad mellan två mineralullsskikt och limmas mot de vertikala reglarna i yttre väggdel. I denna konstruktion bryts inte VIP-skiktet utav reglar eller läkt, utan löper homogent längs hela väggen. I installationsskiktet är ett vertikalt regelsystem monterat.



Figur 14 Väggkonstruktion 4.

Väggkonstruktion 5

Väggkonstruktion 5 har en tjocklek på 248 mm. VIP är placerad mellan två mineralullsskikt och limmas mot de yttre vertikala reglarna. I denna konstruktion bryts inte VIP-skiktet utav reglar eller läkt, utan löper homogent längs hela väggen. I installationsskiktet är ett vertikalt regelsystem monterat.



Figur 15 Väggkonstruktion 5.

3 BERÄKNINGAR

3.1 Beskrivning av beräkningsmetoder

I följande kapitel beskrivs vilka beräkningsmetoder som har tillämpats för studiens erhållna resultat. Vidare redovisas också nödvändiga avgränsningar och möjliga felkällor som har inverkan på resultatet. För fullständiga beräkningar av respektive studerad väggkonstruktion hänvisas till *Bilagorna*.

3.1.1 Värmemotstånd

Samtliga alternativa väggkonstruktioner som studeras i denna rapport har konstruerats så att dess U-värde inte överstiger 0,12 W/m^2K. För en av de alternativa väggkonstruktionerna (väggkonstruktion nr. 4) har även beräkningar genomförts av linjeköldbryggor som uppstår i samband med att ytterväggen ansluter till andra byggnadsdelar. Vidare har ett genomsnittligt U-värde (U_m) beräknats för hela byggnaden då väggkonstruktion nr. 4 har integrerats i referensbyggnaden. Byggnadens punktköldbryggor som exempelvis uppkommer vid infästningar med skruv och spik har inte tagits med i beräkningarna då dess ringa andel har ansetts försumbar. Vidare har transmissionsförlusterna beräknats med avseende på värmeledning genom väggkonstruktionerna under stationära förhållanden. Hänsyn till värmetransport orsakat av konvektion och strålning har endast beaktats vid konstruktionens in- och utsida där värmeöverföringen sker från ytorna till cirkulerande luft, samt i väggkonstruktionens ventilerade luftspalt.

Väggkonstruktionernas totala värmemotstånd är ett genomsnittligt värde som baseras på två olika beräkningsmetoder som kallas *λ-värdesmetoden* och *U-värdesmetoden* (Petersson 2007, s. 327).

- Med *λ-värdesmetoden* beräknas en gemensam värmekonduktivitet för väggens respektive skikt som löper vinkelrätt värmeflödesriktningen. Exempelvis kan den invändiga gipsbeklädnaden och väggens installationsskikt räknas som två olika skikt. Eftersom installationsskiktet består av både träreglar och mineralull (i denna studie) räknas en ny gemensam värmekonduktivitet fram som baseras på hur stor yta respektive material upptar.

- Med *U-värdesmetoden* delas väggkonstruktionen in i utmärkande ytor tvärs igenom väggen och parallellt med värmeflödesriktningen. Beroende på hur väggkonstruktionen är uppbyggd erhålls tvärsnitt med olika värmemotstånd. Exempelvis blir värmemotståndet tvärs igenom konstruktionen bättre där respektive skikts isoleringsmaterial möts i jämförelse med de snitt där konstruktionens regelsystem möts. Med *U-värdesmetoden* beräknas ett totalt värmemotstånd med hänsyn till värmemotståndet i respektive snitt och den andel yta som det specifika snittet upptar.

Det totala värmemotståndet har sedan erhållits som ett medelvärde av resultatet från de två beräkningsmetoderna enligt ekvation 3.1.

$$R_T = \frac{R_T^{\lambda} + R_T^{U}}{2} \qquad (3.1)$$

Gemensamt för alla alternativa väggkonstruktioner i studien är att ett approximativt värmemotstånd för den ventilerade luftspalten inklusive yttre beklädnad har använts i beräkningarna. Likaså har approximativa värden använts för värmemotståndet som uppstår vid väggytorna som angränsar mot utomhusluften och den uppvärmda rumsluften. Värmemotståndet som uppstår vid väggytans angränsande mot utomhusluften och den uppvärmda rumsluften beror på konvektivt värmeutbyte och strålningsutbyte med omgivningen.

Vidare har väggkonstruktionens värmegenomgångskoefficient erhållits som inversen av det totala värmemotståndet enligt ekvation 3.2.

$$U = \frac{1}{R_T} \tag{3.2}$$

Som redan nämnts i rapporten har en bredare studie av väggkonstruktion nr. 4 genomförts. Denna väggkonstruktion har integrerats i referensbyggnaden och ett genomsnittligt U-värde har beräknats för hela byggnaden enligt ekvation 3.3 (Petersson 2007, s. 258). Fortsättningsvis har också risken med att vakuumisoleringspanelen punkteras beaktats för denna konstruktion genom att ett U-värde för väggkonstruktionen innehållande punkterad VIP beräknats.

$$U_m = \frac{\sum U_{korr,i} \cdot A_i + \sum \psi_k \cdot l_k + \sum \chi_j}{A_{om}} \tag{3.3}$$

$U_{korr,i}$ = värmegenomgångskoefficient för byggnadsdelens i $(\frac{W}{m^2K})$

A_i = area för byggnadsdelens i yta mot uppvärmd inneluft (m^2)

ψ_k = värmegenomgångskoefficient för linjära köldbryggan k $(\frac{W}{mK})$

l_k = längden av den linjära köldbryggan k mot uppvärmd inneluft (m)

χ_j = värmegenomgångskoefficient för punktformiga köldbryggan j $(\frac{W}{K})$

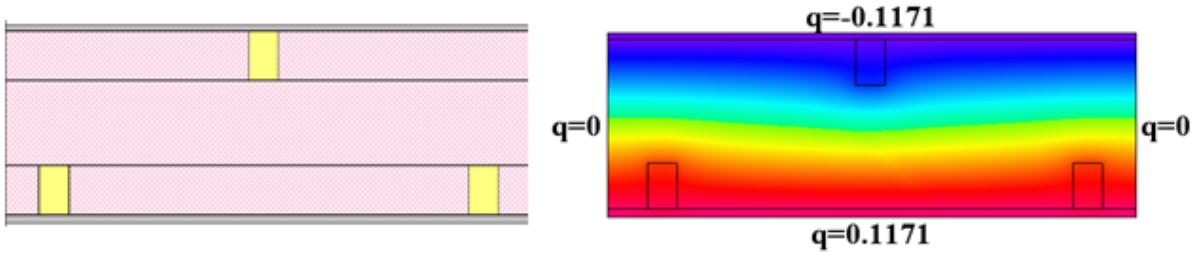
A_{om} = omslutande area mot uppvärmd innomhusluft (m^2)

3.1.2 Köldbryggor

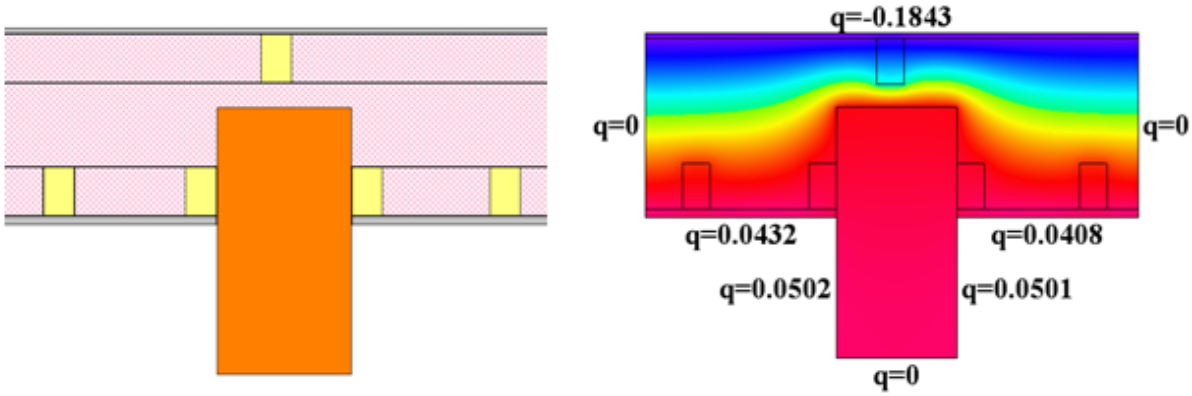
Med hjälp av beräkningsprogrammet HEAT2 kan tvådimensionella värmeflöden genom byggnadskonstruktionen analyseras och visualiseras (Blocon, 2011). I denna studie har programmet använts för att beräkna stationära värmetransporter vid linjära köldbryggor. Två gestaltningar av respektive konstruktionsdetalj som ger upphov till en linjeköldbrygga har ritats. I den ena gestaltningen (se Figur 16) beräknas värmeflödet genom en homogen konstruktion som inte påverkas av något material och/eller en geometrisk utformning som ger upphov till en köldbrygga. I den andra gestaltningen (se Figur 17) beräknas värmeflödet genom samma konstruktionsdetalj med skillnaden att materialet och/eller den geometriska utformningen som ger upphov till en köldbrygga har tagits i beaktan. Differensen av värmeflödet i de två fallen är den värmeförlust som linjeköldbryggan orsakar i enheten W/mK och värmegenomgångskoefficienten, ψ för den linjära köldbryggan. I Figur 17 illustreras ett exempel av en bärande innervägg i betong som ger upphov till en linjeköldbrygga i en utfackningsvägg vid en grads temperaturskillnad ömse sidor av utfackningsväggen. Slutligen har linjeköldbryggans ψ-värde multiplicerats med linjeköldbryggans totala

utsträckning i enheten meter vilket resulterar i att värmeförluster genom linjeköldbryggorna presenteras i enheten W/K.

I studien har ingen hänsyn tagits till köldbryggor som uppstår i samband med infästningar av referensbyggnadens balkonger och trapphus. Vidare har ingen hänsyn tagits till punktköldbryggor som exempelvis uppstår vid fästmaterial som skruv och spik eller vid tredimensionella värmeflöden som uppstår vid ytterhörn, exempelvis där ytterväggshörn angränsar mot tak.



Figur 16 *Bilden till vänster föreställer en utfackningsvägg med ett regelsystem i trä och mineralull som isoleringsmaterial. Bilden till höger illustrerar temperaturfördelningen i väggen samt värmeflödet q genom väggen i enheten W/mK.*



Figur 17 *Samma utfackningsvägg som i Figur 16. Här uppstår emellertid en linjeköldbrygga när den bärande innerväggen fortsätter in i ytterväggen eftersom betong har en större värmeledningsförmåga än mineralull. Väggkonstruktionen i Figur 16 har således mindre värmeförluster än denna konstruktion som påverkas av den bärande innerväggen. Differensen av värmeflödet genom de två konstruktionerna är värmegenomgångskoefficienten, Ψ för den linjära köldbryggan.*

Värmeförlust genom Figur 16: q = 0,1171 W/mK

Värmeförlust genom Figur 17: q = 0,1843 W/mK

Värmeförlust genom linjeköldbryggan: q = 0,1843 – 0,1171 = 0,0672 W/mK

3.1.3 Fukttillstånd

Utvärderingar i fukthänseende för respektive väggkonstruktion har i huvudsak gjorts med hänsyn till diffusion. Fukttransporter i form av konvektion har försummats då detta förebyggs genom dagens hårda krav på lufttäthet i klimatskalet. Beräkningarna gäller för stationära tillstånd.

Temperaturfördelningar har beräknats i HEAT2 för respektive konstruktion med månadsmedelvärde för utomhustemperatur (Göteborg) samt en invändig temperatur av 21 °C som indata. I varje väggkonstruktion har ett kritiskt snitt igenom träreglarna valts ut. Snittet är kritiskt eftersom trä är känsligast mot fukt. Snittet igenom träreglarna har även ett lägre värmemotstånd och därmed fås större temperaturskillnader tvärsigenom snittet.

Ånghaltsfördelningar har beräknats för snitt genom isolering då den har en högre ånggenomsläpplighet än träreglar, därmed fås en högre ånghalt längre ut i konstruktionen. Därefter har en utbredning av den högre ånghalten till det kallare skiktet bakom reglarna antagits. På så sätt fås ett kritiskt fall med en lägre temperatur och en högre ånghalt. Beräkningsscheman har sammanställts i Excel. Medeldygnstemperaturer och absoluta ånghalter för varje månad (Göteborg) har hämtats från tabeller i Tillämpad Byggnadsfysik (Peterson 2007, s. 468). Invändiga fukttillskott för respektive månad har erhållits från ISO 13788.

Ånghaltsfördelning

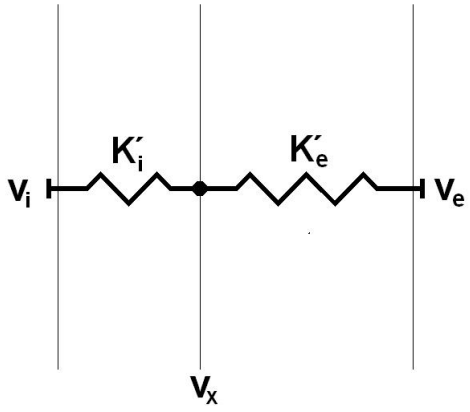
Ånghalten i ett beräkningssnitt x (m) in i konstruktionen kan beräknas enligt ekvation 3.4 nedan. Beräkningsmetoden illustreras i Figur 18.

$$v_x = \frac{K_e' \cdot v_e + K_i' \cdot v_i}{K_e' + K_i'} \qquad (3.4)$$

$$K_e' = \frac{A}{\sum Z_e}, K_i' = \frac{A}{\sum Z_i}$$

ΣZ_e = summan av ånggenomgångsmotstånden från snittet x och ut (s/m)

ΣZ_i = summan av ånggenomgångsmotstånden från snittet x och ut (s/m)

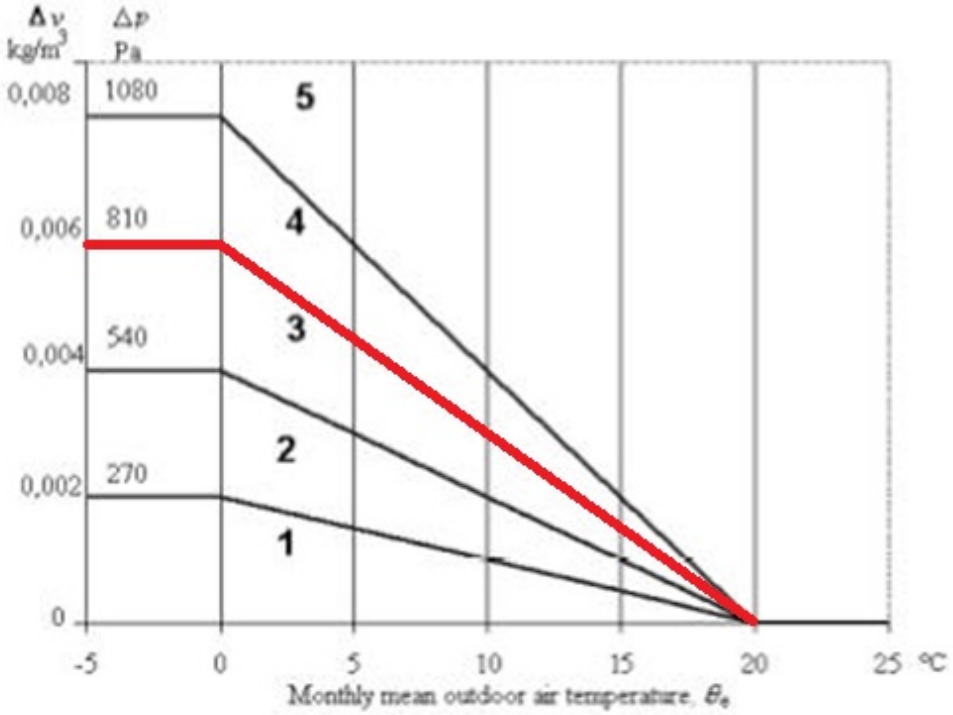


Figur 18 Ånghalthalten v_x mellan två materialskikt.

För att kalkylera det invändiga fukttillskottet har ISO 13788 använts (se Tabell 4 och Figur 19). Byggnaden har antagits tillhöra fuktklass 3 och medeldygnstemperaturer för Göteborg har använts som ingångsvärde.

Tabell 3 Fuktklasser för olika byggnadstyper. (Bauphysik, 2004)

Fuktklass	Byggnadstyp
1	Lager
2	Kontor, butiker
3	**Byggnad med låg beläggning**
4	Byggnad med hög beläggning, idrottshallar, kök, matsalar, gasuppvärmda byggnader
5	Speciella byggnader, t.ex. tvätt, bryggeri, pool



Figur 19 Variation av invändigt fukttillskott med utvändig medeldygnstemperatur för olika fuktklasser. Y-axeln visar invändigt fukttillskott (kg/m^3) samt lufttrycksökning (Pa) och x-axeln visar månatlig medeldygnstemperatur (°C). Den rödmarkerade kurvan motsvarar fuktklass 3. (Bauphysik, 2004)

Kondens/uttorkning

För att beräkna kondens och uttorkning har ekvation 3.5 använts.

$$G = G_{in} - G_{ut} = \left(\frac{v_i - v_s(T_x)}{z_{in}} - \frac{v_s(T_x) - v_e}{z_{ut}}\right) \cdot t_{kond.period} \quad (3.5)$$

Mögelrisk

Kritiska fukttillstånd för mögeltillväxt varierar med temperaturen (Nilsson, 2006). För att analysera om det finns en risk för mögeltillväxt i de olika väggkonstruktionerna har följande ekvationer utvecklad av Hukka och Viitanen (1999) använts. Mögeltillväxtpotentialen är baserad på mätvärden av mögeltillväxt på olika träytor. Temperaturen på en yta, T, används för att räkna ut den kritiska relativa fuktigheten, RF_{crit}, för aktuell temperatur se ekvation 3.6.

$$RF_{crit} = \begin{cases} 100\%, T < 0°C \\ -0.00267 \cdot T^3 + 0.160 \cdot T^2 - 3.13 \cdot T + 100\%, 0°C \leq T \leq 20°C \\ 80\%, T > 20°C \end{cases} \quad (3.6)$$

Potentialen för mögeltillväxt, m, kan därefter beräknas genom ekvation 3.7.

$$m = \frac{RF(T)}{RF_{crit}(T)} \quad (3.7)$$

Där RF är aktuell relativ fuktighet i ytskiktet och RF_{crit} är den kritiska relativa fuktigheten beräknad i ekvation 3.6. Det finns en risk för mögeltillväxt om den aktuella relativa fuktigheten är högre än den kritiska relativa fuktigheten, med andra ord när mögeltillväxtpotentialen m är högre än 1.

3.1.4 Ekonomi

En materialkostnad per längdmeter vägg har kalkylerats för varje väggkonstruktion. Materialkostnaderna/längdmeter vägg för väggkonstruktion 1-5 har sedan ställts mot materialkostnaden/längdmeter vägg för referensväggen, för att på så sätt få fram en merkostnad. Merkostnad har därefter slagits ut på den vunna golvarean för respektive vägg.

Den totala materialkostnaden för respektive väggkonstruktion har beräknats i BidCon. Prisuppgifter för respektive material har erhållits från Skanska och projektet Höjdenvändan, alternativt hämtats från BidCons databas om dessa saknats. Undantaget är priserna för vakuumisoleringen som redovisas i nästa underkapitel.

Vakuumisoleringspaneler

Priset per panel varierar beroende på fabrikat, dess dimensioner samt beställningsvolym. Tillverkare erbjuder olika sorters paneler som skiljer sig i pris beroende på prestanda. I studien har två paneler, panel A och panel B, båda med en kärna av pressad kiseldioxid (fumed silica) och en barriärfilm av metalliserade polymerfilmer använts i beräkningarna. Det enda som skiljer panelerna åt är deras dimensioner (se Bilaga 1). Som beställningsvolym har ett ungefärligt värde motsvarande ytterväggsarean för referensobjektet, ca 1000 m^2 använts.

Prisförfrågningar har sedan sänts till två Svenska distributörer, Termo Teknik Edéus AB och T Knutsson AB. Termo Teknik Edéus AB distribuerar Belgiska Microtherm och Tyska Vaku-Isotherm. T Knutsson AB distribuerar Tyska Porextherm. Distributörernas prisuppskattningar för ovanstående förutsättningar visas i Tabell 5.

Tabell 5 Prisuppskattning panel A & B

Panel	**A**		**B**	
Tjocklek *[m]*	0,025		0,025	
Bredd *[m]*	0,555		1,2	
Höjd *[m]*	1,2		1,2	
Area *[m^2]*	0,666		1,44	
Distributör	Termo Teknik Edéus	T Knutsson	Termo Teknik Edéus	T Knutsson
Pris *[kr/st]*	480,2	505	1031	985
Pris *[kr/m^2]*	721	758,3	716	684
Medelpris *[kr/st]*	492,6		1 008,0	
Medelpris *[kr/m^2]*	739,6		700,0	

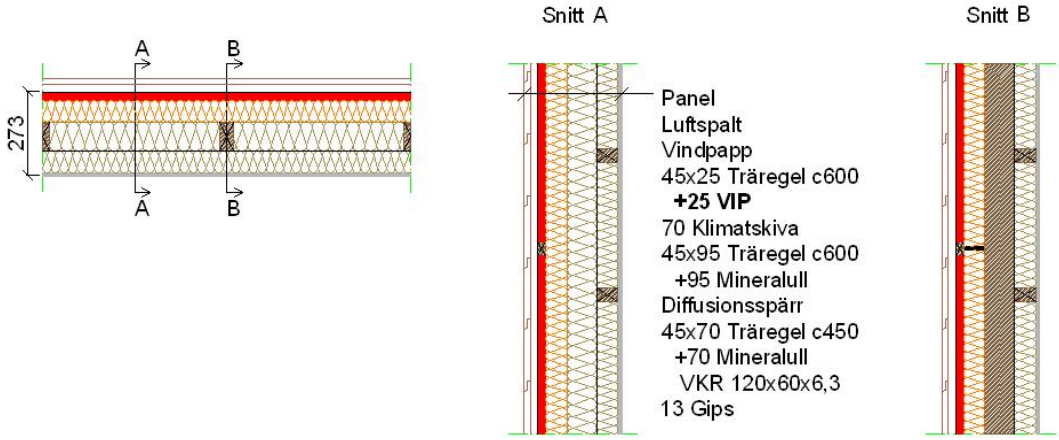
Priserna är inklusive frakt (Göteborg) och exklusive moms. Värt att notera är att distributörernas prisuppskattningar per panel grundar sig på två olika sorters vakuumisoleringspaneler från olika tillverkare. Panelen som använts i studiens beräkningar existerar endast i teorin och det framtagna medelpriset/kvadratmeter panel är ett godtyckligt värde.

Priserna per kvadratmeter VIP ligger i linje med det pris som presenterades i FoU-Väst´s rapport ”invertering och utvärdering av högpresterande isolering” från 2010. För en panel med tjockleken 25 mm anges i rapporten ett pris på 700 kr/m^2 (Clase & Lindén, 2010).

4 RESULTAT

I följande kapitel redovisas resultaten för samtliga fem alternativa väggkonstruktioner i ordningsföljden 1-5. Väggkonstruktionernas uppbyggnad redovisas med en figur. I tabellform redovisas och jämförs värden för den alternativa ytterväggen med referensbyggnadens ytterväg som här betecknas vägg 0. I efterföljande figur redovisas fukttillståndet i väggens olika skikt under årets samtliga månader. Avslutningsvis redovisas mögelpotentialen för trämaterialet i väggkonstruktionen under november månad som visats sig vara den mest kritiska månaden för mögelrisk i dessa väggkonstruktioner.

4.1 Väggkonstruktion 1

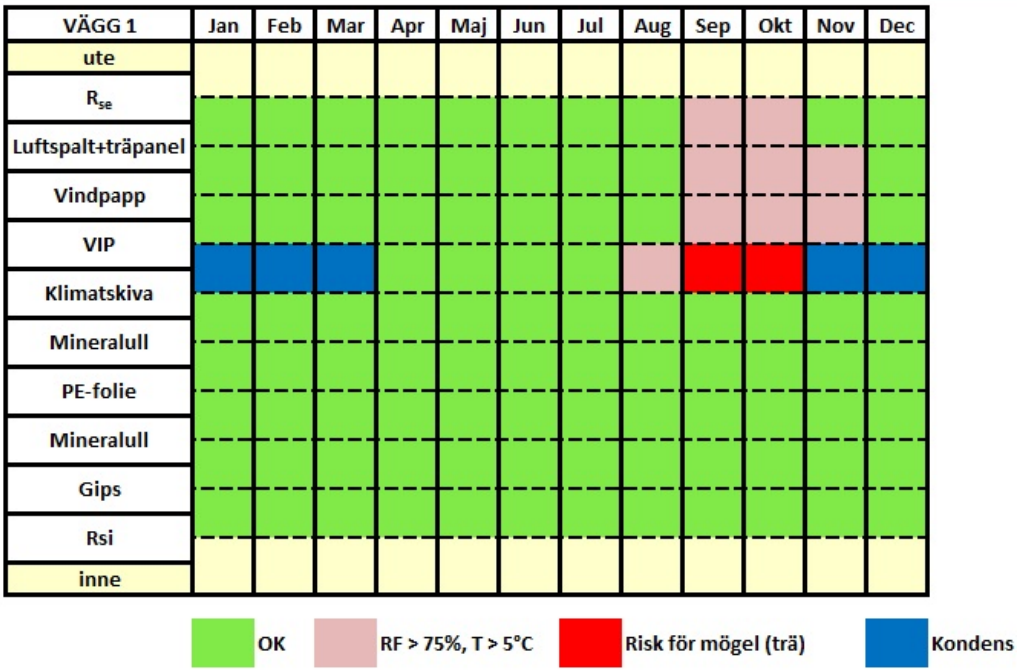


Figur 20 Väggkonstruktion 1.

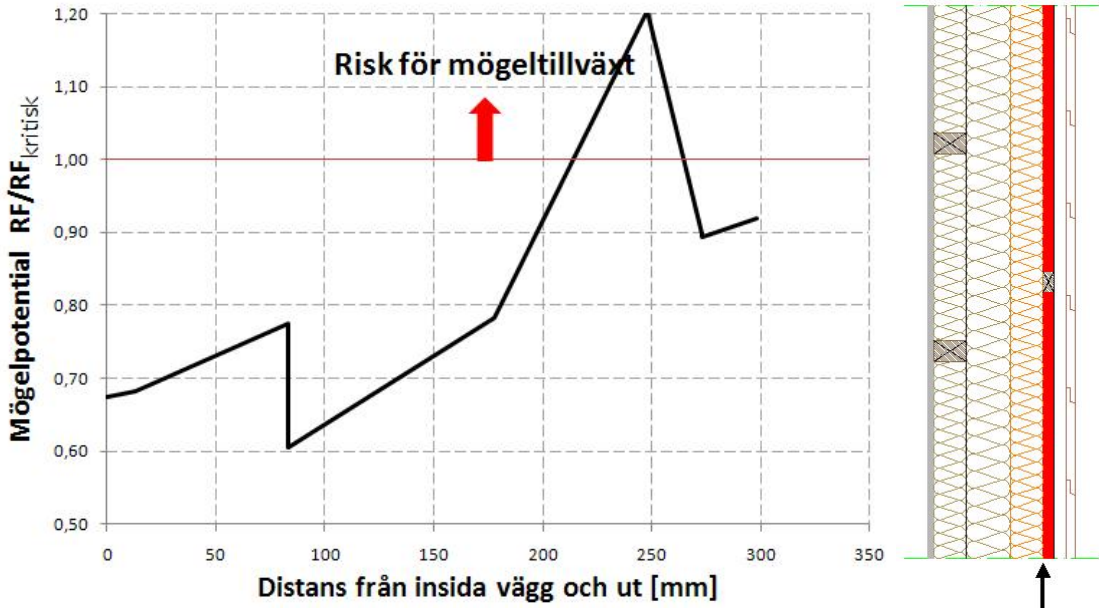
Tabell 6 Resultat väggkonstruktion 1.

Resultat		VÄGG 1	VÄGG 0	Differens
U-värde	*[W/m²K]*	0,120	0,120	**+/- 0**
Tjocklek	*[m]*	0,273	0,373	**- 0,100**
Materialkostnad/ Kvadratmeter vägg	*[kr/m²]*	951,8	328,2	**+ 623,7**
Materialkostnad/ Längdmeter vägg	*[kr/m]*	2 398,5	826,9	**+ 1 571,6**

Materialkostnad/Vunnen golvarea ≈ 15 716 kr/m²

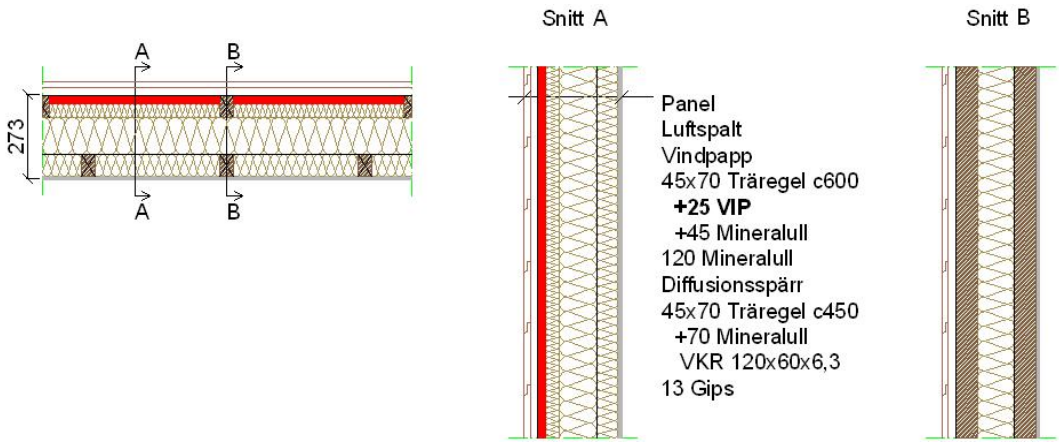


Figur 21 *Fukttillstånd mellan de olika materialskikten under årets månader i väggkonstruktion 1. I skiktet mellan VIP och Klimatskiva uppstår flera kritiska fukttillstånd.*



Figur 22 *Mögelpotential (för trämaterial) i väggkonstruktion 1 under november månad. Pilen längst till höger visar i vilket skikt risk för mögel uppstår.*

4.2 Väggkonstruktion 2

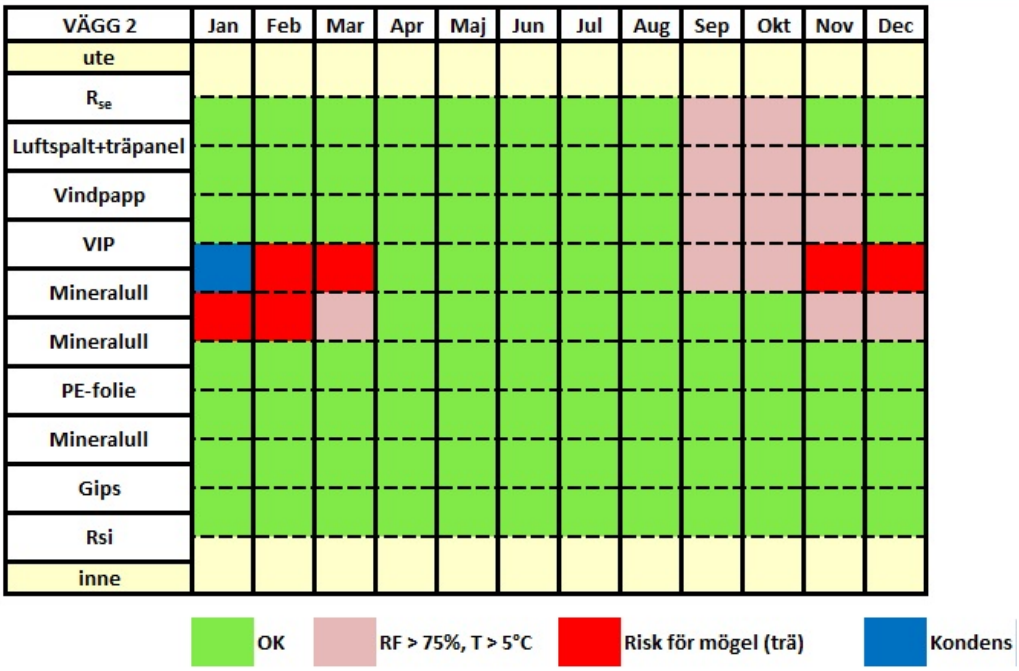


Figur 23 Väggkonstruktion 2.

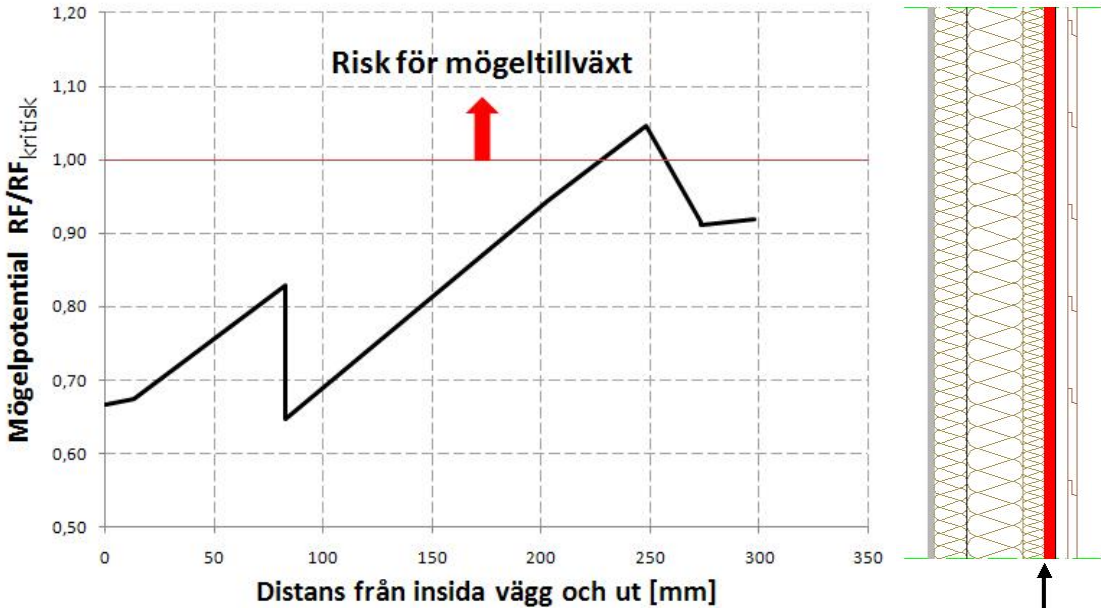
Tabell 7 Resultat väggkonstruktion 2

Resultat		**VÄGG 2**	**VÄGG 0**	**Differens**
U-värde	*[W/m²K]*	0,120	0,120	**+/- 0**
Tjocklek	*[m]*	0,273	0,373	**- 0,100**
Materialkostnad/ Kvadratmeter vägg	*[kr/m²]*	896,6	328,2	**+ 568,5**
Materialkostnad/ Längdmeter vägg	*[kr/m]*	2 259,5	826,9	**+ 1 432,5**

⇨ **Materialkostnad/Vunnen golvarea ≈ 14 325 kr/m²**

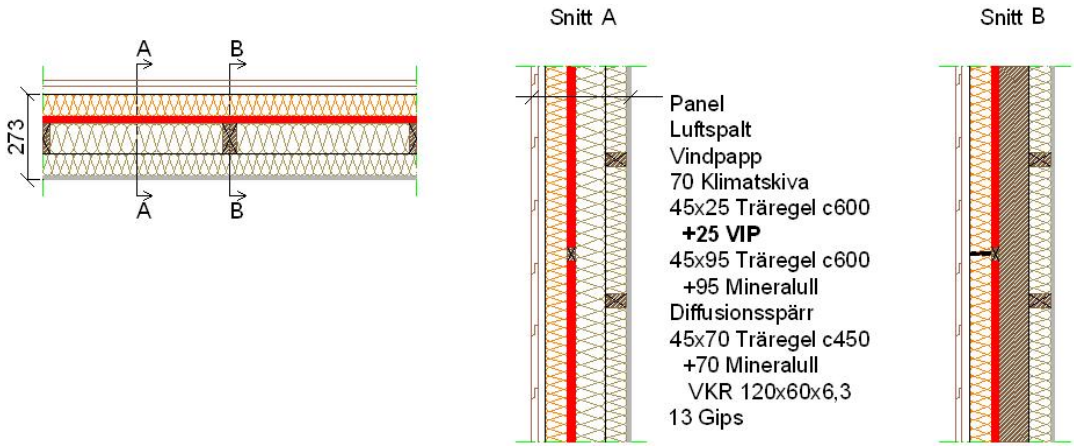


Figur 24 *Fukttillstånd mellan de olika materialskikten under årets månader i väggkonstruktion 2. I skiktet mellan VIP och mineralull samt i skiktet mellan de båda mineralullsskivorna uppstår risk för mögeltillväxt. Hög relativ fuktighet uppstår under stora delar av året.*



Figur 25 *Mögelpotential (för trämaterial) i väggkonstruktion 2 under november månad. Pilen längst till höger visar i vilket skikt risk för mögel uppstår.*

4.3 Väggkonstruktion 3

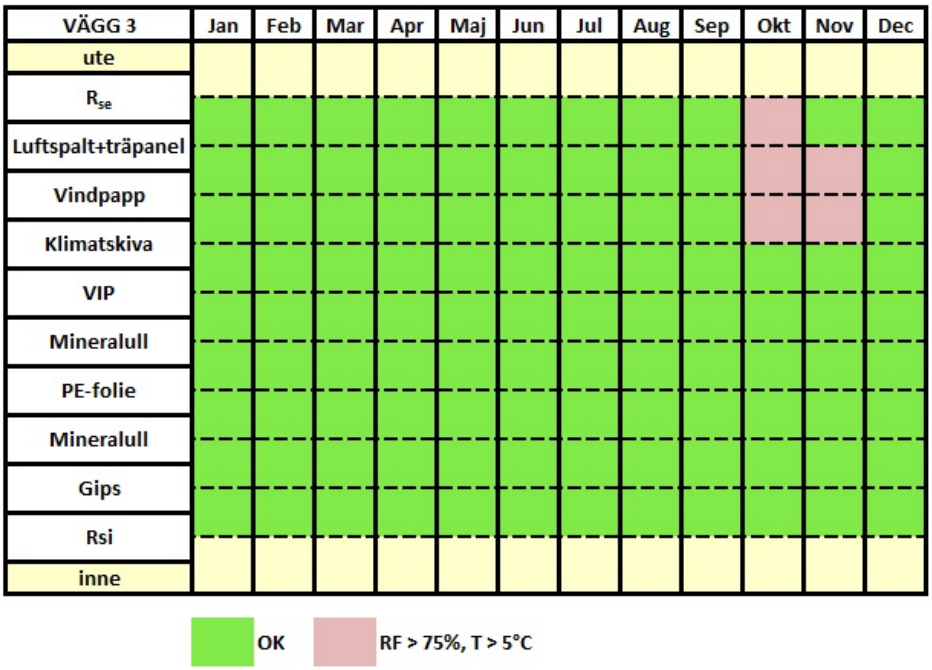


Figur 26 Väggkonstruktion 3.

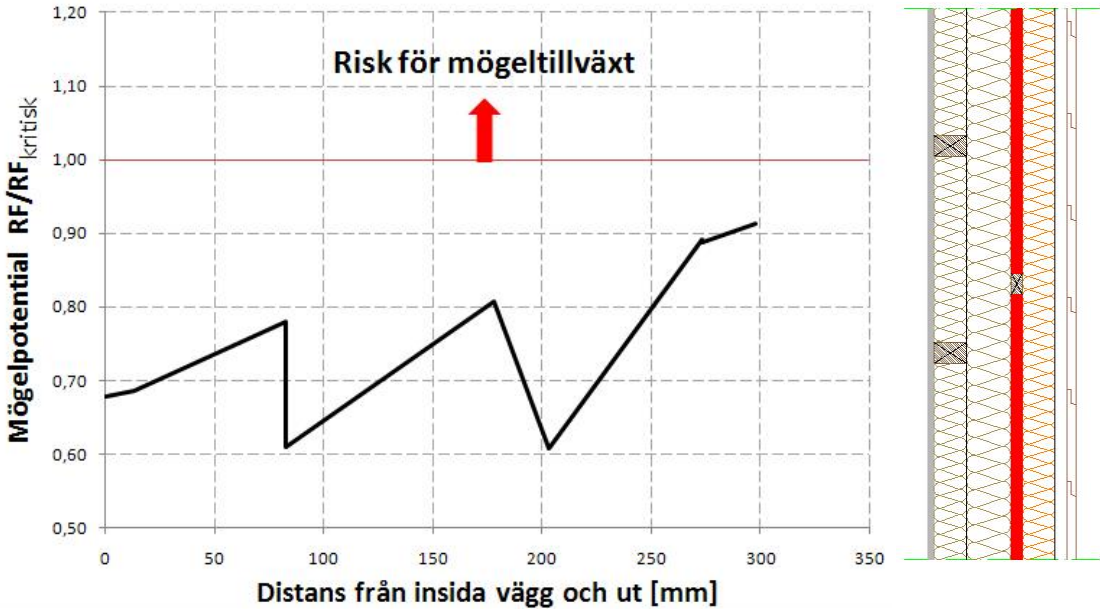
Tabell 8 Resultat väggkonstruktion 3

Resultat		**VÄGG 3**	**VÄGG 0**	**Differens**
U-värde	*[W/m^{2}K]*	0,119	0,120	**0,001**
Tjocklek	*[m]*	0,273	0,373	**- 0,100**
Materialkostnad/ Kvadratmeter vägg	*[kr/m^2]*	951,8	328,2	**+ 623,7**
Materialkostnad/ Längdmeter vägg	*[kr/m]*	2 398,5	826,9	**+ 1 571,6**

⇨ **Materialkostnad/Vunnen golvarea ≈ 15 716 kr/m^2**

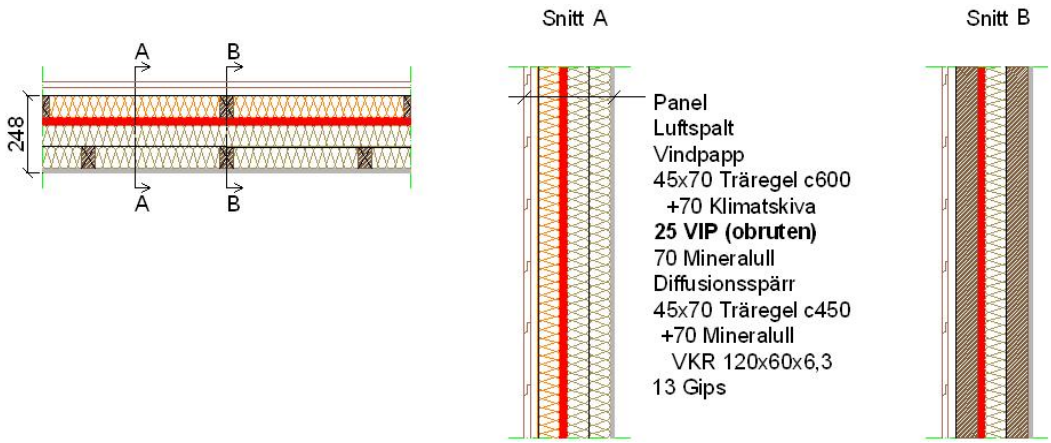


Figur 27 *Fukttillstånd mellan de olika materialskikten under årets månader i väggkonstruktion 3. Det uppstår ingen risk för mögel i denna konstruktion.*



Figur 28 *Mögelpotential (för trämaterial) i väggkonstruktion 3 under november månad.*

4.4 Väggkonstruktion 4

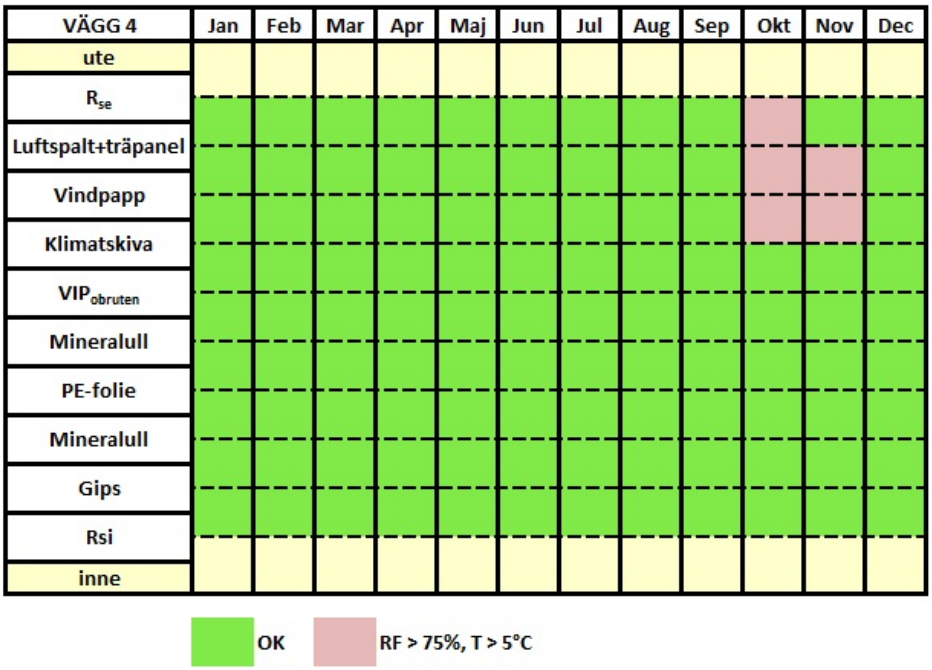


Figur 29 Väggkonstruktion 4.

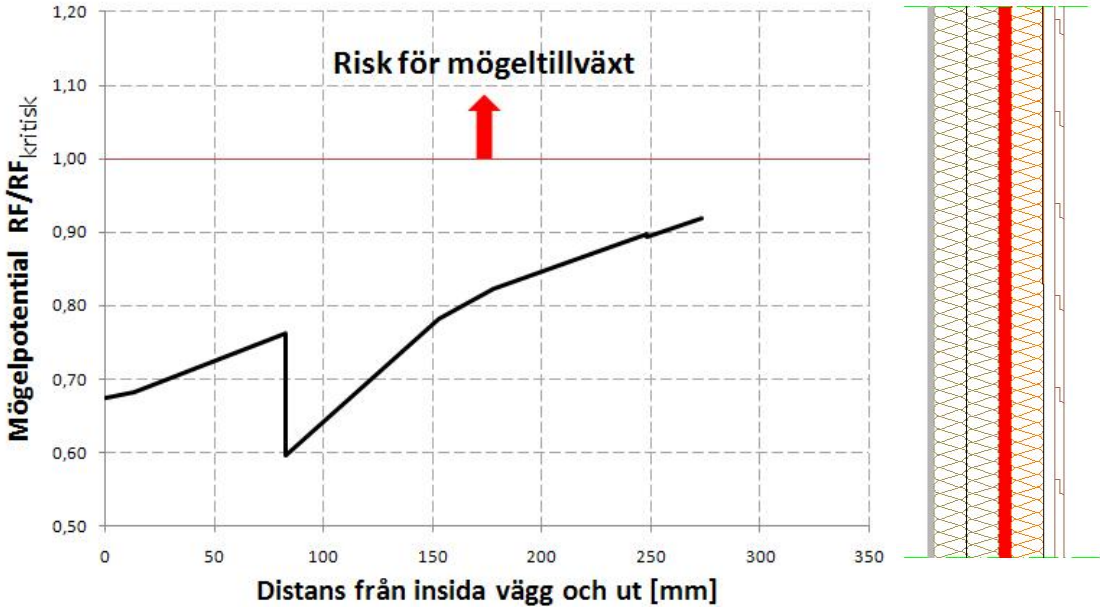
Tabell 9 Resultat väggkonstruktion 4

Resultat		**VÄGG 4**	**VÄGG 0**	**Differens**
U-värde	*[W/m²K]*	0,115	0,120	**- 0,005**
Tjocklek	*[m]*	0,248	0,373	**- 0,125**
Materialkostnad/ Kvadratmeter vägg	*[kr/m²]*	881,7	328,2	**+ 553,5**
Materialkostnad/ Längdmeter vägg	*[kr/m]*	2 221,8	826,9	**+ 1 394,8**

⇨ **Materialkostnad/Vunnen golvarea ≈ 11 159 kr/m²**

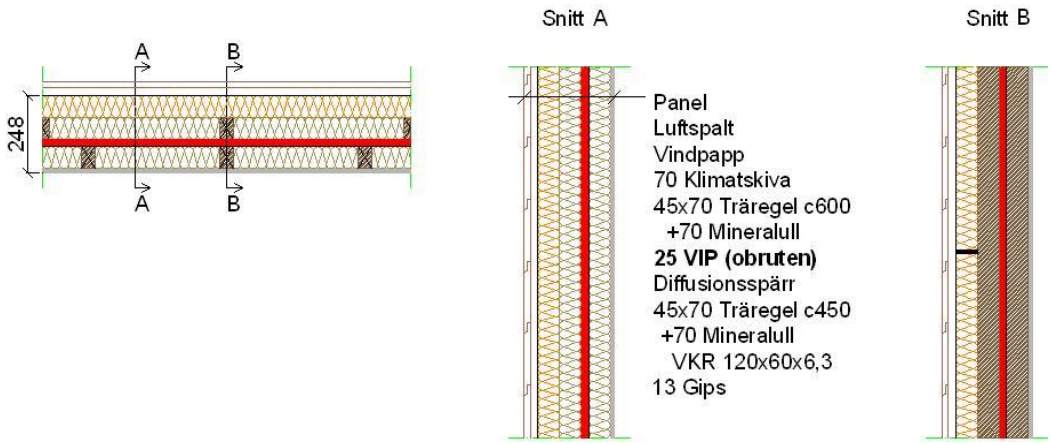


Figur 30 *Fukttillstånd mellan de olika materialskikten under årets månader i väggkonstruktion 4. Det uppstår ingen risk för mögeltillväxt i denna konstruktion.*



Figur 31 *Mögelpotential (för trämaterial) i väggkonstruktion 4 under november månad.*

4.5 Väggkonstruktion 5

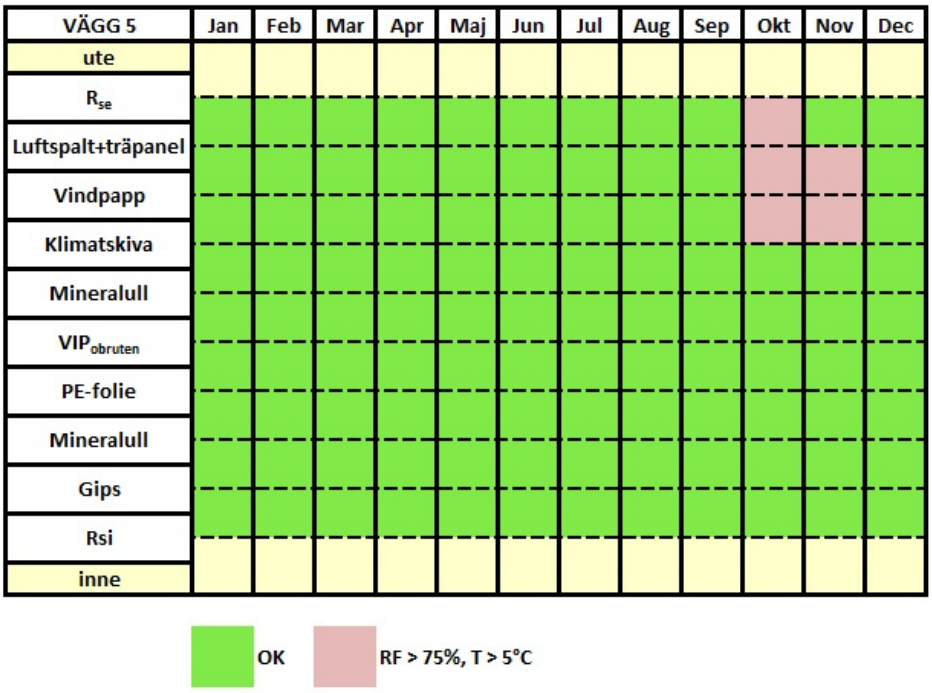


Figur 32 Väggkonstruktion 5.

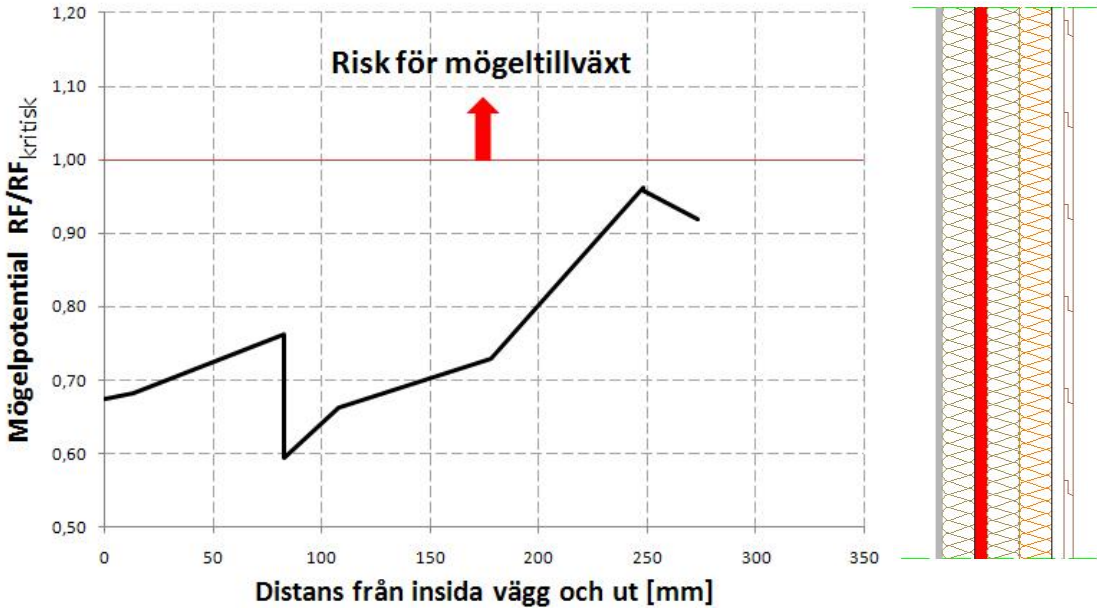
Tabell 10 Resultat väggkonstruktion 5

Resultat		**VÄGG 5**	**VÄGG 0**	**Differens**
U-värde	*[W/m²K]*	0,114	0,120	**- 0,006**
Tjocklek	*[m]*	0,248	0,373	**- 0,125**
Materialkostnad/ Kvadratmeter vägg	*[kr/m²]*	895,8	328,2	**+ 567,6**
Materialkostnad/ Längdmeter vägg	*[kr/m]*	2 257,4	826,9	**+ 1 430,4**

⇨ **Materialkostnad/Vunnen golvarea ≈ 11 443 kr/m²**



Figur 33 *Fukttillstånd mellan de olika materialskikten under årets månader i väggkonstruktion 5. Det uppstår ingen risk för mögeltillväxt i denna konstruktion.*



Figur 34 *Mögelpotential (för trämaterial) i väggkonstruktion 5 under november månad.*

5 ANALYS

5.1 Värmegenomgångskoefficient

Resultatet av studien visar att de tunnaste väggkonstruktionerna (4 och 5) också har de lägsta U-värdena. Orsaken till detta antas bero på flera faktorer, dels att andelen träreglar som inverkar på värmemotståndet har reducerats och ersatts med homogena skikt av VIP och mineralull i dessa konstruktioner. Dessa homogena skikt stoppar också upp värmeflödet där köldbryggor vanligtvis uppstår som till exempel i referensbyggnadens väggkonstruktion där horisontella reglar fästs i de vertikala reglarna och orsakar en köldbrygga genom hela väggkonstruktionen. Vidare har det varit möjligt att använda en större storlek på VIP i de homogena skikten eftersom de inte behöver passas in i regelfack eller mellan bärläkt vilket har resulterat i en förmånligare värmekonduktivitet för vakuumisoleringspanelen (se bilaga 1) som i sin tur har bidragit till ett lägre U-värde. Teoretiskt kan storleken på vakuumisoleringspanelen göras ännu större än den storlek som använts i väggkonstruktion 4 och 5 för optimering av dess värmekonduktivitet samt reducering av köldbryggor som uppstår i VIP-skarvarna. Dock ökar risken, att väggens värmemotstånd försämras i en större omfattning, vid en eventuell punktering av vakuumisoleringspanelen.

5.2 Fukttillstånd

I resultatkapitlet redovisas väggkonstruktionerna i en ordningsföljd som baseras på hur långt ut i väggkonstruktionen vakuumisoleringspanelen är applicerad. I väggkonstruktionerna 1 och 2 är VIP applicerad så att den angränsar mot den ventilerade luftspalten. I väggkonstruktion 3 och 4 har VIP flyttats in i väggkonstruktionen ett steg för att slutligen i väggkonstruktion 5 flyttats in ytterligare ett steg så att VIP angränsar mot installationsskiktet. På detta sätt har ett mönster urskiljts som tydligt visar på hur valet av placering av VIP i väggkonstruktionen påverkar temperatur- och fuktförhållandena i konstruktionen.

Sämst resultat i ett fuktteknisk perspektiv har erhållits i väggkonstruktion 1 och 2 där VIP är applicerad längst ut mot den ventilerade luftspalten. Fuktförhållandena har sedan förbättrats successivt i takt med att VIP har flyttats längre in i väggkonstruktionen. Anledningen till detta antas bero på flera faktorer, dels har VIP ett mycket stort ånggenomgångsmotstånd vilket har resulterat i att en mindre mängd fuktig luft har vandrat ut i väggkonstruktionen när VIP applicerats direkt efter PE-folien som angränsar till installationsskiktet (väggkonstruktion 5). När VIP appliceras längre ut i konstruktionen blir det svårare för den fuktiga luften som vandrar igenom PE-folien att transporteras ut ur konstruktionen då VIP bromsar upp flödet vilket resulterar i att den relativa fuktigheten blir hög vid insida VIP då temperaturen närmar sig daggtemperatur. Detta kan ses i resultatet för väggkonstruktion 1 och 2, där VIP är applicerat ytterst i konstruktionen mot den ventilerade luftspalten. I väggkonstruktion 1 och 2 har temperaturen i konstruktionen sjunkit så pass att luftens daggtemperatur har erhållits vid vakuumisoleringspanelens bärläkt respektive väggreglar och kondens har uppstått. Detta sker under årets kalla månader då den låga temperaturen bidrar till en hög relativ ånghalt. I dessa konstruktioner finns också risk för mögeltillväxt i vakuumisoleringspanelens bärläkt respektive väggreglar.

5.3 Ekonomi

Enligt våra beräkningar, som är begränsade till materialkostnader för respektive vägg, kan man se att priset per kvadratmeter vägg med VIP blir ca 3 gånger högre än för referensväggen. Detta trots att den totala mängden material i väggarna med VIP minskar i och med de minskande dimensionerna. För att värdera varje vägg med VIP får man slå ut den ökade materialkostnaden på den vunna golvarean. Kostnaden, i

form av materialpris, för varje vunnen kvadratmeter golvarea varierade. Exempelvis kostade varje vunnen kvadratmeter golvarea 15 716 kr för vägg 1 och 3, medans den för vägg 4 kostade 11 159 kr. Hur stor avgift fastighetsägaren erhåller per kvadratmeter vunnen golvarea påverkar givetvis återbetalningstiden av de ökade materialkostnaderna i ytterväggen. Ett enkelt räkneexempel visar att om kostnaden för en vunnen kvadratmeter divideras med 40 år, som är ett teoretiskt medelvärde för vakuumisoleringspanelens livslängd i denna studie, erhålls en kostnad per vunnen kvadratmeter och år som krävs för att återbetala de ökade materialkostnaderna i ytterväggen. Exempelvis fås följande kostnad för väggkonstruktion 4:

$$\frac{11\,159\ kr/m^2}{40\ år} \approx \frac{280\ kr/m^2}{år}$$

Den ökade materialkostnaden i ytterväggskonstruktionen är dock bara en del av den totala kostnaden. Det tillkommer även kostnader för markplatta, mellanbjälklag och tak vid den intjänade boytan. Vidare har inga studier gjorts som behandlar produktionskostnader för att bygga med VIP samt att ingen hänsyn har tagits till eventuella underhållsarbeten när vakuumisoleringspanelen prestanda har försämrats och inte längre uppfyller de projekterade kraven. Dessa osäkra faktorer samt att ingen hänsyn har tagits till kalkyl- eller låneränta samt inflation berättigar att en djupare livscykelkostnadsanalys utförs för studien.

5.4 Isoleringsmaterialet

Det som talar emot användandet av VIP i dagsläget är främst priset och den ökade komplexiteten av hanteringen i byggskedet. I och med att VIP är ett relativt nytt material är inte alla led i tillverkningsprocessen effektiviserade och därmed är priset högre än vad det har potential att bli. En effektiv hantering i byggskedet krävs för att inte produktionskostnaderna skall öka.

Vakuumisoleringspaneler på marknaden idag har ofta en initiell värmeledningsförmåga runt 4 *m*W/mK. Man får inte glömma att detta är just ett initialt värde som avser centrum av panelen. Den faktiska, effektiva, värmeledningsförmågan blir högre efter åldrande av panelen och genom tillskott från köldbryggor. Hur mycket högre den effektiva värmeledningsförmågan blir beror i huvudsak på två aspekter:

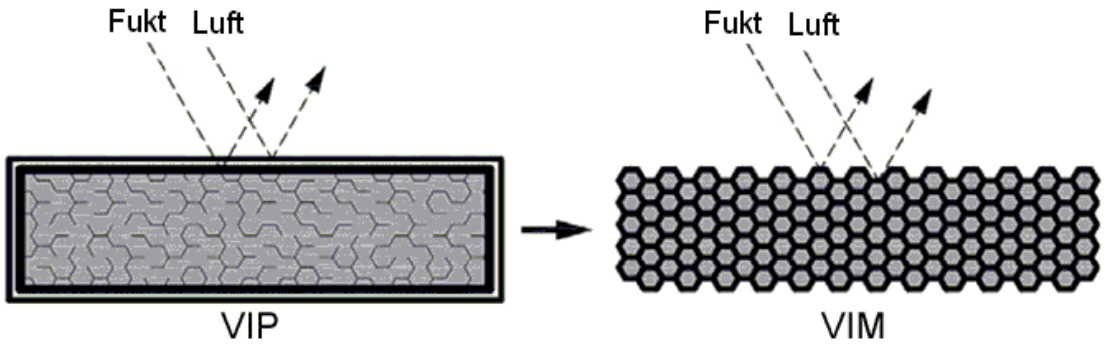
Val av barriärfilm bestämmer värmeledningsförmågan runt panelens kanter samt omfattningen av diffusion av luft och vatten in i panelen. En barriärfilm med flera skikt av metalliserade polymerfilmer är att föredra då den oftast ger upphov till en lägre effektiv värmeledningsförmåga och är mindre känslig mot mekanisk åverkan än en barriärfilm bestående av aluminiumfolie. För de två valda panelerna i rapporten blev den beräknade ökningen av den effektiva värmeledningsförmågan ca 1,5 *m*W/mK (panel A) respektive 0,3 *m*W/mK (panel B) om aluminiumfolie användes som barriärmaterial (se Kapitel 8.1.1 och 8.1.2).

Panelens dimensioner eftersom värmeledningsförmågan och permeabiliteten är högre längs med panelens kanter bör omkretsen i förhållande till panelarean vara så låg som möjligt. Detta innebär att panelerna skall vara så stora som möjligt och att en

kvadratisk form är att föredra. Möjliga dimensioner varierar självklart beroende på vart i konstruktionen panelerna skall placeras. Skall panelerna exempelvis placeras emellan reglar blir således en längddimension låst. Tillverkare har olika standarddimensioner men kan ofta erbjuda beställningar av paneler med önskade dimensioner inom vissa intervall. Skall paneler med specialbeställda mått användas innebär det ofta en högre kostnad. Ett råd kan därför vara att använda sig av största möjliga standarddimensioner.

Andra aspekter som också påverkar den effektiva värmeledningsförmågan är panelens kärnmaterial, monteringen, angränsande material och de yttre förutsättningarna. I dagsläget används nästan uteslutande förångad kiseldioxid (fumed silica) som kärnmaterial, då det är minst känsligt mot ett stigande invändigt tryck. Med ett öppenporigt kärnmaterial krävs en tät omslutande barriärfilm som förhindrar en invändig tryckökning. Detta lägger stora begränsningar på tillämpningen i byggnadsbranschen. Traditionella isoleringsmaterial kan beställas i massor och skäras till på plats. Använder man VIP måste man i förväg beräkna och tillverka varje vakuumisoleringspanel med precisa mått eftersom anpassning på plats inte är möjligt. Användningen av VIP kräver därför ett tidigt system-tänk redan under projekteringsskedet. Det finns olika slags monteringssätt och -anordningar beroende på paneltyp och tillverkare. Valet av monteringslösning är viktigt då dessa kan ge upphov till ytterligare köldbryggor. En praktisk lösning för att minimera köldbryggor som uppstår vid eventuella glipor mellan paneler och angränsande material, exempelvis någon slags värmeisolerande fogmassa, vore därför efterfrågad. När det gäller angränsande material till panelens kanter bör man undvika stål och andra material med hög värmeledningsförmåga då dessa förstärker effekten av köldbryggorna (ANNEX 39A, 2005). Man bör även utföra konstruktioner på ett sådant sätt att de fortfarande kan uppfylla alla funktionskrav även om en panel blir punkterad.

En lösning på dessa problem kan vara så kallade VIM´s (Vakuumisoleringsmaterial) som presenterades i forskningsartikeln ”Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond” i journalen Energy and Buildings 2010. VIM är finporösa material försatta i vakuum, liknande kärnmaterialen i VIP, men med skillnaden att de har en stängd porstruktur. Detta medför att kärnmaterialet inte är beroende av en omslutande barriärfilm vilket innebär att de kan skäras och anpassas på plats. Svårigheten ligger i att få ett vakuum i den stängda porstrukturen. Detta tror man kunna åstadkomma genom att tillverkningsprocessen av kärmaterialets porer sker under vakuum eller genom att skapa en kemisk bindning av luft i materialet (Baetens et al, 2005). Se Figur 35.



Figur 35 *Illustration av utvecklingen från vakuumisoleringspaneler (VIP) till vakuumisoleringsmaterial (VIM). (Baetens et al, 2005)*

6 SLUTSATSER

- Val av VIP barriärfilm och dimensioner avgörande för värmeledningsförmåga.
- VIP placering är avgörande för fukttillståndet i konstruktionen.
- Ekonomin kring VIP bör utredas vidare med hänsyn till produktionskostnad.
- VIP bra komplement vid begränsat utrymme, t ex nybyggnation i stadskärnor och energieffektivisering av byggnadsbeståndet.

Studien visar att placeringen av VIP i väggkonstruktionen har betydelse i ett fuktteknisk perspektiv. När VIP appliceras långt ut i konstruktionen där en lägre lufttemperatur råder ökar risken för att kritiska relativa ånghaltsnivåer uppstår vilket i sin tur kan leda till att kondens och/eller mögeltillväxt på organiska material uppkommer. När VIP appliceras en bit utanför PE-folien skapas ett mellanrum där eventuell fuktig luft får svårt att vandra ut på grund av materialens höga ånggenomgångsmotstånd. Med detta riskerar man också att bygga in eventuell byggfukt från byggnadsmaterial som är applicerat i mellanrummet. Ju lägre lufttemperaturen i detta mellanrum är desto mindre fukt klarar luften av att hålla i gasform vilket resulterar i att den relativa fuktigheten stiger.

På grund av vakuumisoleringspanelernas låga värmekonduktivitet har det varit möjligt att konstruera utfackningsväggar med en tjocklek som motsvarar 2/3 delar av tjockleken på studiens referensvägg inrymmande endast mineralull. I dessa fall har också U-värdet för väggkonstruktionerna inrymmande VIP visat sig vara något bättre än referensväggens U-värde. Vakuumisoleringspanelerna som har studerats i denna studie har emellertid en relativt kort livslängd (30-50 år) vilket kan leda till att vakuumisoleringspanelen måste bytas ut eller kompletteras under byggnadens livslängd för att projekterat U-värde ska kunna bibehållas.

Livslängden på VIP försvårar också bedömningen huruvida det finns en ekonomisk fördel i att använda VIP eller ej. Studiens beräkningar visar att materialkostnaden för väggkonstruktionerna inrymmande VIP är ca tre gånger så dyr som för referensväggen. Studien visar också att de ökade materialkostnaderna för väggkonstruktionerna inrymmande VIP återbetalas relativt enkelt med hjälp av inkomster från den intjänade boytan. Beräkningarna tar dock endast hänsyn till ytterväggens ökade materialkostnader, och inte de extra kostnader som uppstår för byggnation av markplatta, mellanbjälklag samt tak för den intjänade boytan. Vidare har ingen hänsyn tagits till produktionskostnader samt eventuella underhållsarbeten då vakuumisoleringspanelernas livslängd är förbrukad. Författarna till studien anser därför att det behöver utföras djupare studier av ekonomisk aspekt för en säkrare bedömning huruvida det finns en ekonomisk fördel i att använda VIP eller ej.

Förslag till vidare studier:

Monteringsprinciper med VIP

Vidare studier av VIP som tilläggsisolering

Livscykelkostnadsanalys av projekt med vakuumisoleringspaneler

7 REFERENSER

Artiklar/Publikationer

(ANNEX 39 A, 2005) = Simmler, H., Brunner, S., Heinemann, U., Schwab, H., Kumaran, K., Mukhopadhyaya, P., et al. 2005. Vacuum Insulation Panels. Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A): IEA/ECBCS Annex 39.

(ANNEX 39 B, 2005) = Binz, A., Moosmann, A., Steinke, G., Schonhardt, U., Fregnan, F., Simmler, H., et al. 2005. Vacuum Insulation in the Building Sector. Systems and Applications (Subtask B): IEA/ECBCS Annex 39.

Baetens, R., Jelle, B. P., Thue, J. V., Tenpierik, M. J., Grynning, S., Uvsløkk, S., et al. 2010. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. Energy and Buildings, 42(2), 147-172.

Clase, M. & Lindén, E. 2010. Inventering och utvärdering av högpresterande isolering. Förstudie. FoU-Väst Rapport, 1402-7410; 1002. Göteborg: Sveriges byggindustrier.

M. Ehrmanntraut, PUR based vacuum insulation panels, in: Proceedingsto the VIA Symposium, Vacuum Insulation Association, Washington, DC, Juni, 2003.

Fricke, J., Heinemann, U., & Ebert, H. P. 2008. Vacuum insulation panels - From research to market. Vacuum, 82(7), 680-690.

Ghazi Wakili, K., Bundi, R., & Binder, B. 2004. Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels. Building Research and Information, 32(4), 293-299.

Grynning, S., Baetens, R., Jelle, B., Gustavsen, A., Uvsløkk, S., & Meløysund, V. 2009. Vakuumisolasjonspaneler for bruk i bygninger – Egenskaper, krav og muligheter [Vacuum insulation panels for building applications: Properties, requirements and possibilities] Oslo: SINTEF Byggforsk.

Simmler, H., & Brunner, S. 2005. Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life. Energy and Buildings, 37(11 SPEC. ISS.), 1122-1131.

Thorsell, T. I. 2006. Vacuum Insulation in Buildings - Means to Prolong the Service Life. Stockholm: Royal Institute of Technology, Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Building Technology.

Böcker

Enno, A och A Elmroth (2008) *Byggnaden som system*. Forskningsrådet Formas, Stockholm.

Elmroth, A (2009) *ENERGIHUSHÅLLNING OCH VÄRMEISOLERING*. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Nilsson, L-O (2007) *FUKT,* AB Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Nilsson, L-O (2006) *Fuktpåverkan på material – Kritiska fuktnivåer*. Formas, Stockholm.

Petersson, B-Å (2007) *Tillämpad byggnadsfysik*. Studentlitteratur AB, Lund.

Examensarbete

Nyberg, H (2011) *Thermal bridges at foundations: Evaluation of the heat loss calculation methods.* Göteborg: Chalmers tekniska högskola. (Mastersexamensarbete inom avdelningen för byggnadsteknologi).

Föreläsningar/Seminarier

Skanskas seminarium för framtida isoleringsmaterial, Gårdaskrapan, 2011-04-20

Muntliga Källor

Edeús, G (Termo Teknik Edéus AB) E-postkontakt 2011

Gustafson, R. (Projektledare Skanska Bostad Göteborg) Personlig kommunikation, 2011

Hagentoft, C-E. (Professor i byggnadsfysik, Chalmers) Personlig kommunikation, 2011

Johansson, P. (Doktorand byggnadsteknologi, Chalmers) Personlig kommunikation, 2011

Möller, K. (Konsult WSP Environmental) Personlig kommunikation, 2011-01-31

Ramestam, L (T Knutsson AB) E-postkontakt 2011

Webbkällor

Bauphysik (2004), Hygrothermal calculation procedure [www]. Hämtat från: http://www.bauphysik-software.de/downl/maierthomas_ISO13788.pdf (2011-05-20)

Blocon (2011), *HEAT2 – Heat transfer in two dimensions* [www]. Hämtat från: http://www.buildingphysics.com/index-filer/heat2.htm (2011-05-14)

Boverket (2011), *Om Boverket* [www]. Hämtat från: http://www.boverket.se/Om-Boverket/ 2011-05-16

Energimyndigheten (2010a), *Energianvändningen per sektor* [www]. Hämtat från: http://energikunskap.se/sv/FAKTABASEN/Energi-i-Sverige/Energianvandning-per-sektor/ (2011-03-20)

Energimyndigheten (2010b), *Bostäder och service* [www]. Hämtat från: http://energikunskap.se/sv/FAKTABASEN/Energi-i-Sverige/Energianvandning-per-sektor/Bostader-och-service/ (2011-04-26)

Naturvårdsverket (2011) *Energianvändning m. m. i byggnader* (2020/2050)

[www]. Hämtat från: http://www.miljomal.se/15-God-bebyggd-miljo/Delmal/Energianvandning-m-m-i-byggnader-20202050/ (2011-02-23)

Paroc AB (2011), *Energiklokt Hus* [www]. Hämtat från: http://www.energiaviisastalo.fi/energywise/se/?cat=Byggnader+och+klimatf%F6r%E4ndringar&id=308 (2011-04-26)

SABO (2010), *Trubbigt kräva halverad energianvändning vid varje större ombyggnad* [www]. Hämtat från: http://www.sabo.se/aktuellt/nyheter_s/2010/aug/Sidor/Trubbigt_halveradenergianv.aspx

Saint-Gobain Isover AB (2011), *Vad är mineralull?* [www]. Hämtat från: http://www.isover.se/produkter/vad+%C3%A4r+mineralull-c7- (2011-05-19)

Va-Q-Tec (2011), *Vacuum insulation panels* [www]. Hämtat från:

http://www.va-q-tec.com/paneele_en.html (2011-05-30)

Vip-bau (2011), *Vacuum insulation panels: Background* [www]. Hämtat från:

http://www.vip-bau.de/e_pages/technology/vip/background.htm (2011-05-03)

Vip-bau (2006), *What´s a VIP?* [www]. Hämtat från:

http://www.vip-bau.ch/index.php?id=78&L=1 (2011-04-03)

Figurer

Figur 1

Paroc AB (2011) Byggisolering – Värme – Miljö. *paroc.se*. Hämtat från: http://www.paroc.se/channels/se/building+insulation/design+guidelines/thermal+insulation/environment.asp (2011-04-26)

Figur 2

Saint-Gobain Isover AB (2011) Vad är mineralull? *isover.se*. Hämtat från: http://www.isover.se/produkter/vad+%C3%A4r+mineralull-c7- (2011-05-19)

Figur 3

Cauberg, M.J. Tenpierik, A 4.1 Vacuumisolatiepanelen en andere noviteiten, in: D.W. Dicke, E.M. Haas (Eds.), Praktijkhandboek Duurzaam Bouwen, Weka Publishers, Amsterdam, Netherlands, 2005, , 4.1 VAC 1-20.

Figur 4

Baetens, R., Jelle, B. P., Thue, J. V., Tenpierik, M. J., Grynning, S., Uvsløkk, S., et al. 2010. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. Energy and Buildings, 42(2), 147-172.

Figur 5

H. Simmler, S. Brunner, U. Heinemann, H. Schwab, K. Kumaran, Ph. Mukhopadhyaya, D. Que´ nard, H. Salle´ e, K. Noller, E. Kucukpinar-Niarchos, C. Stramm, M.J. Tenpierik, J.J.M. Cauberg, M. Erb, Vacuum Insulation Panels. Study on VIPcomponents and Panels for Service Life Prediction in Building Applications

(Subtask A), Final Report for the IEA/ECBCS Annex 39 HiPTI-project (High Performance Thermal Insulation for Buildings and Building Systems), 2005a.

Figur 6

Grynning, S., Baetens, R., Jelle, B., Gustavsen, A., Uvsløkk, S., & Meløysund, V. 2009. Vakuumisolasjonspaneler for bruk i bygninger – Egenskaper, krav og muligheter [Vacuum insulation panels for building applications: Properties, requirements and possibilities] Oslo: SINTEF Byggforsk.

Figur 7

vip-bau (2011) Hämtat från:

http://www.vip-bau.ch/fileadmin/user_upload/Bilder/BilderInhalt/fig13.jpg (2011-05-31)

Figur 8

Tenpierik, M.J., Cauberg, J.J.M., Thorsell, T.I. Integrating vacuum insulation panels in building constructions: an integral perspective, Construction Innovation 7 (1) (2007) 38–53.

Figur 9

Förbo (2011) Nyproduktion – Höjdenvändan. *foerbo.se*. Hämtat från: http://www.foerbo.se/Startsida/Nyproduktion/Hojdenvandan__Lerum (2011-02-12)

Figur 19

Bauphysik (2004), Hygrothermal calculation procedure [www]. Hämtat från: http://www.bauphysik-software.de/downl/maierthomas_ISO13788.pdf (2011-05-20)

Figur 35

Baetens, R., Jelle, B. P., Thue, J. V., Tenpierik, M. J., Grynning, S., Uvsløkk, S., et al. 2010. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. Energy and Buildings, 42(2), 147-172.

Figur 46

Nyberg, H (2011) *Thermal bridges at foundations: Evaluation of the heat loss calculation methods.* Göteborg: Chalmers tekniska högskola. (Mastersexamensarbete inom avdelningen för byggnadsteknologi).

BILAGOR

Bilaga 1: Vakuumisoleringspaneler

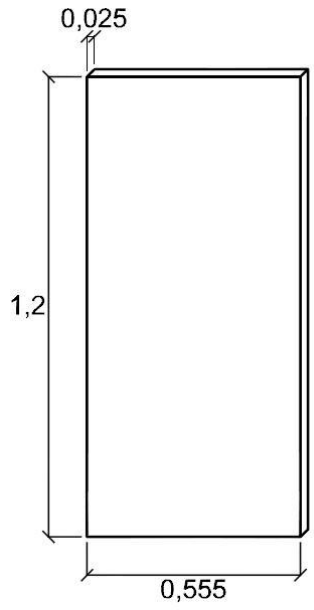
För att räkna ut vakuumpanelernas effektiva värmeledningsförmåga efter 25 år har ekvation 2.5 (se Kapitel 2.3.2) använts:

$$\lambda_{eff} = \lambda_c + \Delta_{kant} = \lambda_c + \psi(d) \cdot d \cdot p/A$$

Beräkningarna är gjorda för två vakuumisoleringspaneler, panel A och B, i olika dimensioner. Båda med en tjocklek av 25 mm, en kärna av förångad kiseldioxid (fumed silicia) och en barriärfilm av metalliserade polymerfilmer. Värdet som har använts för värmeledningsförmåga i centrum av panelerna λ_c är 8 mW/mK. Den linjära värmegenomgångskoefficienten längs med panelernas kanter $\psi(d)$ = 0,006 W/mK. I *bilaga 1* redovisas beräkningar av den effektiva värmeledningsförmågan för ovanstående paneler med en barriärfilm av aluminium.

Panel A

Panelen används i väggkonstruktion 1,2 och 3. Panel A fästs mellan reglar med ett centrum till centrum mått på 600 mm. Panel har dimensionerna 0,555 x 1,2 x 0,025 och illustreras i Figur 36.



Figur 36 Vakuumisoleringspanel A.

$A = 0{,}555 \cdot 1{,}2 = 0{,}666\ m^2$

$p = 2 \cdot 0{,}555 + 2 \cdot 1{,}2 = 3{,}51\ m$

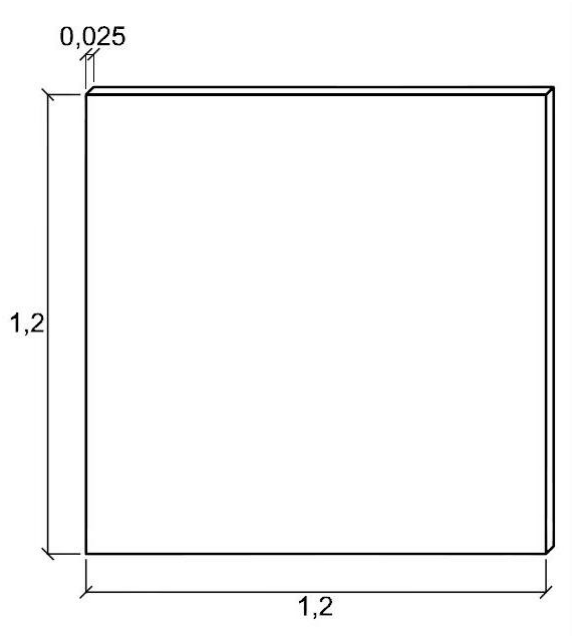
$$\lambda_{eff} = 0{,}008 + 0{,}006 \cdot 0{,}025 \cdot \frac{3{,}51}{0{,}666} = 0{,}0088\, W/mK$$

Effektiv värmeledningsförmåga med barriärfilm av aluminium

$$\lambda_{eff} = 0{,}006 + 0{,}033 \cdot 0{,}025 \cdot \frac{3{,}51}{0{,}666} = 0{,}0103\, W/mK$$

Panel B

Panelen används i väggkonstruktion 4 och 5. Panel B monteras i ett obrutet skikt, limmas mot stående reglar och tejpas i skarvar. Panelen har dimensionerna 1,2 x 1,2 x 0,025 och illustreras i Figur 37.



Figur 37 Vakuumisoleringspanel B.

$A = 1{,}2 \cdot 1{,}2 = 1{,}44\, m^2$

$p = 4 \cdot 1{,}2 = 4{,}8\, m$

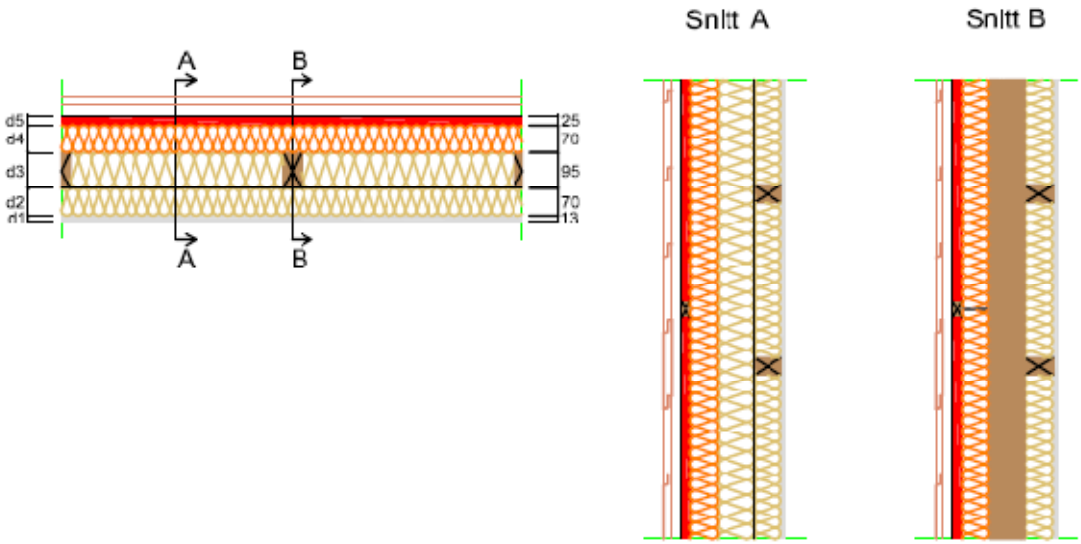
$$\lambda_{eff} = 0{,}008 + 0{,}006 \cdot 0{,}025 \cdot \frac{4{,}8}{1{,}44} = 0{,}0085\, W/mK$$

Effektiv värmeledningsförmåga med barriärfilm av aluminium

$$\lambda_{eff} = 0{,}006 + 0{,}033 \cdot 0{,}025 \cdot \frac{4{,}8}{1{,}44} = 0{,}0088\, W/mK$$

Bilaga 2: Beräkningar av värmemotstånd och U-värden

Väggkonstruktion 1



Materialandelar i respektive skikt (Lambdavärdesmetoden):

Skikt 1:

P_{gips} = 1,0

Skikt 2:

$$P_{mineralull} = \frac{405}{450} = 0{,}9$$

$$P_{träreglar} = \frac{45}{450} = 0{,}1$$

Skikt 3:

$$P_{mineralull} = \frac{555}{600} = 0{,}925$$

$$P_{träreglar} = \frac{45}{600} = 0{,}0750$$

Skikt 4:

$$P_{vip} = \frac{555}{600} = 0{,}925$$

$$P_{träreglar} = \frac{45}{600} = 0{,}0750$$

Skikt 5:

$P_{mineralull}$ = 1,0

Skiktens sammanlagda lambdavärde (W/mK):

λ_1=1,0 · 0,22 = 0,22

λ_2=0,9 · 0,037 + 0,1 · 0,14 = 0,0473

λ_3=0,925 · 0,037 + 0,075 · 0,14 = 0,0447

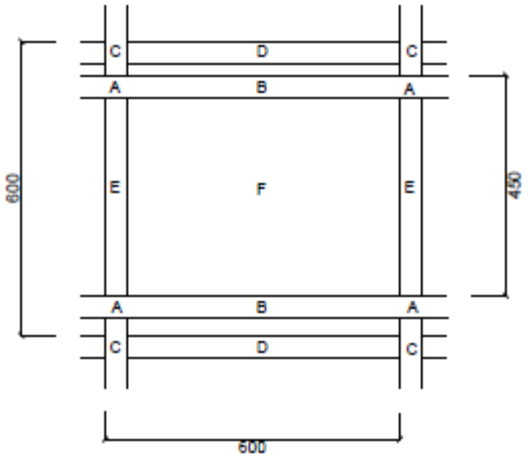
λ_4= 0,925 · 0,0088 + 0,075 · 0,14 = 0,0186

λ_5= 1,0 · 0,033 = 0,033

Värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T^{\lambda} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}0473} + \frac{0{,}095}{0{,}0447} + \frac{0{,}025}{0{,}0186} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 7{,}5$$

Material i respektive snitt (U-värdesmetoden):



Snitt A: gips – träregel – träregel – VIP – mineralull

Snitt B: gips – träregel – mineralull – VIP – mineralull

Snitt C: gips – mineralull – träregel – träregel – mineralull

Snitt D: gips – mineralull – mineralull – träregel – mineralull

Snitt E: gips – mineralull – träregel – VIP – mineralull

Snitt F: gips – mineralull – mineralull – VIP – mineralull

Värmemotstånd i respektive snitt (m^2K/W):

$$R_{TA} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_3}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_4}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + \frac{0{,}095}{0{,}14} + \frac{0{,}025}{0{,}0088} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 5{,}902$$

$$R_{TB} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + \frac{0{,}095}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}0088} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 8{,}459$$

$$R_{TC} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_4}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}095}{0{,}14} + \frac{0{,}025}{0{,}14} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 5{,}299$$

$$R_{TD} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}095}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}14} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 7{,}188$$

$$R_{TE} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_4}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}095}{0{,}14} + \frac{0{,}025}{0{,}0088} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 5{,}405$$

$$R_{TF} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}095}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}0088} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 9{,}851$$

Respektive snitts ytandel:

$$P_A = \frac{45 \cdot 56{,}3}{600 \cdot 600} = 0{,}00704$$

$$P_B = \frac{555 \cdot 56{,}3}{600 \cdot 600} = 0{,}0868$$

$$P_C = \frac{45 \cdot 45}{600 \cdot 600} = 0{,}00563$$

$$P_D = \frac{555 \cdot 45}{600 \cdot 600} = 0{,}0694$$

$$P_E = \frac{45 \cdot 499}{600 \cdot 600} = 0{,}0624$$

$$P_F = 1{,}0 - (P_A + P_B + P_C + P_D + P_E)$$
$$= 1{,}0 - (0{,}00704 + 0{,}0868 + 0{,}00563 + 0{,}0694 + 0{,}0624) = 0{,}766$$

Värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T^U = P_A \cdot R_{TA} + P_B \cdot R_{TB} + P_C \cdot R_{TC} + P_D \cdot R_{TD} + P_E \cdot R_{TE} + P_F \cdot R_{TF}$$
$$= 0{,}00704 \cdot 5{,}902 + 0{,}0868 \cdot 8{,}459 + 0{,}00563 \cdot 5{,}299 + 0{,}0694 \cdot 7{,}188$$
$$+ 0{,}0624 \cdot 5{,}405 + 0{,}766 \cdot 9{,}851 = 9{,}188$$

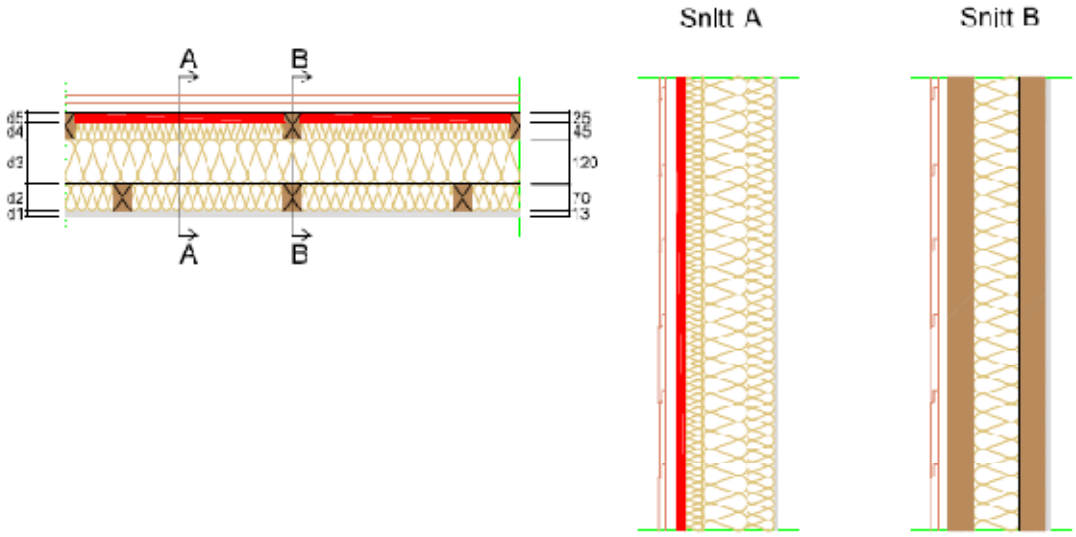
Sammanvägt värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T = \frac{R_T^\lambda + R_T^U}{2} = \frac{7{,}50 + 9{,}188}{2} = 8{,}344$$

U-värde (W/m^2K):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{8{,}344} = 0{,}120$$

Väggkonstruktion 2



Materialandelar i respektive skikt (Lambdavärdesmetoden):

Skikt 1:

P_{gips} = 1,0

Skikt 2:

$$P_{mineralull} = \frac{405}{450} = 0{,}9$$

$$P_{träreglar} = \frac{45}{450} = 0{,}1$$

Skikt 3:

$$P_{mineralull} = \frac{555}{600} = 0{,}925$$

$$P_{träreglar} = \frac{45}{600} = 0{,}0750$$

Skikt 4:

$P_{mineralull}$ = 1,0

Skikt 5:

$$P_{vip} = \frac{555}{600} = 0{,}925$$

$$P_{träreglar} = \frac{45}{600} = 0{,}0750$$

Skiktens sammanlagda lambdavärde (W/mK):

λ_1=1,0 · 0,22 = 0,22

λ_2=0,9 · 0,037 + 0,1 · 0,14 = 0,0473

λ_3=0,925 · 0,037 + 0,075 · 0,14 = 0,0447

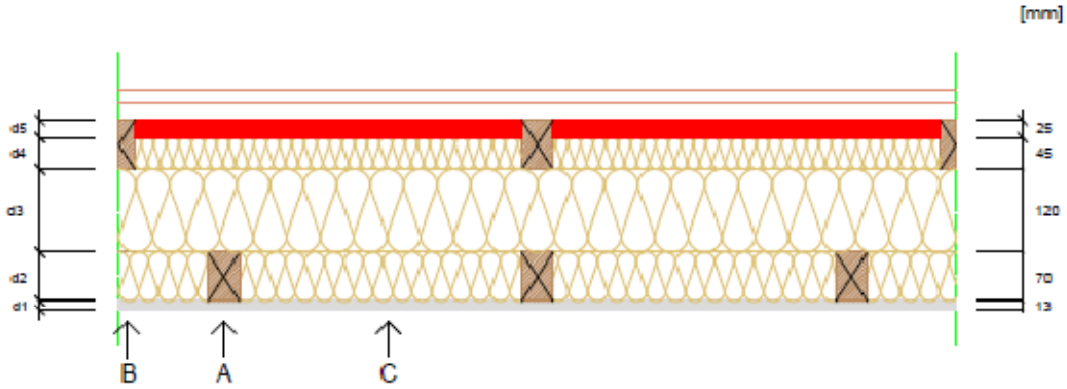
λ_4=1,0 · 0,033 = 0,033

λ_5=0,925 · 0,0088 + 0,075 · 0,14 = 0,0186

Värmemotstånd (m^{2}K/W):

$$R_T^{\lambda} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}0473} + \frac{0{,}095}{0{,}0447} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + \frac{0{,}025}{0{,}0186} + 0{,}20 + 0{,}04 = 7{,}50$$

Material i respektive snitt (U-värdesmetoden):



Snitt A: gips – träregel – mineralull – mineralull – VIP

Snitt B: gips – mineralull – mineralull – träregel

Snitt C: gips – mineralull – mineralull – mineralull – VIP

Värmemotstånd i respektive snitt (m^{2}K/W):

$$R_{TA} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_5}{\lambda_{VIP}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + \frac{0{,}120}{0{,}037} + \frac{0{,}045}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}0088} + 0{,}20 + 0{,}04 = 8{,}230$$

$$R_{TB} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{träregel}} + R_{luftspalt} + R_{se} =$$
$$0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}120}{0{,}037} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + 0{,}20 + 0{,}04 = 6{,}064$$

$$R_{TC} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_5}{\lambda_{VIP}} + R_{luftspalt} +$$
$$R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}120}{0{,}037} + \frac{0{,}045}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}0088} + 0{,}20 + 0{,}04 = 9{,}621$$

Respektive snitts ytandel:

$$P_A = \frac{56{,}3}{600} = 0{,}0938$$

$$P_B = \frac{45}{600} = 0{,}075$$

$$P_C = 1{,}0 - (P_A + P_B) = 1{,}0 - (0{,}0938 + 0{,}075) = 0{,}831$$

Värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T^U = P_A \cdot R_{TA} + P_B \cdot R_{TB} + P_C \cdot R_{TC} = 0{,}0938 \cdot 8{,}23 + 0{,}075 \cdot 6{,}064 + 0{,}831 \cdot 9{,}621 = 9{,}222$$

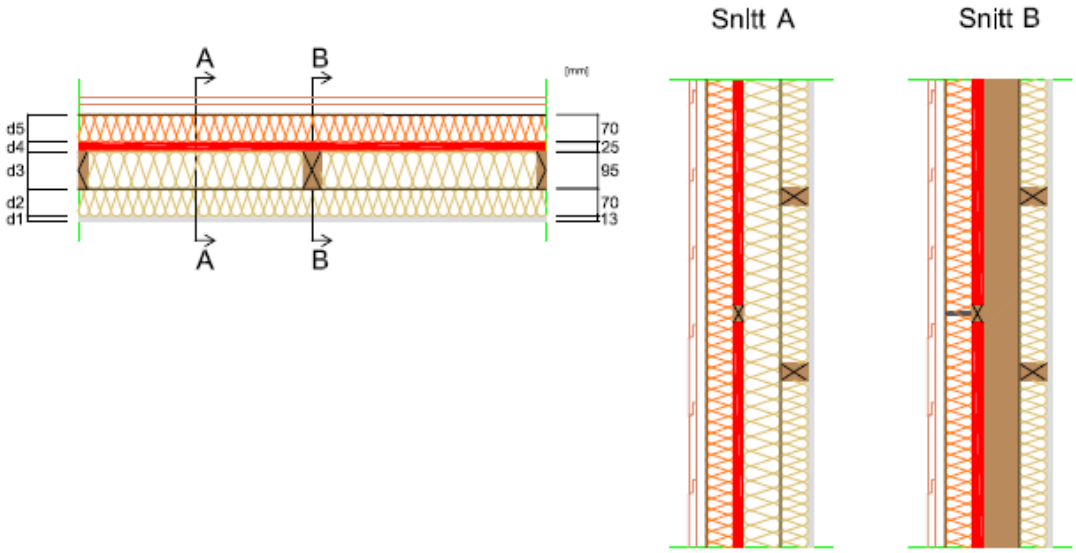
Sammanvägt värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T = \frac{R_T^\lambda + R_T^U}{2} = \frac{7{,}503 + 9{,}222}{2} = 8{,}362$$

U-värde (W/m^2K):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{8{,}362} = 0{,}12$$

Väggkonstruktion 3



Materialandelar i respektive skikt (Lambdavärdesmetoden):

Skikt 1:

P_{gips} = 1,0

Skikt 2:

$$P_{mineralull} = \frac{405}{450} = 0{,}9$$

$$P_{träreglar} = \frac{45}{450} = 0{,}1$$

Skikt 3:

$P_{mineralull}$ = 1,0

Skikt 4:

$$P_{mineralull} = \frac{555}{600} = 0{,}925$$

$$P_{träreglar} = \frac{45}{600} = 0{,}0750$$

Skikt 5:

$$P_{vip} = \frac{555}{600} = 0{,}925$$

$$P_{träreglar} = \frac{45}{600} = 0{,}0750$$

Skiktens sammanlagda lambdavärde (W/mK):

λ_1=1,0 · 0,22 = 0,22

λ_2=0,9 · 0,037 + 0,1 · 0,14 = 0,0473

λ_3=1,0 · 0,037 = 0,037

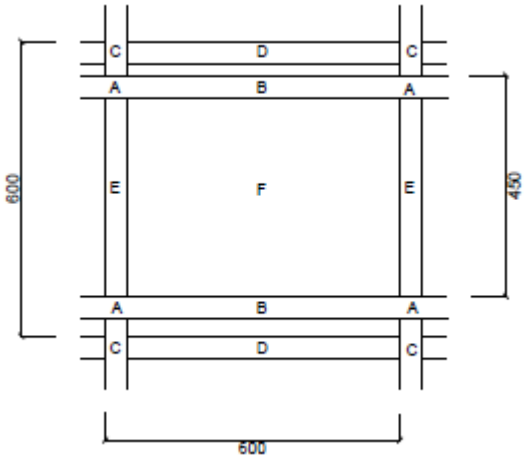
λ_4=0,925 · 0,037 + 0,075 · 0,14 = 0,0447

λ_5=0,925 · 0,0088 + 0,075 · 0,14 = 0,0186

Värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T^{\lambda} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}0473} + \frac{0{,}120}{0{,}037} + \frac{0{,}045}{0{,}0447} + \frac{0{,}025}{0{,}0186} + 0{,}20 + 0{,}04 = 7{,}503$$

Material i respektive snitt (U-värdesmetoden):



Snitt A: gips – träregel – träregel – mineralull – VIP

Snitt B: gips – träregel – mineralull – mineralull – VIP

Snitt C: gips – mineralull – träregel – mineralull – träregel

Snitt D: gips – mineralull – mineralull – mineralull – träregel

Snitt E: gips – mineralull – träregel – mineralull – VIP

Snitt F: gips – mineralull – mineralull – mineralull – VIP

Värmemotstånd i respektive snitt (m^2K/W):

$$R_{TA} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_3}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_4}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_5}{\lambda_{VIP}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + \frac{0{,}095}{0{,}14} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + \frac{0{,}025}{0{,}0088} + 0{,}20 + 0{,}04 = 6{,}570$$

$$R_{TB} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_5}{\lambda_{VIP}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + \frac{0{,}095}{0{,}037} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + \frac{0{,}025}{0{,}0088} + 0{,}20 + 0{,}04 = 8{,}459$$

$$R_{TC} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_4}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_5}{\lambda_{träregel}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}095}{0{,}14} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + \frac{0{,}025}{0{,}14} + 0{,}20 + 0{,}04 = 5{,}299$$

$$R_{TD} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_5}{\lambda_{träregel}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}095}{0{,}037} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + \frac{0{,}025}{0{,}14} + 0{,}20 + 0{,}04 = 7{,}188$$

$$R_{TE} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_4}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_5}{\lambda_{VIP}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}095}{0{,}14} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + \frac{0{,}025}{0{,}0088} + 0{,}20 + 0{,}04 = 7{,}961$$

$$R_{TF} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_5}{\lambda_{VIP}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}095}{0{,}037} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + \frac{0{,}025}{0{,}0088} + 0{,}20 + 0{,}04 = 9{,}850$$

Respektive snitts ytandel:

$$P_A = \frac{45 \cdot 56{,}3}{600 \cdot 600} = 0{,}00704$$

$$P_B = \frac{555 \cdot 56{,}3}{600 \cdot 600} = 0{,}0868$$

$$P_C = \frac{45 \cdot 45}{600 \cdot 600} = 0{,}00563$$

$$P_D = \frac{555 \cdot 45}{600 \cdot 600} = 0{,}0694$$

$$P_E = \frac{45 \cdot 499}{600 \cdot 600} = 0{,}0624$$

$$P_F = 1{,}0 - (P_A + P_B + P_C + P_D + P_E)$$
$$= 1{,}0 - (0{,}00704 + 0{,}0868 + 0{,}00563 + 0{,}0694 + 0{,}0624) = 0{,}766$$

Värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T^U = P_A \cdot R_{TA} + P_B \cdot R_{TB} + P_C \cdot R_{TC} + P_D \cdot R_{TD} + P_E \cdot R_{TE} + P_F \cdot R_{TF}$$
$$= 0{,}00704 \cdot 6{,}570 + 0{,}0868 \cdot 8{,}459 + 0{,}00563 \cdot 5{,}299 + 0{,}0694 \cdot 7{,}188$$
$$+ 0{,}0624 \cdot 7{,}961 + 0{,}766 \cdot 9{,}850 = 9{,}351$$

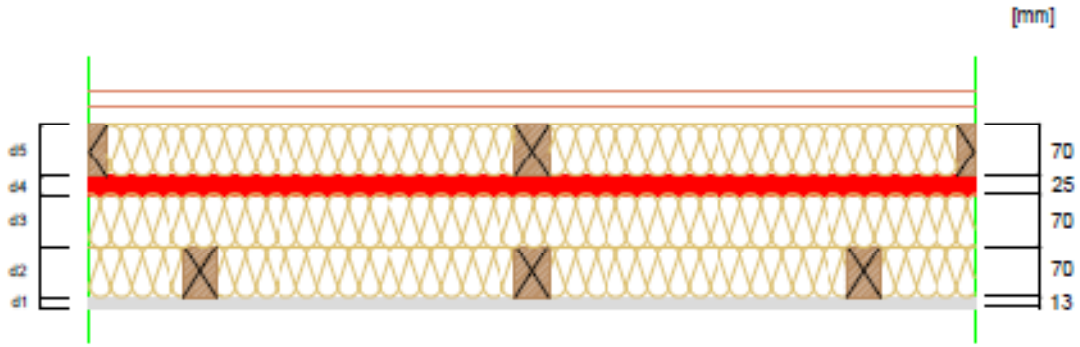
Sammanvägt värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T = \frac{R_T^\lambda + R_T^U}{2} = \frac{7{,}50 + 9{,}351}{2} = 8{,}425$$

U-värde (W/m^2K):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{8{,}425} = 0{,}119$$

Väggkonstruktion 4



Materialandelar i respektive skikt (Lambdavärdesmetoden):

Skikt 1:

P_{gips} = 1,0

Skikt 2:

$P_{mineralull} = \frac{405}{450} = 0{,}9$

$P_{träreglar} = \frac{45}{450} = 0{,}1$

Skikt 3:

$P_{mineralull}$ = 1,0

Skikt 4:

P_{vip} = 1,0

Skikt 5:

$P_{mineralull} = \frac{555}{600} = 0{,}925$

$P_{träreglar} = \frac{45}{600} = 0{,}0750$

Skiktens sammanlagda lambdavärde (W/mK):

λ_1=1,0 · 0,22 = 0,22

λ_2=0,9 · 0,037 + 0,1 · 0,14 = 0,0473

λ_3= 1,0 · 0,037 = 0,037

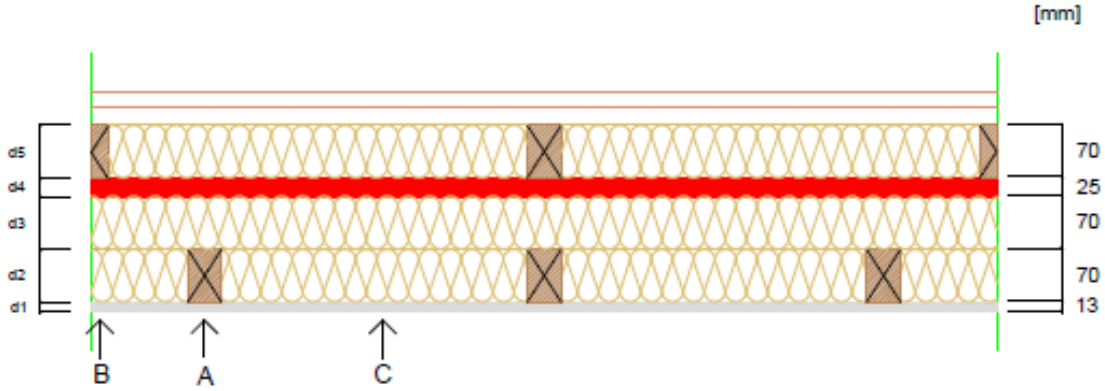
λ_4=1,0 · 0,0085 = 0,0085

λ_5=0,925 · 0,033 + 0,075 · 0,14 = 0,0410

Värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T^{\lambda} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}0473} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}0085} + \frac{0{,}07}{0{,}0410} + 0{,}20 + 0{,}04 = 8{,}449$$

Material i respektive snitt (U-värdesmetoden):



Snitt A: gips – träregel – mineralull – VIP – mineralull

Snitt B: gips – mineralull – mineralull – VIP – träregel

Snitt C: gips – mineralull – mineralull – VIP – mineralull

Värmemotstånd i respektive snitt (m^2K/W):

$$R_{TA} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}0085} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 7{,}883$$

$$R_{TB} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_5}{\lambda_{träregel}} + R_{luftspalt} +$$
$$R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}0085} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + 0{,}20 + 0{,}04 = 7{,}654$$

$$R_{TC} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} +$$
$$R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}0085} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 9{,}275$$

Respektive snitts ytandel:

$$P_A = \frac{56{,}3}{600} = 0{,}0938$$

$$P_B = \frac{45}{600} = 0{,}075$$

$$P_C = 1{,}0 - (P_A + P_B) = 1{,}0 - (0{,}0938 + 0{,}075) = 0{,}831$$

Värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T^U = P_A \cdot R_{TA} + P_B \cdot R_{TB} + P_C \cdot R_{TC}$$
$$= 0{,}0938 \cdot 7{,}883 + 0{,}075 \cdot 7{,}654 + 0{,}831 \cdot 9{,}275 =$$
$$= 9{,}021$$

Sammanvägt värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T = \frac{R_T^\lambda + R_T^U}{2} = \frac{8{,}449 + 9{,}021}{2} = 8{,}735$$

U-värde (W/m^2K):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{8{,}715} = 0{,}114$$

Beräkning av U-värde för väggk. 4 innehållande punkterad VIP:

Det finns en risk att vakuumisoleringspaneler punkteras vilket förstås försämrar värmemotståndet i väggkonstruktionen. Följande beräkningar bygger på exakt samma beräkningsmetod som föregående uträkning men med skillnaden att värmekonduktivitet för punkterad VIP har använts i beräkningarna. Värmekonduktiviteten som använts för punkterad VIP är av värdet 0,020 W/mK. Följande beräkning är något kortfattad och baseras på föregående beräkningsgång för väggkonstruktion 4.

Skiktens sammanlagda värmekonduktivitet (Lambdavärdesmetoden, W/mK):

λ_1=1,0 · 0,22 = 0,22

λ_2=0,9 · 0,037 + 0,1 · 0,14 = 0,0473

λ_3= 1,0 · 0,037 = 0,037

λ_4=1,0 · 0,020 = 0,020

λ_5=0,925 · 0,033 + 0,075 · 0,14 = 0,0410

Värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T^{\lambda} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}0473} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}020} + \frac{0{,}07}{0{,}0410} + 0{,}20 + 0{,}04 = 6{,}758$$

Värmemotstånd i respektive snitt (U-värdesmetoden):

$$R_{TA} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}020} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 6{,}192$$

$$R_{TB} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_5}{\lambda_{träregel}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}020} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + 0{,}20 + 0{,}04 = 5{,}963$$

$$R_{TC} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_4}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}020} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 7{,}584$$

Värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T^U = P_A \cdot R_{TA} + P_B \cdot R_{TB} + P_C \cdot R_{TC}$$
$$= 0{,}0938 \cdot 6{,}192 + 0{,}075 \cdot 5{,}963 + 0{,}831 \cdot 7{,}584 = 7.330$$

Sammanvägt värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T = \frac{R_T^\lambda + R_T^U}{2} = \frac{6{,}758 + 7{,}330}{2} = 7{,}044$$

U-värde (W/m^2K):

$$\boldsymbol{U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{7{,}044} = 0{,}142}$$

Beräkningar av linjeköldbryggor för väggk. 4

För beräkning av tvådimensionella stationära värmetransporter genom linjära köldbryggor har beräkningsprogrammet HEAT2 använts. Det totala värmeflödet som orsakas av köldbryggor har beräknats med differensmetoden (Swedisol 2006) d.v.s. två gestaltningar av respektive konstruktionsdetalj som ger upphov till en köldbrygga har ritats. I den ena gestaltningen beräknas värmeflödet genom en homogen konstruktion som inte påverkas av något material och/eller en geometrisk utformning som ger upphov till en köldbrygga. I den andra gestaltningen beräknas värmeflödet genom samma konstruktionsdetalj med skillnaden att materialet och/eller den geometriska utformningen som ger upphov till en köldbrygga har tagits i beaktande. Differensen av värmeflödet i de två fallen är det totala värmeflödet som köldbryggan orsakar vid en grads temperaturskillnad på ömse sidor av konstruktionen. Differensen är också värmegenomgångskoefficienten Ψ, som mäts i enheten W/K, för den linjära köldbryggan.

I studien har ingen hänsyn tagits till köldbryggor som uppstår i samband med infästningar av referensbyggnadens balkonger och trapphus. Vidare har ingen hänsyn tagits till punktköldbryggor som exempelvis uppstår vid fästmaterial som skruv och spik eller vid tredimensionella värmeflöden som uppstår vid ytterhörn, exempelvis där ytterväggshörn angränsar mot tak.

I följande värmetransportsberäkningar för konstruktionsdetaljer som orsakar köldbryggor har det totala värmeflödet genom köldbryggan beräknats i enheten W/mK. Vidare har de erhållna värdena multiplicerats med respektive linjeköldbryggas utsträckning i byggnaden som fås från aktuella ritningar för projekt Höjdenvändan. I Tabell 11 redovisas respektive byggnadsmaterials värmekonduktivitet .

Tabell 11 *Respektive materials värmekonduktivitet. Värdena är hämtade dels ifrån (Peterson 2007) och dels ifrån materialbasen i beräkningsprogrammet HEAT2. Värmekonduktiviteten för fönster och dörrar har baserats på en fiktiv tjocklek av 120 mm och deras aktuella U-värde, 0,9 W/m^{2}K respektive 1,0 W/m^{2}K.*

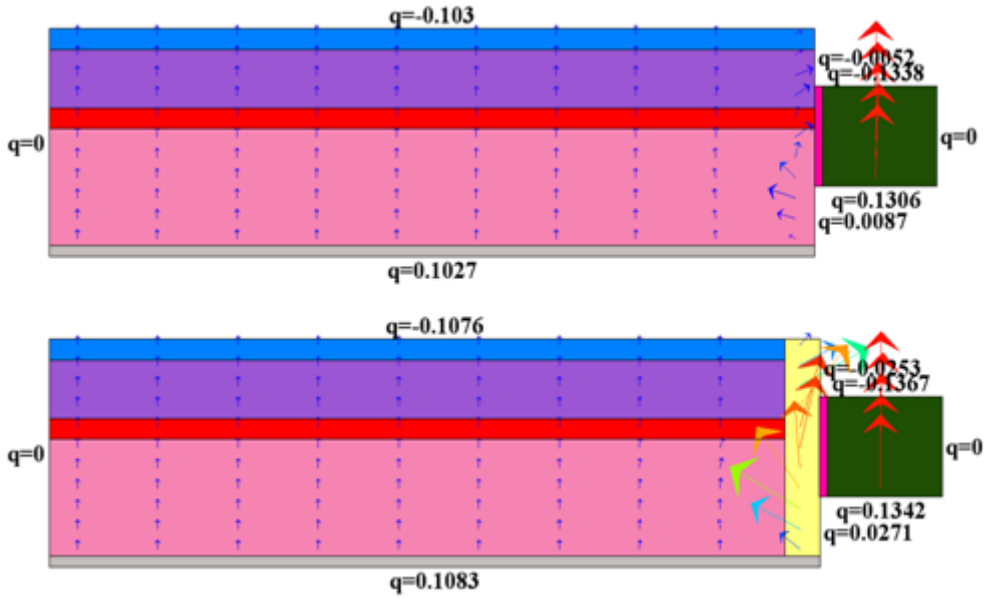
Material	Värmekonduktivitet, λ *[W/mK]*
Betong	1,70
Cellplast	0,033
Drevning	0,040
Dörr	0,12
Fönster	0,11
Gips	0,22
Klimatskiva	0,033
Luft	0,25
Luftspalt	0,125
Lösull	0,042
Mineralull	0,037
Stål	60
Träregel	0,14
VIP	0,0085
EPS	0,031
Mark	2,0

Köldbryggor runt dörrar

I Figur 38 visas två gestaltningar av konstruktionsdetaljen där yttervägg angränsar mot dörrpost. Den övre figuren saknar köldbrygga i form av träreglar som fordras för fastmontering av dörrkarm, gipsskivor, dörrsmyg och yttre beklädnad. Dörrarnas värmegenomgångskoefficient är 1,0 W/m^{2}K, som är ett genomsnittligt värde av dörrens samtliga delar som exempelvis karm och dörrblad samt värmetransport via anslutningar mellan de olika delarna (Peterson 2007). I Figur 38 har beräkningen av

värmeförluster genom dörrposten generaliserats eftersom värmekonduktiviteten som har använts i beräkningarna är densamma för hela dörrposten.

De vertikala reglarna vid dörrarnas sidor går från golv till tak och har en längd på 2,4 meter. Den horisontella regeln i ovankant dörröppning passas in mellan de vertikala reglarna vilket resulterar i att längden på de horisontella reglarna varierar med dörrbredden. Nedan följer total värmetransport genom köldbryggan vid en grads temperaturskillnad på ömse sida av väggkonstruktionen. Vidare redovisas total längd och värmeförlust genom byggnadens linjeköldbryggor vid samtliga dörrposter.



Figur 38 *Köldbryggor vid dörrposter. Den övre enhetliga väggkonstruktionen har mindre värmeförluster än den nedre konstruktionen med köldbrygga. Differensen av värmeflödet genom de två konstruktionerna är värmegenomgångskoefficienten, Ψ för den linjära köldbryggan. Material uppifrån i nedre figur: Luftspalt 25 mm, klimatskiva 70 mm, VIP 25 mm, mineralull 70 mm, mineralull 70 mm, gipsskiva 13 mm. Övriga material från höger: Dörr 120 mm, drevning 120 mm, träregel 260 mm.*

Värmetransport genom enhetlig konstruktion: q = 0,242 W/m.

Värmetransport genom oenhetlig konstruktion: q = 0,270 W/m.

Värmetransport genom köldbrygga: q = 0,270 – 0,242 = 0,028 W/m.

Total längd linjeköldbrygga vid byggnadens samtliga dörrar = 139,2 meter.

Värmetransport = 139,2 x 0,028 = 3,898 W/K.

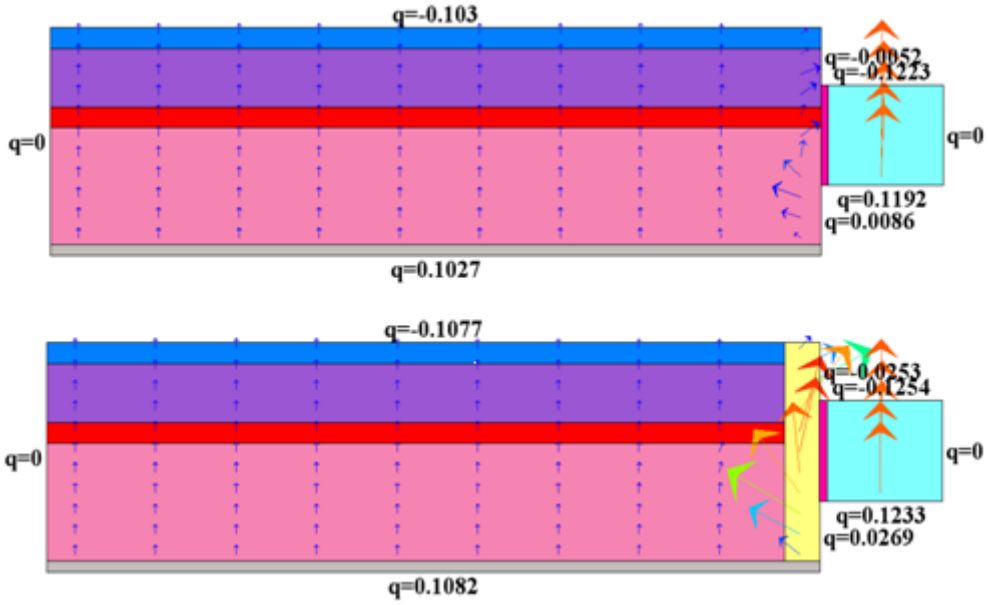
Köldbryggor runt fönster

I Figur 39 visas två gestaltningar av samma konstruktionsdetalj där ytterväggg angränsar mot fönsterpost. Den övre figuren saknar köldbrygga i form av träreglar

som fordras för fastmontering av fönsterkarm, gipsskivor, fönstersmyg och yttre beklädnad. Fönstrens värmegenomgångskoefficient är 0,9 W/m^{2}K, som är ett genomsnittligt värde av fönstrens samtliga delar som exempelvis karm och fönsterglas samt värmetransport via anslutningar mellan de olika delarna. I Figur 39 har beräkningen av värmeförluster genom fönsterpartiet generaliserats eftersom värmekonduktiviteten som har använts i beräkningarna är densamma för hela fönsterpartiet.

I Figur 40 visas köldbryggan som uppstår på grund av de vertikala reglarna som redovisas i Figur 39 under och över fönsterpartiet, d.v.s. där det inte behövs träreglar för att fästa fönsterkarmen.

De vertikala reglarna vid fönstrens sidor går från golv till tak och har en längd på 2,4 meter. De horisontella reglarna passas in mellan de vertikala reglarna vilket resulterar i att längden på de horisontella reglarna varierar med fönsterbredden. Nedan följer total längd för byggnadens linjeköldbryggor vid samtliga fönster samt total värmetransport vid en grads temperaturskillnad på ömse sida av väggkonstruktionen.



Figur 39 *Köldbryggor vid fönsterposter. Den övre enhetliga väggkonstruktionen har mindre värmeförluster än den nedre konstruktionen med köldbrygga. Differensen av värmeflödet genom de två konstruktionerna är värmegenomgångskoefficienten, Ψ för den linjära köldbryggan. Material uppifrån i nedre figur: Luftspalt 25 mm, klimatskiva 70 mm, VIP 25 mm, mineralull 70 mm, mineralull 70 mm, gipsskiva 13 mm. Övriga material från höger: Fönster 120 mm, drevning 120 mm, träregel 260 mm.*

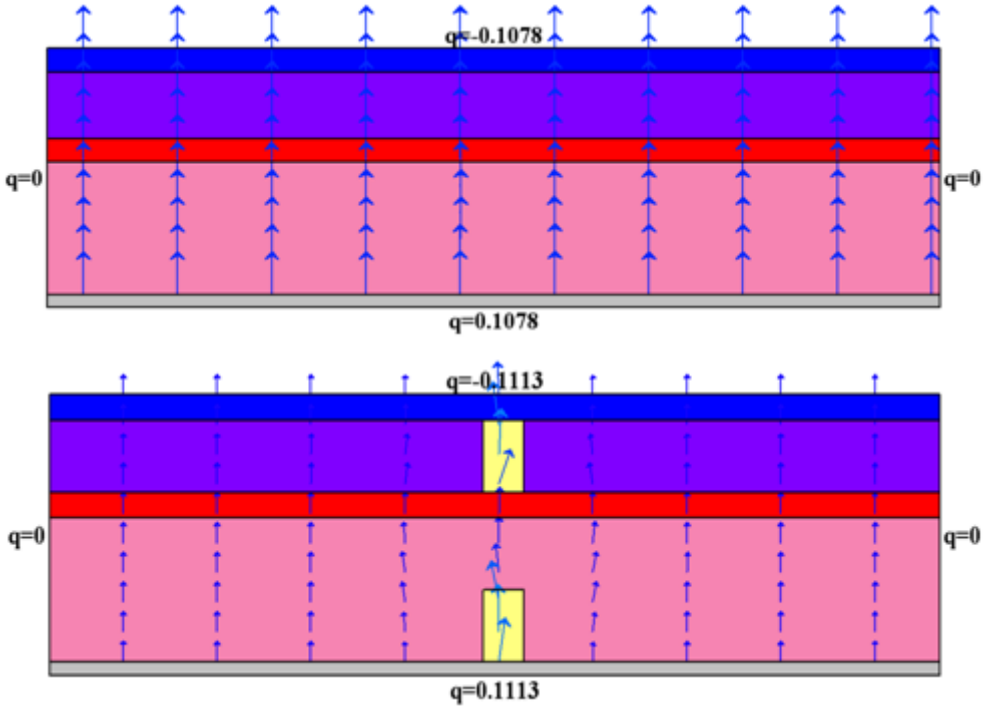
Värmetransport genom enhetlig konstruktion: q = 0,231 W/m.

Värmetransport genom oenhetlig konstruktion: q = 0,258 W/m.

Värmetransport genom köldbrygga: q = 0,258 – 0,231 = 0,027 W/m.

Total längd linjeköldbrygga vid byggnadens samtliga fönster = 202,8 meter

Värmetransport = 202,8 x 0,027 = 5,476 W/K



Figur 40 *Köldbrygga för vertikala träreglar vid angränsande mot fönsterparti. Konstruktionsdetaljen förekommer under och över fönsterpartierna. Material uppifrån i nedre figur: Luftspalt 25 mm, klimatskiva 70 mm samt träregel 45 x 70 mm, VIP 25 mm, mineralull 70 mm, mineralull 70 mm samt träregel 45 x 70 mm, gipsskiva 13 mm.*

Värmetransport genom enhetlig konstruktion: q = 0,1078 W/m.

Värmetransport genom oenhetlig konstruktion: q = 0,1113 W/m.

Värmetransport genom köldbrygga: q = 0,1113 – 0,1078 = 0,0035 W/m.

Total längd linjeköldbrygga vid byggnadens samtliga fönster = 79,6 meter

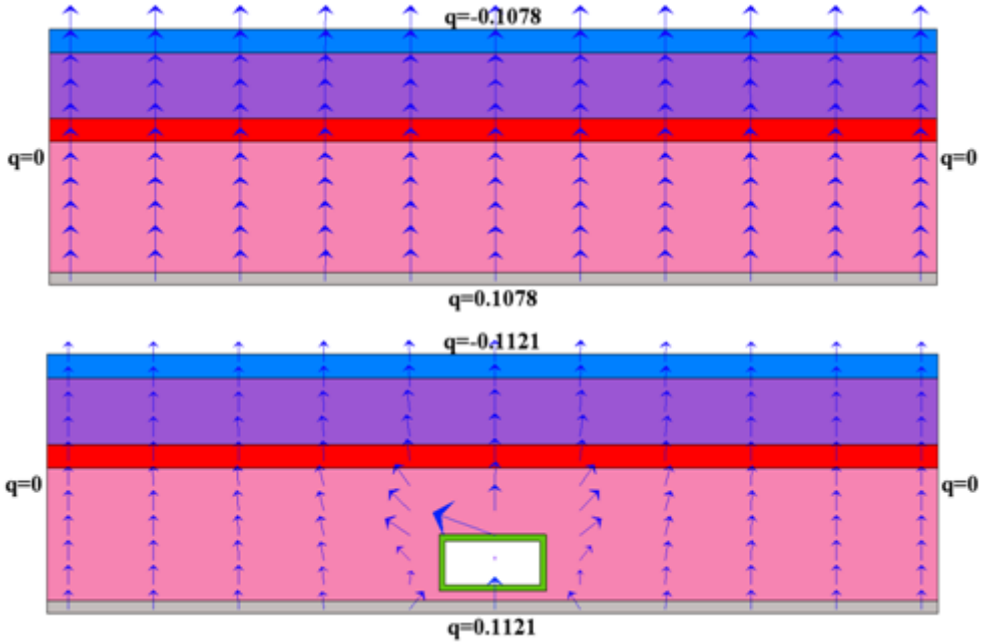
Värmetransport = 79,6 x 0,0035 = 0,2786 W/K

Köldbryggor vid bärande stålpelare

I Figur 41 visas två gestaltningar varav den övre konstruktionen saknar en bärande stålpelare som ger upphov till en köldbrygga.

Antalet bärande stålpelare är 24 st, exklusive hörnpelarna som redovisas i figuren över ytterväggshörn, för hela byggnaden. En pelares längd är 2,5 meter. Nedan följer

total längd för byggnadens linjeköldbryggor vid samtliga pelare samt total värmetransport vid en grads temperaturskillnad ömse sida av väggkonstruktionen.



Figur 41 *Köldbrygga vid bärande stålpelare. Den övre enhetliga väggkonstruktionen har mindre värmeförluster än den nedre konstruktionen med köldbrygga. Differensen av värmeflödet genom de två konstruktionerna är värmegenomgångskoefficienten, Ψ för den linjära köldbryggan. Material uppifrån i nedre figur: Luftspalt 25 mm, klimatskiva 70 mm, VIP 25 mm, mineralull 70 mm, mineralull 70 mm samt stålpelare VKR 120 x 60 x 6,3 mm, gipsskiva 13 mm.*

Värmetransport genom enhetlig konstruktion: q = 0,1078 W/m.

Värmetransport genom oenhetlig konstruktion: q = 0,1121 W/m.

Värmetransport genom köldbrygga: q = 0,1121 – 0,1078 = 0,0043 W/m.

Total längd linjeköldbrygga vid byggnadens samtliga pelare = 80 meter

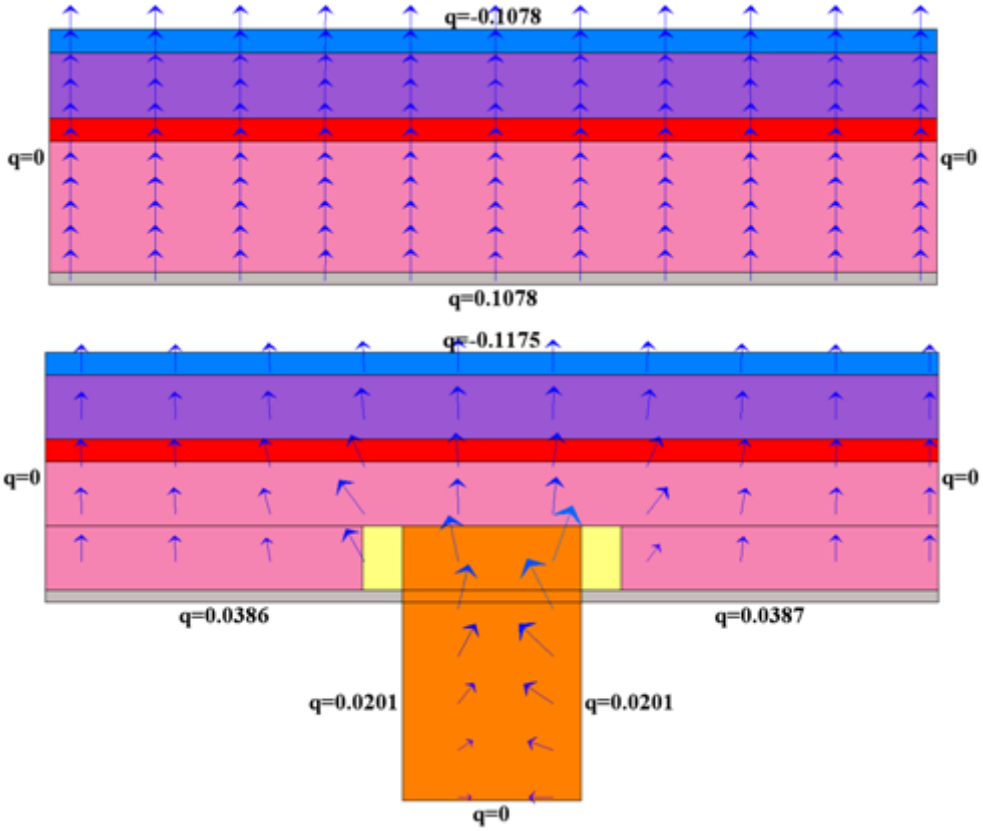
Värmetransport = 80 x 0,0043 = 0,344 W/K

Köldbrygga där bärande innervägg möter yttervägg

I Figur 42 visas två gestaltningar varav den övre är en homogen yttervägg. Den nedre konstruktionsdetaljen illustrerar en köldbrygga som uppstår där den bärande innerväggen fortsätter in i utfackningsväggen.

De bärande innerväggarna reducerar väggens värmemotstånd vid 12 st platser i byggnaden. Höjden på en bärande innervägg är 2,5 meter. Nedan följer total längd för

byggnadens linjeköldbryggor vid samtliga bärande innerväggar samt total värmetransport vid en grads temperaturskillnad på ömse sida av väggkonstruktionen.



Figur 42 *Köldbrygga vid bärande innerväggar. Den övre enhetliga väggkonstruktionen har mindre värmeförluster än den nedre konstruktionen med köldbrygga. Differensen av värmeflödet genom de två konstruktionerna är värmegenomgångskoefficienten, Ψ för den linjära köldbryggan. Material uppifrån i nedre figur: Luftspalt 25 mm, klimatskiva 70 mm, VIP 25 mm, mineralull 70 mm, mineralull 70 mm samt träreglar 45 x 70 mm samt betong 200 mm, gipsskiva 13 mm.*

Värmetransport genom enhetlig konstruktion: q = 0,1078 W/m.

Värmetransport genom oenhetlig konstruktion: q = 0,1175 W/m.

Värmetransport genom köldbrygga: q = 0,1175 – 0,1078 = 0,0097 W/m.

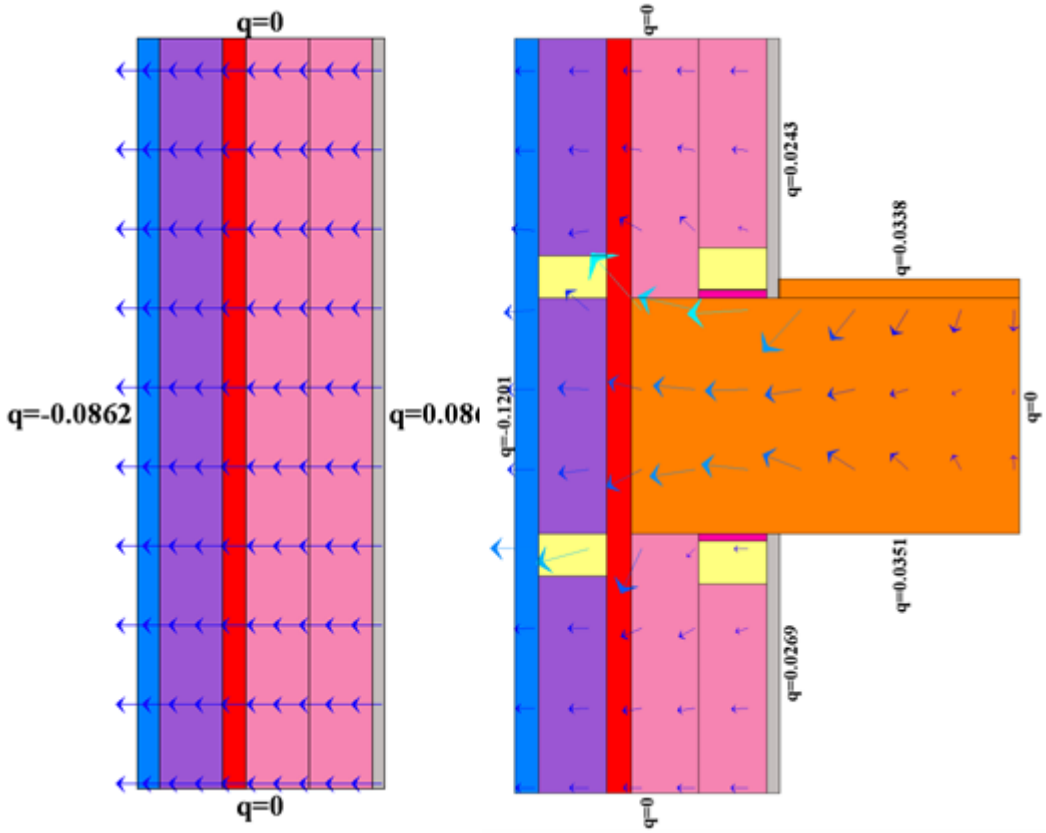
Total längd linjeköldbrygga vid byggnadens samtliga bärande innerväggar = 30 meter

Värmetransport = 30 x 0,0097 = 0,291 W/K

Köldbrygga där mellanbjälklag möter yttervägg

I Figur 43 visas två gestaltningar varav den vänstra är en homogen yttervägg. Den högra konstruktionsdetaljen föreställer mellanbjälklaget samt fästningsanordningar för

väggens regelsystem som ger upphov till en köldbrygga. Nedan följer total längd för byggnadens linjeköldbrygga vid mellanbjälklaget samt total värmetransport vid en grads temperaturskillnad på ömse sida av väggkonstruktionen.



Figur 43 *Köldbrygga vid mellanbjälklaget. Den vänstra enhetliga väggkonstruktionen har mindre värmeförluster än den högra konstruktionen med köldbrygga. Differensen av värmeflödet genom de två konstruktionerna är värmegenomgångskoefficienten, Ψ för den linjära köldbryggan. Material från vänster i höger figur: Luftspalt 25 mm, klimatskiva 70 mm samt träreglar 45 x 70 mm, VIP 25 mm, mineralull 70 mm samt betong 300 mm, mineralull 70 mm samt träreglar 45 x 70 mm samt drevning och betong 300 mm, gipsskiva 13 mm.*

Värmetransport genom enhetlig konstruktion: q = 0,0862 W/m.

Värmetransport genom oenhetlig konstruktion: q = 0,1201 W/m.

Värmetransport genom köldbrygga: q = 0,1201 – 0,0862 = 0,0339 W/m.

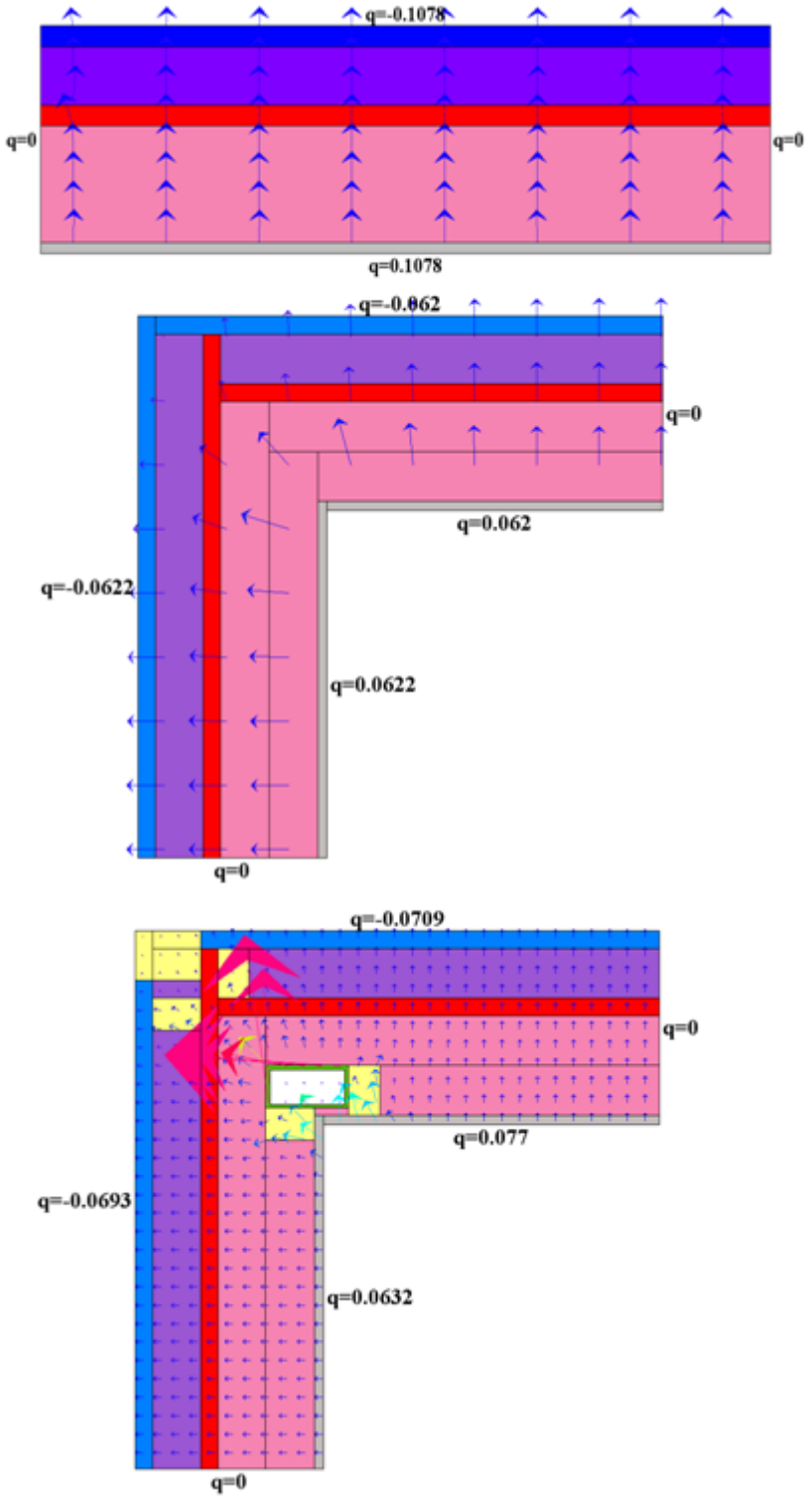
Total längd linjeköldbrygga längs med byggnadens mellanbjälklag = 73,3 meter

Värmetransport = 73,3 x 0,0339 = 2,485 W/K

Köldbrygga vid ytterväggshörn

I Figur 44 visas tre gestaltningar. Den övre bilden föreställer en homogen ytterv̈agg medans bilden i mitten illustrerar hur värmetransporten genom konstruktionen påverkas av den geometriska utformningen som i detta fall är ett vinkelrätt ytterväggshörn. Den vinkelräta utformningen ger upphov till en köldbrygga eftersom den utvändiga väggarean med lägre yttemperatur då blir större än den invändiga väggarean, förutsatt att det är en lägre lufttemperatur utomhus. I den nedre bilden visas också inverkan av bärande pelare samt reglar och läkt som fordras för fästning av invändig och utvändig klädsel.

Köldbryggan som uppstår vid ytterväggshörnen inträffar vid 4 st platser i byggnaden. Nedan följer total längd för byggnadens linjeköldbrygga vid ytterväggshörnen samt total värmetransport vid en grads temperaturskillnad på ömse sida av väggkonstruktionen.



Figur 44 *Köldbrygga vid ytterväggshörn. Både geometrisk utformning samt inverkan av pelare, reglar och läkt ger upphov till en köldbrygga. Differensen av värmeflödet genom den övre raka väggkonstruktionen samt den nedre hörnkonstruktionen är värmegenomgångskoefficienten, Ψ för den linjära köldbryggan. Material uppifrån i övre figur: Luftspalt 25 mm, klimatskiva 70 mm, VIP 25 mm, mineralull 70 mm, mineralull 70 mm, gipsskiva 13 mm.*

Värmetransport genom enhetlig konstruktion: q = 0,1078 W/m.

Värmetransport genom oenhetlig konstruktion: q = 0,1402 W/m.

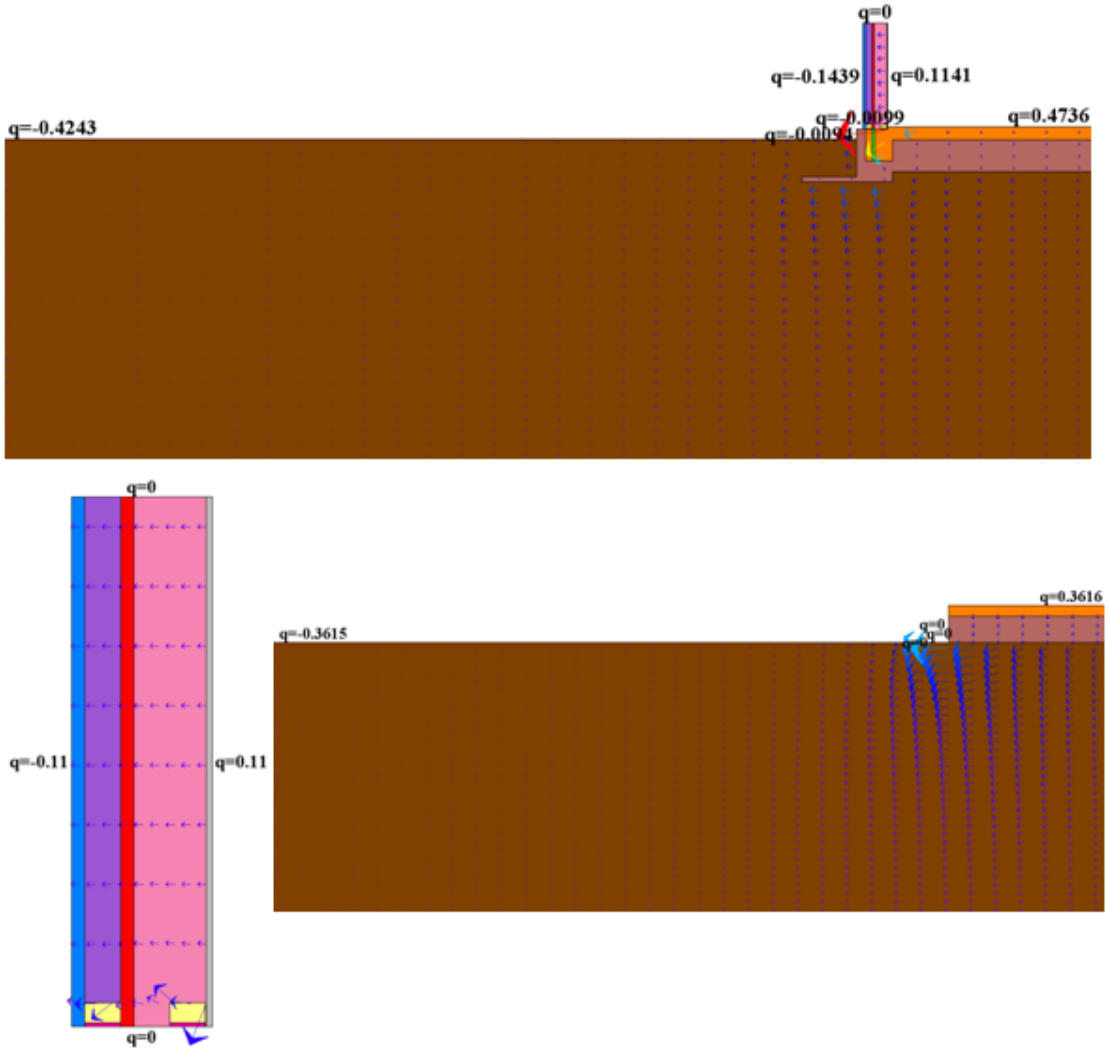
Värmetransport genom köldbrygga: q = 0,1402 – 0,1078 = 0,0324 W/m.

Total längd på linjeköldbryggan vid byggnadens samtliga ytterhörn = 20 meter

Värmetransport = 20 x 0,0324 = 0,648 W/K

Köldbrygga där yttervägg möter grundplatta

I Figur 45 visas tre gestaltningar som ingår i beräkningen av linjeköldbryggan som uppstår på grund av markplattans kantbalk. Den totala värmeförlusten genom gestaltad konstruktion beräknas i den övre bilden varefter värdet på värmeförluster genom vägg (bilden längst ner till vänster) och markplatta (bilden längst ner till höger) dras ifrån den totala värmeförlusten. Kvarvarande värmeförlust är värmegenomgångskoefficienten Ψ, som mäts i enheten W/K, för den linjära köldbryggan orsakad av markplattans kantbalk.



Figur 45 *Köldbrygga vid markplattans kantbalk. Material från vänster i väggfigur: Luftspalt 25 mm, klimatskiva 70 mm samt träsyll 45 x 70 samt sylltätning, VIP 25 mm, mineralull 70 mm, mineralull 70 mm*

samt träsyll 45 x 70 mm samt sylltätning, gipsskiva 13 mm. Material i platta uppifrån: Betong 100 mm, tjälisolering 300 mm.

Värmetransport genom vägg, kantbalk och markplatta: q = 0,5877 W/m.

Värmetransport genom vägg : q = 0,11 W/m.

Värmetransport genom marplatta: q = 0,3616 W/m

Värmetransport genom köldbrygga (kantbalk): q = 0,5877 – 0,11 – 0,3616 = 0,1161 W/m.

Total längd på linjeköldbryggan längs med kantbalken = 73,3 meter

Värmetransport = 73,3 x 0,1161 = 8,51 W/K.

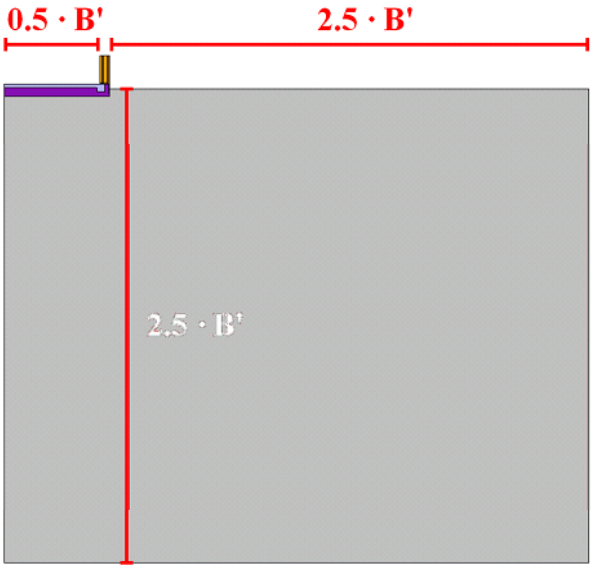
Vid beräkningen av värmeflödet genom kantbalken har hänsyn tagits till markens värmemotstånd som beror på vilken jordart marken består av. Vidare avgörs hur mycket markyta som ska tas med i beräkningarna av storleken på markplattan. För bestämmande av hur mycket markyta som ska tas med i följande tvådimensionella beräkningar har ett karakteristiskt värde (B´) som beror på markplattans bredd och längd beräknats (Nyberg, 2011).

$$B' = \frac{A}{0{,}5 \cdot P} \qquad (8.1)$$

A = Area

P = Omkrets

Det erhållna karakteristiska värdet har sedan multiplicerats med koefficienter enligt Figur 46 för fastställande av vilka dimensioner på platta och mark som ska tas med i beräkningarna.



Figur 46 *De röda linjerna visar vilken dimension på mark och markplatta som ska tas med i beräkningar för tvådimensionella värmetransporter. (Nyberg 2011)*

Nedan följer beräkningar av B´ samt dimensioner på platta och mark som fordras för att rätt värde på värmeförlusterna genom kantbalken ska erhållas med hjälp av visualisering i HEAT2.

Area = 9,5 x 28,15 = 267,43 m^2

Omkrets = (2 x 9,5) + (2 x 28,15) = 75,3 m

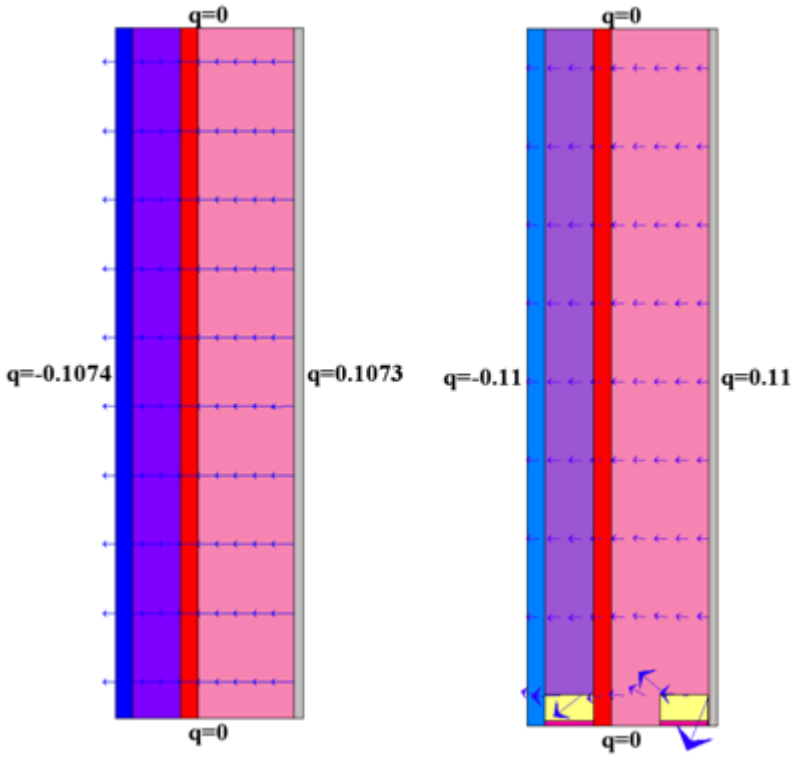
$$B' = \frac{A}{0{,}5 \cdot P} = \frac{267{,}43}{0{,}5 \cdot 75{,}3} = 7{,}10 \text{ m}$$

Längd på markplatta = 0,5 x B´= 0,5 x 7,10 = 3,55 m

Längd på markens djup och utbredning i sidled = 2,5 x B´= 2,5 x 7,10 = 17,75 m

Köldbrygga vid ytterväggssyll mot markplatta

I Figur 47 visas två gestaltningar varav den vänstra är en homogen yttervägg. Bilden till höger illustrerar en köldbrygga som uppstår på grund av väggens syll.



Figur 47 *Köldbrygga vid väggens syll. Den vänstra enhetliga väggkonstruktionen har mindre värmeförluster än konstruktionen till höger med köldbrygga. Differensen av värmeflödet genom de två konstruktionerna är värmegenomgångskoefficienten, Ψ för den linjära köldbryggan. Material från vänster i höger figur: Luftspalt 25 mm, klimatskiva 70 mm samt träsyll 45 x 70 mm samt sylltätning, VIP 25 mm, mineralull 70 mm, mineralull 70 mm samt träsyll 45 x 70 mm samt sylltätning, gipsskiva 13 mm.*

Värmetransport genom enhetlig konstruktion: q = 0,1074 W/m.

Värmetransport genom oenhetlig konstruktion: q = 0,11 W/m.

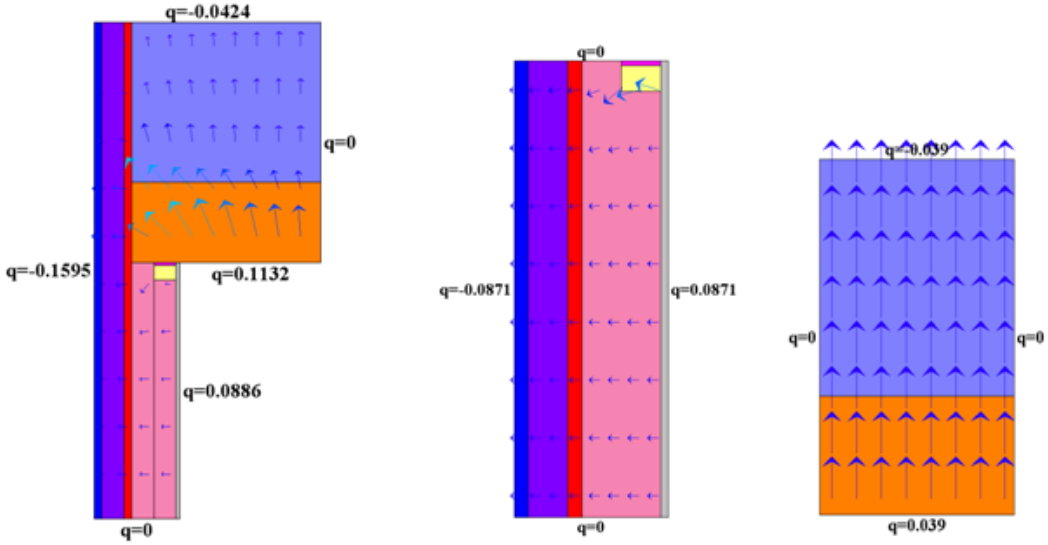
Värmetransport genom köldbrygga: q = 0,11 – 0,1074 = 0,0026 W/m.

Total längd linjeköldbrygga längs med byggnadens syll = 73,3 meter

Värmetransport = 73,3 x 0,0026 = 0,191 W/K

Köldbrygga vid takbjälklag

I Figur 48 visas tre gestaltningar som ingår i beräkningen av linjeköldbryggan som uppstår på grund av att takbjälklaget fortsätter in i ytterväggskonstruktionen. Den totala värmeförlusten genom gestaltad konstruktion beräknas i den vänstra bilden varefter värdet på värmeförluster genom vägg (bilden i mitten) och tak (bilden till höger) dras ifrån den totala värmeförlusten. Kvarvarande värmeförlust är värmegenomgångskoefficienten Ψ, som mäts i enheten W/K, för den linjära köldbryggan orsakad av takbjälklaget.



Figur 48 *Köldbrygga vid takbjälklag. Material från vänster i vägg: Luftspalt 25 mm, klimatskiva 70 mm, VIP 25 mm, mineralull 70 mm, mineralull 70 mm samt hammarband 45 x 70 mm samt sylltätning, gipsskiva 13 mm. Material i tak ovanifrån: Lösull 500 mm, betong 300 mm.*

Värmetransport genom enhetlig konstruktion: q = 0,2018 W/m.

Värmetransport genom vägg: q = 0,0871 W/m.

Värmetransport genom tak: q = 0,039 W/m.

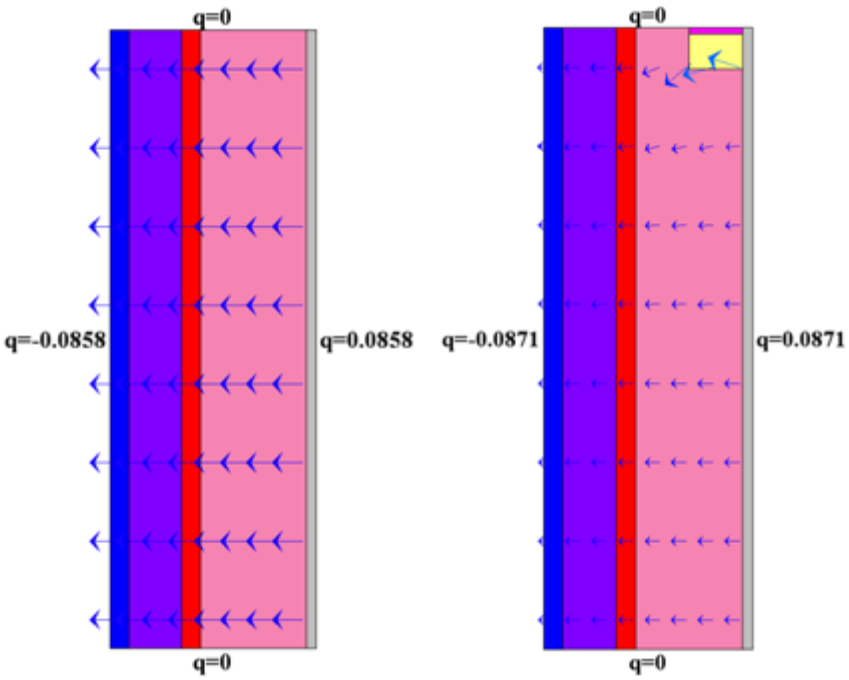
Värmetransport via köldbryggan: q = 0,2018 – 0,0871 – 0,039 = 0,0757

Total längd på linjeköldbryggan vid takbjälklag = 73,3 meter

Värmetransport = 73,3 x 0,0757 = 5,549 W/K

Köldbrygga vid hammarband mot takbjälklag

I Figur 49 har hammarbandets inverkan till värmeförluster studerats.



Figur 49 *Köldbryggor vid hammarbandets anslutning mot takbjälklag. Den vänstra enhetliga väggkonstruktionen har mindre värmeförluster än konstruktionen till höger medhammarband. Differensen av värmeflödet genom de två konstruktionerna är värmegenomgångskoefficienten, Ψ för den linjära köldbryggan. Material från vänster i höger figur: Luftspalt 25 mm, klimatskiva 70 mm, VIP 25 mm, mineralull 70 mm, mineralull 70 mm samt hammarband 45 x 70 mm samt sylltätning, gipsskiva 13 mm.*

Värmetransport genom enhetlig konstruktion: q = 0,0858 W/m.

Värmetransport genom oenhetlig konstruktion: q = 0,0871 W/m.

Värmetransport genom köldbrygga: q = 0,0871 – 0,0858 = 0,0013 W/m.

Total längd linjeköldbrygga längs med byggnadens syll = 73,3 meter

Värmetransport = 73,3 x 0,0013 = 0,0953 W/K

Totala linjeköldbryggor för hela byggnaden

q_{tot} = 3,898 + 5,476 + 0,2786 + 0,344 + 0,291 + 2,485 + 0,648 + 8,51 + 0,191 + 5,549 + 0,0953

= 27,766 W/K

Beräkning av U_m för väggk. 4 integrerad i referensbyggnad.

Vid beräkning av byggnadens genomsnittliga värmegenomgångskoefficient beaktas byggnadens samtliga omslutande delar som väggar, golv, tak, fönster och dörrar. Vidare beaktas också byggnadens köldbryggor som kan ses i ekvation 8.2 (Peterson 2007). I denna studie har dock inga beräkningar utförts för byggnadens punktköldbryggor.

$$U_m = \frac{\sum U_{korr,i} \cdot A_i + \sum \psi_k \cdot l_k + \sum \chi_j}{A_{om}} \quad (8.2)$$

$U_{korr,i}$ = värmegenomgångskoefficient för byggnadsdelens i $(\frac{W}{m^2K})$

A_i = area för byggnadsdelens i yta mot uppvärmd inneluft (m^2)

ψ_k = värmegenomgångskoefficient för linjära köldbryggan k $(\frac{W}{mK})$

l_k = längden av den linjära köldbryggan k mot uppvärmd inneluft (m)

χ_j = värmegenomgångskoefficient för punktformiga köldbryggan j $(\frac{W}{K})$

A_{om} = omslutande area mot uppvärmd innomhusluft(m^2)

För korrekta beräkningar måste ibland U-värdet korrigeras med korrektionstermen ΔU enligt ekvation 8.3 (Peterson 2007).

$$U_{korr} = U + \Delta U_f + \Delta U_g + \Delta U_r \quad (8.3)$$

U = värmegenomgångskoefficient $(\frac{W}{m^2K})$

ΔU_f = korrektion för köldbryggor i form av fästanordningar etc

ΔU_g = korrektion för arbetsutförande och springor och spalter

ΔU_r = korrektion för nederbörd och vindpåverkan i omvända tak och duo − tak

Korrektion för köldbryggor i form av fästanordningar etc.

Ingen korrektion för fästanordningar i form av spik för yttre beklädnad över luftspalt och plastdistanser för fästning av klimatskiva har utförts då dess inverkan på värmeflödet anses försumbar (Peterson 2007).

$\Delta U_f = 0$

Korrektion för arbetsutförande och springor och spalter.

Ingen korrektion för springor och spalter i isoleringsskikten har utförts då väggkonstruktionerna består av fyra olika isoleringsskikt där skarvarna är förskjutna samt att ett skikt i varje vägg är heltäckande. Två förskjutna isoleringslager under markplatta samt lösull i takbjälklag kräver inte heller någon korrigering (Peterson 2007).

$\Delta U_g = 0$

Korrektion för nederbörd och vindpåverkan i omvända tak och duo-tak.

Ingen korrektion för nederbörd och vindpåverkan i omvända tak och duo-tak har utförts då detta inte är aktuellt för takkonstruktionen på referensbyggnaden.

$\Delta U_r = 0$

Respektive byggnadsdels area samt A_{om} (m^2)

De olika byggnadsdelarnas areor är hämtade från aktuella ritningar. Nedan följer totala areor för respektive byggnadsdel.

Fönster: 80,44

Dörrar: 33,6

Vägg: 246,46

Tak: 243,45

Golv: 243,45

A_{om}: 847,4

Respektive byggnadsdels U-värde (W/m^2K).

Fönster: 0,9

Dörrar: 1,0

Vägg: 0,114

Tak: 0,09

Golv: 0,11

Totala linjeköldbryggor (W/K)

Totala linjeköldbryggor för hela byggnaden: 27,766

Totala punktköldbryggor (W/K)

Punktköldbryggor har inte beräknats

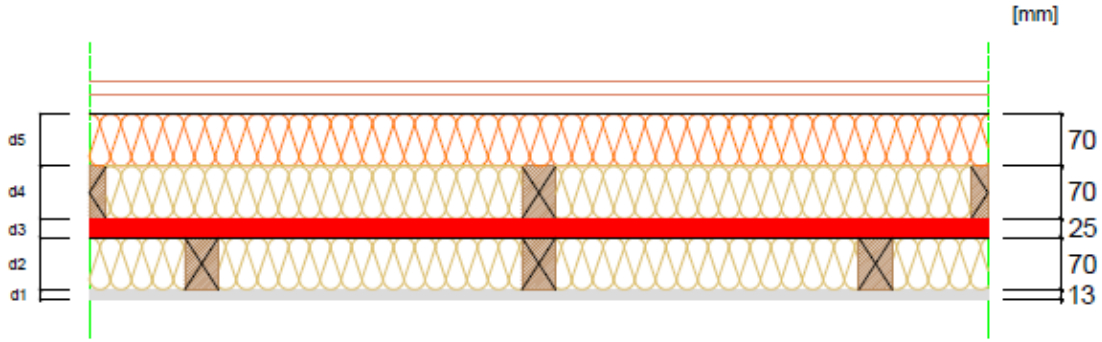
Genomsnittligt U-värde (W/m^{2}K)

$$U_m = \frac{\sum U_{korr,i} \cdot A_i + \sum \psi_k \cdot l_k + \sum \chi_j}{A_{om}}$$

$$= \frac{(0{,}9 \cdot 80{,}44 + 1{,}0 \cdot 33{,}6 + 0{,}114 \cdot 246{,}6 + 0{,}09 \cdot 243{,}45 + 0{,}11 \cdot 243{,}45) + 27{,}766}{847{,}4}$$

$$= 0{,}248$$

Väggkonstruktion 5



Materialandelar i respektive skikt (Lambdavärdesmetoden) :

Skikt 1:

$P_{gips} = 1{,}0$

Skikt 2:

$$P_{mineralull} = \frac{405}{450} = 0{,}9$$

$$P_{träreglar} = \frac{45}{450} = 0{,}1$$

Skikt 3:

$P_{vip} = 1{,}0$

Skikt 4:

$$P_{mineralull} = \frac{555}{600} = 0{,}925$$

$$P_{träreglar} = \frac{45}{600} = 0{,}0750$$

Skikt 5:

$P_{mineralull} = 1{,}0$

Skiktens sammanlagda lambdavärde (W/mK):

λ_1=1,0 · 0,22 = 0,22

λ_2=0,9 · 0,037 + 0,1 · 0,14 = 0,0473

λ_3= 1,0 · 0,0085 = 0,0085

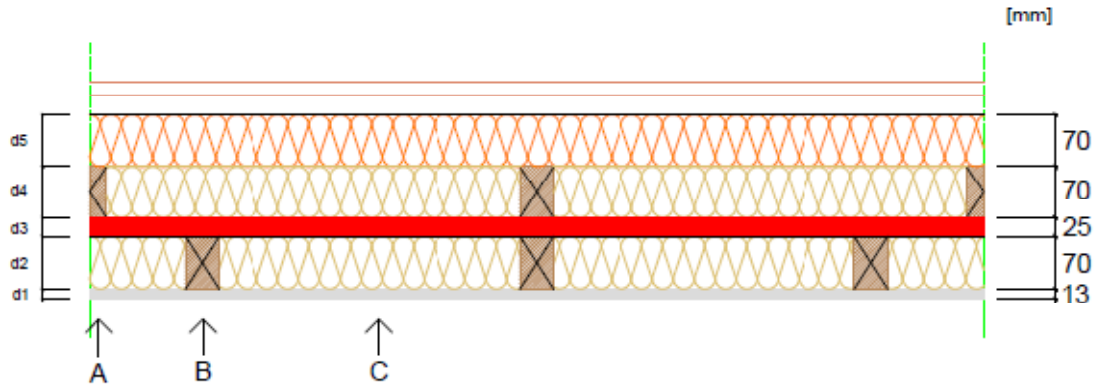
λ_4= 0,925 · 0,037 + 0,075 · 0,14 = 0,0447

λ_5= 1,0 · 0,033 = 0,033

Värmemotstånd (m^{2}K/W):

$$R_T^{\lambda} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}0473} + \frac{0{,}025}{0{,}0085} + \frac{0{,}07}{0{,}0447} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 8{,}537$$

Material i respektive snitt (U-värdesmetoden):



Snitt A: gips – mineralull– VIP – träregel – mineralull

Snitt B: gips – träregel – VIP – mineralull – mineralull

Snitt C: gips – mineralull – VIP – mineralull – mineralull

Värmemotstånd i respektive snitt (m^{2}K/W):

$$R_{TA} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_4}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} + R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}0085} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 7{,}883$$

$$R_{TB} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{träregel}} + \frac{d_3}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_4}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} +$$
$$R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + \frac{0{,}025}{0{,}0085} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 7{,}883$$

$$R_{TC} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{gips}} + \frac{d_2}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_3}{\lambda_{VIP}} + \frac{d_4}{\lambda_{mineralull}} + \frac{d_5}{\lambda_{mineralull}} + R_{luftspalt} +$$
$$R_{se} = 0{,}13 + \frac{0{,}013}{0{,}22} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}025}{0{,}0085} + \frac{0{,}07}{0{,}037} + \frac{0{,}07}{0{,}033} + 0{,}20 + 0{,}04 = 9{,}275$$

Respektive snitts ytandel:

$$P_A = \frac{45}{600} = 0{,}075$$

$$P_B = \frac{56{,}3}{600} = 0{,}0938$$

$$P_C = 1{,}0 - (P_A + P_B) = 1{,}0 - (0{,}075 + 0{,}0938) = 0{,}831$$

Värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T^U = P_A \cdot R_{TA} + P_B \cdot R_{TB} + P_C \cdot R_{TC} = 0{,}075 \cdot 7{,}883 + 0{,}0938 \cdot 7{,}883 + 0{,}831 \cdot 9{,}275 = 9{,}040$$

Sammanvägt värmemotstånd (m^2K/W):

$$R_T = \frac{R_T^\lambda + R_T^U}{2} = \frac{8{,}537 + 9{,}040}{2} = 8{,}789$$

U-värde (W/m^2K):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{8{,}789} = 0{,}114$$

Bilaga 3: Fuktberäkningar

Beräkningsscheman med temperatur- och ånghaltsfördelning för respektive konstruktion och månad har sammanställts i Excel. I Figur 50 visas ett exempel på ett sådant beräkningsschema.

Göteborg	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
T_{medel}	-0,9	-1,2	1,3	6	11,5	15,2	17,5	16,8	13,1	8,6	4,5	1,8
RÅ	85	82	77	71	66	69	73	74	79	81	84	86
v_e	3,7	3,4	3,9	5	6,6	8,8	10,8	10,5	9	6,9	5,4	4,6
$v_{tillskott}$	6	6	5,5	4	2,5	1,5	0,75	1	2	3	4,25	5,25
v_i	9,7	9,4	9,4	9	9,1	10,3	11,55	11,5	11	9,9	9,65	9,85

Väggkonstruktion 1	dim	λ	ΔT	T	v_s	δ	Z	K'$_e$	K'$_i$	Δv	v	RF
	m	W/mK	°C	°C	g/m^3	m^2/s	s/m	m^3/s	m^3/s	g/m^3	g/m^3	%
ute				-0,90	4,52						3,70	81,86%
R_{se}		0,04	0,18							0,00		
				-0,72	4,59						3,70	80,61%
Luftspalt+träpanel	0,025	0,125	0,79							0,00		
				0,07	4,88						3,70	75,82%
Vindpapp	0,002	0	0,00				2,00E+04			0,03		
				0,07	4,88			5,00E-05	2,49E-07		3,73	76,43%
VIP	0,025	0,0088	0,88				2,00E+06			2,98		
				0,95	5,19			4,95E-07	4,97E-07		6,71	129,20%
Klimatskiva	0,07	0,033	10,60			2,40E-05	2,92E+03			0,00		
				11,54	10,34			4,94E-07	4,98E-07		6,71	64,89%
Mineralull	0,095	0,037	5,78			2,40E-05	3,96E+03			0,01		
				17,33	14,74			4,93E-07	4,99E-07		6,72	45,56%
PE-folie	0,002	0	0,00				2,00E+06			2,98		
				17,33	14,74			2,48E-07	1,78E-04		9,69	65,75%
Mineralull	0,07	0,037	2,80			2,40E-05	2,92E+03			0,00		
				20,13	17,38			2,48E-07	3,70E-04		9,70	55,79%
Gips	0,013	0,22	0,27				2,70E+03			0,00		
				20,40	17,69						9,70	54,83%
Rsi		0,13	0,60							0,00		
				21,00	18,32						9,70	52,95%
inne												
Summa	0,302		21,90				4,03E+06			6,00		

Figur 50 *Beräkningsschema för väggkonstruktion 1, januari månad. Värden i gula celler representerar ingångsvärden för aktuell månad. Temperaturfördelning för respektive modell och månad har hämtats från HEAT2.*

Därefter har ett schema sammanställts för respektive konstruktion som enbart visar temperatur och relativ fuktighet i varje skikt under årets alla månader (se följande kapitel). Utifrån dessa scheman har en bedömning av väggkonstruktionernas fukttillstånd gjorts.

Väggkonstruktion 1

Fukttillstånd i väggkonstruktion 1

VÄGG 1	Januari		Februari		Mars		April		Maj		Juni		Juli		Augusti		September		Oktober		November		December	
	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)
ute	-0,9	81,9	-1,2	76,9	1,3	73,6	6,0	68,8	11,5	63,8	15,2	67,7	17,5	72,4	16,8	73,4	13,1	78,8	8,6	80,2	4,5	82,1	1,8	83,8
R_{se}	-0,7	80,6	-1,0	75,7	1,5	72,6	6,1	68,3	11,6	63,5	15,2	67,3	17,5	72,4	16,8	73,4	13,2	78,3	8,7	79,7	4,6	81,6	2,0	82,7
Luftspalt-träpanel	0,1	75,8	-0,2	71,1	2,2	69,2	6,7	65,7	11,9	62,3	15,5	66,5	17,7	71,6	17,0	72,5	13,5	76,9	9,2	77,2	5,2	78,4	2,7	78,9
Vindpapp	0,1	76,4	-0,2	71,8	2,2	69,6	6,7	66,0	11,9	62,4	15,5	66,6	17,7	71,6	17,0	72,6	13,5	76,9	9,2	77,4	5,2	78,7	2,7	79,4
VIP	0,9	129,2	0,7	125,9	3,0	111,9	7,3	88,5	12,3	72,2	15,7	71,3	17,8	73,6	17,2	75,1	13,8	83,9	9,6	91,0	5,9	104,3	3,4	118,3
Klimatskiva	11,5	64,9	11,4	62,4	12,5	60,5	14,5	56,3	16,9	54,6	18,5	60,3	19,5	66,6	19,2	66,7	17,6	66,7	15,6	62,8	13,9	62,8	12,7	64,9
Mineralull	17,3	45,6	17,3	43,5	17,7	44,2	18,5	44,3	19,4	47,1	20,0	55,3	20,4	63,2	20,3	62,6	19,7	59,9	18,9	51,9	18,2	48,5	17,8	47,7
PE-folie	17,3	65,8	17,3	63,7	17,7	62,2	18,5	56,8	19,4	54,5	20,0	59,6	20,4	65,3	20,3	65,4	19,7	64,8	18,9	61,1	18,2	62,0	17,8	64,8
Mineralull	20,1	55,8	20,1	54,1	20,2	53,7	20,4	50,9	20,6	50,8	20,8	56,9	20,9	63,4	20,8	63,5	20,7	61,1	20,5	55,6	20,3	54,5	20,2	56,3
Gips	20,4	54,8	20,4	53,1	20,5	52,8	20,6	50,3	20,7	50,6	20,8	56,9	20,9	63,4	20,9	63,2	20,8	60,7	20,7	55,0	20,5	53,9	20,5	55,4
Rsi	21,0	53,0	21,0	51,3	21,0	51,3	21,0	49,1	21,0	49,7	21,0	56,2	21,0	63,1	21,0	62,8	21,0	60,0	21,0	54,0	21,0	52,7	21,0	53,8
inne																								

OK

RF > 75%, T > 5°C

Risk för mögel (trä)

Kondens

Kondens

November:

$$G_{kond} = \left(\frac{9{,}65 \cdot 10^{-3} - 7{,}22 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{7{,}22 \cdot 10^{-3} - 5{,}4 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3600$$
$$= 0{,}794 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

December:

$$G_{kond} = \left(\frac{9{,}85 \cdot 10^{-3} - 6{,}11 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{6{,}11 \cdot 10^{-3} - 4{,}6 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 31 \cdot 24 \cdot 3600$$
$$= 2{,}975 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

Januari:

$$G_{kond} = \left(\frac{9{,}7 \cdot 10^{-3} - 5{,}19 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{5{,}19 \cdot 10^{-3} - 3{,}7 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 31 \cdot 24 \cdot 3600$$
$$= 4{,}026 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

Februari:

$$G_{kond} = \left(\frac{9{,}4 \cdot 10^{-3} - 5{,}09 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{5{,}09 \cdot 10^{-3} - 3{,}4 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 28 \cdot 24 \cdot 3600$$
$$= 3{,}157 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

Mars:

$$G_{kond} = \left(\frac{9{,}4 \cdot 10^{-3} - 5{,}95 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{5{,}95 \cdot 10^{-3} - 3{,}9 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 31 \cdot 24 \cdot 3600$$
$$= 1{,}877 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

Totalt = $12{,}829 \cdot 10^{-3}$ kg/m^2

Uttorkning

April:

$$G_{uttorkn} = \left(\frac{9 \cdot 10^{-3} - 7{,}91 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{7{,}91 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3600$$
$$= -2{,}330 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

Maj:

$$G_{uttorkn} = \left(\frac{9{,}1 \cdot 10^{-3} - 10{,}87 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{10{,}87 \cdot 10^{-3} - 6{,}6 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 31 \cdot 24$$
$$\cdot 3600 = -8{,}017 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

Juni:

$$G_{uttorkn} = \left(\frac{10{,}3 \cdot 10^{-3} - 13{,}39 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{13{,}39 \cdot 10^{-3} - 8{,}8 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 30 \cdot 24$$
$$\cdot 3600 = -9{,}870 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

Juli:

$$G_{uttorkn} = \left(\frac{11{,}55 \cdot 10^{-3} - 15{,}18 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{15{,}18 \cdot 10^{-3} - 10{,}8 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 31 \cdot 24 \cdot 3600 = -10{,}639 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

Augusti:

$$G_{uttorkn} = \left(\frac{11{,}5 \cdot 10^{-3} - 14{,}65 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{14{,}65 \cdot 10^{-3} - 10{,}5 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 31 \cdot 24 \cdot 3600 = -9{,}695 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

September:

$$G_{uttorkn} = \left(\frac{11 \cdot 10^{-3} - 11{,}92 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{11{,}92 \cdot 10^{-3} - 9 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3600 = -4{,}932 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

Oktober:

$$G_{uttorkn} = \left(\frac{9{,}9 \cdot 10^{-3} - 9{,}23 \cdot 10^{-3}}{2\,012\,500} - \frac{9{,}23 \cdot 10^{-3} - 6{,}9 \cdot 10^{-3}}{2\,020\,000}\right) \cdot 31 \cdot 24 \cdot 3600 = -2{,}198 \cdot 10^{-3}\ kg/m^2$$

<u>Totalt $= -47{,}681 \cdot 10^{-3}$ kg/m²</u>

Fyra gånger mer än kondensmängden under vinterperioden OK

Väggkonstruktion 2

Fukttillstånd i väggkonstruktion 2

VÄGG 2	Januari		Februari		Mars		April		Maj		Juni		Juli		Augusti		September		Oktober		November		December	
	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)
ute	-0,9	81,9	-1,2	75,2	1,3	73,6	6,0	68,8	11,5	63,8	15,2	67,7	17,5	72,4	16,8	73,4	13,1	78,8	8,6	80,2	4,5	82,1	1,8	83,8
R_{se}	-0,8	81,1	-1,1	74,6	1,4	73,0	6,1	68,3	11,5	63,8	15,2	67,7	17,5	72,4	16,8	73,4	13,1	78,8	8,6	80,2	4,6	81,6	1,9	83,3
Luftspalt+träpanel	-0,5	79,2	-0,8	72,5	1,7	71,6	6,3	67,5	11,7	63,0	15,3	67,3	17,6	72,0	16,9	73,0	13,3	77,9	8,9	78,7	4,8	80,5	2,2	81,6
Vindpapp	-0,5	79,9	-0,8	73,1	1,7	72,1	6,3	67,7	11,7	63,2	15,3	67,4	17,6	72,0	16,9	73,0	13,3	77,9	8,9	78,9	4,8	80,8	2,2	82,0
VIP	4,7	100,5	4,5	96,0	6,4	89,2	9,8	74,9	13,4	67,5	16,7	67,2	18,4	71,1	17,9	72,0	15,1	77,5	11,8	79,7	8,7	86,9	6,7	95,0
Mineralull	7,2	92,7	7,0	88,5	8,6	77,4	11,6	67,4	15,0	61,2	17,4	64,4	18,8	69,4	18,4	69,9	16,0	73,4	13,2	73,1	10,6	77,1	8,9	82,5
Mineralull	15,8	49,9	15,7	47,9	16,3	48,0	17,4	47,3	18,7	49,1	19,6	56,6	20,2	63,9	20,0	63,7	19,1	61,0	18,0	54,7	17,1	51,8	16,4	51,9
PE-folie	15,8	72,0	15,7	70,1	16,3	67,7	17,4	60,7	18,7	56,8	19,6	61,0	20,2	66,0	20,0	66,5	19,1	67,1	18,0	64,4	17,1	66,2	16,4	70,5
Mineralull	20,5	54,5	20,5	52,8	20,6	52,5	20,7	50,0	20,8	50,2	20,9	56,6	20,9	63,4	20,9	63,2	20,8	60,7	20,7	55,0	20,6	53,9	20,6	55,0
Gips	20,7	53,9	20,7	52,2	20,7	52,2	20,8	49,7	20,9	50,0	20,9	56,6	20,9	63,4	20,9	63,2	20,9	60,4	20,8	54,7	20,8	53,3	20,7	54,7
Rsi	21,0	53,0	21,0	51,3	21,0	51,3	21,0	49,1	21,0	49,7	21,0	56,2	21,0	63,1	21,0	62,8	21,0	60,0	21,0	54,0	21,0	52,7	21,0	53,8
inne																								

OK

RF > 75%, T > 5°C

Risk för mögel (trä)

Kondens

Väggkonstruktion 3

Fukttillstånd i väggkonstruktion 3

VÄGG 3	Januari		Februari		Mars		April		Maj		Juni		Juli		Augusti		September		Oktober		November		December	
	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)
ute	-0,9	81,9	-1,2	76,9	1,3	73,6	6,0	68,8	11,5	63,8	15,2	67,7	17,5	72,4	16,8	73,4	13,1	78,8	8,6	80,2	4,5	82,1	1,8	83,8
R_{se}	-0,7	80,6	-1,0	75,7	1,5	72,6	6,1	68,3	11,6	63,5	15,3	67,3	17,5	72,4	16,8	73,4	13,2	78,3	8,7	79,7	4,6	81,0	2,0	82,7
Luftspalt+träpanel	0,1	75,8	-0,2	71,1	2,2	69,2	6,7	65,7	11,9	62,3	15,5	66,5	17,7	71,6	17,0	72,5	13,5	76,9	9,2	77,2	5,3	77,8	2,7	78,9
Vindpapp	0,1	76,4	-0,2	71,8	2,2	69,6	6,7	66,0	11,9	62,4	15,5	66,6	17,7	71,6	17,0	72,6	13,5	76,9	9,2	77,4	5,3	78,1	2,7	79,4
Klimatskiva	9,8	40,2	9,6	37,5	10,9	39,5	13,3	43,5	16,1	48,2	18,0	57,4	19,2	65,5	18,9	64,9	17,0	62,2	14,7	54,9	12,8	49,0	11,2	45,9
VIP	10,9	67,4	10,8	64,8	11,9	62,8	14,1	57,7	16,6	55,6	18,3	61,1	19,4	67,0	19,1	67,1	17,4	67,5	15,3	64,3	14,4	64,8	12,2	67,4
Mineralull	17,2	45,8	17,1	44,1	17,6	44,4	18,4	44,6	19,3	47,4	20,0	55,3	20,4	63,2	20,3	62,6	19,6	59,3	18,8	52,2	18,0	48,8	17,6	48,3
PE-folie	17,2	66,2	17,1	64,5	17,6	62,6	18,4	57,2	19,3	54,8	20,0	59,6	20,4	65,3	20,3	65,4	19,6	65,2	18,8	61,4	18,0	62,4	17,6	65,6
Mineralull	20,1	55,8	20,1	54,1	20,2	53,7	20,4	50,9	20,6	50,8	20,8	56,9	20,9	63,4	20,8	63,5	20,7	61,1	20,5	55,6	20,3	54,8	20,2	56,3
Gips	20,4	54,8	20,4	53,1	20,5	52,8	20,6	50,3	20,7	50,6	20,8	57,9	20,9	63,4	20,9	63,2	20,8	60,7	20,7	55,0	20,5	54,2	20,5	55,4
Rsi	21,0	53,0	21,0	51,3	21,0	51,3	21,0	49,1	21,0	49,7	21,0	56,2	21,0	63,1	21,0	62,8	21,0	60,0	21,0	54,0	21,0	52,7	21,0	53,8
inne																								

OK

RF > 75%, T > 5°C

Väggkonstruktion 4

Fukttillstånd i väggkonstruktion 4

VÄGG 4	Januari		Februari		Mars		April		Maj		Juni		Juli		Augusti		September		Oktober		November		December	
	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)
ute	-0,9	81,9	-1,2	76,9	1,3	73,6	6,0	68,8	11,5	63,8	15,2	67,7	17,5	72,4	16,8	73,4	13,1	78,8	8,6	80,2	4,5	82,1	1,8	83,8
R_{se}	-0,7	80,6	-1,0	75,7	1,5	72,6	6,1	68,3	11,6	63,5	15,2	67,3	17,5	72,4	16,8	73,4	13,2	78,3	8,7	79,7	4,6	81,6	2,0	82,7
Luftspalt-träpanel	0,1	75,8	-0,2	71,1	2,2	69,2	6,7	65,7	11,9	62,3	15,5	66,5	17,7	71,6	17,0	72,5	13,4	76,9	9,1	77,2	5,2	78,4	2,6	78,9
Vindpapp	0,1	76,4	-0,2	71,8	2,2	69,6	6,7	66,0	11,9	62,4	15,5	66,6	17,7	71,6	17,0	72,6	13,4	76,9	9,1	77,4	5,2	78,7	2,6	79,4
Klimatskiva	2,5	64,9	2,2	60,9	4,3	60,6	8,3	59,5	13,0	58,3	16,1	64,2	18,0	70,3	17,4	70,5	14,3	73,3	10,5	71,2	7,0	69,9	4,8	69,0
$VIP_{obruten}$	11,6	64,5	11,5	62,0	12,5	60,5	14,5	56,0	16,9	54,6	18,5	60,4	19,5	66,6	19,2	66,7	17,6	66,7	15,7	62,8	13,9	62,8	12,7	64,9
Mineralull	17,6	44,8	17,6	42,8	18,0	43,4	18,7	43,8	19,5	46,8	20,1	55,0	20,5	62,8	20,4	62,2	19,8	58,6	19,1	51,3	18,5	47,6	18,0	47,1
PE-folie	17,6	64,6	17,6	62,6	18,0	61,2	18,7	56,2	19,5	54,2	20,1	59,3	20,5	64,9	20,4	65,0	19,8	64,4	19,1	60,3	18,5	60,9	18,0	64,1
Mineralull	20,2	55,4	20,2	53,7	20,3	53,4	20,5	50,6	20,7	50,6	20,8	56,9	20,9	63,4	20,8	63,2	20,7	61,1	20,6	55,3	20,4	54,5	20,3	56,0
Gips	20,5	54,5	20,5	52,8	20,5	52,8	20,6	50,3	20,8	50,3	20,9	56,6	20,9	63,4	20,9	63,2	20,8	60,7	20,7	55,0	20,6	53,9	20,5	55,4
Rsi	21,0	53,0	21,0	51,3	21,0	51,3	21,0	49,1	21,0	49,7	21,0	56,2	21,0	63,1	21,0	62,8	21,0	60,0	21,0	54,0	21,0	52,7	21,0	53,8
inne																								

OK

RF > 75%, T > 5°C

Väggkonstruktion 5

Fukttillstånd i väggkonstruktion 5

VÄGG 5	Januari		Februari		Mars		April		Maj		Juni		Juli		Augusti		September		Oktober		November		December	
	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)
ute	-0,9	81,9	-1,2	76,9	1,3	73,6	6,0	68,8	11,5	63,8	15,2	67,7	17,5	72,4	16,8	73,4	13,1	78,8	8,6	80,2	4,5	82,1	1,8	83,8
R_{se}	-0,8	81,1	-1,1	76,4	1,4	73,0	6,1	68,3	11,6	63,5	15,2	67,7	17,5	72,4	16,8	73,4	13,1	78,8	8,7	79,7	4,6	81,6	1,9	83,3
Luftspalt+träpanel	-0,2	77,4	-0,5	72,8	1,9	70,7	6,5	66,6	11,8	62,6	15,4	66,9	17,6	72,0	16,9	73,0	13,3	77,4	9,0	78,1	5,0	79,4	2,4	80,6
Vindpapp	-0,2	78,0	-0,5	73,4	1,9	71,2	6,5	66,8	11,8	62,7	15,4	67,0	17,6	72,0	16,9	73,0	13,3	77,5	9,0	78,3	5,0	79,7	2,4	81,0
Klimatskiva	6,1	51,0	5,8	47,6	7,5	49,1	10,8	50,7	14,5	53,1	17,0	60,8	18,6	67,9	18,1	68,0	15,6	67,7	12,5	62,9	9,7	58,8	7,9	56,3
Mineralull	8,2	44,6	8,0	41,5	9,5	43,2	12,2	46,5	15,4	50,3	17,6	58,7	19,0	66,3	18,5	66,4	16,4	64,6	13,7	58,4	11,3	53,2	9,8	49,9
$VIP_{obruten}$	17,7	44,5	17,7	42,5	18,0	43,4	18,7	43,5	19,6	46,5	20,1	55,0	20,5	62,8	20,4	62,2	19,8	58,6	19,1	51,3	18,5	47,6	18,1	46,8
PE-folie	17,7	64,2	17,7	62,2	18,0	61,2	18,7	55,8	19,6	53,9	20,1	59,3	20,5	64,9	20,4	65,0	19,8	64,4	19,1	60,3	18,5	60,9	18,1	63,7
Mineralull	20,2	55,4	20,2	53,7	20,3	53,4	20,5	50,6	20,7	50,6	20,8	56,9	20,9	63,4	20,9	63,2	20,7	61,1	20,6	55,3	20,4	54,5	20,3	56,0
Gips	20,5	54,5	20,5	52,8	20,5	52,8	20,7	50,3	20,8	50,3	20,9	56,6	20,9	63,4	20,9	63,2	20,8	60,7	20,7	55,0	20,6	53,9	20,6	55,0
Rsi	21,0	53,0	21,0	51,3	21,0	51,3	21,0	49,1	21,0	49,7	21,0	56,2	21,0	63,1	21,0	62,8	21,0	60,0	21,0	54,0	21,0	52,7	21,0	53,8
inne																								

OK

RF > 75%, T > 5°C

Bilaga 4: Materialkostnader väggkonstruktioner

Referensvägg	**Materialkostnad/ Kvadratmeter vägg** *[kr/m^2]*	**Materialkostnad/ Längdmeter vägg** *takhöjd=2,52 m [kr/m]*
Vindpapp	11,07	27,90
70 klimatskiva	47,80	120,46
28x70 Träläkt cc600	13,52	34,07
220 Stålreglar cc450	116,99	294,81
220 Mineralull	42,24	106,44
PE-folie	6,78	17,09
45x70 Träreglar cc450	21,42	53,98
70 Mineralull	13,46	33,92
13 Gipsskiva	54,87	138,27
Totalt	**328,15**	**826,94**
Väggkonstruktion 1	**Materialkostnad/ Kvadratmeter vägg** *[kr/m^2]*	**Materialkostnad/ Längdmeter vägg** *takhöjd=2,52 m [kr/m]*
Vindpapp	11,07	27,90
45x25 Träläkt cc600	9,47	23,86
VIP A	739,60	1 863,79
70 Klimatskiva	47,80	120,46
Distanser (70 mm)	5,50	13,86
45x95 Träreglar cc600	21,37	53,85
95 Mineralull	20,46	51,56
PE-folie	6,78	17,09
45x70 Träreglar cc450	21,42	53,98
70 Mineralull	13,46	33,92
13 Gipsskiva	54,87	138,27
Totalt	**951,80**	**2 398,54**
Väggkonstruktion 2	**Materialkostnad/ Kvadratmeter vägg** *[kr/m^2]*	**Materialkostnad/ Längdmeter vägg** *takhöjd=2,52 m [kr/m]*
Vindpapp	11,07	27,90
45x70 Träreglar cc600	16,77	42,26
VIP A	739,60	1 863,79
45 Mineralull	10,86	27,37
120 Mineralull	21,78	54,89
PE-folie	6,78	17,09
45x70 Träreglar cc450	21,42	53,98
70 Mineralull	13,46	33,92
13 Gipsskiva	54,87	138,27
Totalt	**896,61**	**2 259,46**

Väggkonstruktion 3	**Materialkostnad/ Kvadratmeter vägg** *[kr/m^2]*	**Materialkostnad/ Längdmeter vägg** *takhöjd=2,52 m [kr/m]*
Vindpapp	11,07	27,90
70 Klimatskiva	47,80	120,46
Distanser (70 mm)	5,50	13,86
45x25 Träläkt cc600	9,47	23,86
VIP A	739,60	1863,79
45x95 Träreglar cc600	21,37	53,85
95 Mineralull	20,46	51,56
PE-folie	6,78	17,09
45x70 Träreglar cc450	21,42	53,98
70 Mineralull	13,46	33,92
13 Gipsskiva	54,87	138,27
Totalt	**951,80**	**2 398,54**
Väggkonstruktion 4	**Materialkostnad/ Kvadratmeter vägg** *[kr/m^2]*	**Materialkostnad/ Längdmeter vägg** *takhöjd=2,52 m [kr/m]*
Vindpapp	11,07	27,90
45x70 Träreglar cc600	21,42	53,98
70 Klimatskiva	39,80	100,30
VIP B	700,00	1 764,00
70 Mineralull	12,83	32,33
PE-folie	6,78	17,09
45x70 Träreglar cc450	21,42	53,98
70 Mineralull	13,46	33,92
13 Gipsskiva	54,87	138,27
Totalt	**881,65**	**2 221,76**
Väggkonstruktion 5	**Materialkostnad/ Kvadratmeter vägg** *[kr/m^2]*	**Materialkostnad/ Längdmeter vägg** *takhöjd=2,52 m [kr/m]*
Vindpapp	11,07	27,90
70 Klimatskiva	47,80	120,46
Distanser (70 mm)	5,50	13,86
45x70 Träreglar cc600	21,42	53,98
70 Mineralull	13,46	33,92
VIP B	700,00	1 764,00
PE-folie	6,78	17,09
45x70 Träreglar cc450	21,42	53,98
70 Mineralull	13,46	33,92
13 Gipsskiva	54,87	138,27
Totalt	**895,78**	**2 257,37**