CHALMERS

Ekonomisk jämförelse av tilläggsisolering på miljonprogramshus med vakuumisoleringspaneler

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

DIMITRIOS CHRISTOS KARYDAS
JENS LE

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNAD

EXAMENSARBETE ACEX20

Ekonomisk jämförelse av tilläggsisolering på miljonprogramshus med vakuumisoleringspaneler

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

DIMITRIOS CHRISTOS KARYDAS
JENS LE

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Byggnadsfysikalisk modellering
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2024

Ekonomisk jämförelse av tilläggsisolering på miljonprogramshus med vakuumisoleringspaneler

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

DIMITRIOS CHRISTOS KARYDAS

JENS LE

© DIMITRIOS CHRISTOS KARYDAS/JENS LE, 2024

Examensarbete ACEX20
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola 2024

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Byggnadsfysikalisk modellering
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2024

Ekonomisk jämförelse av tilläggsisolering på miljonprogramshus med vakuumisoleringspaneler

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

DIMITRIOS CHRISTOS KARYDAS

JENS LE

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Byggnadsfysikalisk modellering
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Då byggsektorn står för stora mängder växthusgasutsläpp är det väsentligt att vidta energieffektiva åtgärder för att uppnå ett hållbart samhälle. Många byggnader i Sverige är i dagsläget nära slutet på sin tekniska livslängd och kräver någon form av underhåll. Genom effektiv renovering med högvärdiga isoleringsmaterial kan energiförbrukningen hos äldre byggnader minska avsevärt då många av dessa består av undermålig isolering. I Sverige är en majoritet av byggnaderna isolerade med mineralullsisolering eller cellplastisolering, men det har på senare år dykt upp olika superisoleringsmaterial. Ett sådant material är vakuumisoleringspaneler (VIP) som är paneler med extremt låg värmeledningsförmåga.

Trots att dessa paneler värmeisolerar bättre än konventionella isoleringsmaterial väljs de ofta bort på grund av deras höga pris. Kostnaden för vakuumisoleringspaneler kan vara uppemot tio gånger dyrare än kostnaden för mineralull vilket medför att det kan ta flera år innan det blir ekonomiskt fördelaktigt att renovera med vakuumisoleringspaneler. Denna studie beaktar de olika isoleringsmaterialen för att analysera hur lång återbetalningstiden är vid renovering för vardera material. Med hjälp av beräkningar och simuleringar från datorprogram fås därmed en uppfattning för om vakuumisoleringspaneler är ett ekonomiskt lönsamt isoleringsmaterial att tillämpa för renoveringsprojekt på miljonprogramshus.

Studiens resultat visar att renovering med vakuumisoleringspaneler har en återbetalningstid som är betydligt mycket längre än vid renovering med mineralull. En punkterad vakuumisoleringspanel med försämrad prestanda har en förlängd återbetalningstid på nästan tio gånger. Utifrån dessa resultat kan vi därmed konstatera att det i dagsläget inte blir ekonomiskt fördelaktigt att renovera med vakuumisoleringspaneler då materialkostnaden jämfört med mineralull är signifikant. Trots dessa resultat fås samtidigt en omfattande minskning i energiförbrukningen, vilket antyder på att dessa paneler har möjligheten att vara fördelaktiga beroende på framtida elpriser, samt om det inte vore för deras höga kostnad.

Nyckelord: vakuumisoleringspaneler, VIP, energiförbrukning, miljonprogrammet, renovering, tilläggsisolering, mineralull, energieffektivisering

Economic comparison of additional insulation on million programme buildings with vacuum insulation panels

Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering

DIMITRIOS CHRISTOS KARYDAS

JENS LE

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Building Technology
Building Physics Modelling
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

As the construction sector accounts for large amounts of greenhouse gas emissions, it is essential to take energy-efficient measures to achieve a sustainable society. Many buildings in Sweden are currently close to the end of their technical lifespan and require some form of maintenance. Through effective renovation with high-quality insulation materials, the energy consumption of older buildings can be significantly reduced, as many of these consist of substandard inadequate insulation. In Sweden, the majority of buildings consist of mineral wool insulation or cellular plastic insulation, although in recent years super insulation materials have appeared. One such material is vacuum insulation panels (VIP) which are panels with extremely low thermal conductivity.

Although these panels provide better thermal insulation, they are usually deprioritized due to their high cost. The cost of vacuum insulation panels can be up to ten times more expensive than the cost of mineral wool, which means that it can take several years before it becomes economically beneficial to renovate with vacuum insulation panels. This study considers the different insulation materials to analyze how long the payback period is for each material. With the help of calculations and simulations from computer programs, an assessment is made to determine whether vacuum insulation panels are economically profitable insulation material to apply for renovation projects on million programme houses.

The results of the study show that renovation with vacuum insulation panels has a payback period that is significantly longer than renovation with mineral wool. A punctured vacuum insulation panel with reduced performance has an extended payback period of almost ten times. Based on these results, we can therefore state that it is not economically beneficial to renovate with vacuum insulation panels currently as the material cost compared to mineral wool is significant. Despite these results, a substantial reduction in energy consumption is obtained simultaneously, which suggests that these panels have the potential to be beneficial depending on future electricity prices, as well as if it were not for their high cost.

Key words: vacuum insulation panels, VIP, energy consumption, million programme, renovation, additional insulation, mineral wool, energy efficiency

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING I
ABSTRACT II
INNEHÅLL III
FÖRORD V
BETECKNINGAR VI

1 INLEDNING 1
1.1 Syfte 2
1.2 Frågeställningar 2
1.3 Metod 2
1.4 Avgränsningar 2

2 MILJONPROGRAMMET 3
2.1 Miljonprogrammets byggnader 3
2.2 Efterverkningar och renoveringsmöjligheter 4

3 VAKUUMISOLERINGSPANELER 5
3.1 Uppbyggnad och funktion 5
3.2 VIP i jämförelse med andra isoleringsmaterial 5

4 GRUNDLÄGGANDE BYGGNADSFYSIK, NORMER OCH STANDARDER 7
4.1 Boverkets byggregler 10

5 ANALYS AV RENOVERINGSLÖSNINGAR 11
5.1 Utgångsvägg 16
5.2 Renoveringslösning 1 & 2 17
5.3 Renoveringslösning 3 & 4 18
5.4 Renoveringslösning 5 18

6 RESULTAT 20
6.1 Energiförluster 20
6.2 Uppvärmningskostnader 22
6.3 Årlig besparing 23
6.4 Återbetalningstid 24

7 DISKUSSION 25

8 SLUTSATS 27

REFERENSER 28

BILAGOR 30

FÖRORD

Denna studie är ett examensarbete utfört på Chalmers Tekniska Högskola under vårterminen 2024 och omfattar 15 högskolepoäng. Rapporten är skriven vid avdelningen för Byggnadsteknologi, institutionen för Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik. Arbetet undersöker den ekonomiska lönsamheten vid tillämpning av vakuumisoleringspaneler som isoleringsmaterial på ett miljonprogramshus.

Vi vill tacka vår handledare Pär Johansson, docent i byggnadsfysik på Chalmers, som har bidragit med värdefull support och expertis under arbetets förlopp.

Göteborg maj 2024
Dimitrios Christos Karydas
Jens Le

BETECKNINGAR

Latinska versaler

A_i	Arean för byggnadsdelens yta (m^2)
A_{om}	Omslutningsarea för byggnad (m^2)
E	Energi (J)
K_{tot}	Totala förluster (W/K)
K_{trans}	Transmissionsförluster (W/K)
K_{vent}	Ventilationsförluster (W/K)
Q	Värmeeffekt (W)
R	Värmemotstånd genom skikt (m^2K/W)
R_{se}	Värmeövergångsmotstånd på byggnadsdelens utsida (m^2K/W)
R_{si}	Värmeövergångsmotstånd på byggnadsdelens insida (m^2K/W)
R_{tot}	Totala värmemotståndet (m^2K/W)
T_i	Inomhustemperatur (°C)
T_u	Utomhustemperatur (°C)
U_i	Värmegenomgångskoefficient för byggnadsdel (W/m^2K)
U_m	Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient (W/m^2K)
$\dot{V}_{vent}$	Ventilationsflöde (m^3/s)

Latinska gemena

$c_{p,luft}$	Luftens specifika värmekapacitet (J/kgK)
d	Materialskiktets tjocklek (m)
t	Tid (h)

Grekiska bokstäver

α_k	Värmeöverföringskoefficient konvektion (W/m^2K)
α_s	Värmeöverföringskoefficient strålning (W/m^2K)
λ	Värmeledningsförmåga (W/mK)
ρ_{luft}	Luftens densitet (kg/m^3)
ψ	Linjära köldbryggor (W/mK)
χ	Punktköldbryggor (W/K)

1 INLEDNING

Byggsektorn står i dagsläget för stora mängder utsläpp av växthusgaser. Ungefär 40% av energianvändningen i Sverige går åt byggnaders uppvärmning och förseende av el samtidigt som drygt 20% av Sveriges totala växthusgasutsläpp kommer från byggnader (Naturvårdsverket, 2023). Vid analysering av en byggnads energianvändning över ett 50-årsspan framgår det tydligt att största mängden energi går åt uppvärmning av huset där drift och uppvärmning står för drygt 90% av en byggnads totala energianvändning, medan transporter och materialtillverkning står för resterande 9%. Det är därför väsentligt att minska drift- och uppvärmningsbehoven genom att energieffektivisera husen. Med bättre isolering sparas stora mängder energi och den totala energiåtgången minskar radikalt i ett energieffektivt hus (Bokalders & Block, 2004).

Att minska energiförbrukningen genom att bygga tätt och med effektiv isolering istället för att nyttja aktiva system som installationssystem, ventilationsanläggningar och uppvärmningssystem kallas vanligtvis för passiv teknik. Denna teknik kräver att byggnaden konstrueras på ett välgjort sätt redan från början vilket senare under användningsskedet medför minimala underhållsarbeten (Strandberg & Lavén, 2018). För ett hållbart samhälle bör byggnader isoleras i större omfattning och med högvärdig isolering. Under miljonprogrammet isolerades husen i tak och väggar med 100 mm tjock isolering, vilket i modern standard klassas som undermåligt. Isoleringstjocklekarna fördubblades senare under 1970-talet som ett resultat av stigande oljepriser men trots denna fördubbling anses isoleringen fortfarande inte att vara tillräckligt för ett hållbart samhälle (Bokalders & Block, 2004).

Det är komplicerat att beräkna den optimala isolertjockleken på ytterväggar då denna beror på dem framtida energikostnaderna. Exempelvis har superisolerade hus vanligtvis en isolertjocklek på 250–350 mm i väggar och 500–600 mm i tak och anses generellt vara energisnåla. Det är dock inte enbart isoleringsmaterialet och dess tjocklek som påverkar en byggnads isoleringsförmåga. Bland annat är lufttäthet, fuktbuffring och värmetröghet några av de påverkande faktorerna på en byggnads isoleringsförmåga.

Olika isoleringsmaterial varierar i dess förmåga att isolera och de bästa materialen har en värmeledningsförmåga på 0,035–0,055 W/mK. Under senare år har isoleringsmaterial med exceptionellt låga λ-värden introducerats (Bokalders & Block, 2004). Ett av dessa material är vakuumisoleringspaneler (VIP) som är mikroporösa paneler och tack vare sitt låga λ-värde har en utmärkt isolerprestanda jämfört med konventionella isoleringsmaterial (Svensk Byggtjänst, 2023). Värmeledningsförmågan för dessa paneler är 2–5 gånger lägre än konventionella isoleringsmaterial vilket innebär att om tjockleken på VIP är densamma som för ett konventionellt isoleringsmaterial kan 50–80% av byggnadens totala värmeförluster genom klimatskalet reduceras. Genom välisolerade nybyggnationer och betydande renovering av befintliga byggnader kan målet om halvering av energianvändningen jämfört med år 1995 uppnås (Adl-Zarrabi & Johansson, 2017).

1.1 Syfte

Syftet med detta arbete var att få en djupare förståelse för vakuumisoleringspanelers uppbyggnad och funktion, men även hur dessa kan implementeras vid renovering av en yttervägg på en befintlig bostad byggd under miljonprogrammet. Genom en ökad kunskap om vakuumisoleringspanelers tillämpning kunde en förståelse fås för hur energianvändningen för ett renoveringsobjekt med vakuumisoleringspaneler som det primära isoleringsmaterialet förhåller sig gentemot ett traditionellt renoveringsprojekt med mineralull som det primära isoleringsmaterialet. Vidare beaktades den ekonomiska aspekten av de olika renoveringsprojekten och en analys av återbetalningstiden gjordes med syftet att bedöma när det blir ekonomiskt fördelaktigt att implementera vakuumisoleringspaneler i ett renoveringsprojekt.

1.2 Frågeställningar

- Är vakuumisoleringspaneler ett lönsamt isoleringsmaterial att tillämpa i ytterväggar av ett renoveringsprojekt för svenska byggnader?
- Hur lång är återbetalningstiden för renoveringslösningar gällande vakuumisoleringspaneler?

1.3 Metod

Utförandet av arbetet uppdelades i tre steg. Det första steget var att skapa en fördjupad förståelse om materialet och ämnet samt kontextualisera arbetet genom att utföra en litteraturstudie. Studien innefattade bland annat VIP:s funktion, användning samt dess för- och nackdelar och användes som grund för de efterkommande stegen. Inom detta steg valdes även en byggnad inom miljonprogrammet som undersökningsobjekt, där relevant bakgrundsinformation togs fram. Sedan skapades ett flertal ritningar inom renoveringssyfte för byggnaden, där varje ritning ägnade sig till olika förbättringsalternativ. Ritningarna baserades på litteraturstudien med mål om att kunna återskapas och användas inom verkliga miljonprograms byggnader. Slutligen återskapades ritningarna i multifysiksimuleringsprogrammet COMSOL Multiphysics för att simulera deras prestanda och ta fram återbetalningstiden för varje lösning. Resultaten redovisades sedan i ett flertal diagram där de kunde jämföras för att hitta den mest optimala lösningen för olika mål och syften.

1.4 Avgränsningar

Studien avgränsades till att analysera en yttervägg på referensbyggnaden Hjällbo 37:32. Vid framtagning av ytterväggens energiförluster försummades förluster genom ventilationssystem, men även internvärme och solinstrålning. Enbart transmissionsförluster genom ytterväggen uppmärksammades således i studien. Ytterligare en avgränsning avsåg återbetalningstiden, då endast materialkostnaden beaktades utan hänsyn till monteringskostnader eller transportkostnader. Med tanke på att arbetets syfte endast var att betrakta värmeöverföring genom en yttervägg var invändig tilläggsisolering fokus för studien. Nackdelarna med utvändig tilläggsisolering ansågs inte vara relevanta för beräkningarna och avgränsades därmed från detta arbete.

2 MILJONPROGRAMMET

Som ett resultat av den snabba urbaniseringen till följd av andra världskrigets slut uppstod en kraftig bostadsbrist i Sverige. Den dåvarande högkonjunkturen ledde till att många människor som tidigare bott på landsbygden flyttade in till storstäder vilket gjorde det omöjligt för storstäderna att bemöta denna anstormning. Approximativt två tredjedelar av lägenheterna i Sverige var som störst två rum och kök och ända fram till 1956 var smålägenheterna dominerande. Bostadsbristen fortsatte att växa kraftigt över hela landet och i samband med det bestämde sig Sverige för att en miljon nya bostäder skulle byggas under en nioårsperiod, det så kallade Miljonprogrammet (Arnstberg, 2000; Söderqvist, 1999).

Termen har sitt ursprung 1965 och målet med riksdagens beslut var att eliminera den stora bostadsbristen genom att bygga samtida bostäder till priser som var överkomliga för arbetarklassen (Stockholmskällan, 2022). Beslutet om ett fortlöpande byggande fastställdes och för att komma till rätta med denna akuta kris innebar det ett byggande av rekordstor mängd bostäder (Söderqvist, 1999).

2.1 Miljonprogrammets byggnader

År 1965 började det stora bostadsbyggandet i Sverige och under en nioårsperiod står ungefär en miljon nya bostäder klara över hela landet. Formgivningen för dessa byggnader inspirerades av funktionalismen och präglades av ett inflytande från strukturalismen och brutalismen. Därmed har många av byggnaderna karaktäristiska verkningsmedel som skiljer sig från en traditionell eller klassisk byggnadsutformning. Trots det skiljer sig byggnadernas utformning generellt i de olika områdena och skillnader kan identifieras både lokalt och regionalt (Samuelsson, 2004).

Den bärande stommen anpassades alltmer till rationella produktions- och byggmetoder och runtomkring 40% av byggnaderna består av bärande system där de tvärställda väggarna bär bjälklagen, till skillnad mot gamla byggnader där längsgående hjärtväggar och ytterväggar bär upp bjälklagen. Grundläggningsarbetet omfattades av den rationella byggtekniken och ungefär en tiondel av byggnaderna har platta på mark medan en tredjedel av byggnaderna har friktions- och stödpålar. De vanligaste takformerna för dessa byggnader är sadeltak, pulpettak, plant tak och inåtlutande tak. Innerväggarnas material och ytskikt varierar där ungefär en tredjedel av alla hus har icke-bärande innerväggar av lättbetong medan ungefär hälften av alla hus har icke-bärande innerväggar av en plåt- eller träregelstomme (Vidén & Lundahl, 1992).

Ytterväggarnas värmeisolering har i de flesta fallen ett U-värde på 0,5–0,6 m^2K/W. I samband med det anses tätning vara nödvändigt för att förbättra inomhusklimatet då många av ytterväggarna är otäta. Vanligtvis är ytterväggars utfackningspartier mycket otätare än murade eller gjutna väggar vilket leder till att dessa kan upplevas som mycket kalla och dragiga. Fönstren utfördes i de flesta fall med inåtgående tvåglasfönster och i vissa få fall med treglasfönster, dock endast i 5% av alla byggnader (Vidén & Lundahl, 1992).

2.2 Efterverkningar och renoveringsmöjligheter

Redan under tidigt 1970-tal var frågan om den svenska bostadskrisen löst. Trångboddheten försvann och ett överskott av bostäder uppstod vilket innebar att det fanns plats för alla att bosätta sig i (Samuelsson, 2004). Trots det kom kritiken ganska snabbt och många områden och bostadshus ansågs bland annat vara oattraktiva och förtryckande på grund av deras gråa, sterila och storskaliga utseende. I många fall höll inte förverkligandet samma standard som planeringsidealen och utbyggnaden släpade efter i vissa grundläggande funktioner såsom affärer, skolor eller kollektivtrafik.

Runt 300 000 fastigheter står i dagsläget i behov av en omgående renovering (Naturskyddsföreningen, 2021). En liten del av bostäderna innehar allvarliga problem på grund av att de är tekniskt undermåliga men majoriteten kräver endast mindre förbättringar, där behoven varierar mellan olika fastigheter och beror på vilket sorts underhållsarbete som gjorts tidigare. Exempelvis kan det handla om fasader, balkonger, fönster, ventilation eller elinstallationer. Kostnaderna för att renovera eller energieffektivisera dessa bostäder uppskattas till 500 miljarder kronor (Samuelsson, 2004; Boverket, 2020).

Vid renovering av en ytterv̈agg kan arbetet genomföras genom att antingen ersätta den befintliga isoleringen eller genom att tilläggsisolera. Tilläggsisolering kan implementeras både invändigt och utvändigt beroende på hur ytterväggens behov ser ut (Lindgren, 2020). Vid utvändig tilläggsisolering av en fasadvägg finns det generellt inga problem beträffande begränsningar inom boytan (Lauby, 2013). Detta medför flexibilitet när det gäller isoleringens tjocklek, vilket är användbart för att uppfylla isoleringskrav. Det finns dock andra problem med utvändig tilläggsisolering. I fall där byggnadens fasad måste bevaras kan det visa sig vara utmanande att tilläggsisolera utvändigt. Detta kan vara fallet med historiska eller kulturellt värdefulla byggnader. Dessutom måste isoleringsskiktet klara av att motstå högre nivåer av fukt, köldbryggor och frost från utomhusmiljön, vilket kan kräva extra åtgärder.

Invändig tilläggsisolering kan vara ett alternativ när utrymmet på utsidan är begränsat men detta sker då istället på bekostnaden av boytan. Utöver detta förekommer andra nackdelar. Den invändiga isoleringen medför att väggens tjocklek inte bidrar lika mycket till den termiska trögheten (Lauby, 2013). Problem med fukt kan också förekomma, vilket medför att luftspalter och ångspärrar kan behövas för att minska risk för kondensation och skador. Beroende på vilket alternativ som används kommer värmelusten genom vägen att se annorlunda ut.

3 VAKUUMISOLERINGSPANELER

Vakuumisoleringspaneler, eller så kallade VIP, är en relativt ny termisk isoleringslösning som gjordes tillgänglig i slutet av 1990-talet (Brunner et al, 2012). Teknologin presenterades i syfte att användas inom kylningssystem som exempelvis kylskåp, frysar och fraktkartonger. Panelerna har dock varit av intresse för byggindustrin på grund av dess låga värmeledningsförmåga samt tunna skikt.

3.1 Uppbyggnad och funktion

Vakuumisoleringspaneler utgörs av en porös kärna omgiven av ett flertal täckande ytterskikt (Baetens, et al., 2010). Den porösa kärnan fyller det primära isoleringssyftet och behöver därmed uppfylla en rad olika krav. Kärnan ska bestå av ett mikroporöst material för att effektivt reducera värmeöverföringen inom porerna till ett ytterst litet värde. Dessutom krävs det att materialet ska inneha en helt öppen cellstruktur för att möjliggöra tömning av gaser inom materialet. Slutligen ska kärnan vara tålig mot kompression för att motstå både det interna trycket under bruk och trycket under vakuumevakuering.

Det finns ett antal material som uppfyllt dessa krav under livslängden av VIP. Ett vanligt alternativ som använts inom kylskåpsproduktion är polystyren (Baetens, et al., 2010). Inom byggbranschen har dock pyrogen kiseldioxid (Baetens, Jellea, & Arild, 2011) visat sig vara särskilt effektiv i isolerings syfte. Detta är i huvudsak på grund av materialets motstånd mot trycksänkningen samtidigt som den uppfyller kraven om den öppna cellstrukturen.

De täckande ytterskikten består av ett flertal lager laminerad plastfilm bestående av olika material med syftet att skydda panelen mot både fysiska skador men även penetration av fukt och gaser (Gonçalves, Simões, Serra, & Flores-Colen, 2020). Inom ytterskiktet implementeras även material som minskar värmestrålningen från panelerna.

Resultatet av denna uppbyggnad är att panelerna kan uppnå ett väldigt lågt λ-värde, mellan 0,0028 – 0,013 W/mK vid nytt skede, beroende på paneltyp och är därför av intresse för byggnadsapplikation (Gonçalves, Simões, Serra, & Flores-Colen, 2020).

3.2 VIP i jämförelse med andra isoleringsmaterial

Medan det finns flera fördelar med VIP finns det även fler nackdelar. Den komplexa tillverkningsprocessen av panelerna medför en hög kostnad i jämförelse med traditionella isoleringsmaterial (Baetens, et al., 2010). Materialet har etablerat sig i marknaden men dess produktion är fortfarande i stort sett handgjorda, vilket enbart ökar kostnaden (Baetens, et al., 2010). I jämförelse med traditionella isoleringsmaterial, såsom mineralull eller cellplast, kan kostnaden av VIP per kvadratmeter vara närmare tio gånger så stor (Schiavoni, D'Alessandro, Bianchi, & F., 2016).

Utöver detta finns problem med panelernas livslängd, då vakuumsförhållandet inom panelerna försämras med tiden. Livslängden skiljer sig mellan tillverkare och paneltyper men den estimerad livslängden av VIP kan ligga på allt mellan 10 – 60 år

beroende på panel typ (Gonçalves, Simões, Serra, & Flores-Colen, 2020). Panelerna har inte funnits tillräckligt länge för att säkerställa en konkret livslängd. Isoleringsförmågan under VIP:s livslängd är dock inte heller statisk utan dynamisk. Detta är på grund av tryckförlusterna som sker under panelens livslängd, vilket medför att prestandan försämras med tiden (Baetens, et al., 2010). Traditionella isoleringsmaterial etablerad livslängd, då dessa varit i bruk under en väldigt lång tid. Samtidigt försämras inte dessa material lika mycket med tiden i jämförelse med VIP.

4 GRUNDLÄGGANDE BYGGNADSFYSIK, NORMER OCH STANDARDER

I. Byggnaders klimatskal

En byggnads klimatskal består av ytterväggar, fönster, tak, golv och dörrar och är således alla ytor som omfattar husets uppvärmda yta. Dess huvudsyfte är att skydda konstruktionen mot skador från fukt och kyla samt förebygga energi- och värmeförluster. För att avgöra om skyddet är tillräckligt måste både de interna och externa påfrestningarna beaktas. De interna påfrestningarna består av bland annat fukt- och värmeavgivning från människor i byggnaden men även från byggnadsmaterialets emissioner, medan de externa påfrestningarna framför allt handlar om belastningar från klimatet såsom nederbörd, solstrålning, vind, uteluft etcetera. För att dessa krav uppfylls finns det därmed ett antal funktionskrav för klimatskalet (Hagentoft & Sandin, 2017).

De olika funktionskrav som klimatskalet ställs inför är fuktskydd, vindskydd, regnskydd, värmeskydd, tjälskydd och luftläckageskydd (Hagentoft & Sandin, 2017). Det handlar till exempel om att byggnadens utformning ska vara på sådant sätt att byggnadsmaterialet eller konstruktionen inte drabbas av fuktbelastningar, att en god termisk komfort kan uppfyllas inomhus oavsett väder och att nederbörd inte ska vara orsaken för skador på byggnaden. I grunden handlar det om att uppnå en hälsosam miljö utan att det ska finnas risk för att bli sjuk.

Värmeförluster är starkt beroende av byggnadens klimatskal och dess utformning. Ju mindre isolering och slarvigt byggande desto mer energi kommer en byggnad att kräva för uppvärmning (Strandberg & Lavén, 2018). Av den orsaken är det viktigt att klimatskärmens utformning bestäms med ett långsiktigt synsätt redan från början för att spara energi. I nutida byggnader består klimatskalet av många olika material eller materialskikt där varje material tillgodoser ett tekniskt funktionskrav, men så har det inte alltid varit. Många äldre byggnader består av endast ett fåtal material eller materialskikt där dessa fungerar som alla funktionskrav, det vill säga värmeisolering, stomme, ytskikt, regnskydd och vindskydd.

II. Värmeöverföring

Värmeöverföring kan generellt beskrivas som den process där värme överförs från ett område till ett annat på grund av en differens i temperatur. I byggsektorn är detta fenomen viktigt för att säkerställa energieffektivitet och rimliga uppvärmningskostnader.

Värmeöverföring inom byggnadsfysikaliskt syfte kan delas upp i tre typer, ledning, konvektion och strålning. Med värmeledning överförs värmen genom direkt kontakt mellan materialskikt. Värmeledning sker främst mellan fasta material, men kan även ske ifall en vätska är tillräckligt viskös eller ifall det finns instängd gas i materialet.

Konvektion medför värmetransport genom tryckskillnader och rörelse genom en fluid. Denna typ av överföring är ytterst vanlig inom gaser och vätskor, där den kan ske genom antingen påtvingad konvektion eller naturlig konvektion. Den påtvingade konvektionen förekommer under påtvingad fluidrörelser, såsom under inflytandet av

en fläkt. Naturlig konvektionen förekommer som konsekvens av den termiska drivkraften.

Strålning medför värmeöverföring mellan ytor som inte är i kontakt. Överföring sker genom elektromagnetisk strålning som skapas på grund av temperatur differensen.

III. Värmeledningsförmåga

Värmeledningsförmågan (λ) har enheten W/mK och beskriver hur bra ett material leder värme (Strandberg & Lavén, 2018). Ett materials värmeledningsförmåga tillsammans med dess tjocklek avgör hur god värmeisolering en komponent har. Ett mindre värde på λ innebär bättre isolering eftersom mindre värme tränger igenom materialet och förloras genom klimatskalet. Olika material har olika bra värmeledningsförmåga och det är i första hand material med mycket luftfyllda hålrum eller porer som kännetecknar god isoleringsförmåga.

Vanligaste värmeisoleringsmaterialet för svenska byggnader är mineralull som består av antingen stenull eller glasull. Dess λ-värde varierar mellan 0,033–0,045 W/mK och har mycket god brandbeständighet och isoleringsförmåga (Bokalders & Block, 2004). Ännu ett vanligt värmeisoleringsmaterial är cellplast som består av antingen EPS eller XPS med ett λ-värde för som varierar mellan 0,036–0,040 W/mK.

IV. Värmemotstånd

Värmemotstånd (R) har enheten m^2K/W och beskriver isoleringsförmågan för ett materialskikt (Hagentoft & Sandin, 2017). Temperaturskillnader ger upphov till värmeflöde som begränsas av värmemotståndet. För att beräkna värmeflödet genom en homogen skiva med stationärt värmeflöde används värmekretsar. För ventilerade utrymmen och ytor används däremot värmekonduktanser och ju mindre dessa är desto mindre är värmeflödet. För en homogen skiva kan värmemotstånd och värmekonduktans uttryckas enligt ekvation (1).

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (1)$$

V. Värmegångskoefficient

Värmegenomgångskoefficienten, även kallat U-värde, har enheten W/m^2K och anger isoleringsförmågan för en hel byggnadsdel (Strandberg & Lavén, 2018). Det kan definieras som mängden värme som passerar genom en ytenhet av en konstruktionsdel per en tidsenhet, givet att lufttemperaturens skillnad mellan de två sidorna är en grad (Hagentoft & Sandin, 2017). För beräkning av U-värdet för en byggnadsdel behöver värmegenomgångsmotstånd och värmemotstånd på ingående skikt att vara kända (Strandberg & Lavén, 2018). Summan av det inverterade värdet från dessa skikt utgör därmed U-värdet vilket kan uttryckas enligt ekvation (2).

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^{N} \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}} \quad (2)$$

Enligt europastandard EN-ISO 6946:2017 ska värmeövergångsmotståndet för väggens insida och utsida räknas med vid U-värdesberäkningar. Dessa har beteckningen R_{si} för väggens insida och R_{se} för väggens utsida och har enheten m^2K/W. Med tanke på att en konstruktions totala värmemotstånd är mycket större än

värmeövergångsmotstånden har medelvärden tagits fram vid beräkning av värmeflödet. Nedanstående värden utgör en kraftig förenkling av verkligheten:

$R_{se} = 0{,}04\ m^2K/W$ (Gäller alltid)
$R_{si} = 0{,}13\ m^2K/W$ (För väggar)

Värmeövergångsmotståndet har en avgörande betydelse vid beräkning av en komponents yttemperatur. Exempelvis behöver en noggrannare uppskattning göras med hjälp av α_k och α_s för att beräkna insidans yttemperatur enligt:

$$R_{si} = \frac{1}{a_k + a_s} \quad (3)$$

Värmeövergångskoefficienten α_k har enheten W/m^{2}K och beror på luftflödets hastighet. Likaså har värmegenomgångskoefficienten α_s enheten W/m^{2}K och beror istället på ytans absorberingsförmåga av strålning.

VI. Internvärme och värmeförluster

En byggnads energiprestanda måste beräknas under normalt bruk och normalår enligt Boverkets allmänna råd och föreskrifter (Boverket, 2021). Allt som påverkar byggnadens energianvändning måste vägas in under normalt brukande för att beräkningar ska ske med noggrannhet. Två parametrar som påverkar energianvändningen är internvärme och transmissionsförluster och ingår därmed vid beräkning av byggnadens energiprestanda.

Internvärme är gratisvärme som avges från människor och elektriska apparater såsom vitvaror, belysning och datorer (Hagentoft & Sandin, 2017). Människor avger en värmeeffekt genom metabolism på ungefär 100 W vid vila vilket medför att uppvärmningsbehovet för bostäder alternerar beroende på mängden människor och apparater samt pågående aktivitet i bostaden. Även solinstrålning tillför kostnadsfri uppvärmning och resulterar i skiftande uppvärmningskostnader. I detta fall beror behovet på ortens klimat eftersom mängden solinstrålning är kopplat till byggnadens belägenhet.

Transmissionsförluster förekommer i alla byggnader och är mängden värme som flödar ut genom klimatskalet. Dessa förluster bestäms av klimatskalsdelarnas värmegenomgångskoefficient och innebär att ett lägre U-värde resulterar i mindre transmissionsförluster. Transmissionsförluster för en byggnad kan därmed beräknas enligt (4). Förutom transmissionsförluster genom klimatskalet kan värmeförluster ske genom ventilationen. Dessa kallas för ventilationsförluster och beräknas enligt ekvation (5).

$$K_{trans} = \Sigma_i\, U_i \cdot A_i \quad (4)$$

$$K_{vent} = \rho_{luft} \cdot c_{p,luft} \cdot \dot{V}_{vent} \quad (5)$$

Vidare när alla transmissionsförluster och ventilationsförluster är kända kan dessa summeras för att beräkna värmeeffekten och slutligen energianvändningen för en bostad enligt ekvationerna (6) och (7).

$$Q = K_{tot} \cdot (T_i - T_u) \quad (6)$$

$$E = Q \cdot t \quad (7)$$

VII. Köldbryggor

Köldbryggor är ett område där ett eller flera material har högre värmeledningsförmåga än närliggande material (Boverket, 2012). Detta skapar en ”brygga” där konstruktionen har mindre resistans och där värmen kan enklare ta sig igenom. För att säkerställa att en byggnads klimatskal bibehåller värme på ett så effektivt sätt som möjligt är det viktigt att identifiera och minimera antalet köldbryggor.

Köldbryggor kan kategoriseras i två grupper, nämligen linjära köldbryggor och punktköldbryggor. De linjära köldbryggorna uttrycks med beteckningen (ψ) och utrycks i W/mK. Dessa sker när flera materialskikt med olika värmegenomgångskoefficienter korsar varandra och kan beräknas med tvådimensionella beräkningsmetoder. Punktköldbryggor betecknas med (χ) och utrycks i W/K (Boverket, 2012). Dessa representerar tredimensionella köldbryggor som oftast sker vid exempelvis utvändiga hörn. Generellt sätt försummas dessa köldbryggor då de är väldigt små i förhållande till förluster genom övrig klimatskärm.

4.1 Boverkets byggregler

I Boverkets byggregler (BBR) finns det krav som sammanställer att en byggnad är tillräckligt isolerad (Boverket, 2020). Kravet ställs på klimatskalets genomsnittliga värmegenomgångskoefficient (U_m) och varierar beroende på verksamhet. Det finns alltså ett högsta tillåtna värde på U_m beroende på om byggnaden är ett flerbostadshus, ett småhus eller en lokal. För att kunna räkna ut en byggnads värmegenomgångskoefficient behöver alla U-värden för byggnadens komponenter vara kända. Därmed multipliceras respektive U-värdet med respektive area för varje komponent och summeras sedan tillsammans med byggnadens köldbryggor. Slutligen divideras den totala summan med den omslutande arean för byggnaden (A_{om}) och enheten är W/m^2 K. På så vis beräknas den genomsnittliga värmeövergångskoefficienten U_m och klimatskalets isoleringsgrad kan fastställas.

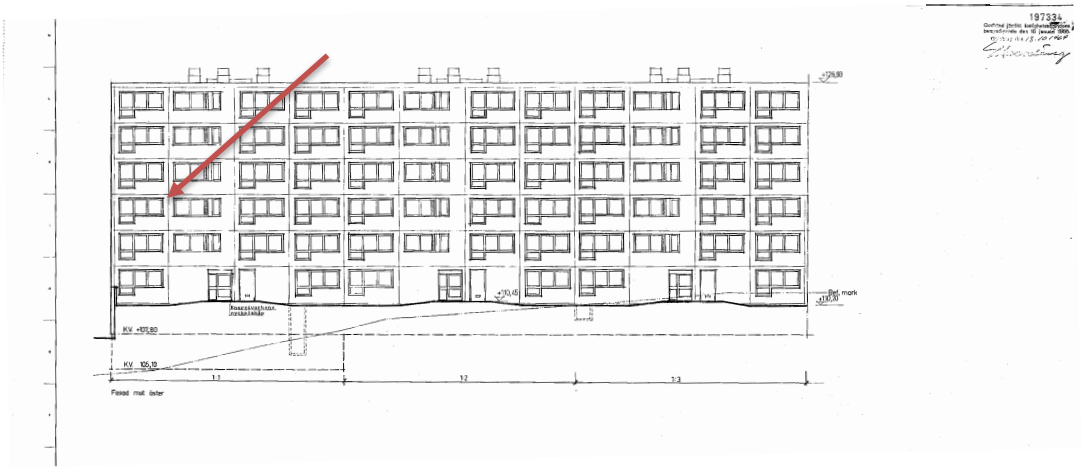
Tabell 1. Övre gränser för tillåtet U_m enligt tabell 9:2a i BBR.

Bostäder/Lokaler	**U_m [W/m^{2}K]**
Småhus > 130m^2	0,3
Småhus > 90-130m^2	0,3
Småhus > 50-90m^2	0,3
Småhus ≤ 50m^2	0,33
Flerbostadshus	0,4
Lokaler	0,5
Lokal ≤ 50m^2	0,33

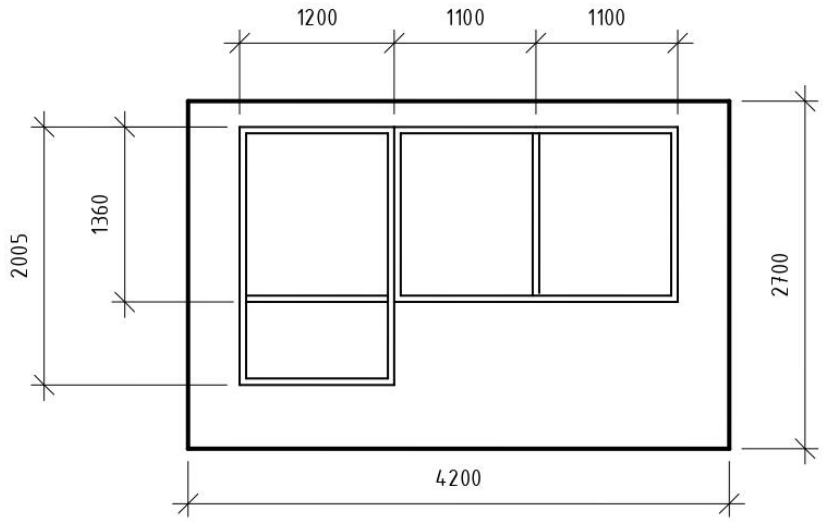
5 ANALYS AV RENOVERINGSLÖSNINGAR

I denna rapport har fastigheten Hjällbo 37:32 valts som referensbyggnad. Byggnaden är belägen i Hammarkullen, Göteborg. Hammarkullen är en del av miljonprogrammet som byggdes på två och ett halvt år och är en storskalig förort bestående av traditionella lägenheter (Arnstberg, 2000). Precis som många byggnader under miljonprogrammet är Hjällbo 37:32 nära slutet på sin tekniska livslängd och i behov av renoveringsarbete. Den utsedda ytterväggen för detta arbete är belägen mot öster på tredje våningen, se *Figur 1*. Väggen har en total yta på 11,34 m^2, inklusive en fönsteryta på 5,4 m^2 med 22 mm tjockt glas, se *Figur 2*.

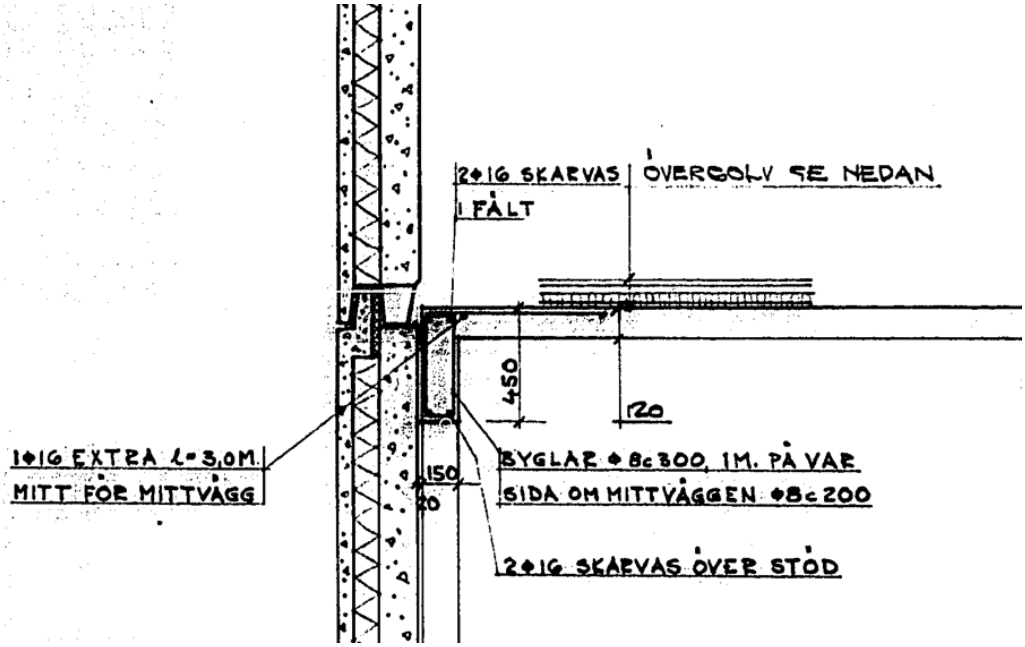
För att uppfylla rapportens syfte har urvalet av referensbyggnaden främst baserats på geografiskt läge och tidigare underhåll. Det är viktigt att tidigare renoveringsarbete inte skett på byggnaden då det sällan är ekonomiskt lönsamt att tilläggsisolera för fasader som fortfarande är i bra skick. Sex olika ritningar ska skapas varav dessa ritningar ska utformas med skiljande syften och slutligen jämföras med varandra för att få ett resultat på hur värmeeffektbehovet varierar för varje vägg. Skillnaden mellan dessa ritningar kommer främst att bero på typ av renovering samt material.



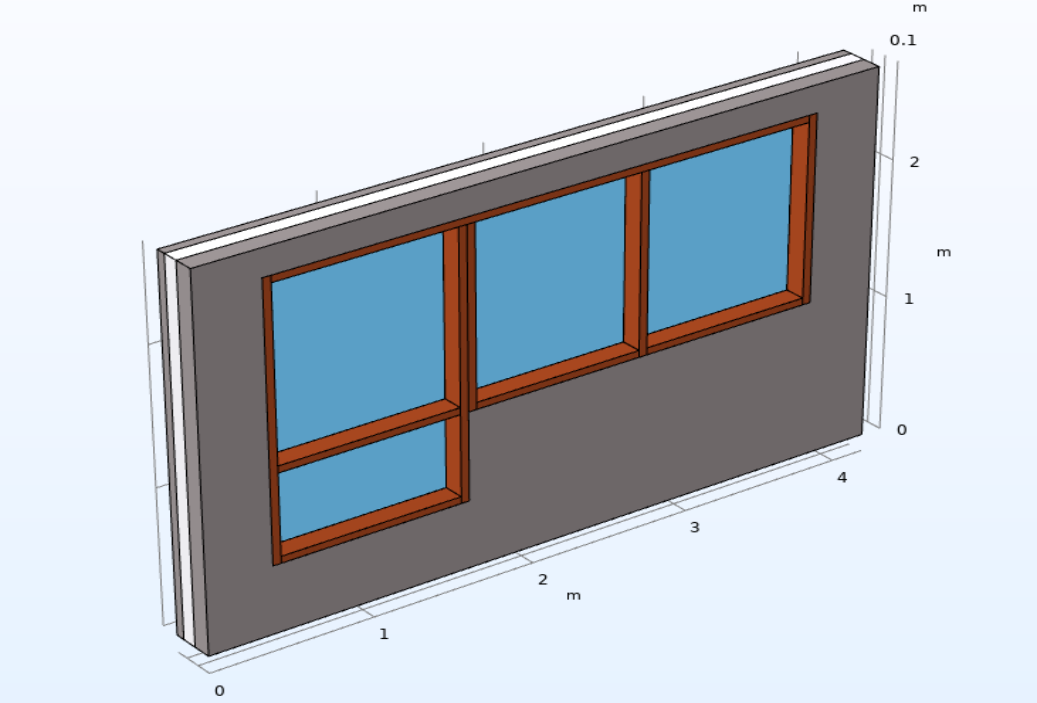
Figur 1. Ytterväggens placering på referensbyggnaden (Stadsbyggnadsförvaltningen, 1969).



Figur 2. Modell av utgångsväggens fasad med mått.



Figur 3. Ytterväggens anslutning till tak, golv och vägg (Stadsbyggnadsförvaltningen, 1969).

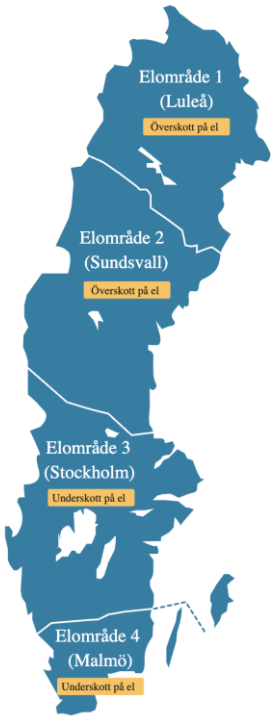


Figur 4. Modell av utgångsvägg i COMSOL.

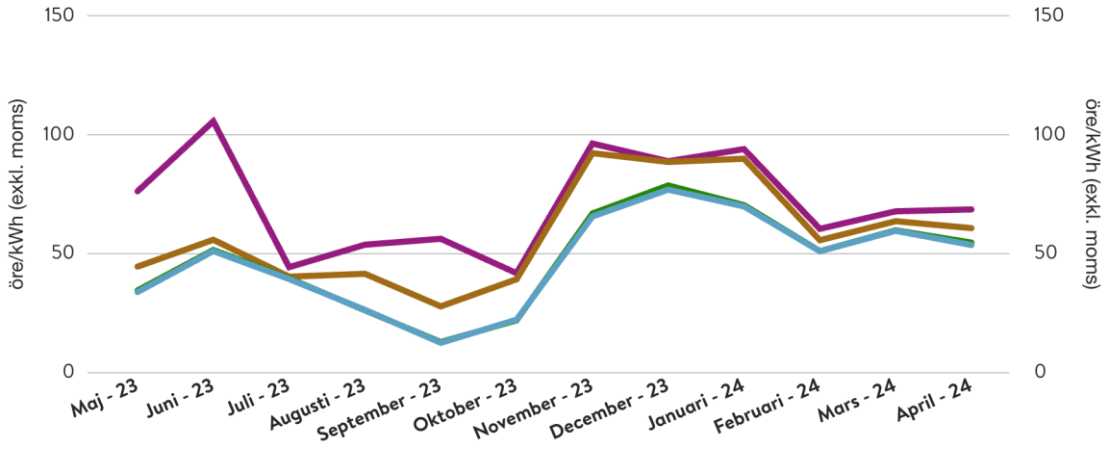
I. Ekonomi

Vid utförandet av ett renoveringsprojekt på en bostad är materialkostnaden av stor betydelse. Det är väsentligt att ha insikt i vad inköpspriset för materialen är redan innan projektets påbörjan för att senare kunna beräkna lönsamheten för projektet. Utöver materialkostnaden är det grundläggande att ha kännedom för elpriserna samt uppvärmningsbehovet i bostaden för att möjliggöra bedömningen av de löpande uppvärmningskostnaderna.

Med tanke på att elpriserna är rörliga och fluktuerar dagligen är det omöjligt att räkna med ett oföränderligt pris. Till följd av detta kommer denna rapport utgå från prishistoriken för volymvägt månadsmedelpris under det senaste året samt ytterligare två förhöjda elpriser för att analysera hur återbetalningstiden ser ut för olika elpriser. Sverige är uppdelat i fyra elområden och elpriset för varje område varierar mellan dem på grund av olika väderförhållanden, se *Figur 5*. Den valda referensbyggnaden Hjällbo 37:32 är belägen i *Elområde 3, Södra Mellansverige* och samtliga elpriser för det området kommer därmed att användas. Medelpriset för de 12 senaste månaderna beräknas till 59,29 öre/kWh, se *Figur 6.* De två förhöjda elpriserna som används kommer vara 100 öre/kWh, samt 120 öre/kWh (Göteborg Energi, 2024).



Figur 5. Elområden i Sverige (Energimarknadsinspektionen, 2021).



Figur 6. Månadsmedelpris för de fyra elområdena (Göteborg Energi, 2024).

II. Material

Marknaden består av ett stort antal olika tillverkare och tjocklekar av mineralull vilket skapar en stor variation i priserna. Detta arbete har använt sig av mineralullsisolering från finska företaget Paroc, vilket är ett marknadsledande företag i Sverige, Baltikum och Finland (Paroc, 2024). För samtliga beräkningar används *”PAROC Solid stenullsskiva lambda 37”* som har en tjocklek på 95 mm och kostar 79,95 kr/m^2 (Byggmax, 2024).

Vakuumsisoleringspaneler är mer kostsamma än konventionella isoleringsmaterial. För detta arbete har vakuumsisoleringspaneler från va-Q-tec använts vilket är ett företag grundat i Tyskland. Företaget tillverkar många olika typer av VIP varav den

som kommer att användas i simuleringarna är ”*va-Q-vip F”* som har ett λ-värde på 0,004 W/mK vid nyproduktion och ett λ-värde på 0,02 W/mK när den är punkterad (va-Q-tec, 2022). Kostnaden för dessa paneler är en komplex fråga då företaget inte vill offentliggöra priset innan köpet är fullbordat. För att estimera ett pris har vi analyserat prisutvecklingen under tidigare år. Under år 2011 kunde ett pris på 900 kr/m^2 estimeras för en 20 mm tjock panel, vilket resulterar i 450 kr/m^2/10mm (Forsberg & Sørensen, 2012). Under år 2021 estimerades priset att ligga på 340kr/m^2/10mm (Adl-Zarrabi, 2021). Genom att applicera en linjär trendlinje på dessa värden kan vi uppskatta priset för år 2024 att ungefär hamna på 300 kr/m^2/10mm och är det priset som kommer att användas för samtliga beräkningar i detta arbete.

Vid intern tilläggsisolering ska väggen täckas med en gipsskiva. Precis som mineralull består marknaden av en stor variation av tillverkare med olika priser för gipsskivor. I detta arbete kommer väggen att täckas med *Gyproc GNE 13* som är en standardgipsskiva tillverkad av företaget Gyproc. Företaget tillverkar ett flertal återvinningsbara gipsskivor och är ett företag många års erfarenhet i marknaden (Gyproc, 2024). Kostnaden för ovannämnda skivor är 69 kr/m^2 och är 13 mm tjocka (Beijer, 2023).

III. COMSOL Multiphysics

Simulering av värmeöverföringen i väggen sker genom programmet COMSOL. Programmet erbjuder en rad olika funktioner för simulering av värmeöverföring men för detta arbetes syfte används funktionen ”Heat Transfer in Solids”. Då arbetet även tar hänsyn till varierande temperatur, vind hastighet och luftfuktighet används en tidsberoende studie i programmet.

Processen utgörs genom att först skapa en modell av väggen med alla dess komponenter. Utifrån tidigare indata om materialegenskaper kan varje skikt tilldelas dess respektive material. Simuleringen behandlar endast värmeöverföring från inomhusmiljö till utomhusmiljö genom ytterväggen, utan att ta hänsyn till andra förluster såsom genom golv och tak. Inomhusmiljön behandlas med en konstant temperatur på 21°C, vilket även används av Boverket vid framtagande av energiregler. Utomhusmiljön tar hänsyn till väderdata för ett typiskt år inom Göteborg, hämtat från SMHI (Sveby, 2022), där temperatur, vind hastighet och luftfuktighet varierar med tid.

Simuleringen sker först med en stationär studie av väggen med väderdata från dag ett. Resultatet från studien används som bas för den tidsberoende studien som är inställd på simulering i 365 dagar, med en analys varje dag. När simuleringen är klar kan en summering över ytorna på väggens insida göras för att ta fram ett dagsmedelvärde för effektgenomsläpp genom väggen. Detta värde kan sedan multipliceras med 24 timmar för att ta fram dagliga energiförlusten. Denna process upprepas för varje dag under ett år för att erhålla den totala energiförlusten över året.

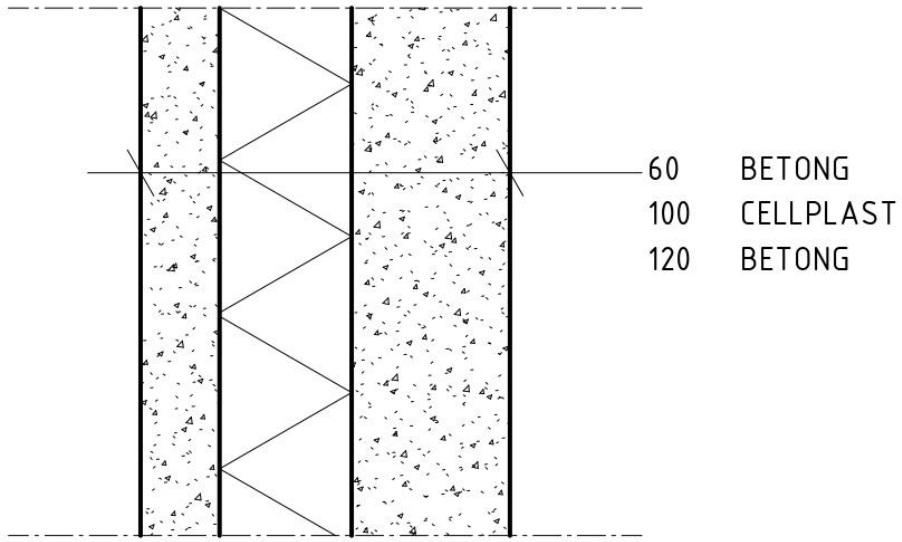
För att simulera värmeöverföringen i yttervägg krävs indata för varje material. I tabellen nedan redovisas denna indata, taget från de olika materialtillverkarna och säljare. För de materialen inte beskrivet ovan har materialindata tagits från COMSOL:s egna databas.

Tabell 2. Relevanta materialegenskaper för simulering i COMSOL.

Material	Densitet kg/m^3	Värmekapacitet J/kgK	Värmeledningsförmåga W/mK
Cellplast (Paroc)	13	1200	0,037
Betong (COMSOL)	1800	1000	1,8
VIP (va-Q-tec)	210	1000	0,004
Punkterad VIP (va-Q-tec)	210	1000	0,02
Gips (Gyproc)	1200	1000	0,25
Trä (COMSOL)	630	2400	0,2
Glas (COMSOL)	2500	870	1,06
Luft (COMSOL)	1,29	1000	0,026
Mineralull (Paroc)	20	1000	0,037

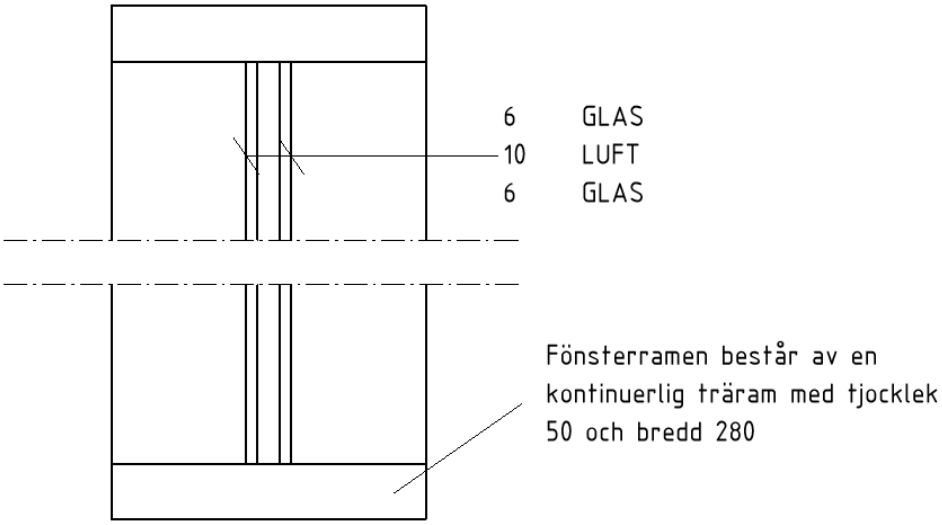
5.1 Utgångsvägg

Utgångsväggens yttre lager utgörs av en 60 mm tjock betongskiva. Det följs av ett 100 mm tjockt lager av cellplast som fyller väggens primära form av värmeisolering. Det sista och innersta lagret består av ett 120 mm tjockt betongskikt. Utgångsväggens U-värde är 0,336 W/m^{2}K. Fönstrets U-värde är 1,2 W/m^{2}K och kommer att vara samma för alla renoveringslösningar.



Figur 7. Ritning av utgångsvägg.

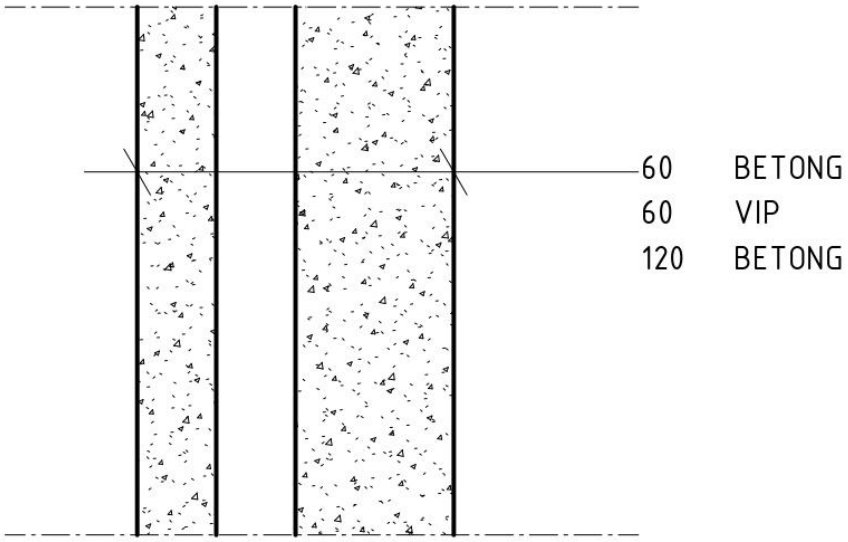
Under modellering i COMSOL kommer fönsterna att simplifieras för enklare simulering. Detta är då en högre nivå av detalj på en sådan liten skala ger sjunkande avkastning.



Figur 8. Ritning av simplifierad fönsterritning.

5.2 Renoveringslösning 1 & 2

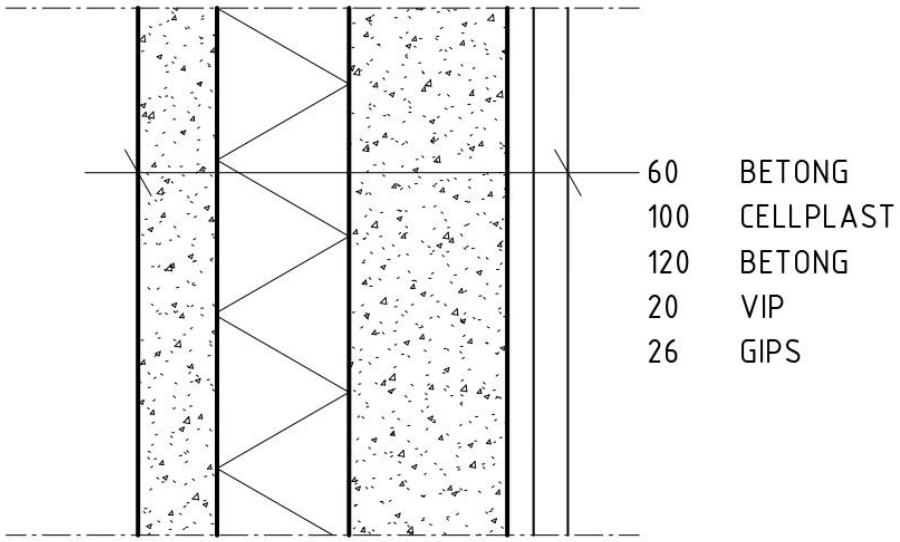
Den första renoveringslösningen som ska testas i arbetet är en maximal lösning där utgångsväggens isoleringsskikt av cellplast byts ut mot VIP. Syftet är att jämföra hur VIP presterar som det primära isoleringsskikten och ifall återbetalningstiden hade gynnat ekonomisk vinst i framtiden. Simulering kommer ske två gånger, varav VIP kommer behålla sitt urpsrungliga λ-värde under hela sin livscykel för ena fallet. För andra fallet kommer VIP anta det svagaste värdet vid start, där det ska simuleras ett värsta scenario där panelerna punkterats direkt. Med dessa kommer ett minimum och maximum prestanda kunna utläsas. För första fallet har väggen ett U-värde på 0,065 W/m^{2}K. För andra fallet med punkterad VIP har väggen ett U-värde på 0,306 W/m^{2}K.



Figur 9. Ritning av utgångsvägg isolerat med VIP.

5.3 Renoveringslösning 3 & 4

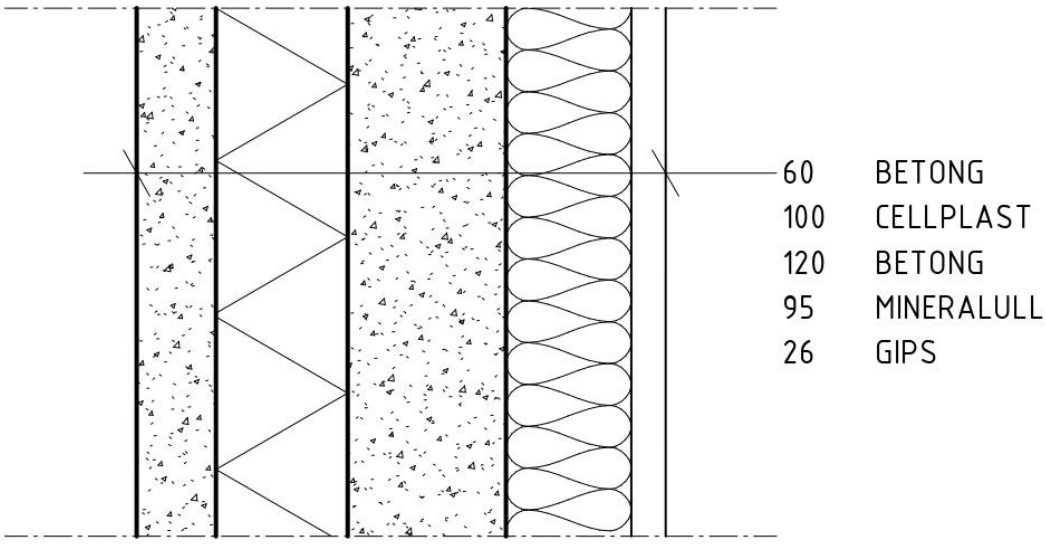
Den andra renoveringslösningen kommer följa en mer traditionell lösning, där VIP används för att tilläggsisolera väggen. Utgångsväggen behålls då, men ett skikt av VIP läggs på för att förbättra väggens isoleringsförmåga. Lösningen innefattar även ett ytterligare skikt i form av gips som både ska skydda panelerna och användas som invändig beklädnad för väggen. Likt den första lösningen kommer även denna testas för maximum och minimum prestanda. För renovering med maximum prestanda på VIP har väggkomponenten ett U-värde på 0,1238 W/m^{2}K. För renovering med en minimumprestanda på VIP har väggkomponenten ett U-värde på 0,2453 W/m^{2}K.



Figur 10. Ritning av utgångsvägg tilläggsisolerat med VIP.

5.4 Renoveringslösning 5

För att jämföra prestandan av den andra lösningen kommer ytterligare en lösning skapas där väggen tilläggsisoleras med mineralull. Med hjälp av denna renoveringslösning kommer det bli tydligt för hur tilläggsisolering med VIP förhåller sig gentemot tilläggsisolering med ett traditionellt isoleringsmaterial såsom mineralull. Väggkomponentens U-värde är 0,1772 W/m^{2}K.



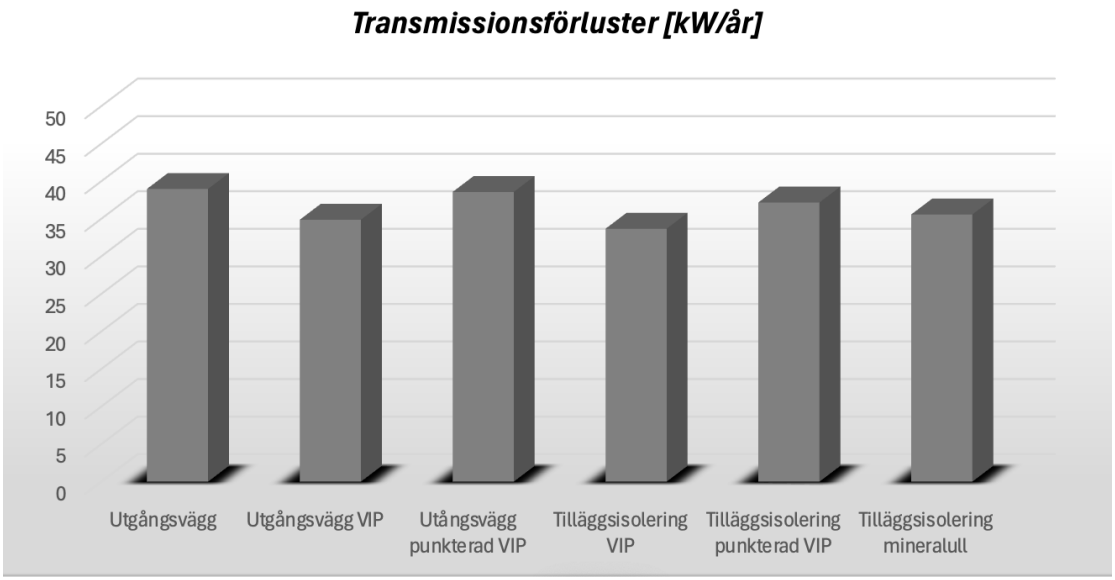
Figur 11. Ritning av utgångsvägg tilläggsisolerat med mineralull.

6 RESULTAT

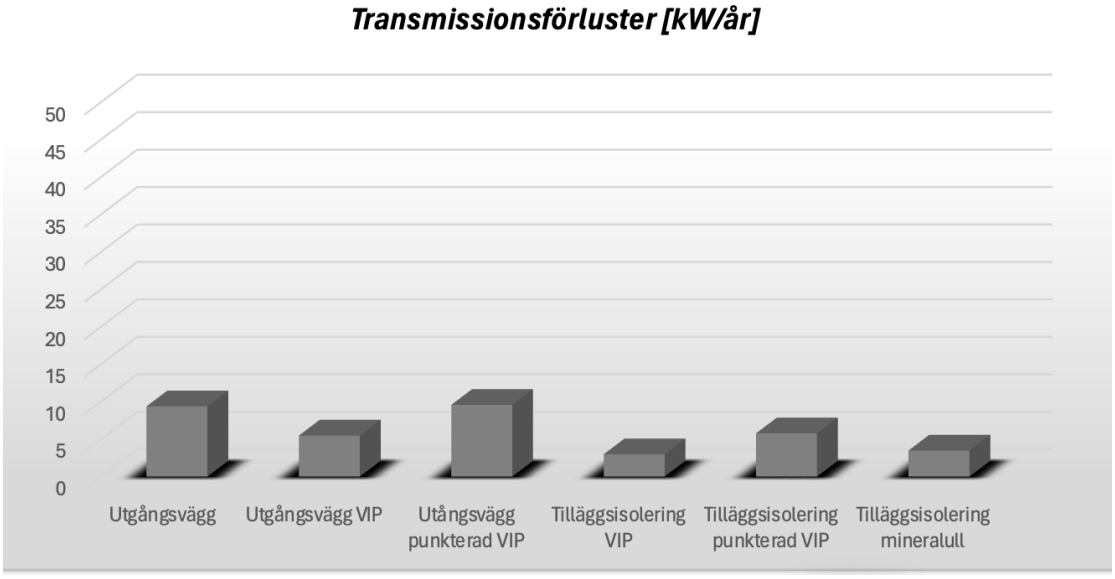
I detta kapitel redovisas studiens resultat.

6.1 Energiförluster

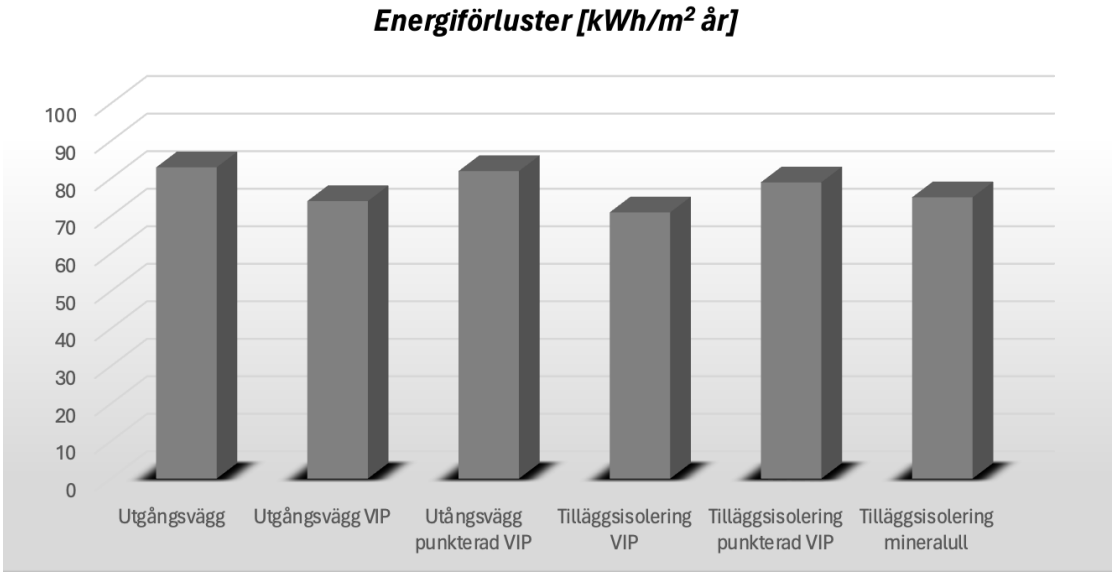
I detta avsnitt presenteras energiförlusterna i form av transmissionsförluster över ett år samt energiförlusterna per kvadratmeter och år för varje väggkomponent. Det första diagrammet representerar transmissionsförlusterna genom hela ytterväggen medan det andra diagrammet representerar transmissionsförlusterna, exklusive fönster. Längre ned redovisas diagrammet med energiförlusterna per kvadratmeter och år för varje väggkomponent.



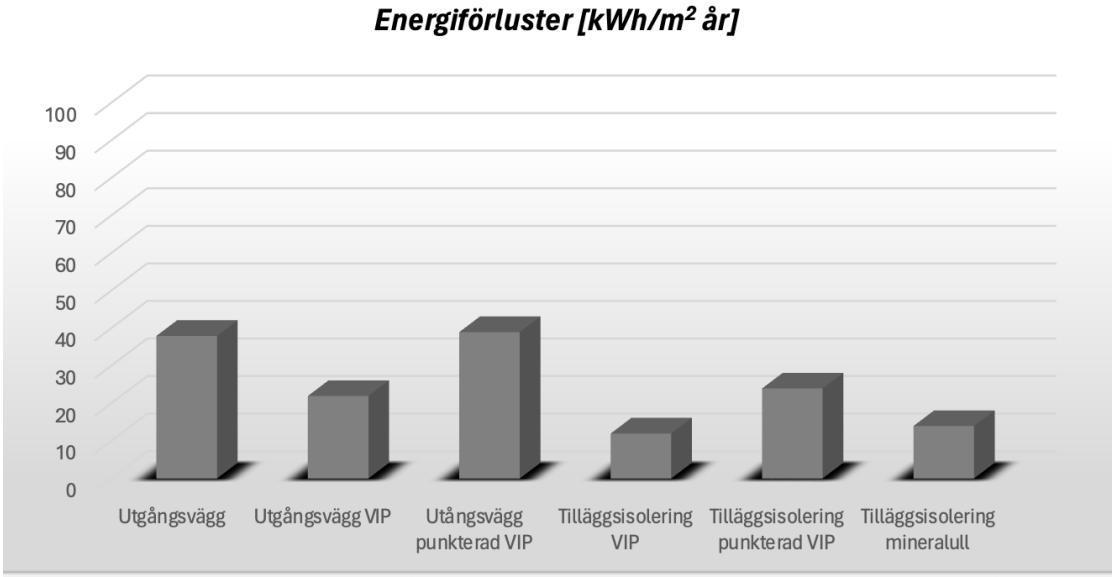
Figur 12. Redogörelse av transmissionsförluster för varje väggkomponent.



Figur 13. Redogörelse av transmissionsförluster för varje väggkomponent, exklusive fönster.



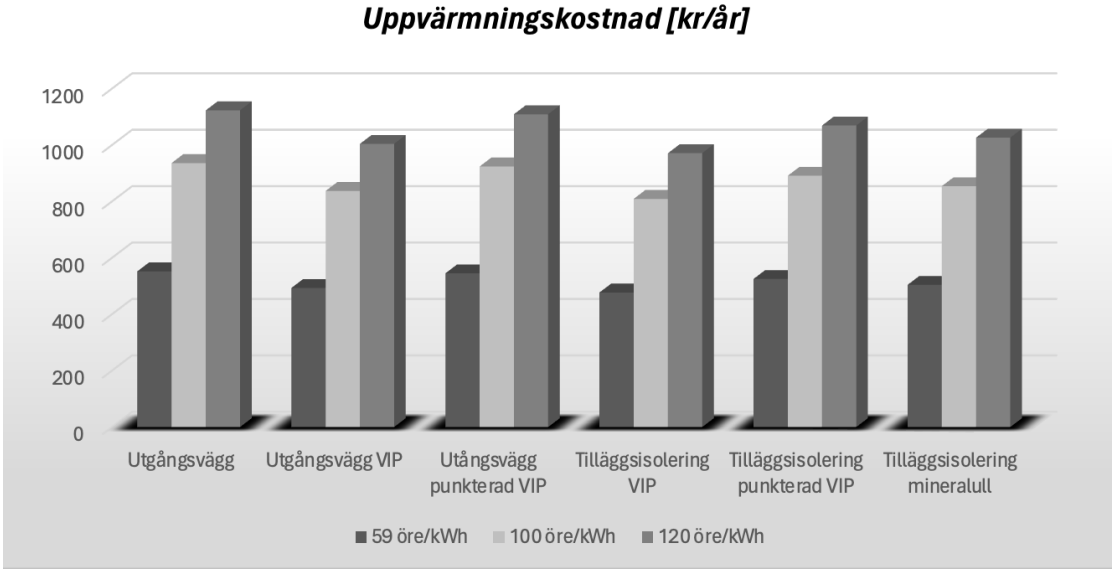
Figur 14. Redogörelse av energiförluster för varje väggkomponent.



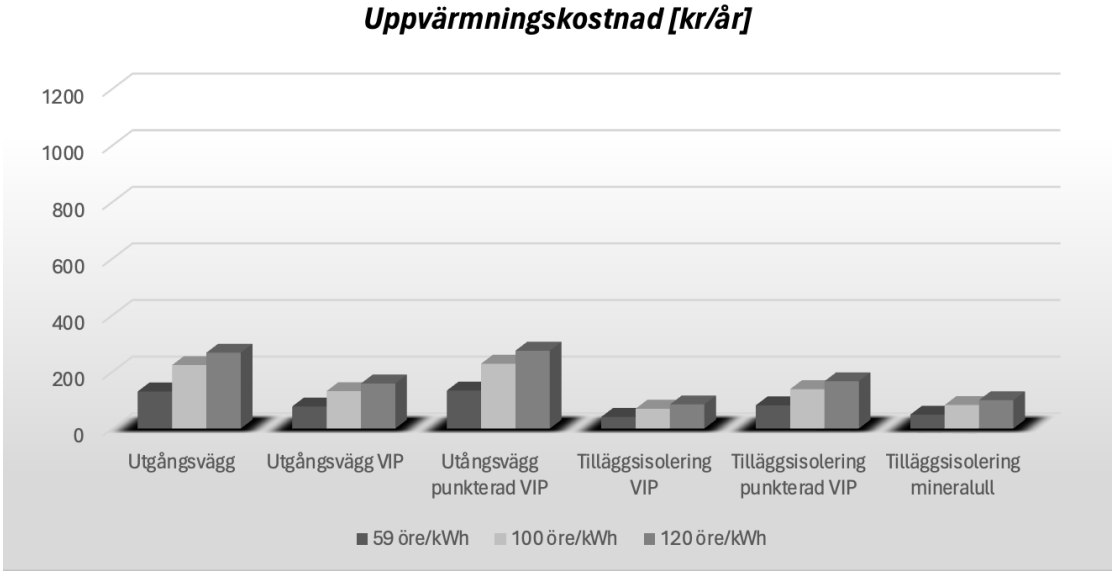
Figur 15. Redogörelse av energiförluster för varje väggkomponent, exklusive fönster.

6.2 Uppvärmningskostnader

I detta avsnitt presenteras uppvärmningskostnaderna per år för varje väggkomponent. I första diagrammet representeras de årliga uppvärmningskostnaderna med de tre olika elpriserna genom hela ytterväggens area medan den andra tabellen representerar de årliga uppvärmningskostnaderna exklusive fönsterarea. Med hjälp av dessa diagram framgår det stora skillnader i kostnaderna med, respektive utan fönster. Den billigaste årliga uppvärmningskostnaden för hela ytterväggen är vid tilläggsisolering med VIP, med en kostnad på 478 kr/år. Den billigaste årliga uppvärmningskostnaden för ytterväggen exklusive fönster är på samma sätt tilläggsisolering med VIP, med en kostnad på 42 kr/år istället.



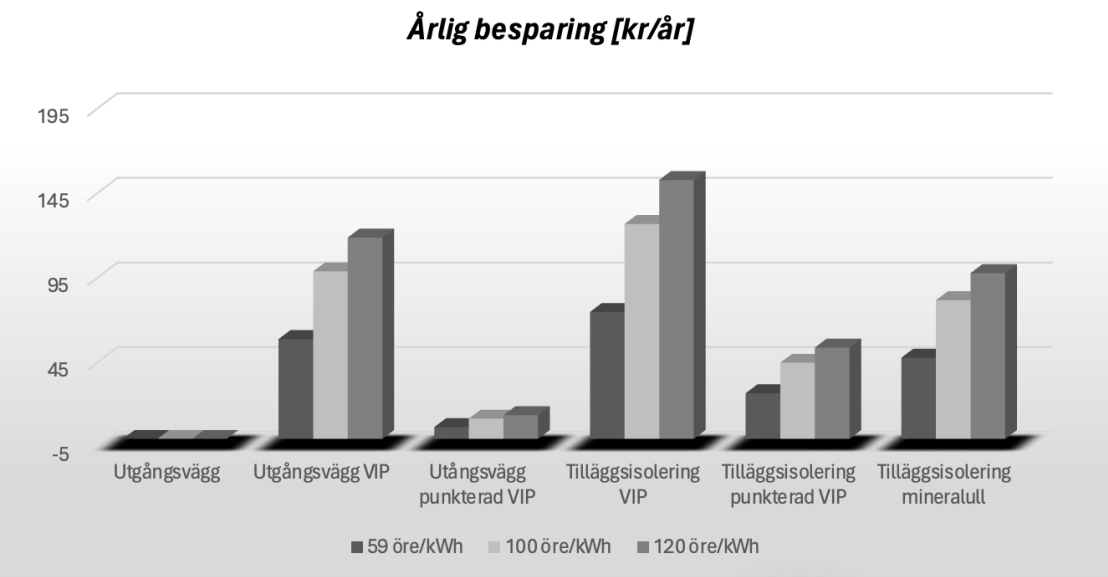
Figur 16. Redogörelse av uppvärmningskostnader för varje väggkomponent med olika elpriser.



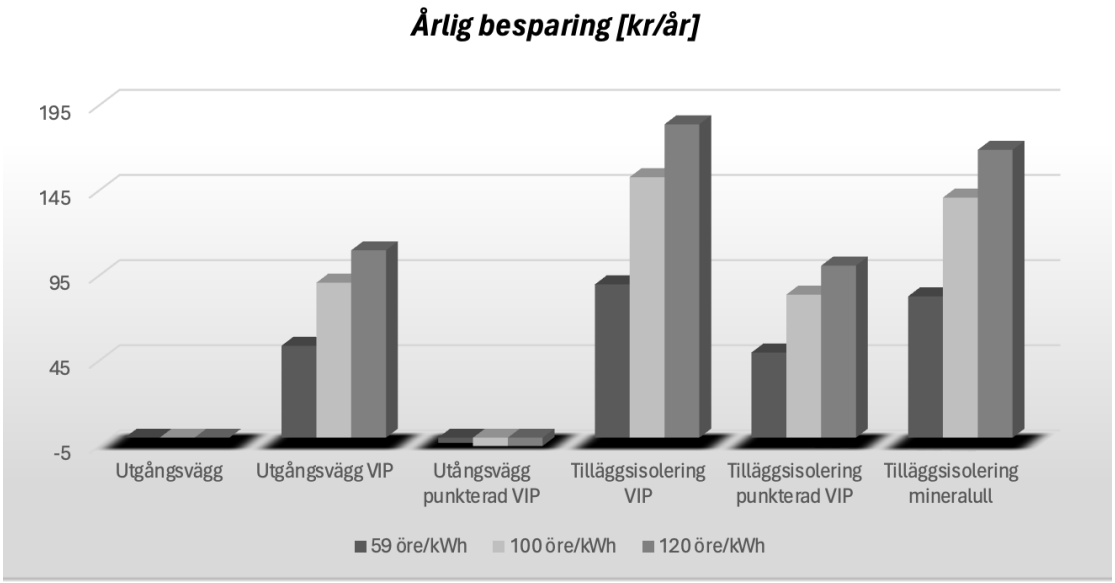
Figur 17. Redogörelse av uppvärmningskostnader för varje väggkomponent exklusive fönster med olika elpriser.

6.3 Årlig besparing

I detta avsnitt presenteras den årliga besparingen genom väggkomponenten. Första diagrammet redovisar den årliga vinsten för hela ytterväggens area medan andra diagrammet redovisar den årliga vinsten utan hänsyn till fönsterytan. Resultaten visar att högre elkostnader leder till större besparingar årligen, med störst besparingar vid tilläggsisolering med VIP som ger en årlig besparing på 153 kr/år. Notera att renovering med punkterad VIP ger en negativ avkastning för fallet utan hänsyn till väggkomponentens fönsteryta.



Figur 18. Redogörelse av den årliga besparingen för varje väggkomponent med olika elkostnader.



Figur 19. Redogörelse av den årliga besparingen för varje väggkomponent exklusive fönster med olika elkostnader.

6.4 Återbetalningstid

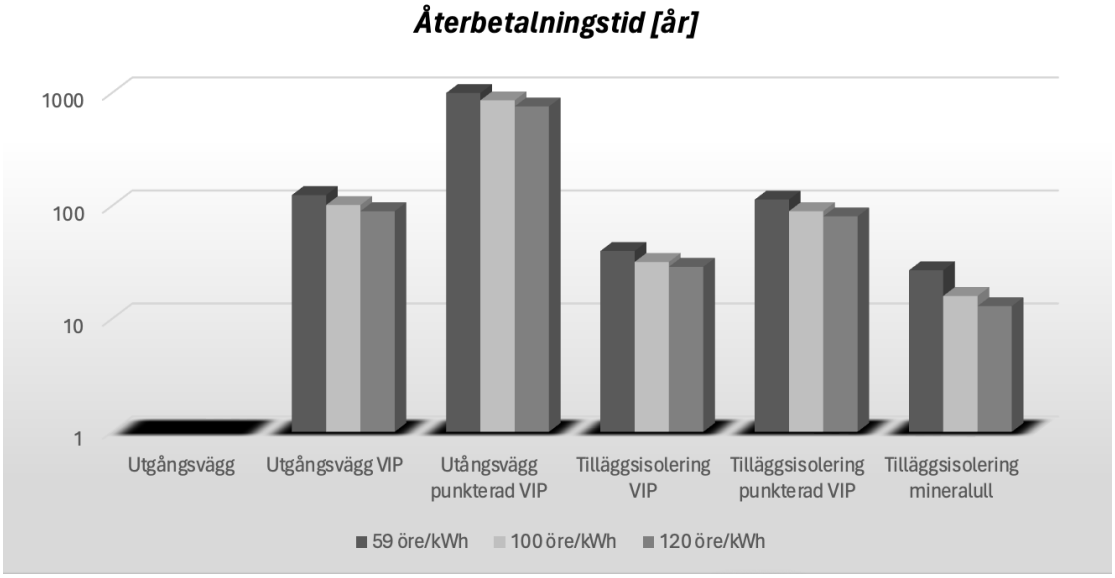
I detta avsnitt presenteras materialkostnader och återbetalningstiden för de olika renoveringsprojekten. För samtliga resultat har både materialkostnader och energianvändning beaktats i beräkningarna. Genom avläsning av resultaten framgår det att elpriser på 120 öre/kWh ger en kortare återbetalningstid på grund av större årliga besparingar. Observera att diagrammet redovisas i logaritmisk skala.

Tabell 3. Materialkostnader för de olika väggkomponenterna.

Vägg	Materialkostnad (kr)
Utgångsvägg	0
Utgångsvägg med VIP och punkterad VIP	10 696
Utgångsvägg invändigt tilläggsisolerat med VIP och punkterad VIP	4385
Utgångsvägg invändigt tilläggsisolerat med Mineralull	1295

Tabell 4. Redogörelse av återbetalningstiden för varje väggkomponent med olika elkostnader

Återbetalningstid för lösningar beroende på material- och elkostnad (år)	59 öre/kWh	100 öre/kWh	120 öre/kWh
Utgångsvägg	0	0	0
Utgångsvägg med VIP (300 kr/m^2/10mm)	135	102	90
Utgångsvägg med punkterad VIP (300 kr/m^2/10mm)	1141	862	761
Utgångsvägg tilläggsisolerat med VIP (300 kr/m^2/10mm)	40	32	29
Utgångsvägg tilläggsisolerat med punkterad VIP (300 kr/m^2/10mm)	114	90	81
Utgångsvägg tilläggsisolerat med Mineralull	27	16	13



Figur 20. Redogörelse av återbetalningstiden för varje väggkomponent med olika elpriser i logaritmisk skala.

7 DISKUSSION

Resultaten indikerar tydliga skillnader mellan de olika renoveringslösningarna. Utifrån framtagna resultat i detta arbete är det märkbart att transmissionsförlusterna minskar avsevärt vid isolering med vakuumisoleringspaneler. En fullt optimerad VIP med drygt en femtedels tjocklek värmeisolerar bättre än mineralull och medför att den kan uppnå samma prestanda som ett traditionellt isoleringsmaterial på grund av dess låga värmeledningsförmåga, vilket även bekräftas av Johansson och Adl-Zarrabi (2017). Notera även att en 60 mm tjock punkterad VIP med försämrad prestanda fortfarande värmeisolerar i högre grad än konventionella isoleringsmaterial som mineralull. Det visar att även om VIP tappar sin prestanda med åren förblir det ett kvalitativt isoleringsmaterial under hela sin livslängd som resulterar i lägre värmeförluster under användningsskedet.

Det är svårt att dra en konkret slutsats om panelernas ekonomiska lönsamhet vid renovering. Detta är i stort på grund av att det inte går att framställa ett konkret pris för panelerna. Med hjälp av återbetalningsmetoden framgår det att tilläggsisolering med mineralull är den mest fördelaktiga lösningen på grund av den låga materialkostnaden och korta återbetalningstiden. Denna renoveringslösning har således en återbetalningstid på mellan 13 – 27 år beroende på elkostnad. Med hjälp av återbetalningsmetoden gick det samtidigt att avläsa att den mest lönsamma renoveringslösningen som innefattar VIP var tilläggsisolering, där återbetalningstiden hamnar mellan 29 – 40 år beroende på elkostnad. Återbetalningstiden hamnar då under den förväntade livslängden av panelerna, vilket då medför lite säkerhet och potential för vinster med deras användning. Det är dock inte helt utan risk, då återbetalningstiden beräknades utan hänsyn till försämring av panelernas prestanda. Vid punkterat skede kan vi se att återbetalningstiden för tilläggsisolering med VIP ligger mellan 81 – 114 år, vilket överskrider den förväntade livslängden. Samtidigt kan vi se att renoveringslösningen med VIP som primärisolering inte är lönsam alls, då återbetalningstiden hamnar långt över den förväntade livslängden, både vid nytt skede och punkterat skede. Resultaten visar dock att det kan utvinnas vinster med användning av VIP, förutsatt att panelerna håller sin prestanda under en längre period av tid.

Vidare är det viktigt att ha i åtanke att referensbyggnadens yttervägg består till ungefär 48% av fönster. Detta innebär att tilläggsisoleringen endast har en inverkan på drygt halva väggytan då fönstrets värmegenomgångskoefficient är densamma både före och efter renoveringen. Vid analys av transmissionsförlusterna per kvadratmeter väggarea och år ser vi att tilläggsisoleringen med VIP minskar förlusterna med ungefär 68% per år. Även vid punkterat skede kan en minskning på ungefär 37% uppnås. Det är då möjligt att utvinna större vinster om tilläggsisoleringen skulle ske på en större skala med en större väggarea, så som i lagerenheter, där behovet av fönster inte är lika stor jämfört med lägenheter. Genom att analysera transmissionsförlusterna för hela väggkomponenten gentemot väggkomponenten exklusive fönsterytan kan vi snabbt förstå att de absolut största förlusterna sker genom fönsterna. Det bekräftas även av väggkomponenternas U-värde som är betydligt lägre än fönstrets. Det finns då möjlighet för förbättrade resultat genom tilläggsisolering med VIP inom väggar som antingen har en betydligt större väggarea i jämförelse med fönsterarea, eller i väggar där fönstret har ett jämförvärt bra U-värde.

Vid analys av yttemperaturen på vägglösningarna (se figur 33 – 38) går det att avläsa en generell förbättring av yttemperaturen inom varje lösning. Det går dessutom att avläsa en minskad variation i temperatur. Dessa förbättringar leder till en förbättrad termisk komfort.

Utöver detta har arbetet inte heller tagit hänsyn till vinster inom boyta, där mineralull krävde ytterligare 75mm för att uppnå samma prestanda som tilläggsisolering med VIP. Det är dock svårt att evaluera boyta, då detta kan vara helt subjektivt och ändras från bostad till bostad.

Trots att simuleringarna och beräkningarna ger representativa resultat är dessa inte fullständigt verklighetstrogna. För att erhålla verkliga resultat bör hela byggnadens klimatskal beaktas med hänsyn till värmeförluster genom anslutningar samt ventilationsförluster. Även inkludering av intervärme och solinstrålning skulle medföra mer verklighetstrogna resultat. Fastän detta arbete avgränsas till enbart värmeförluster genom en yttervägg ger det fortfarande en inblick i hur energiförbrukningen varierar mellan samtliga renoveringslösningar.

8 SLUTSATS

Utifrån studiens resultat kan vi fastställa att tilläggsisolering med en fullt optimerad VIP resulterar i lägst transmissionsförluster och innebär den mest lönsamma åtgärden med avseende på uppvärmningskostnader över tid. Däremot är den höga materialkostnaden för VIP i förhållande till materialkostnaden för mineralull avgörande, vilket resulterar i att återbetalningstiden för tilläggsisolering med VIP blir efter 29 år under bästa ekonomiska scenariot, förutsatt att panelerna bibehåller högsta prestanda under hela livslängden. Under sämsta ekonomiska scenariot hamnar återbetalningstiden på 81 år, förutsatt att panelerna bibehåller lägsta prestanda under hela livslängden. Tilläggsisolering med mineralull blir därmed det mest ekonomiskt lönsamma alternativet med avseende på återbetalningstiden.

Resultaten antyder vidare att en betydande andel av energiförlusterna sker genom fönsterytan. Efter tilläggsisolering med VIP står fönsterytan för 91% av värmeförlusterna. På samma sätt, efter tilläggsisolering med mineralull står fönsterytan för 81% av alla värmeförluster. Baserat på dessa resultat kan vi dra slutsatsen att det blir mer fördelaktigt att fokusera på att energieffektivisera fönstren för den givna referensbyggnaden, då värmeförlusterna är dominerande där.

Förslag till framtida studier:

- Är fönsterrenovering mer ekonomiskt fördelaktigt än renovering av ytterväggar med VIP?

- För vilket pris på VIP blir det lönsamt att tillämpa i ett renoveringsprojekt?

- Är utvändig tilläggsisolering med VIP mer ekonomiskt fördelaktigt än invändig tilläggsisolering med VIP?

REFERENSER

Adl-Zarrabi, B. (2021). *Uppskattning av den tekniska livslängden hos hybridisolerade fjärrvärmerör.* Göteborg: Energiforsk.

Arnstberg, K.-O. (2000). *Miljonprogrammet.* Stockholm: Carlssons Bokförlag.

Baetens, R., Jelle, B. P., Thue, J. V., Tenpierik, M., Grynning, S., Uvsløkk, S., & Gustavsen, A. (Februari 2010). Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond . *Energy and Buildings*, ss. 147-172.

Baetens, R., Jellea, B. P., & Arild, G. (2011). Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, ss. 761-769.

Beijer Byggmaterial. (2024). *Beijer*. Hämtat från https://www.beijerbygg.se/foretag/sv/produkter/byggmaterial/gipsskivor/vagg-takgipsskivor/gipsskiva-gne-13x900x2700-ergo-2-43m2-42-900022239

Björk, C., Kallstenius, P., & Reppen, L. (2021). *Så byggdes husen 1880-2020: Arkitektur, konstruktion och material i våra flerbostadshus under 140 år.* Stockholm: Svensk Byggtjänst.

Bokalders, V., & Block, M. (2004). *Byggekologi: Kunskaper för ett hållbart byggande.* Stockholm: Svensk Byggtjänst.

Boverket. (augusti 2012). *Handbok för energihushållning enligt Boverkets byggregler – utgåva två*. Hämtat från Boverket: https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2012/handbok-for-energihushallning-enligt-boverkets-byggregler.pdf

Boverket. (den 3 Juni 2020). *Under miljonprogrammet byggdes en miljon bostäder*. Hämtat från Boverket: https://www.boverket.se/sv/samhallsplanering/stadsutveckling/miljonprogrammet/

Boverket. (den 28 April 2021). *Beräkning av byggnadens energiprestanda*. Hämtat från Boverket: https://www.boverket.se/sv/energideklaration/for-energiexperter/berakning-av-byggnadens-energianvandning/

Byggmax. (2024). *Byggmax*. Hämtat från Byggmax: https://www.byggmax.se/stenullsskiva-paroc-solid#1257=90019

Energimarknadsinspektionen. (den 28 Februari 2021). *Elområde*. Hämtat från Energimarknadsinspektionen: https://ei.se/konsument/el/elmarknaden/elomrade

Forsberg, J., & Sørensen, R. (2012). *VIP- paneler och högeffektiva isoleringsmaterial: Analys och mätningar av Vakuumisoleringspaneler.* Göteborg.

Gonçalves, M., Simões, N., Serra, C., & Flores-Colen, I. (den 1 Januari 2020). A review of the challenges posed by the use of vacuum panels in external insulation finishing systems. *Applied Energy*.

Gyproc. (2024). *Gyproc*. Hämtat från https://www.gyproc.se/produkter/gipsskivor-och-andra-byggskivor/standardskivor/gyproc-gne-13-normal-klima#marketing-description

Hagentoft, C.-E., & Sandin, K. (2017). *Byggnadsfysik - Så fungerar hus.* Lund: Studentlitteratur.

Jelle, B. P. (Oktober 2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, ss. 2549-2563.

Johansson, P., & Adl-Zarrabi, B. (2017). *Superisoleringsmaterial i byggnader.* Stockholm.

Johansson, P., Adl-Zarrabi, B., & Sasic Kalagasidis, A. (den 15 Oktober 2016). Evaluation of 5 years' performance of VIPs in a retrofitted building façade. *Energy and Buildings*, ss. 488-494.

Lakatos, Á., & Lucchi, E. (Mars 2024). Thermal performances of Super Insulation Materials (SIMs): A comprehensive analysis of characteristics, heat transfer mechanisms, laboratory tests, and experimental comparisons. *International Communications in Heat and Mass Transfer*.

Lauby, A. (2013). Retrofitting an old warehouse using vacuum insulation panels .

Naturskyddsföreningen. (den 16 Mars 2021). *Energirenovera miljonprogrammet*. Hämtat från Naturskyddsföreningen: https://www.naturskyddsforeningen.se/artiklar/energirenovera-miljonprogrammet/

Naturvårdsverket. (den 14 December 2023). *Naturvårdsverket*. Hämtat från https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-bygg--och-fastighetssektorn/

Paroc. (2024). *Om Paroc*. Hämtat från Paroc: https://se.paroc.com/om-paroc/om-paroc

Samuelsson, N. (2004). *Förändra varsamt.* Stockholm: Riksantikvarieämbetet.

Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & F., A. (2016). Insulation materials for the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ss. 989-1011.

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

Strandberg, B., & Lavén, F. (2018). *Bygga hus: Illustrerad bygglära.* Lund: Studentlitteratur.

Sveby. (den 3 oktober 2022). *Klimatdatafiler SMHI/Bov 1991-2020.* Hämtat från sveby.org: https://www.sveby.org/typar_1991_2020_smhi_bov/

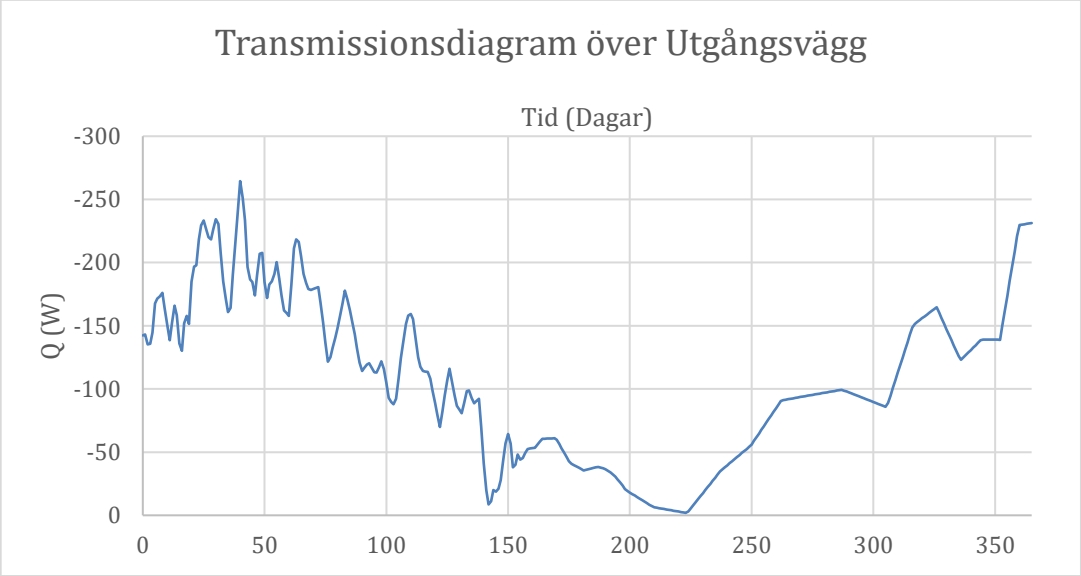
Svensson, Y. (den 1 Juli 2020). *Boverket.* Hämtat från Boverkets författningssamling: https://rinfo.boverket.se/BFS2011-6/pdf/BFS2020-4.pdf

va-Q-tec. (den 13 Oktober 2022). *va-Q-tec.* Hämtat från Technical Data Sheet va-Q-vip F: https://www.va-q-tec.com/wp-content/uploads/pimcore/2022-10-13_%20Product-Data-Sheet_va-Q-F-Versions.pdf

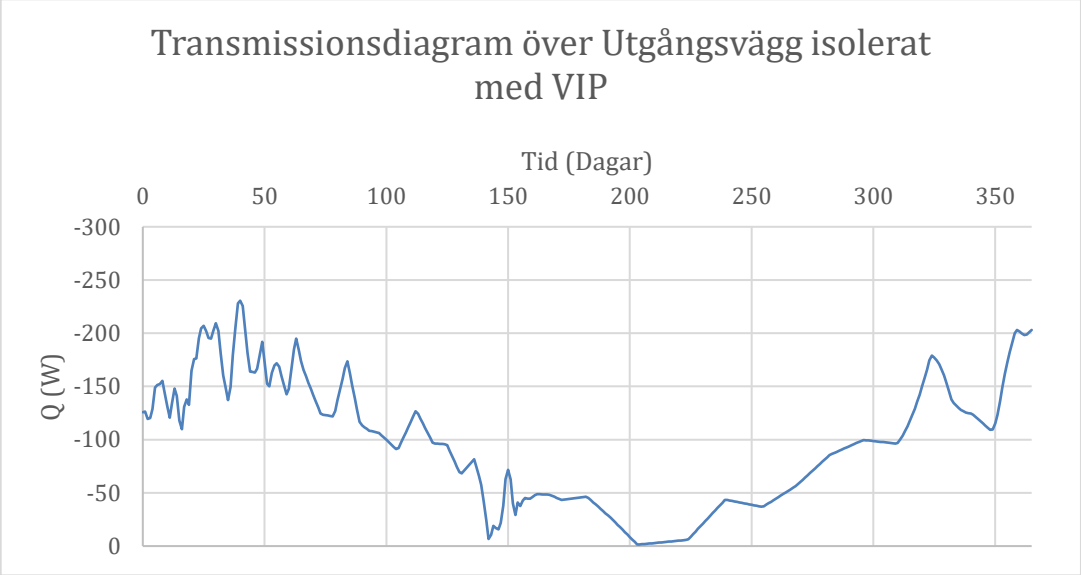
Vidén, S. (2012). Miljonprogrammet - utveckla eller avvecka? *Rekordårens bostäder - en viktig resurs för hållbar utveckling*. Stockholm: Formas Fokuserar.

Vidén, S., & Lundahl, G. (1992). *Miljonprogrammets bostäder: Bevara - Förnya - Förbättra.* Stockholm: Ljunglöfs Offset AB.

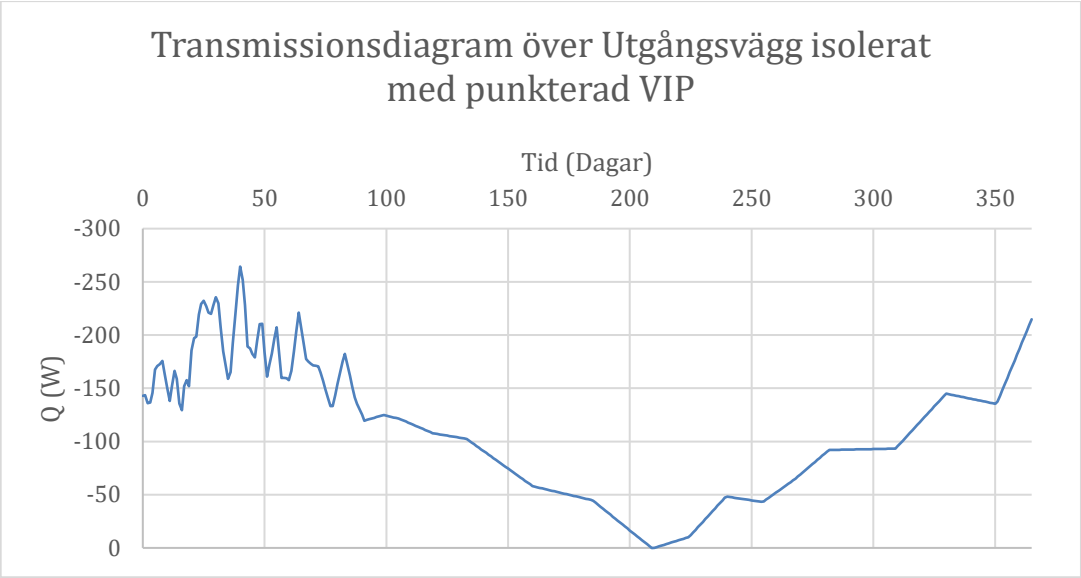
BILAGOR



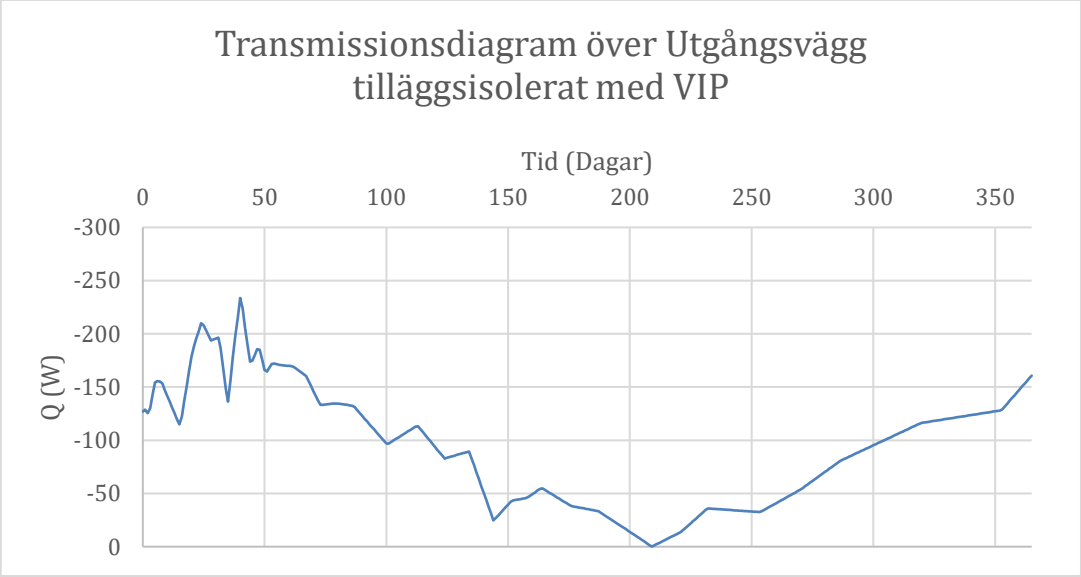
Figur 21. Effektdiagram över utgångsvägg.



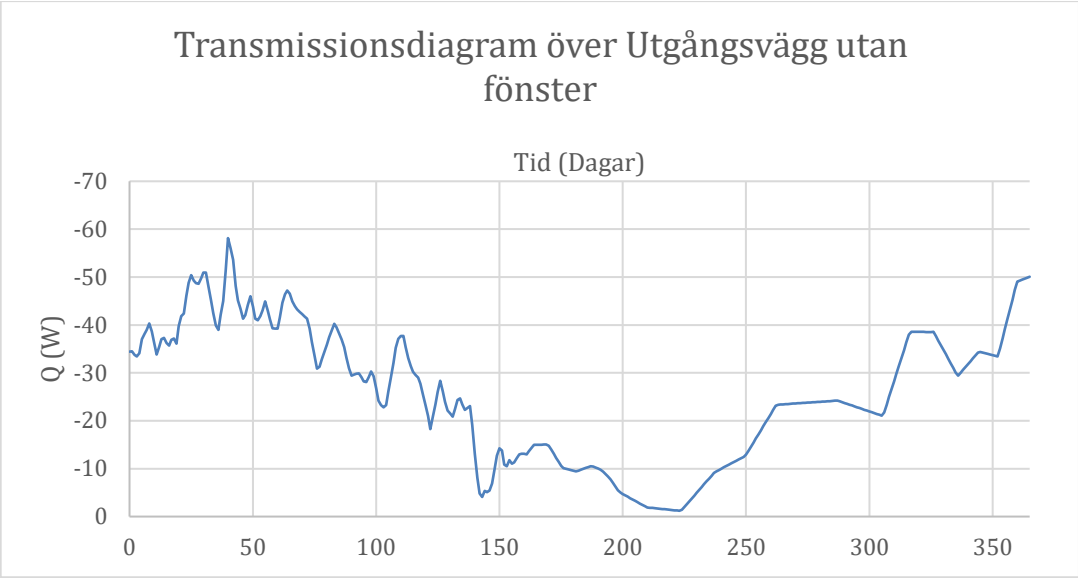
Figur 22. Effektdiagram över utgångsvägg isolerat med VIP.



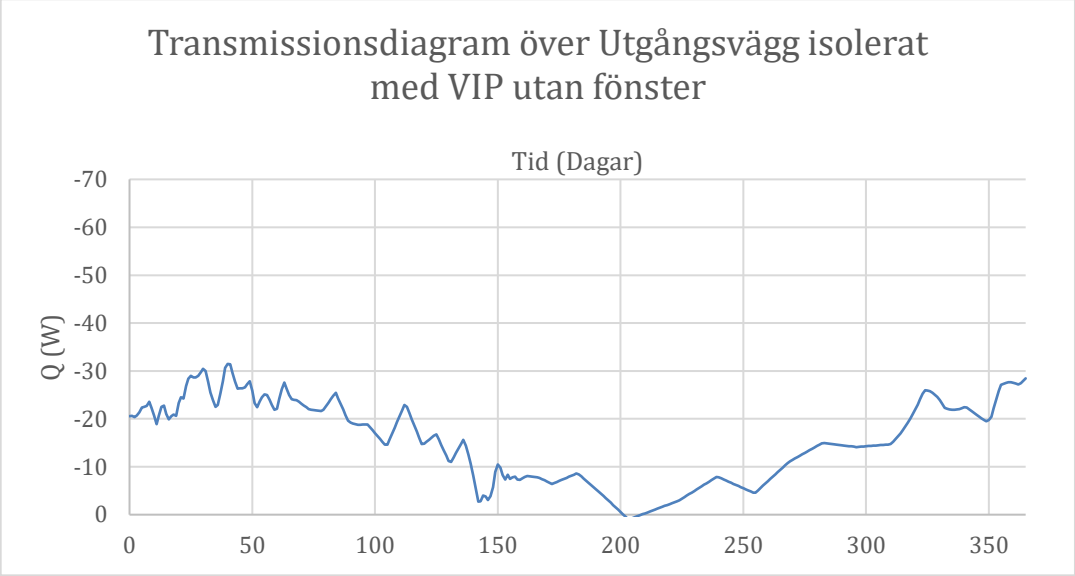
Figur 23. Effektdiagram över utgångsvägg isolerat med punkterad VIP.



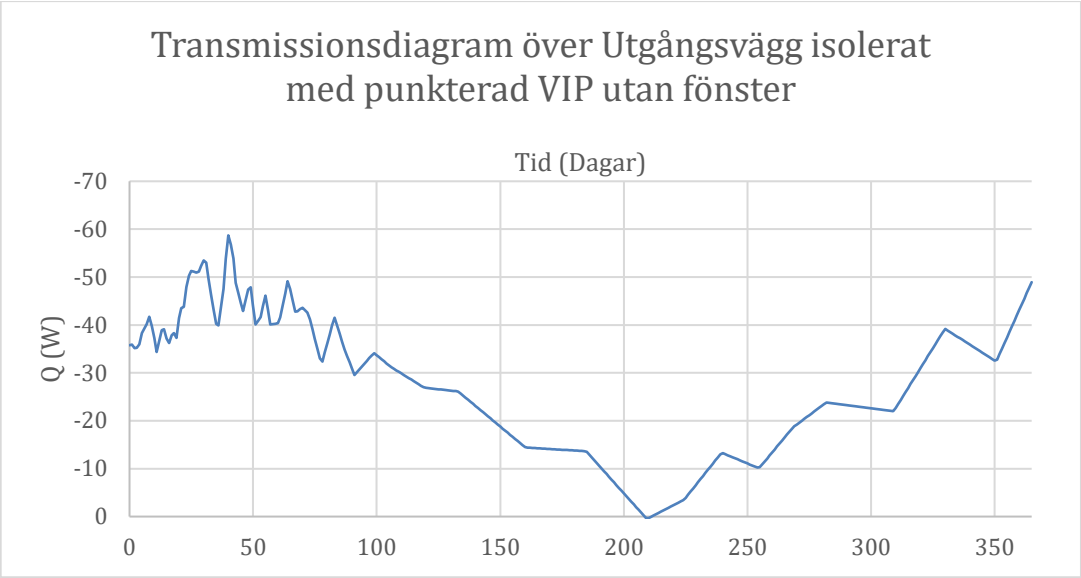
Figur 24. Effektdiagram över utgångsvägg tilläggsisolerat med VIP.



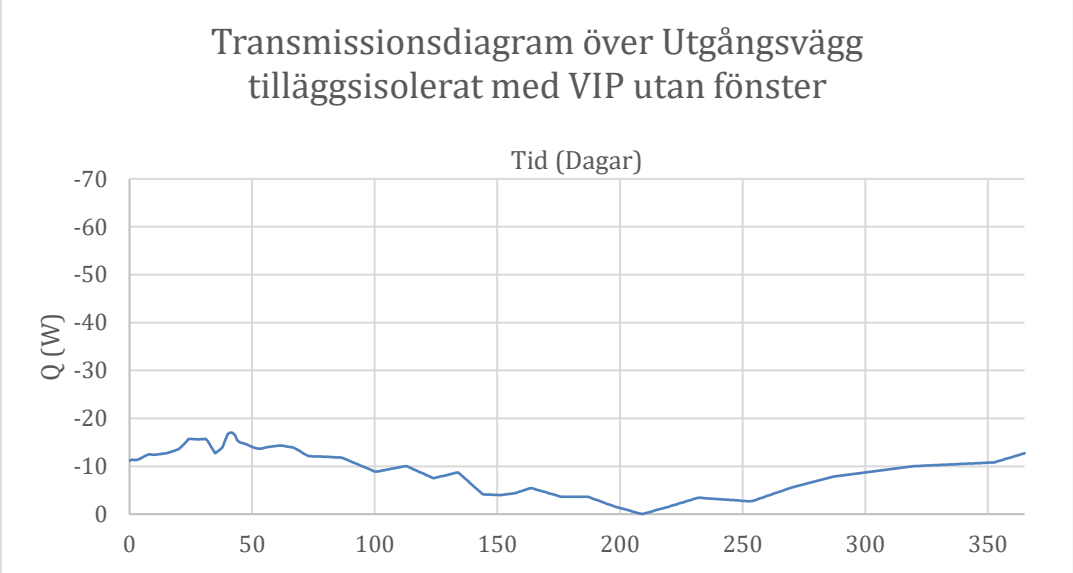
Figur 25. Effektdiagram över utgångsvägg utan hänsyn till fönster.



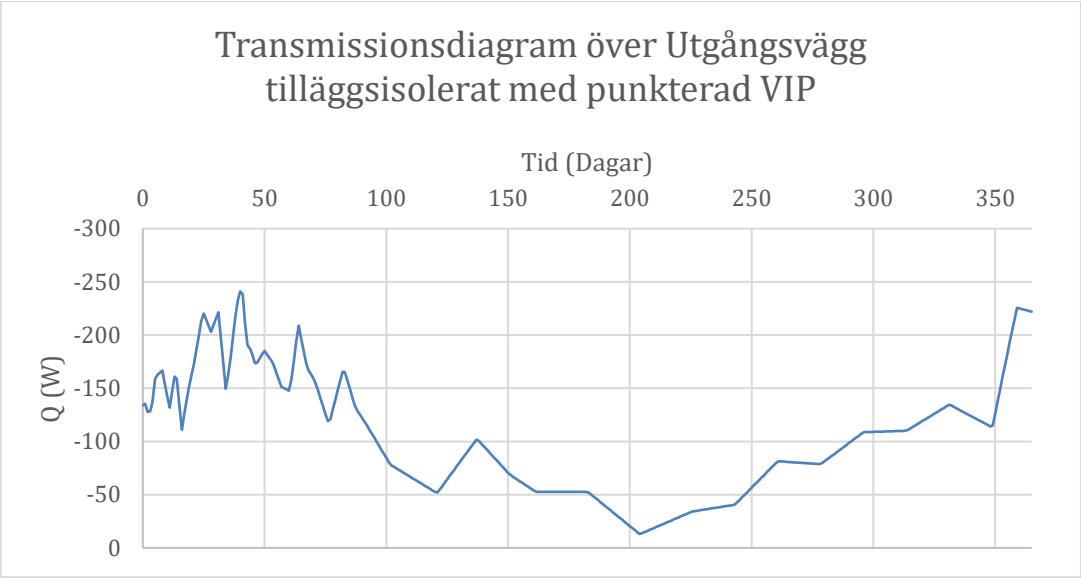
Figur 26. Effektdiagram över utgångsvägg isolerat med VIP utan hänsyn till fönster.



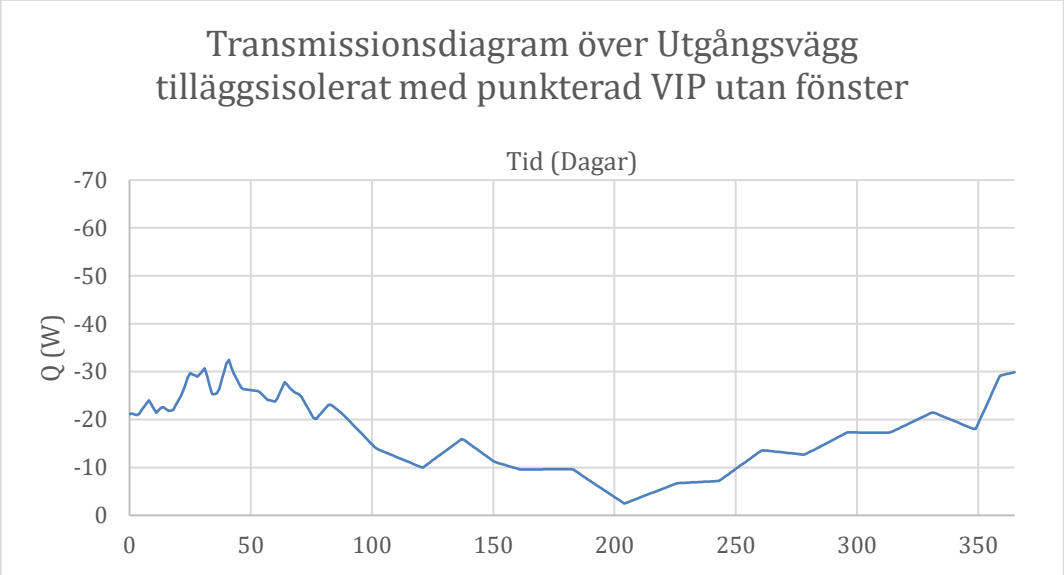
Figur 27. Effektdiagram över utgångsvägg isolerat med punkterad VIP utan hänsyn till fönster.



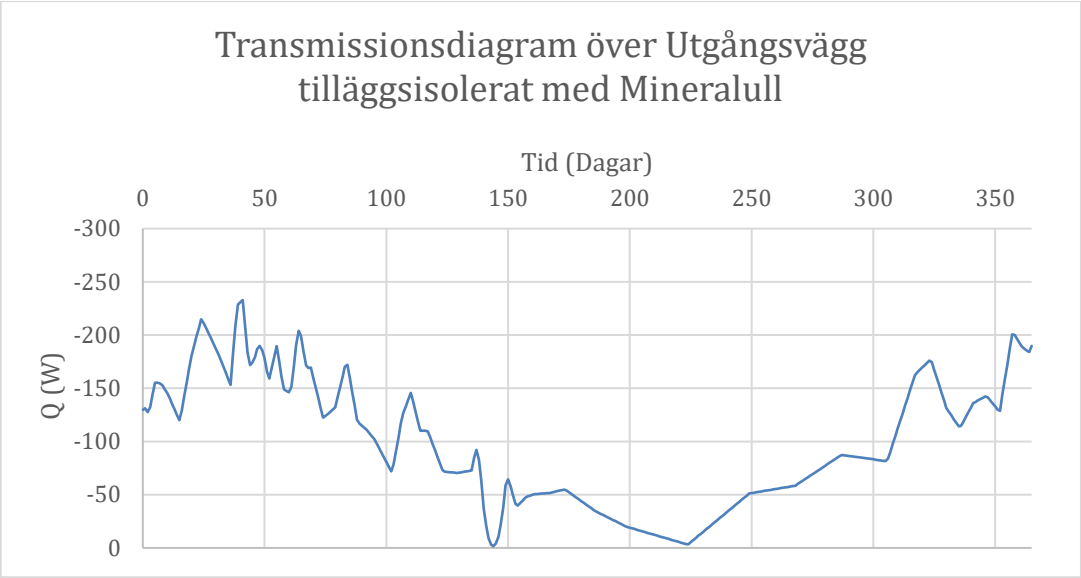
Figur 28. Effektdiagram över utgångsvägg tilläggsisolerat med VIP utan hänsyn till fönster.



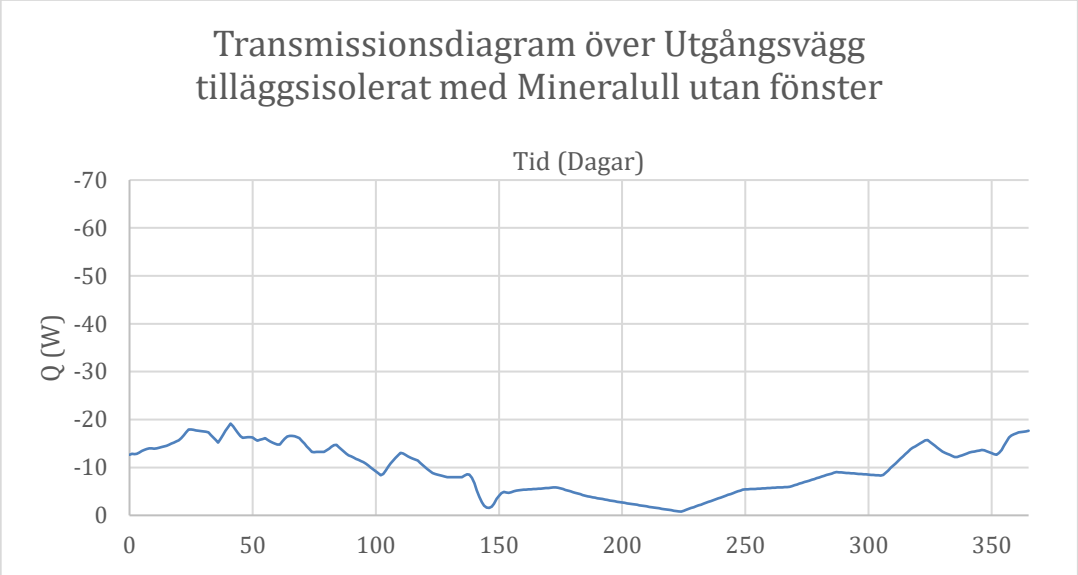
Figur 29. Effektdiagram över utgångsvägg tilläggsisolerat med punkterad VIP.



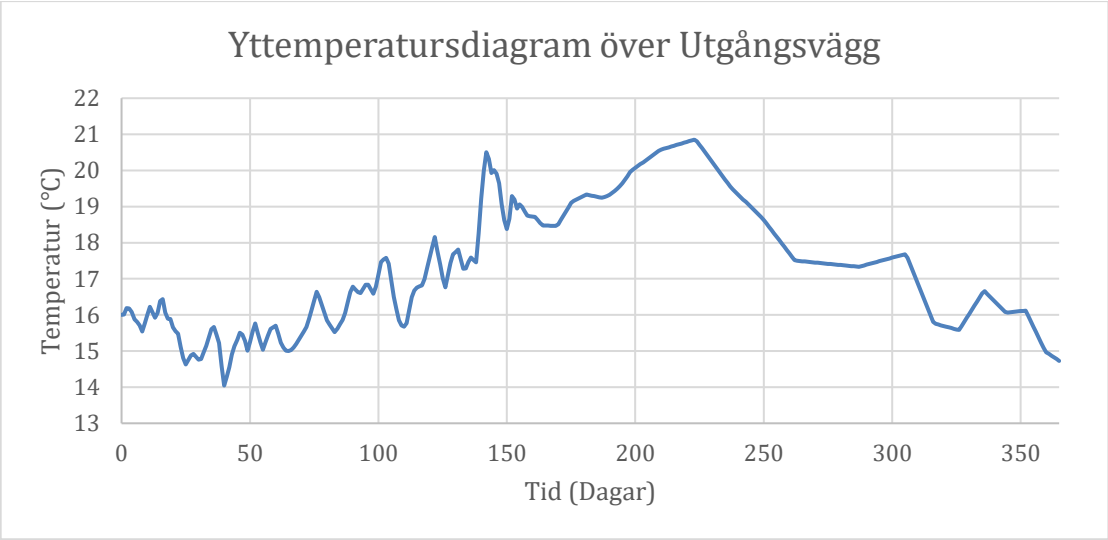
Figur 30. Effektdiagram över utgångsvägg tilläggsisolerat med punkterad VIP utan hänsyn till fönster.



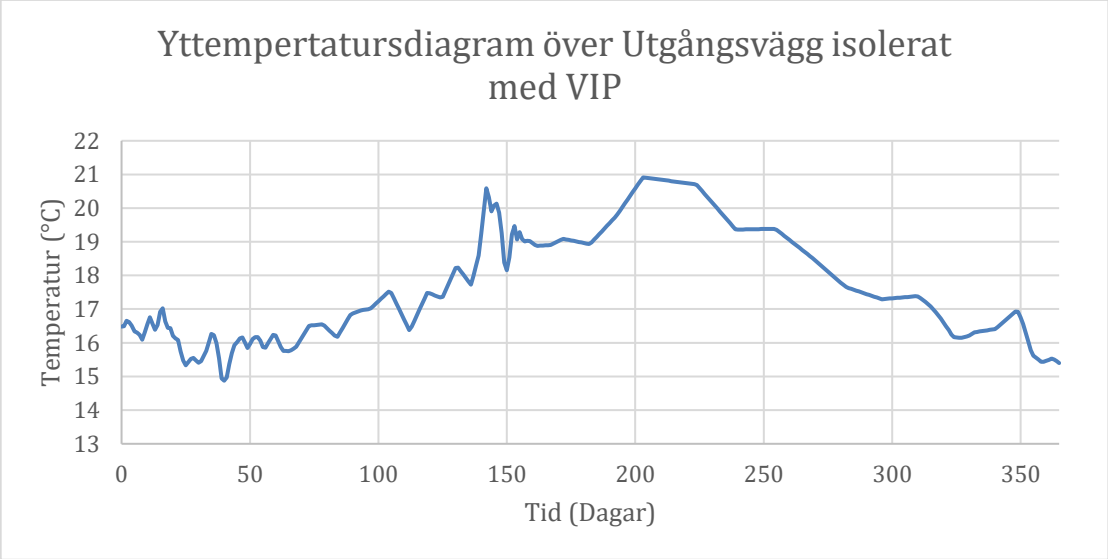
Figur 31. Effektdiagram över utgångsvägg tilläggsisolerat med mineralull.



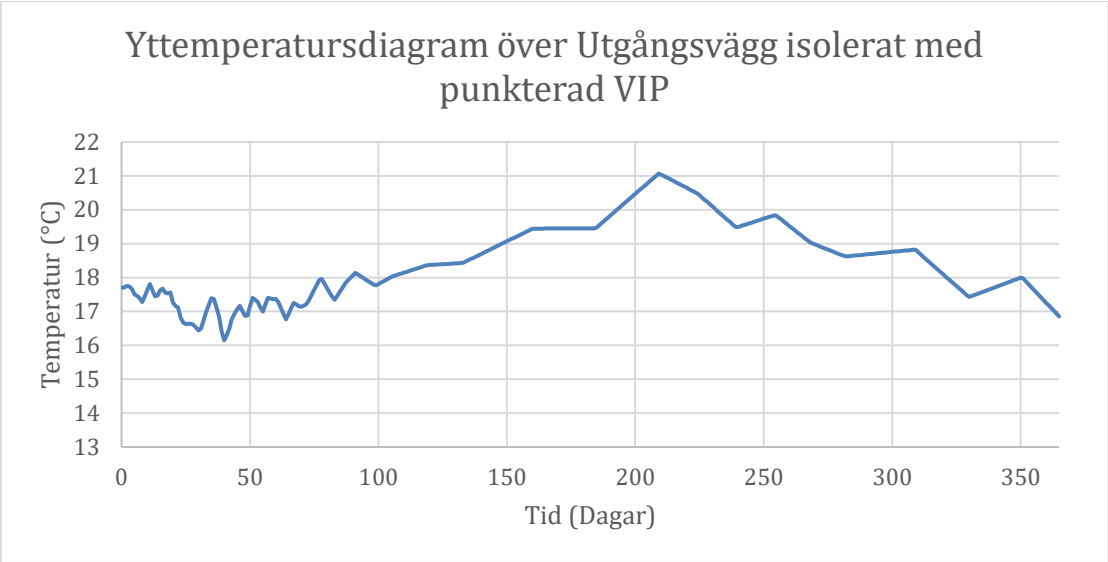
Figur 32. Effektdiagram över utgångsvägg tilläggsisolerat med mineralull utan hänsyn till fönster.



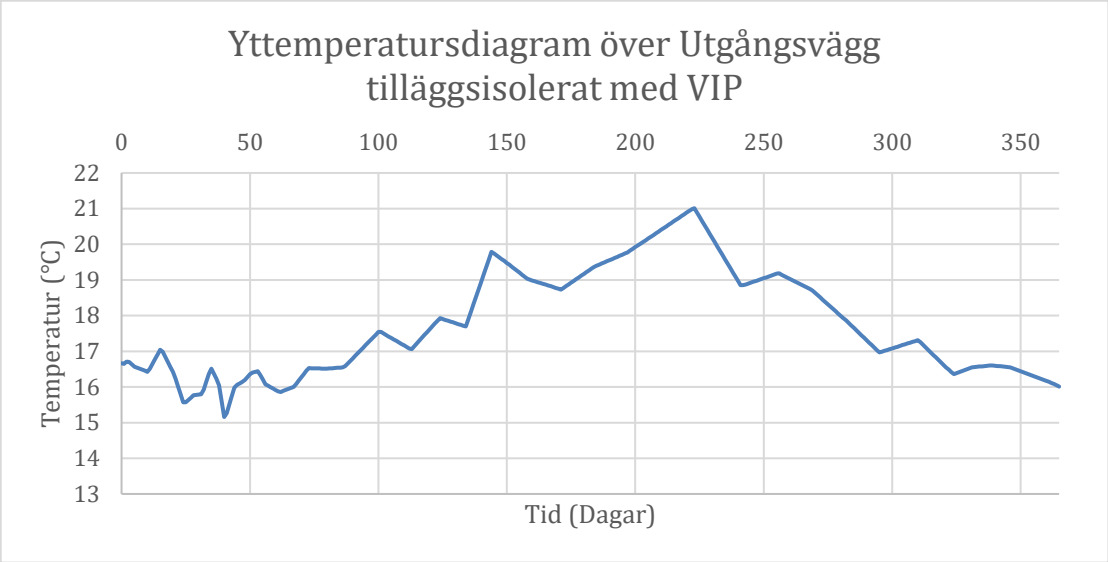
Figur 33. Diagram över yttemperatur på utgångsväggen.



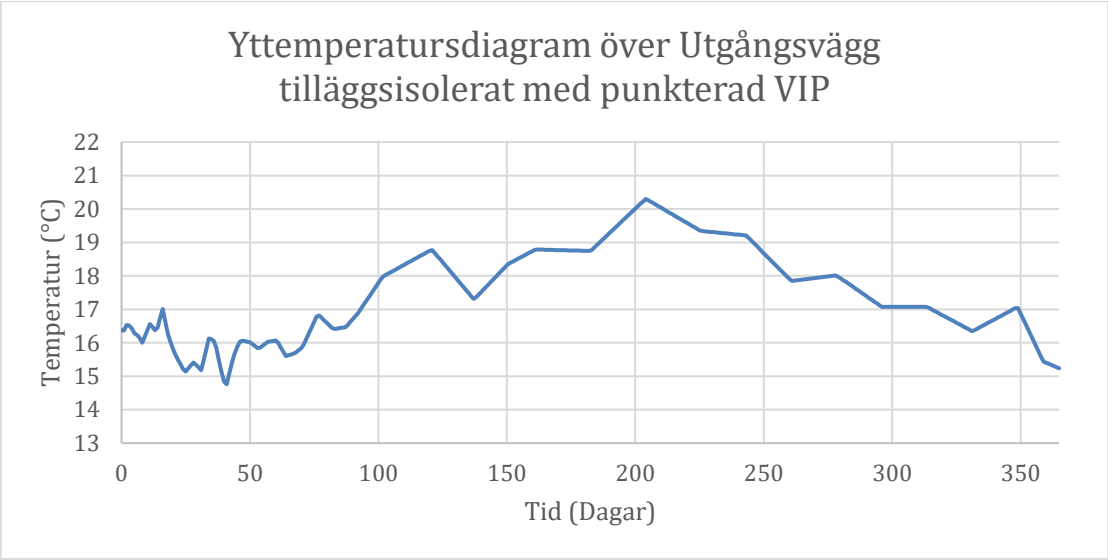
Figur 34. Diagram över yttemperatur på utgångsväggen isolerat med VIP.



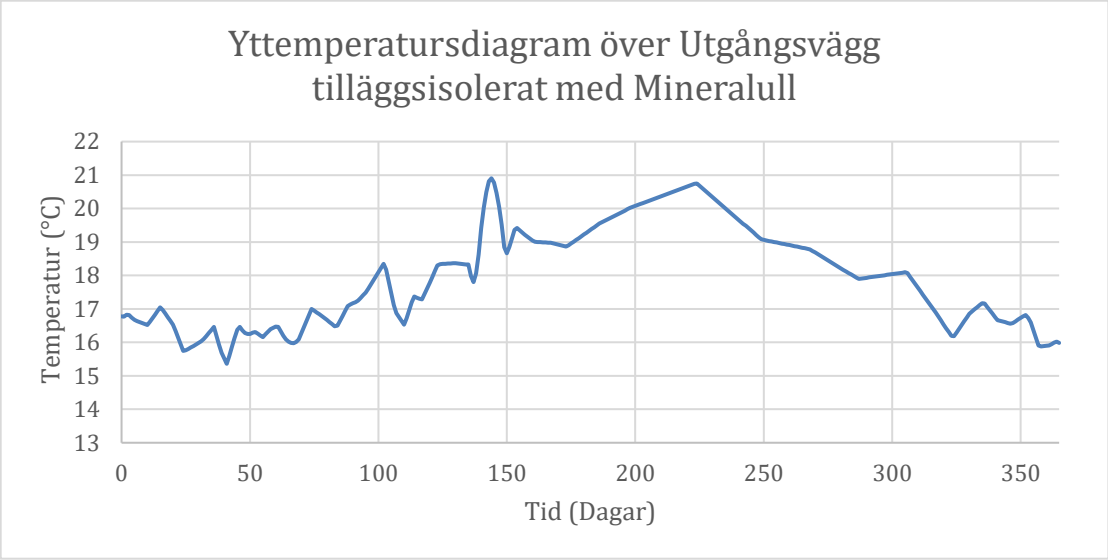
Figur 35. Diagram över yttemperatur på utgångsväggen isolerat med punkterad VIP.



Figur 36. Diagram över yttemperatur på utgångsväggen tilläggsisolerat med VIP.



Figur 37. Diagram över yttemperatur på utgångsväggen tilläggsisolerat med punkterad VIP.



Figur 38. Diagram över yttemperatur på utgångsväggen tilläggsisolerat med mineralull

.