

Yttervägg med träregelstomme och högpresterande isolering

Platsbesparande yttervägg för Attefallshus

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

PETTER ERIKSSON

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

EXAMENSARBETE ACEX20

Yttervägg med träregelstomme och högpresterande isolering

Platsbesparande yttervägg för Attefallshus

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

PETTER ERIKSSON

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Byggnadsteknologi

Byggnadsfysikalisk modellering

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2022

Yttervägg med träregelstomme och högpresterande isolering

Platsbesparande yttervägg för Attefallshus

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

PETTER ERIKSSON

© PETTER ERIKSSON, 2022

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2022

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Byggnadsteknologi

Byggnadsfysikalisk modellering

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Omslag:

Detaljbild av beräkningspunkter för fuktillstånd i ytterväggskonstruktion

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2022

Yttervägg med träregelstomme och högpresterande isolering

Platsbesparande yttervägg för Attefallshus

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

PETTER ERIKSSON

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

SAMMANFATTNING

Höjda ambitioner inom energihushållning har lett till mer värmeisolering i byggnaders klimatskal. En konsekvens av detta är att ytterväggarna blivit tjockare och upptar en stor andel av byggnadsarean. Detta blir särskilt påtagligt för mindre byggnader som Attefallshus där byggnadsarean är begränsad till 30 m². Syftet med detta arbete är att undersöka möjligheten att använda högpresterande isoleringsmaterial i ytterväggarna i avsikt att öka andelen boarea för Attefallshus. Högpresterande isolering är isoleringsprodukter med lägre värmeledningsförmåga än den traditionellt använda mineralullen. Detta möjliggör i sin tur tunnare lager av isolering utan en försämrade energiprestanda.

Rapporten inleds med en teoridel för att beskriva vilka energikrav som gäller för Attefallshus, egenskaper för de material som undersökts samt för att klarlägga principer för hur en yttervägg med träregelstomme bör utformas med avseende på fuktsäkerhet.

Teoriavsnittet har legat till grund för fyra förslag till ytterväggkonstruktioner som delvis utformats med högpresterande isoleringsmaterial. Dessa förslag följs upp med beräkningar av U-värde, fuktillstånd och materialkostnader.

Resultatet visar att det finns potential att öka andelen boarea för Attefallshus om låga U-värden eftersträvas. För en vägg med U-värde 0,122 W/m²K var ökningen 9,5% jämfört med en vägg med mineralull med samma U-värde. För en vägg med U-värde 0,171 W/m²K var samma ökning endast 1,5%. De ekonomiska konsekvenserna behöver dock utredas grundligare då materialkostnaderna för konstruktionerna med vakuumisoleringspaneler ökade med 150–160%.

Nyckelord: Attefallshus, Ytterväggar, Träregelstomme, Vakuumisoleringspaneler, VIP, Fenolskum, PF, WUFI, fuktsäkerhet.

Exterior wooden frame wall with high-performance insulation

Space-saving exterior wall for Attefallshus

*Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering*

PETTER ERIKSSON

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

ABSTRACT

Raised ambitions in energy management have led to more thermal insulation in building envelopes. One consequence of this is that the exterior walls have become thicker and occupy a large proportion of the gross floor area. This becomes particularly noticeable for smaller buildings such as Attefallshus where the gross floor area is limited to 30 m². The purpose of this thesis is to investigate the possibility of using high-performance insulation materials in the exterior walls with the intention of increasing the proportion of floorspace for an Attefallshus building. High-performance insulation is insulation products with lower thermal conductivity than the traditionally used mineral wool. This could make for thinner layers of insulation without a degraded energy performance.

The thesis begins with a theoretical part to describe the energy requirements that apply to Attefallshus, properties of the materials examined and to clarify principles for how an exterior wall with a wooden frame should be designed regarding moisture safety.

The theory section has formed the basis for four proposals for exterior wall constructions that are partly designed with high-performance insulation materials. These proposals are followed up with calculations of U-value, hygrothermal condition and material costs.

The results show that there is potential to increase the proportion of floorspace for Attefallshus if low U-values are pursued. For a wall with a U-value of 0.122 W/m²K, the increase was 9.5% compared to a wall with mineral wool with the same U-value. For a wall with a U-value of 0.171 W/m²K the same increase was only 1.5%. However, the economic consequences need to be investigated more thoroughly as the material costs for the constructions with vacuum insulation panels increased by 150–160%.

Keywords: Attefallshus, Exterior walls, Wooden frame, Vacuum insulation panels, VIP, Phenolic foam, PF, phenolic foam, WUFI, moisture-safety.

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och målsättning	1
1.3 Problemformulering	1
1.4 Metod	1
1.5 Avgränsningar	2
1.6 Målgrupp	2
2 TEORI	3
2.1 Kort om Attefallshus	3
2.2 Kraven i Boverkets byggregler	3
2.2.1 Energihushållning	3
2.2.2 Fuktsäkerhet	4
2.3 Byggnadsfysikalisk teori	5
2.3.1 Värmetransport i konstruktioner	5
2.3.2 Fukttransport i konstruktioner	5
2.3.3 Modell för kritiskt fuktillstånd	6
2.4 Högpresterande isoleringsmaterial	7
2.4.1 Vakuumisolerade paneler (VIP)	7
2.4.2 Fenolskum (PF)	9
2.5 Träregelväggens uppbyggnad	9
2.6 Principer för fuktsäkra träregelväggar	11
2.6.1 Luftspaltens utförande	11
2.6.2 Fasadskivans betydelse för fuktsäkerheten	11
2.6.3 Ångspärrens placering och betydelsen av att bygga lufttätt	12
2.6.4 Köldbryggor	12
2.6.5 Byggfukt och smuts på material	13
3 UTFORMNINGSFÖRSLAG	14
3.1 Referensvägg	14
3.2 Väggekonstruktion 1	15
3.3 Väggekonstruktion 2	15

3.4	Väggkonstruktion 3	16
3.5	Väggkonstruktion 4	16
4	BERÄKNINGAR	17
4.1	Beräkningar av U-värden	17
4.2	Beräkningar av fuktillstånd	18
4.3	Beräkningar av materialkostnad	19
5	RESULTAT	21
5.1	Väggkonstruktion 1 (VIP 20 mm)	23
5.2	Väggkonstruktion 2 (VIP 20 mm och PF 50 mm)	25
5.3	Väggkonstruktion 3 (PF 25 mm)	27
5.4	Väggkonstruktion 4 (PF 25 mm och PF 50 mm)	29
5.5	Referensväggen	31
6	DISKUSSION	33
7	SLUTSATSER	36
8	REFERENSER	37
9	BILAGOR	40
9.1	Bilaga 1 – Inställningar i WUFI	40
9.2	Bilaga 2 – Beräkningar av materialkostnad	41
9.3	Bilaga 3 – Beräkningar av U-värde	44
9.4	Bilaga 4 – Exempel på omslutande area för olika byggnadsdelar i ett Attefallshus	48

Förord

Denna rapport avslutar mina studier på högskoleingenjörsprogrammet i Samhällsbyggnadsteknik på Chalmers tekniska högskola. Jag vill passa på att tacka vänner och familj som på olika sätt stöttat upp längs resans gång. Jag vill även rikta ett tack till min handledare Pär Johansson på Chalmers för värdefulla synpunkter och kommentarer på arbetet.

Göteborg maj 2022
Petter Eriksson

Beteckningar

Latinska

A_i	Area för byggnadsdelens i yta mot uppvärmd inneluft (m^2).
A_{om}	Sammanlagd area för omslutande byggnadsdelars ytor mot uppvärmda delar av bostäder eller lokaler (m^2).
A_{temp}	Summan av invändig area för respektive våningsplan, vindsplan och källarplan som värms till mer än 10 °C. Area som upptas av innerväggar, öppningar för trappa, schakt och dylikt, inräknas. Area för garage, inom byggnaden, i bostadshus eller annan lokalbyggnad än garage, inräknas inte (m^2).
BOA	Boarean (BOA) är den area i en byggnad som är användningsbar för boende. Mäts från ytterväggarnas insida och inkluderar innerväggar, skåp etcetera. För våning med snedtak finns särskilda bestämmelser (m^2).
BYA	Byggnadsarean (BYA) avser den area som en byggnad upptar på marken, inklusive utkragande byggnadsdelar utan hänsyn till antal våningar eller höjd. Det är ytterväggarnas utsida eller konstruktionens utsida som räknas (m^2).
d_i	Tjocklek för materialskiktet i (m).
l_k	Längd för den linjära köldbryggan k (m).
R	Värmemotstånd (m^2K/W).
R_{se}	Yttre värmeövergångsmotstånd (m^2K/W).
R_{si}	Inre värmeövergångsmotstånd (m^2K/W).
R_T	Totalt värmemotstånd (m^2K/W).
R_T^U	Totalt värmemotstånd med U-värdesmetoden (m^2K/W).
R_T^λ	Totalt värmemotstånd med λ -värdesmetoden (m^2K/W).
RF	Relativ fuktighet (%).
T	Temperatur (°C).
U	Värmegenomgångskoefficient för en byggnadsdel (W/m^2K).
U_i	Värmegenomgångskoefficient för byggnadsdelen i (W/m^2K).
U_m	Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient för en byggnads klimatskärm (W/m^2K).

Grekiska

λ_i	Värmekonduktivitet (W/mK).
λ_i	Värmekonduktivitet för materialet i (W/mK).
χ_j	Värmegenomgångskoefficient för den punktformiga köldbryggan j (W/K).
ψ_k	Värmegenomgångskoefficient för den linjära köldbryggan k (W/mK).

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Ett av Sveriges miljömål *God bebyggd miljö* handlar bland annat om att användningen av energi ska ske på ett resursbesparande och effektivt sätt (Boverket, 2019). Bygg- och fastighetssektorn står idag för cirka en tredjedel av Sveriges totala energianvändning, och över 70% av denna energi går till uppvärmning av byggnadsbeståndet (Boverket, 2021). I Sverige är det Boverkets byggregler (BBR) som genom föreskrifter och råd reglerar hur våra byggnader ska utformas. Där ställs bland annat krav på hur välisolerad en byggnad skall vara och dessa ökande energikrav har lett till tjockare lager av isolering i klimatskalets olika delar. Ur ett energihushållningsperspektiv är detta en eftersträvansvärd utveckling. Men det får också konsekvensen att ytterväggarna blir tjockare och upptar en stor andel av byggnadsarean. För mindre byggnader som Attefallshus där byggnadsarean är begränsad till 30 m² leder det till svårigheter med att projektera godkända och tillgänglighetsanpassade planlösningar och det påverkar även byggnadens ekonomiska värde negativt. Högpresterande isoleringsmaterial har lägre värmekonduktivitet än den traditionellt använda mineralullen vilket innebär att isolerings-tjockleken kan minskas utan en försämrad energiprestanda som följd.

1.2 Syfte och målsättning

Syftet med denna studie är att undersöka om det med hjälp av högpresterande isolering är möjligt att utforma en tunnare ytterväggskonstruktion för Attefallshus och samtidigt uppfylla dagens energikrav. Målsättningen är att arbetet ska resultera i förslag på ytterväggskonstruktioner som ger ett bättre utnyttjande av byggnadsarean alternativt ett likvärdigt utnyttjande men med en högre energiprestanda.

1.3 Problemformulering

Studien har ett flertal frågeställningar som rör högpresterande isoleringsmaterial och hur dessa kan användas i syfte att spara boyta i Attefallshus.

- I vilken utsträckning är det möjligt att kompensera ett högre U-värde i ytterväggarna med ökad isolering i andra delar av klimatskalet?
- Går det att utforma en tunnare träregelvägg med hjälp av högpresterande isolering och samtidigt uppnå energikraven för ett Attefallshus?
- Hur påverkar de förändrade isoleringsmaterialen konstruktionen ur fuktsäkerhetsperspektiv och materialkostnad?

1.4 Metod

Arbetsprocessen började som en litteraturstudie dels för att kartlägga vilka energikrav som gäller för Attefallshus från myndighetshåll, dels för att beskriva principer för hur en yttervägg med träregelstomme bör utformas för att fungera väl ur fuktsäkerhetssynpunkt. Litteratur till arbetet består dels av kurslitteratur från utbildningen på högskoleingenjörsprogrammet i samhällsbyggnadsteknik (från kurserna Byggnadsmaterial och Byggnadsteknologi), dels från myndigheter, tekniska

rapporter och forskningspublikationer. Ingångsdata för beräkningar i form av materialegenskaper för både mineralull och högpresterande isoleringsmaterial inhämtades från facklitteratur, kurslitteratur och tillverkare. Dessa har sedan legat till grund för beräkningar av konstruktionsförslagets U-värde som gjorts med Microsoft Excel. Fuktberäkningar genomfördes med beräkningsprogrammet WUFI Pro för klimatförhållanden i Göteborg. Resultaten har sedan analyserats och de föreslagna ytterväggskonstruktionernas för och nackdelar diskuteras.

1.5 Avgränsningar

Arbetet har endast undersökt ytterväggskonstruktioner med träregelstomme. Dimensionering för hållfasthet, brand och akustik utreds inte i detta arbete. Eftersom Attefallshus i princip endast medger byggnation i ett plan (bortsett från källare och loft) så är lasterna som bärs ner i ytterväggarna relativt låga vilket bör vara fördelaktigt vid utformning av en tunnare väggkonstruktion. En regelstomme av 45x95 mm C24 klassat virke har antagits klara lasterna för förhållanden i Göteborg. En annan utgångspunkt är att isoleringsmaterial som tas upp i studien skall vara tillgängliga på den svenska marknaden. Vid implementering av nya byggnadsmaterial är det förstås viktigt att undersöka energiåtgång och miljöpåverkan från materialet i tillverkningsprocessen. Någon analys om materialens hållbarhetsaspekter görs dock inte i detta arbete men parametrar som förväntad livslängd och materialkostnad kommer att redovisas och diskuteras.

1.6 Målgrupp

Förhoppningen är att detta arbete kan vara relevant för personer som går i tankar om att bygga ett Attefallshus som komplementbostad. Arbetet kan även tänkas vara relevant för företag som producerar eller projekterar Attefallshus.

2 Teori

2.1 Kort om Attefallshus

Byggreglerna för Attefallshuset infördes 2014. Det är en byggnadstyp som får uppföras på en tomt med ett befintligt en- eller tvåbostadshus. Byggnaden är bygglovsbefriad och får även strida mot bestämmelser i detaljplan (får exempelvis uppföras på prickad mark) men kräver bygganmälan. Attefallshuset får till skillnad från Friggeboden inredas som bostad (komplementbostadshus) men kan även användas som exempelvis garage eller förråd (komplementbyggnad) (Boverket, 2021). År 2020 höjdes den tillåtna byggnadsarean från 25 m² till 30 m². Detta gjordes främst för att göra det mer attraktivt att bygga dem men också på grund av svårigheter med att utforma tillgängliga och godkända planlösningar då byggnaden uppförs som permanentbostad (Boverket, 2018, s. 21).

2.2 Kraven i Boverkets byggregler

När ett Attefallshus uppförs som komplementbostadshus gäller samma regelverk som vid uppförande av andra småhus för bostadsändamål vilket innebär att byggnaden skall uppfylla kraven i BBR. I detta avsnitt beskrivs hur dessa krav är formulerade när det gäller energihushållning samt fuktsäkerhet.

2.2.1 Energihushållning

Energianvändning för byggnader behandlas i det nionde kapitlet *Energihushållning* i BBR. Det övergripande funktionskravet är att ”Byggnader ska vara utformade så att energianvändningen begränsas genom låga värmeförluster, lågt kylbehov, effektiv värme- och kylanvändning och effektiv elanvändning” (Boverket, 2020, s. 135). De specifika kraven formuleras som gränsvärden i syfte att minska värmebehovet och elanvändningen för uppvärmning. Dessa krav redovisas i Tabell 1. För mindre småhus ($\leq 50 \text{ m}^2 A_{\text{temp}}$) finns dock inget krav på vare sig primärenergital eller effektbegränsningar för uppvärmning. Kravet på genomsnittlig värmegenomgångskoefficient (U_m) är 0,33 W/m²K. A_{temp} avser summan av invändig area för alla våningsplan som värms till mer än 10 °C. Man accepterar alltså ett något högre värde på U_m jämfört med större småhus.

Tabell 1 BBR:s krav på högsta tillåtna primärenergital, installerad eleffekt för uppvärmning, genomsnittlig värmegenomgångskoefficient och genomsnittligt luftläckage, för bostäder (Boverket, 2020, s. 138–139).

	Energi-prestanda uttryckt som primärenergital (EP _{pet}) [kWh/m ² A _{temp} och år]	Installerad eleffekt för uppvärmning [kW]	Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient (U _m) [W/m ² K]	Klimatskärmens genomsnittliga luftläckage vid 50 Pa tryckskillnad [l/s m ²]
Småhus >130 m ² A _{temp}	90	4,5 + 1,7 x (F _{geo-1}) ¹⁾	0,30	Enligt avsnitt 9:26
Småhus >90–130 m ² A _{temp}	95			
Småhus >50–90 m ² A _{temp}	100			
Småhus ≤50 m ² A _{temp}	Inget krav	Inget krav	0,33	0,6
Flerbostadshus	75 ⁴⁾	4,5 + 1,7 x (F _{geo-1}) ^{1),5)}	0,40	Enligt avsnitt 9:26

U_m beräknas enligt ekvation (1) genom att respektive byggnadsdels U-värde (U_i) viktas mot sin area (A_i). Till detta adderas även linjära (Ψ_k) och punktformiga (χ_j) köldbryggor.

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n U_i A_i + \sum_{k=1}^m l_k \Psi_k + \sum_{j=1}^p \chi_j}{A_{om}} \quad (1)$$

Vid ändring av byggnader skall U-värden i Tabell 2 eftersträvas. I ett tidigt skede i projekteringen, när en byggnads geometri inte är helt fastställd kan dessa värden ge en god indikation om vilka U-värden respektive byggnadsdel bör uppfylla.

Tabell 2 Värmegenomgångskoefficient som ska eftersträvas för enskilda byggnadsdelar (Boverket, 2020, s. 144).

U _i	[W/m ² K]
U _{tak}	0,13
U _{vägg}	0,18
U _{golv}	0,15
U _{fönster}	1,2
U _{yttterdörr}	1,2

Eftersom kraven i Tabell 1 gäller den genomsnittliga värmegenomgångskoefficienten är det möjligt att kompensera ett högre U-värde för exempelvis ytterväggarna genom att värmeisolera mer i klimatskärmens övriga delar. För ett Attefallshus utgör dock ytterväggarna en stor andel (mellan 40–50%) av den omslutande arean vilket begränsar effekten av en sådan åtgärd. I bilaga 4 visas ett exempel på hur stora areaandelarna för de olika byggnadsdelarna kan vara för ett Attefallshus med 4 x 7,5 m² byggnadsarea.

2.2.2 Fuktsäkerhet

Fukt behandlas i kapitel 6:5 i BBR. Funktionskravet är att ”Byggnader ska utformas så att fukt inte orsakar skador, lukt eller mikrobiell växt som kan påverka hygien eller hälsa” (Boverket, 2020, s. 95). Detta skall verifieras genom en fuktsäkerhetsprojektering vars syfte är att säkerställa att fukttillstånden i en byggnadsdel

och dess ingående material inte överskrider högsta tillåtna fuktillstånd. För fastställande av högsta tillåtna fuktillstånd används så kallade kritiska fuktillstånd vilket avser fuktillstånd då material inte uppfyller sin avsedda funktion eller då mikrobiell tillväxt kan ske. De kritiska fuktillstånd som används skall vara välbeprövade och hänsyn skall även tas till effekter av smuts på materialet. Om det kritiska fuktillståndet inte är känt ska en relativ fuktighet (RF) på 75% användas (Boverket, 2020).

2.3 Byggnadsfysikalisk teori

I detta avsnitt beskrivs de huvudsakliga fysikaliska mekanismer och material-egenskaper som påverkar värme och fukttransport i klimatavskiljande konstruktioner. Erfarenheter kring energieffektivt byggande och fuktsäkerhet för träregelstomme sammanfattas i ett antal konstruktionsprinciper. Denna teori ligger sedan till grund för utformningsförslagen av ytterväggskonstruktioner med högpresterande isolering.

2.3.1 Värmetransport i konstruktioner

Värmetransport i konstruktioner sker genom tre interagerande mekanismer. Värmeledning i det fasta materialet, strålningsutbyte mellan ytor med olika temperatur och konvektion i konstruktionens håligheter. Drivkraften för värmetransporten styrs av storleken på temperatur- eller tryckskillnaden och sker i riktning mot lägre temperatur eller tryck (Petersson, 2013). Ett materials benägenhet att leda och transportera värme beskrivs med materialegenskapen värmekonduktivitet eller värmeledningsförmåga (λ) med enheten W/mK . Värmekonduktiviteten för byggnadsmaterial bestäms genom provning med hjälp av en plattapparat eller värmeflödesapparat enligt standarden SS-EN 12667 (SIS, 2001) och tar alltså hänsyn till samtliga värmetransportmekanismer. En klimatskiljande konstruktion består i regel av flera sammansatta materialskikt av varierande tjocklek. Värme genomgångskoefficienten (U-värdet) beskriver en hel byggnadsdels värmeisoleringsgrad och har enheten W/m^2K . U-värdet beräknas som inversen av konstruktionens totala värmemotstånd (R_T) (Petersson, 2013). Sambanden redovisas i ekvation (2), (3) och (4).

$$U = R_T^{-1} \quad [W/m^2K] \quad (2)$$

$$R_T = \Sigma R_i \quad [m^2K/W] \quad (3)$$

$$R_i = d_i/\lambda_i \quad [m^2K/W] \quad (4)$$

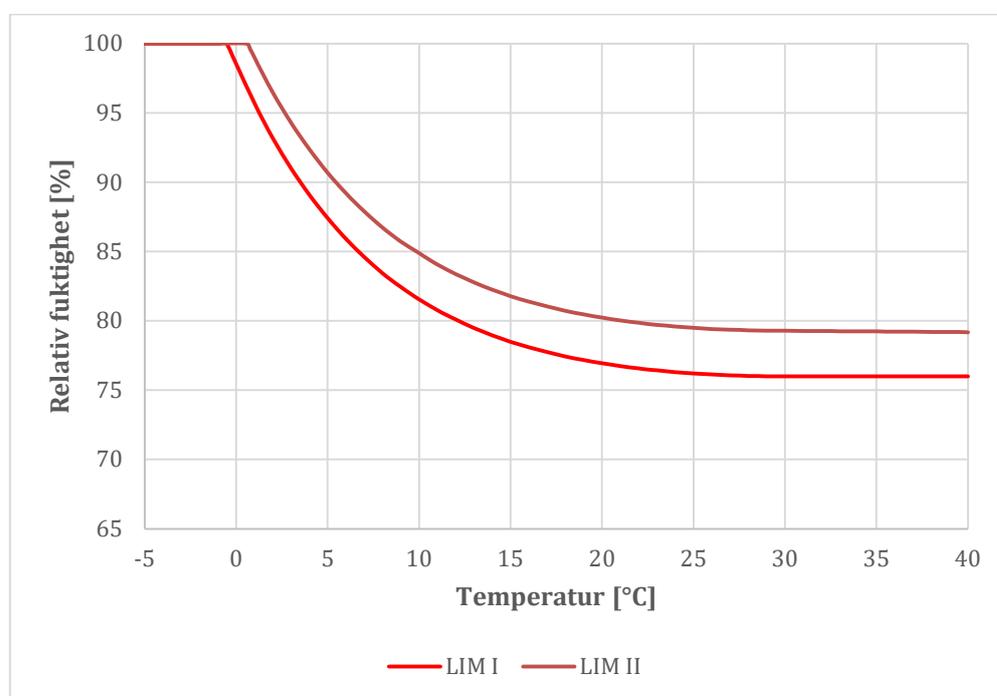
2.3.2 Fukttransport i konstruktioner

Fukttransport i konstruktioner kan ske genom ett flertal mekanismer beroende på om fukten är i ång- eller vätskefas. De mekanismer som är av betydelse i denna studie är fukttransport genom konvektion samt diffusion och dessa sker i ångfas. Fukttransport genom konvektion innebär att vattenånga transporteras med luftströmmar som uppstår till följd av tryckskillnader. Fuktkonvektion sker i riktning mot lägre lufttryck och är ofta en kritisk mekanism ur fuktsäkerhetssynpunkt då den har potential att transportera stora mängder fukt (Arfvidsson et al., 2017). Risken för skador till följd av konvektiv fukttransport minskas genom att införa lufttäta skikt i konstruktionen

samt att med hjälp av ventilation skapa ett undertryck i byggnaden (Pettersson, 2013). Drivkraften för fukttransport genom diffusion är skillnader i ånghalt. Det innebär att vattenånga rör sig från områden med en högre ånghalt till områden med lägre ånghalt. Eftersom ånghalten generellt sett är högre inomhus än utomhus innebär det att det uppstår fukttransport genom exempelvis ytterväggar. Diffusion genom konstruktioner minskar genom att införa material med ett högt ånggenomgångsmotstånd. I byggnader med träregelstomme är denna ångspärr oftast en PE-folie som placeras nära konstruktionens insida för att skapa både ett luft- och ångtätt skikt (Arfvidsson et al., 2017).

2.3.3 Modell för kritiskt fuktillstånd

För att utvärdera om de beräknade fuktillstånden i väggkonstruktionerna är acceptabla jämförs de mot ett kritiskt fuktillstånd. Ett kritiskt fuktillstånd är ett tillstånd då tillväxt av mögel kan antas ske. Risken för mögeltillväxt påverkas huvudsakligen av RF och temperatur samt under hur lång tid de kritiska gränserna överskrids men beror också på vilket material som studeras (Pettersson, 2013). De kritiska fuktillstånd som används i detta arbete har utvecklats av Sedlbauer (2002) och är samma som används i WUFI Pro, se Figur 1. LIM står för ”Lowest Isoleth for Mould”. LIM I gäller för biologiskt återvinningsbara material medan LIM II avser material som är svåra att återvinna biologiskt. I denna studie bör fuktillstånd för materialskikt med träreglar ej överstiga LIM I under längre perioder. Materialskikt med enbart mineralull eller oorganiska material jämförs mot LIM II. Fuktillstånd som ligger över respektive graf visar tillfällena då risk för mögelpåväxt föreligger dock utan beaktande av varaktigheten, medan fuktillstånd under grafen indikerar att påväxt av mögel är osannolikt.



Figur 1 Mögelmodellen som används i WUFI Pro (Sedlbauer, 2002).

2.4 Högpresterande isoleringsmaterial

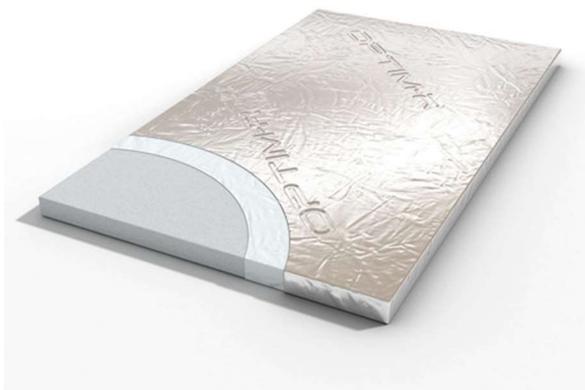
Med högpresterande isolering syftas i detta arbete på isoleringsmaterial med en lägre värmekonduktivitet än konventionella isoleringsmaterial som mineralull (MU). Det finns idag ett flertal produkter på marknaden. De två material som tas upp i denna studie är Vakuumisolerade paneler (VIP) samt Fenolskum (PF från Phenolic foam). VIP tas med i studien främst för dess exceptionella värmeisolerande egenskaper. PF är intressant för att det bland annat marknadsförs som ett alternativ till mineralull i träregelväggar. I Tabell 3 visas en sammanställning av materialegenskaper och priser som kan ses som riktlinjer för VIP, PF och MU. Idag används högpresterande isolering företrädesvis i ombyggnadsprojekt där det på grund av utrymmesbrist kan vara svårt att uppnå energieffektivitet med konventionella material. Det kan också föreligga särskilda kulturhistoriska eller arkitektoniska skäl som motiverar användningen av högpresterande isolering.

Tabell 3 Sammanställning av egenskaper för isoleringsmaterial.

		<i>MU</i>	<i>VIP</i>	<i>PF</i>
Värmekonduktivitet	[W/mK]	0,030–0,039 ^{1) 2)}	0,007 ⁴⁾	0,020–0,023 ^{7) 8)}
Densitet	[kg/m ³]	15–200 ¹⁾	180–220 ⁴⁾	30–45 ⁷⁾
Specifik värmekapacitet	[J/kgK]	800 ¹⁾	800 ⁴⁾	1500 ^{7) 8)}
Ångpermeabilitet	× 10 ⁻⁶ [m ² /s]	8–24 ¹⁾	0,000016 ⁵⁾	0,15–0,75 ^{7) 8)}
Tjocklek	[mm]	45–220	6–40	25–200
Pris per kubikmeter	[SEK/m ³]	600 ³⁾	52 500 ⁶⁾	1900 ^{9) 10)}
Kvadratmeterpris / värmemotstånd	$\left[\frac{SEK}{m^2} / \frac{m^2K}{W} \right]$	21 ⁹⁾	368 ⁹⁾	41 ⁹⁾
¹⁾ (Pettersson, 2013, s. 497–505). ²⁾ (Isover, 2016). ³⁾ (Bidcon prislista) ⁴⁾ (Kingspan, 2021b). ⁵⁾ (WUFI Pro materialdatabas). ⁶⁾ (Skanska, 2012). ⁷⁾ (Kingspan, 2021a). ⁸⁾ (Unilin, 2019). ⁹⁾ Beräknat på medelvärden i denna tabell.				

2.4.1 Vakuumisolerade paneler (VIP)

Vakuumisolerade paneler (VIP) har en deklarerad värmekonduktivitet på 0,007 W/mK vilket gör dem cirka fem gånger effektivare än mineralull och till ett av de effektivaste materialen för byggnadsisolering på marknaden idag.



Figur 2 Vakuumisolerade paneler finns i tjocklekar mellan 20–60 mm (Kingspan, 2017).

Panelerna är uppbyggda av ett finporöst kärnmaterial som evakuerats på luft och inkapslats i en barriärfilm, se Figur 2. Kärnmaterialiet består vanligtvis av pyrogen kiseldioxid (fumed silica) med en öppen porstruktur och en porstorlek på cirka 30–100 nanometer (Bouquerel et al., 2012). Som barriärfilm används olika typer av gas- och ångtäta laminerade folier uppbyggda av flera skikt av tunna metalliserade polymerfilmer (MF) eller aluminiumfilmer (AF). Barriärfilmens syfte är att bibehålla undertryck i panelerna, men eftersom foliernas värmekonduktivitet är relativt hög uppstår köldbryggor längs panelernas kanter (Wegger et al., 2011). VIP:s låga värmekonduktivitet beror huvudsakligen på att värmeledningen och konvektionen i gasen i kärnmaterialiets porer minimeras eftersom kärnan är försatt i vakuum. (Wegger et al., 2011). Initialt efter tillverkningen kan panelerna ha en värmekonduktivitet på cirka $0,004 \text{ W/mK}$ men med tiden diffunderar luft och vattenånga genom barriärfilmen och trycket i panelerna ökar, vilket också resulterar i att panelernas värmekonduktivitet i sin tur ökar. Från tillverkare uppges VIP ha en teknisk livslängd på 30–50 år. I studier där man utsatt VIP för påskyndat åldrande visar resultaten på en värmekonduktivitet runt $0,008 \text{ W/mK}$ efter 25 år (Kim et al., 2017). Andra studier visar på att VIP med AF som barriärfilm verkar bibehålla trycket i panelerna under längre tid men med större köldbryggor längs kanterna då metallhöljet i AF barriären är relativt kraftig (Mao et al., 2020). För en panel med kärnmaterial av pyrogen kiseldioxid ligger värmekonduktiviteten vid atmosfärstryck (dvs en punkterad panel) på cirka $0,020 \text{ W/mK}$ (Wegger et al., 2011).

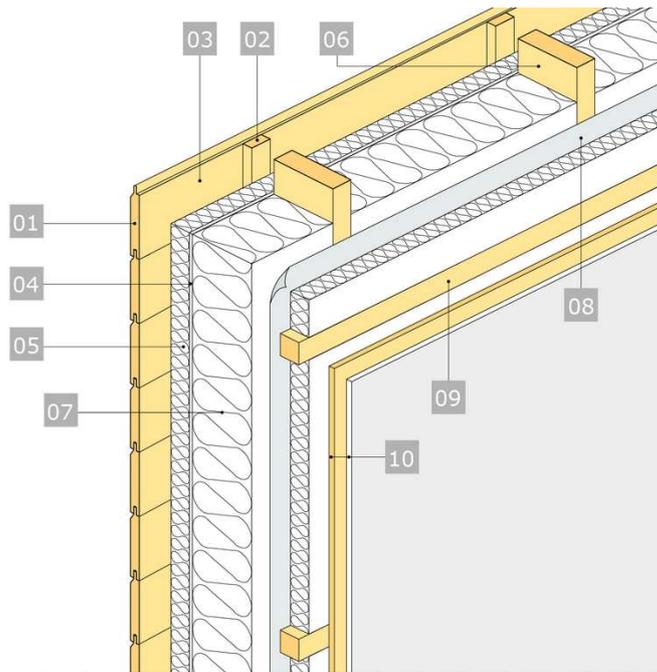
Eftersom panelernas effektivitet är beroende av ett bibehållet undertryck är de känsliga för punktering vid hantering och montering. Det går inte heller att anpassa panelernas mått på byggarbetsplatsen vilket gör att de måste beställas med rätt mått från fabrik. Det ställer i sin tur höga krav på en noggrann projektering men också på en varsam hantering vid installationen eftersom en skadad panel måste ersättas med en ny. Infästningen av panelerna mot andra material är också en utmaning eftersom det inte är möjligt att spika eller skruva genom panelerna. Det är svårt att fastställa en generell prisnivå på VIP då det varierar beroende på typen av panel (kärnmaterial och barriärfilm) men också på hur stora kvantiteter som beställs. I en rapport av Skanska (2012) uppges ett pris på cirka 900 kr/m^2 och 1300 kr/m^2 för en 20 mm respektive 40 mm tjock VIP med kiseldioxidkärna (2012 års prisnivå).

2.4.2 Fenolskum (PF)

Fenolskum eller Phenolic foam (PF) är en härdplast som framställs genom skumning av fenolharts. Den deklarerade värmekonduktiviteten för PF-skivor är 0,020–0,023 W/mK (Kingspan, 2021a; Unilin, 2019). PF har många likheter med isoleringsmaterialet polyisocyanurat (PIR) som också är en härdplast. Skillnaden är främst att PF har något bättre brandegenskaper och viss ånggenomsläpplighet (Unilin, personlig kommunikation, 5 maj, 2022). PF introducerades under 80-talet på den nordamerikanska marknaden men orsakade då korrosionsproblem i anslutning till ståldetaljer. Detta skedde till följd av sulfonsyra (sulfonic acid) som användes som en katalysator i tillverkningen. PF isoleringen som finns på marknaden idag skall dock inte ha detta problem (Fraunhofer Bau, n.d.; Green Building Advisor, 2018; Kingspan holdings, 2006). Beroende på tillämpning kan PF tillverkas med öppen eller stängd porstruktur. Som byggisolering har den en stor andel (>90%) slutna porer. Värmekonduktiviteten är beroende av porstorleken, andelen slutna celler samt vilket blåsmedel som använts vid tillverkningen. Värmekonduktiviteten ökar dock över tid med storleksordningen 10–20% efter 25 år. Orsaken till detta är att gasen i porerna succesivt ersätts med luft (Kim et al., 2020). Prisnivån för PF är 1800–2000 SEK/m³ beroende på tjocklek (Unilin, personlig kommunikation, 5 maj, 2022).

2.5 Träregeleväggens uppbyggnad

Ytterväggar med träregelestomme är den vanligaste väggkonstruktionen för småhus i Sverige (TräGuiden, 2003). Den exakta utformningen varierar beroende på vilka krav som ställs på konstruktionen vad gäller bärrighet, energihushållning, brand och akustik. Generellt byggs den upp av ett flertal skikt med regler och isolering. I Figur 3 och Figur 4 visas exempel på utformning. Stomskiktet som bär ner vertikala laster är normalt det tjockaste skiktet (145–220 mm). För att bryta köldbryggor och öka energiprestandan monteras ofta ett utvändigt isoleringsskikt, vanligen i form av en fasadskiva samt en vindskyddsduk för att förhindra påtvingade luftströmmar i isoleringen. På stomskiktets insida monteras en åldersbeständig PE-folie med syfte att skapa ett luft- och ångtätt skikt för att förhindra fukttransport genom både konvektion och diffusion. Om varm och fuktig inomhusluft tillåts transporteras in i de kallare delarna av väggen kan det leda till kondens och fuktskador. PE-folien monteras ofta utanför det innersta isoleringsskiktet för att minimera antalet hål i folien samt för att underlätta förläggningen av installationer i det innersta isoleringsskiktet. Väggens utsida avslutas med spikläkt och fasadmateriale där spikläkten förutom att bära själva fasaden även skapar en luftspalt mellan fasadmaterialet och stommens utsida.



Figur 3 Yttervägg med liggande panel (TräGuiden, 2003).

En variant på väggkonstruktion som ibland används i lågenergihus visas i Figur 4 (Paroc, n.d.). Den består av en dubbel regelstomme med ett mellanliggande homogent isoleringsskikt. Det mellanliggande isoleringsskiktet kan varieras i tjocklek beroende på vilket U-värde som eftersträvas, och bidrar också ytterligare till att bryta köldbryggor genom konstruktionen.



Figur 4 Dubbel trästomme med stående panel (Paroc, n.d.).

2.6 Principer för fuktsäkra träregelväggar

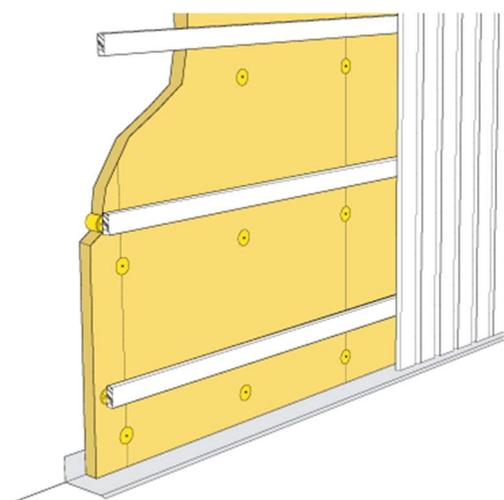
I detta avsnitt görs ett försök att summera några viktiga principer i utformandet av fuktsäkra ytterväggar med träregelstomme. Eftersom träregelväggar med mineralull har använts under en lång tid i Sverige finns det mycket erfarenhet om hur dessa bör utformas för att fungera väl både ur energi och fuktsäkerhetssynpunkt. Att införa nya isoleringsmaterial med andra egenskaper i en sådan beprövad konstruktion kan leda till att värme och fuktbalansen för konstruktionen förändras. VIP och PF har gemensamt att de är mycket diffusionstäta i jämförelse med mineralull, se materialegenskaper i Tabell 3. Detta behöver tas i beaktande då det kan få en stor inverkan på en konstruktions fukttekniska funktion.

2.6.1 Luftspaltens utförande

För konstruktioner som innehåller organiska material är det helt nödvändigt med en luftspalt bakom fasadmaterialet, så kallad tvåstegstätad fasad (Hägerstedt, 2012; Samuelsson et al., 2009). Luftspalten hindrar kapillär sugning av fritt vatten in i stomskiktet, utjämnar vindtrycket mot väggkonstruktionen och ska tillgodose att inträngande vatten kan avledas och dräneras (Petersson, 2013). Luftspalten bör utformas så att en luftväxling på minst 30 oms/h uppnås (Hägerstedt, 2012). I praktiken innebär detta en luftspalt med minst 25 mm tjocklek av vertikala spikläkt som hålls öppen i över- och nederkant. De vertikala spikläkten ger en betydligt högre luftomsättning än horisontella läkt (Falk, 2010). Om horisontella läkt skall användas (vid stående ytterpanel) bör alltså ytterligare ett lager korsande vertikal spikläkt monteras närmast stommen, alternativt någon typ av perforerad horisontell spikläkt.

2.6.2 Fasadskivans betydelse för fuktsäkerheten

Flera studier av bland annat Hägerstedt (2012) och Olsson (2014) visar att användandet av en oorganisk och diffusionsöppen yttre isolering utanpå stomskiktet minskar risken för kritiska fuktillstånd i konstruktionens yttre delar. Denna typ av isolering går under benämningen fasadskiva. Det har visats att användningen av fasadskiva ökar möjligheten för fukt i stomskiktet att torka ut och att tjockleken på fasadskivan bör anpassas i relation till väggens totala värmemotstånd. Fasadskivan monteras med distanshylsor av plast mellan stommen och spikläkten. Det här skapar därför ett i princip homogent isoleringsskikt, se Figur 5. På detta vis kan organiska material undvikas i det yttersta isoleringsskiktet.



Figur 5 Fasadskiva (Isover n.d.).

2.6.3 Ångspärrens placering och betydelsen av att bygga lufttätt

Generellt rekommenderas att ytterväggar byggs upp så att ånggenomsläppligheten för de ingående materialskikten ökar mot väggens utsida (Petersson, 2013). Detta medför att uttorkning av fukt i väggkonstruktionen i huvudsak också sker mot väggens utsida. För träregelväggar är normalt PE-folien det tätaste skiktet och bör alltså placeras nära konstruktionens insida. Det har dock konstaterats att det är gynnsamt att placera PE-folien en bit in i väggkonstruktionen under förutsättning att den inte placeras djupare än 1/3 av det totala värmemotståndet (så kallad indragen ångspärr). Anledningen är framför allt att antalet hål i ångspärren till följd av elinstallationer och infästningar begränsas, vilket bidrar till ökad ång- och lufttätthet. Placeras ångspärren för långt in i konstruktionen finns det risk att den hamnar i ett för kallt klimat vilket kan leda till att vattenånga kondenserar på dess yta (Wahlgren, 2010; Hägerstedt, 2012).

Som nämnts tidigare har fukttransport genom konvektion förmåga att förflytta stora mängder fukt men det finns flera anledningar till att sörja för en god lufttätthet i byggnader. Wahlgren (2010) menar att det är en avgörande faktor för att skapa en energieffektiv byggnad då ett otätt klimatskal leder till oönskade ventilationsförluster. Det är också en komfortfråga eftersom en otät byggnad också leder till kalldrag vid genomföringar till följd av luftläckage vid exempelvis hård vind. För att uppnå god lufttätthet behöver anslutningar mellan byggnadsdelar, genomföringar och skarvar i PE-folien utföras på ett korrekt sätt (Wahlgren, 2010; Arfvidsson et al., 2017).

2.6.4 Köldbryggor

En köldbrygga uppstår när ett material med högre värmekonduktivitet genomskär exempelvis ett isoleringsskikt. Det kan vara en träregel i ett skikt av isolering som skapar en linjär köldbrygga eller en infästning av metall som skapar en punktformig köldbrygga. Köldbryggor kan också uppstå till följd av förändrade tjocklekar på isoleringsskikt eller i hörn där större ytor mot konstruktionens kalla sida uppstår (Petersson, 2013). Eftersom yttemperaturen vid en köldbrygga är lägre än övriga delar av konstruktionen kan det uppstå hög RF och kondens vid köldbryggan. Det beror på att mätnadsånghalten är lägre i området till följd av den lägre temperaturen

(Samuelsson et al., 2009). Effekten av köldbryggor i konstruktioner är i princip oundvikliga men kan minskas genom att eftersträva homogena materialskikt och genomarbetade detaljlösningar för genomföringar, infästningar och anslutningar mellan olika byggnadselement.

2.6.5 Byggfukt och smuts på material

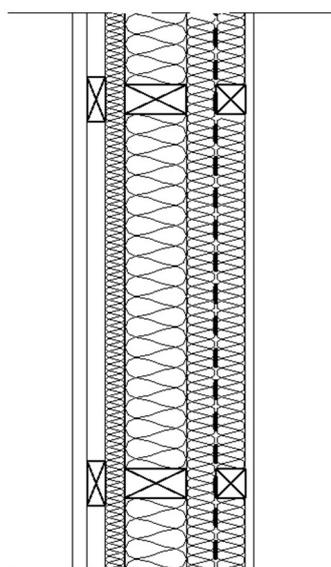
De flesta byggmaterial innehåller fukt. Med byggfukt avses den fukt som behöver torkas ut ur ett material för att det ska befinna sig i jämvikt med RF i sin omgivning (Petersson, 2013). Det är viktigt att tillgodose att byggfukt har möjlighet att torka ut innan det byggs in med täta materialskikt. För ytterväggar med träregelstomme förekommer inga större mängder byggfukt under förutsättning att materialen och byggnaden skyddas från nederbörd under byggtiden (Samuelsson et al., 2009). Byggnadsmaterial ska också skyddas mot nedsmutsning i hanteringen då det har visats att smuts på byggnadsmaterial är en faktor som ökar risken för mögelpåväxt (Johansson et al., 2005).

3 Utformningsförslag

Med utgångspunkt från teorin och principerna som redovisats i kapitel två har fyra förslag på väggkonstruktioner utformats. Gemensamt för alla förslagen är att de högpresterande isoleringsmaterialen har placerats långt in i väggkonstruktionen i nära kontakt med diffusionsspärren. Denna placering bör vara fördelaktig ut fuktsynpunkt dels för att inte frångå principen om att ånggenomsläppligheten ska öka mot konstruktionens utsida, dels för att inte riskera att stänga in byggfukt mellan två täta materialskikt. Själva väggkonstruktionen består av en dubbel regelstomme med ett mellanliggande homogent isoleringsskikt enligt principen som visas i Figur 4. Det inre regelverket skapar ett utrymme för installationer samtidigt som PE-folien skyddas genom att den placeras en bit in i väggen. För förslagen med VIP i konstruktionerna är förhoppningen att många av utmaningarna med infästning av panelerna är löst genom att panelerna helt enkelt staplas på varandra i det mellanliggande skiktet. Det kan dock vara nödvändigt att utreda mer i detalj att panelerna inte tar skada av ett sådant montage. Det kan också vara fördelaktigt för panelernas livslängd att de placeras långt in i konstruktionen i ett jämnare klimat med mindre temperaturskiftningar. Detta har dock inte bekräftats i litteraturstudien. Den dubbla regelstommen medför dessutom ytterligare ett homogent isoleringsskikt i konstruktionen som bidrar till att minska effekten av köldbryggor. Det leder också till ett maximalt utnyttjande av de högpresterande isoleringsmaterialens värmemotstånd.

3.1 Referensvägg

Referensväggen är uppbyggd av en dubbelstomme (95 mm stomskikt och 45 mm installationsskikt) med ett mellanliggande isoleringsskikt med 45 mm mineralull. Väggens totala tjocklek är 278 mm och U-värdet är $0,168 W/m^2K$, se Figur 6 för detaljerad beskrivning. För att uppnå ett U-värde som är lägre än det rekommenderade $U_{vägg}$ på $0,18 W/m^2K$ räcker det med 32 mm mineralull i det mellanliggande skiktet men eftersom det är en tjocklek som inte saluförs valdes det att gå upp till närmaste tjocklek som är 45 mm.



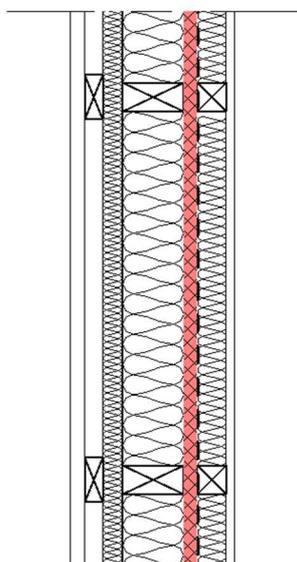
Beskrivning:

Liggande ytterpanel	22 mm
Luftspalt / Spikläkt	28 mm
Fasadskiva	30 mm
Vindskydd	0,2 mm
Mineralull / Träregel	95 mm
Mineralull	45 mm
Plastfolie	0,2 mm
Mineralull / Träregel	45 mm
Gips	13 mm
Tjocklek	278 mm
U-värde	$0,168 W/m^2K$

Figur 6 Horisontalsnitt och beskrivning för referensväggen.

3.2 Vägghkonstruktion 1

I vägghkonstruktion 1 placeras en 20 mm VIP i det mellanliggande isoleringsskiktet (markerad med rött), se Figur 7 för detaljerad beskrivning



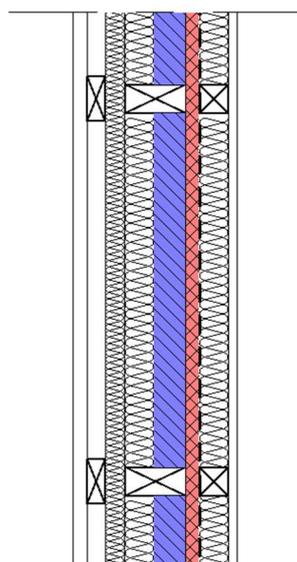
Beskrivning:

Liggande ytterpanel	22 mm
Luftspalt / Spikläkt	28 mm
Fasadskiva	30 mm
Vindskydd	0,2 mm
Mineralull / Träregel	95 mm
VIP	20 mm
PE-folie	0,2 mm
Mineralull / Träregel	45 mm
Gips	13 mm
Tjocklek	253 mm

Figur 7 Horisontalsnitt och beskrivning för vägghkonstruktion 1.

3.3 Vägghkonstruktion 2

I vägghkonstruktion 2 placeras en 20 mm VIP i det mellanliggande isoleringsskiktet (markerad med rött) och en 50 mm PF i den inre delen av stommskiktet (markerad med blå). Se Figur 8 för detaljerad beskrivning.



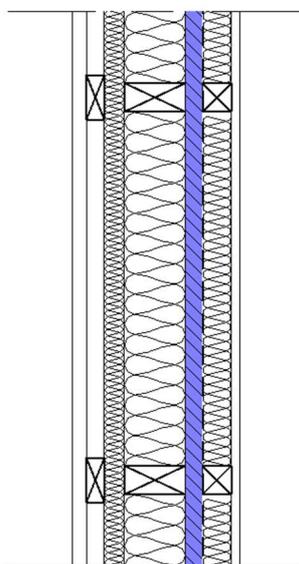
Beskrivning:

Liggande ytterpanel	22 mm
Luftspalt / Spikläkt	28 mm
Fasadskiva	30 mm
Vindskydd	0,2 mm
Mineralull / Träregel	45 mm
PF / Träregel	50 mm
VIP	20 mm
Plastfolie	0,2 mm
Mineralull / Träregel	45 mm
Gips	13 mm
Tjocklek	253 mm

Figur 8 Horisontalsnitt och beskrivning för vägghkonstruktion 2.

3.4 Vägghkonstruktion 3

I väggkonstruktion 3 placeras en 25 mm PF i det mellanliggande isoleringsskiktet (markerad med blå). Se Figur 9 för detaljerad beskrivning



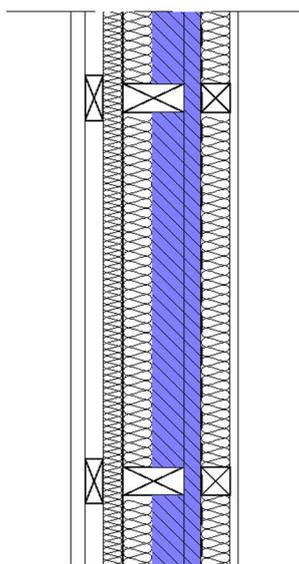
Beskrivning:

Liggande ytterpanel	22 mm
Luftspalt / Spikläkt	28 mm
Fasadskiva	30 mm
Vindskydd	0,2 mm
Mineralull / Träregel	95 mm
PF	25 mm
Plastfolie	0,2 mm
Mineralull / Träregel	45 mm
Gips	13 mm
Tjocklek	258 mm

Figur 9 Horisontalsnitt och beskrivning för väggkonstruktion 3.

3.5 Vägghkonstruktion 4

I väggkonstruktion 4 placeras en 25 mm PF i det mellanliggande isoleringsskiktet (markerad med blå) och en 50 mm PF i den inre delen av stommskiktet (markerad med blå). Se Figur 10 för detaljerad beskrivning



Beskrivning:

Liggande ytterpanel	22 mm
Luftspalt / Spikläkt	28 mm
Fasadskiva MU	30 mm
Vindskydd	0,2 mm
MU / Träregel	45 mm
PF / Träregel	50 mm
PF	25 mm
Plastfolie	0,2 mm
Mineralull / Träregel	45 mm
Gips	13 mm
Tjocklek	258 mm

Figur 10 Horisontalsnitt och beskrivning för väggkonstruktion 4.

4 Beräkningar

I detta avsnitt beskrivs hur beräkningar för konstruktionsförslagets U-värden, fukt-tillstånd och materialkostnader utförts.

4.1 Beräkningar av U-värden

Väggkonstruktionernas totala värmemotstånd har beräknats enligt λ -värdesmetoden och U-värdesmetoden. Metoderna skiljer sig åt beräkningsmässigt i hur de hanterar inhomogena materialskikt. λ -värdesmetoden representerar det lägre gränsvärdet och U-värdesmetoden det högre gränsvärdet för det totala värmemotståndet.

I λ -värdesmetoden beräknas en sammanvägd värmekonduktivitet för inhomogena skikt genom att vikta de ingående materialens värmekonduktiviteter mot dess ytandelar vinkelrätt mot värmeflödet. I U-värdesmetoden delas i stället hela konstruktionen in i delar så att varje del endast består av homogena skikt. För varje del summeras värmemotstånden för de ingående skikten. Värmemotståndet för respektive del viktas sedan mot dess ytandelar. Det resulterande U-värdet beräknas som ett medelvärde av respektive beräkningsmetods värmemotstånd, enligt ekvation (5) och (6) (Pettersson, 2013).

$$R_T = \frac{R_T^\lambda + R_T^U}{2} \quad [m^2 K/W] \quad (5)$$

$$U = R_T^{-1} \quad [W/m^2 K] \quad (6)$$

För sammansatta materialskikt bestående av träregel och isoleringsmaterial har materialandelen träregel satts till 12 % för centrumavståndet 600 mm dvs något högre än 45/600 (7,5%) för att kompensera för extra reglar vid syll, hammarband samt fönster och dörrar. Inre och yttre övergångsmotstånd samt värmekonduktivitet för de ingående material redovisas i Tabell 4.

Tabell 4 Värmekonduktivitet och värmemotstånd för U-värdesberäkningar (Pettersson, 2013; Kingspan, 2021a; Kingspan, 2021b; Unilin, 2019).

Material	Värmekonduktivitet λ (W/mK)
Gipsskiva	0,250
Träregel	0,140
Mineralull regelisolering	0,035
Mineralull fasadskiva	0,032
PF-isolering (tjocklek <45 mm)	0,021
PF-isolering (tjocklek >45 mm)	0,020
VIP-isolering	0,007
Resistanser	Värmemotstånd R ($m^2 K/W$)
R _{si} (inre övergångsmotstånd)	0,13
R _{se} (yttre övergångsmotstånd)	0,04
Ventilerad luftspalt och fasadskikt av trä	0,20

4.2 Beräkningar av fukttillstånd

Beräkningar för utvärdering av konstruktionsförslagets fukttillstånd har utförts med programvaran WUFI Pro (version 6.5). WUFI Pro är ett endimensionellt beräkningsprogram för utvärdering av fukttillstånd vilket innebär att programvaran endast kan hantera homogena materialskikt. Därför har sammansatta skikt som innehåller träreglar modellerats som homogena isoleringsskikt utan träreglar. Materialegenskaper har hämtats från den inbyggda materialdatabasen i WUFI Pro och kommer från Fraunhofer-IBP:s egen databas. I några fall har ingående materialegenskaper justerats för att bättre motsvara de som legat till grund för beräkningarna av U-värden. Materialegenskaper samt eventuella ändringar för samtliga ingående materialskikt redovisas i Tabell 5.

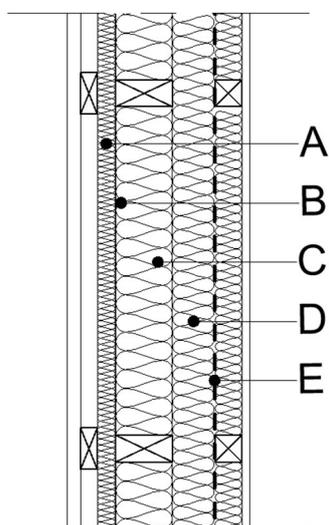
Tabell 5 *Materialegenskaper för fuktberäkningar.*

Material	Benämning i WUFI	Skrymdensitet [kg/m ³]	Porositet [-]	Spec. värmekap. [J/kgK]	Värmekonduktivitet [W/mK]	Diffusionsmotstånd μ [-]
Ytterpanel	Spruce, radial	455	0,73	1400	0,09	1000 (130)
Luftspalt	Air layer 25 mm, without additional moisture capacity	1,3	0,999	1000	0,155	0,51
Fasadskiva	ISOVER PB F 030	38	0,984	850	0,032 (0,030)	1,3
Vindskyddsduk	Weather resistive barrier (sd=0,2m)	130	0,001	2300	2,3	200
Mineralull	ISOVER GW Integra ZSF	30	0,95	840	0,035 (0,032)	1
Fenolskum	PF (heat cond 0,04 W/mK)	43	0,95	1500	0,020 (0,040)	30
VIP	VIP generic (0,007 W/m ² K)	200	0,001	800	0,007	1 500 000
PE-folie	Vapour retarder (sd=50m)	130	0,001	2300	2,3	50 000
Gipsskiva	Gypsum board	850	0,65	850	0,2	8,3
Ursprungligt värde inom parentes						

Luftspalten bakom ytterpanelen har antagits ha en konstant luftomsättning på 30 oms/h. För att beakta inverkan av slagregn har en fuktkälla motsvarande 1% av regnlasten placerats på utsidan av det yttersta isoleringsskiktet (fasadskivan).

Klimatdata från databasen i WUFI Pro för Göteborg har använts i beräkningarna och avser ett normalår. Inomhusklimatet påverkas av det valda utomhusklimatet enligt ISO 13788 med en medeltemperatur på 20 °C. Fuktlast inomhus har satts till *Fuktighetsklass 2* vilket motsvarar ett fukttillskott på 4 g/m³ för utomhustemperaturer under 0 °C. Fukttillskottet minskar sedan linjärt till 1 g/m³ för utomhustemperaturer över 20 °C. Beräkningarna har utförts för väderstrecken norr och söder under en period på fem år med start första januari. Resultaten presenteras i diagram som avser det femte året. Se bilaga 1 för en redovisning av övriga inställningar i WUFI Pro.

De beräknade fukttillstånden redovisas i fem monitorpositioner i respektive konstruktion, se Figur 11. Hägerstedt (2012) har visat att fasadskivan (position A) samt utsidan av träreglarna i stomskiktet (position B) ofta är kritiska positioner för fuktpåverkan till följd av höga RF. Position C är placerad längre in i stomskiktet och position D mitt i det mellersta isoleringskiktet. Position E har valts för att påvisa eventuell kondens mot PE-folien.



Figur 11 Monitorpositioner

4.3 Beräkningar av materialkostnad

En materialkostnad har beräknats för respektive väggkonstruktion. VIP föranleder troligen högre kostnader även i leverans och monteringskedet. Inga påslag har dock gjorts för att uppväga detta. Materialkostnaden redovisas som en kostnad per kvadratmeter väggarea samt som en totalsumma för en uppskattad väggarea om 69 m² för en Attefallsbyggnad om 4x7,5 m² och en genomsnittlig vägghöjd på 3 m. Kostnadsberäkningarna har utförts i Excel och materialpriser har inhämtats från prislistor i kalkylprogrammet Bidcon. För VIP och PF har det saknats prisuppgifter i Bidcon. Därför har prisuppgifter från andra källor använts för dessa material, se Tabell 6.

Tabell 6 Materialpriser för VIP och PF (Skanska 2012), (Kingspan, personlig kommunikation, 4 mars, 2022).

Produkt	Tjocklek	SEK/m ²
VIP	20 mm	1050 ¹
PF	25 mm	98
PF	50 mm	155

¹ Uppräknad materialkostnad från 2012 års prisnivå (konsumentprisindex).

5 Resultat

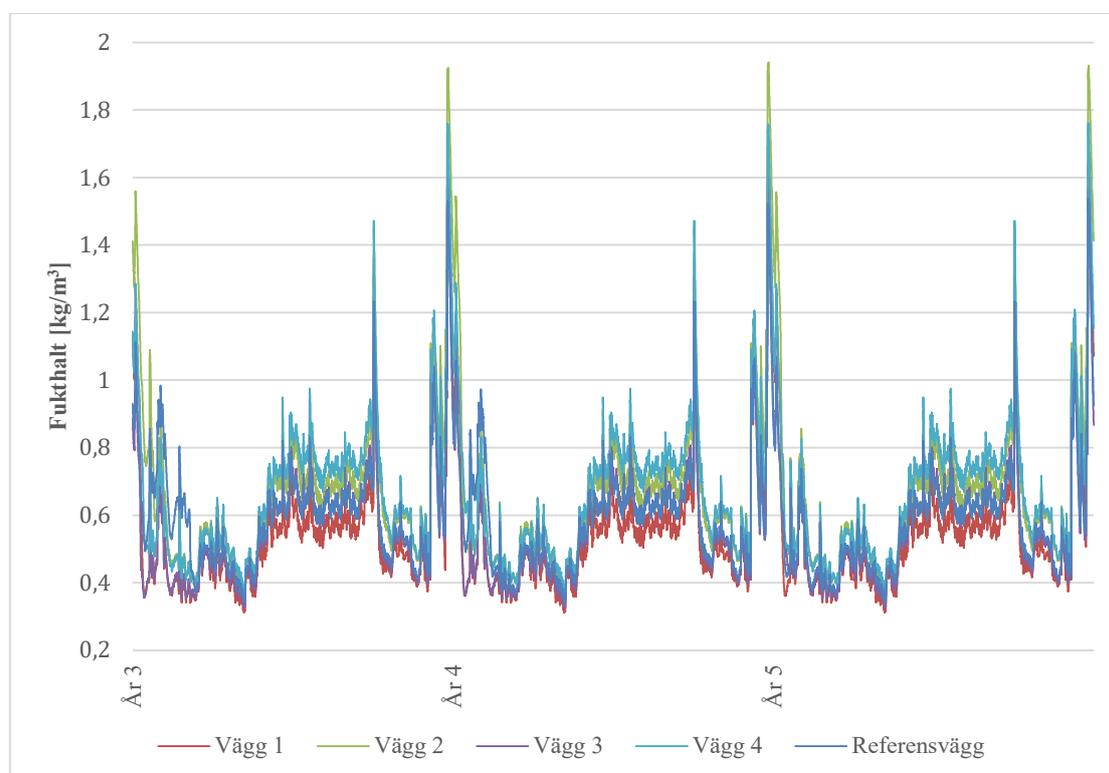
I detta kapitel redovisas resultatet från beräkningarna av väggkonstruktionernas U-värde, materialkostnad och fuktillstånd.

Fuktberäkningar utfördes för både norr- och söderfasad men resultat redovisas endast för söderfasad då det medförde det värsta scenariot. Resultat för monitorposition A och B redovisas mer detaljerat under avsnittet för respektive konstruktion då dessa i högre grad uppvisade höga RF. I Tabell 7 redovisas en sammanställning av antalet timmar/beräkningssteg då kritiskt fuktillstånd överskreds för respektive monitorposition.

Tabell 7 Sammanställning av antal timmar då kritiskt fuktillstånd överskrids för respektive monitorposition under beräkningsår 5.

	Position A	Position B	Position C	Position D	Position E
Vägg 1	1048	627	79	0	0
Vägg 2	1046	487	0	0	0
Vägg 3	974	463	0	0	0
Vägg 4	950	423	0	0	0
Referensvägg	876	514	0	0	0

I Figur 12 redovisas hur det totala vatteninnehållet uttryckt som fukthalt varierar över beräkningsår 3–5.



Figur 12 Totalt vatteninnehåll för samtliga konstruktioner under beräkningsår 3–5.

I Tabell 8 redovisas en sammanställning av kostnadsökning och intjänad boarea.

Tabell 8 Beräknad ökning av materialkostnader och intjänad area för väggkonstruktionerna.

	U-värde [W/m ² K]	Kostnadsökning [SEK/m ²]	Total kostnadsökning ¹ [SEK]	Intjänad boarea ² [m ²]	Kostnadsökning per intjänad boarea [SEK/m ²]
Vägg 1	0,133	973	67 137	1,66	40 444
Vägg 2	0,122	1092	75 348	2,14	35 209
Vägg 3	0,171	64	4416	0,35	12 617
Vägg 4	0,154	166	11 454	0,83	13 800
¹ Beräknat för en Attefallsbyggnad om 4,0 x 7,5 m ² med genomsnittlig vägghöjd på 3,0 m, vilket ger 69 m ² ytterväggsyta utan avdrag för fönster och dörrar. ² Avser vägg med samma U-värde med motsvarande mängd mineralullsisolering för en Attefallsbyggnad om 4,0 x 7,5 m ² .					

5.1 Vägghkonstruktion 1 (VIP 20 mm)

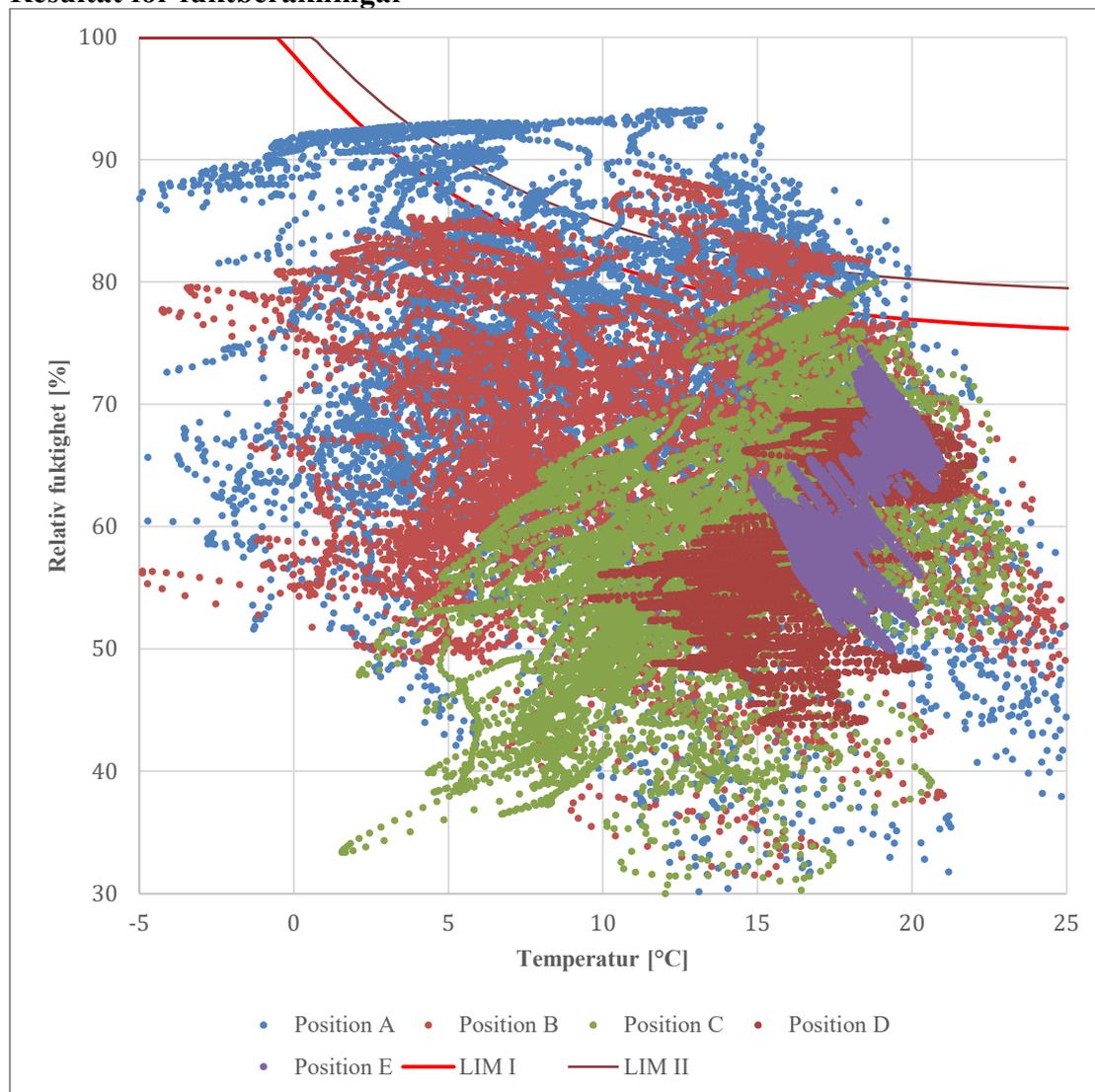
Resultat för beräkning av U-värde och materialkostnad

Tabell 9 Beräkningsresultat för vägghkonstruktion 1.

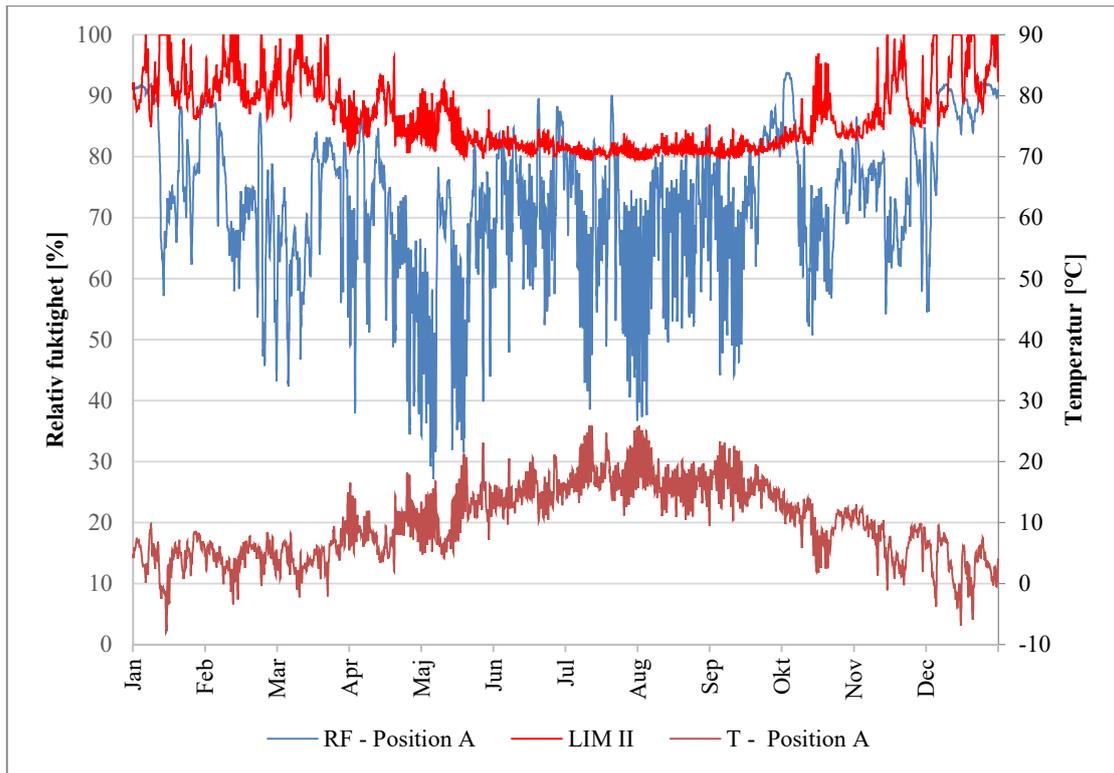
		Vägghkonstruktion 1	Referensvägg ²	Skillnad
U-värde	[W/m ² K]	0,133	0,133	0
Tjocklek	[mm]	253	333	-80
Area ¹	[mm]	5,56	7,22	-1,66
Materialkostnad	[SEK/m ²]	1632	659	+973

¹ Avser av ytterväggarna upptagande area för en Attefallsbyggnad om 4,0 x 7,5 m²
² Avser vägg med samma U-värde med motsvarande mängd mineralullsisolering.

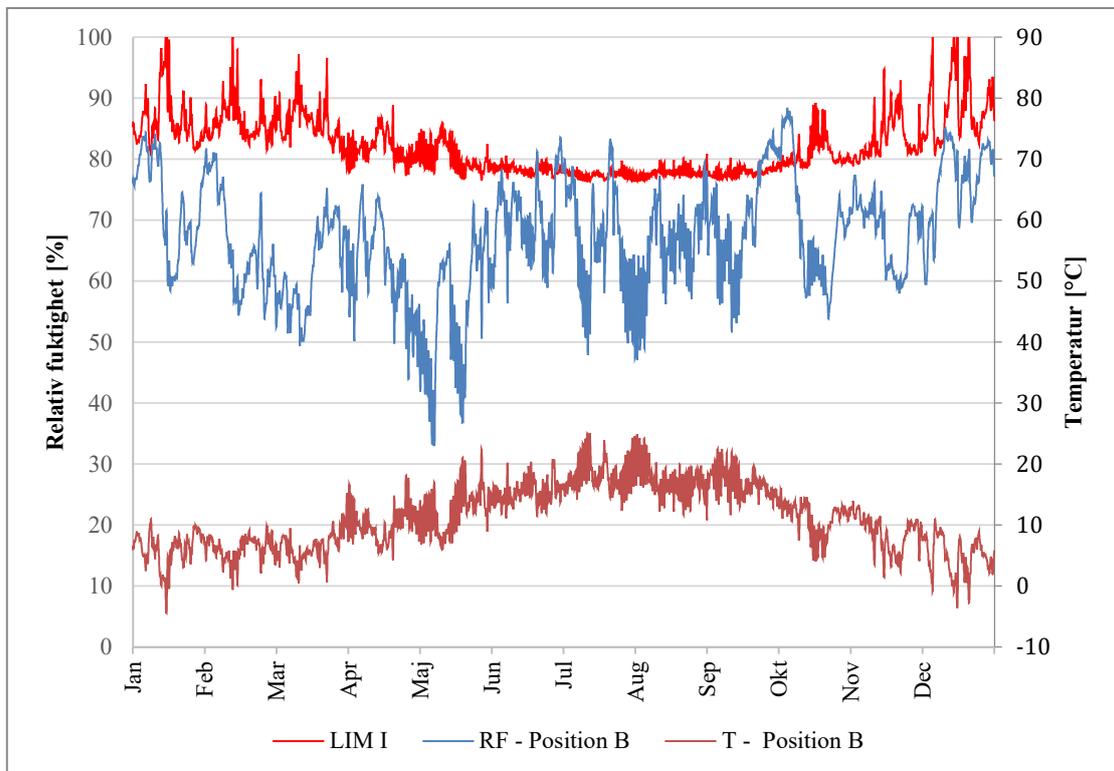
Resultat för fuktberäkningar



Figur 13 Beräknad temperatur och RF i position A, B, C, D och E, vägghkonstruktion 1, fasad mot söder.



Figur 14 Beräknad temperatur och RF i Position A, väggkonstruktion 1, fasad mot söder.



Figur 15 Beräknad temperatur och RF i Position B, väggkonstruktion 1, fasad mot söder.

5.2 Vägghkonstruktion 2 (VIP 20 mm och PF 50 mm)

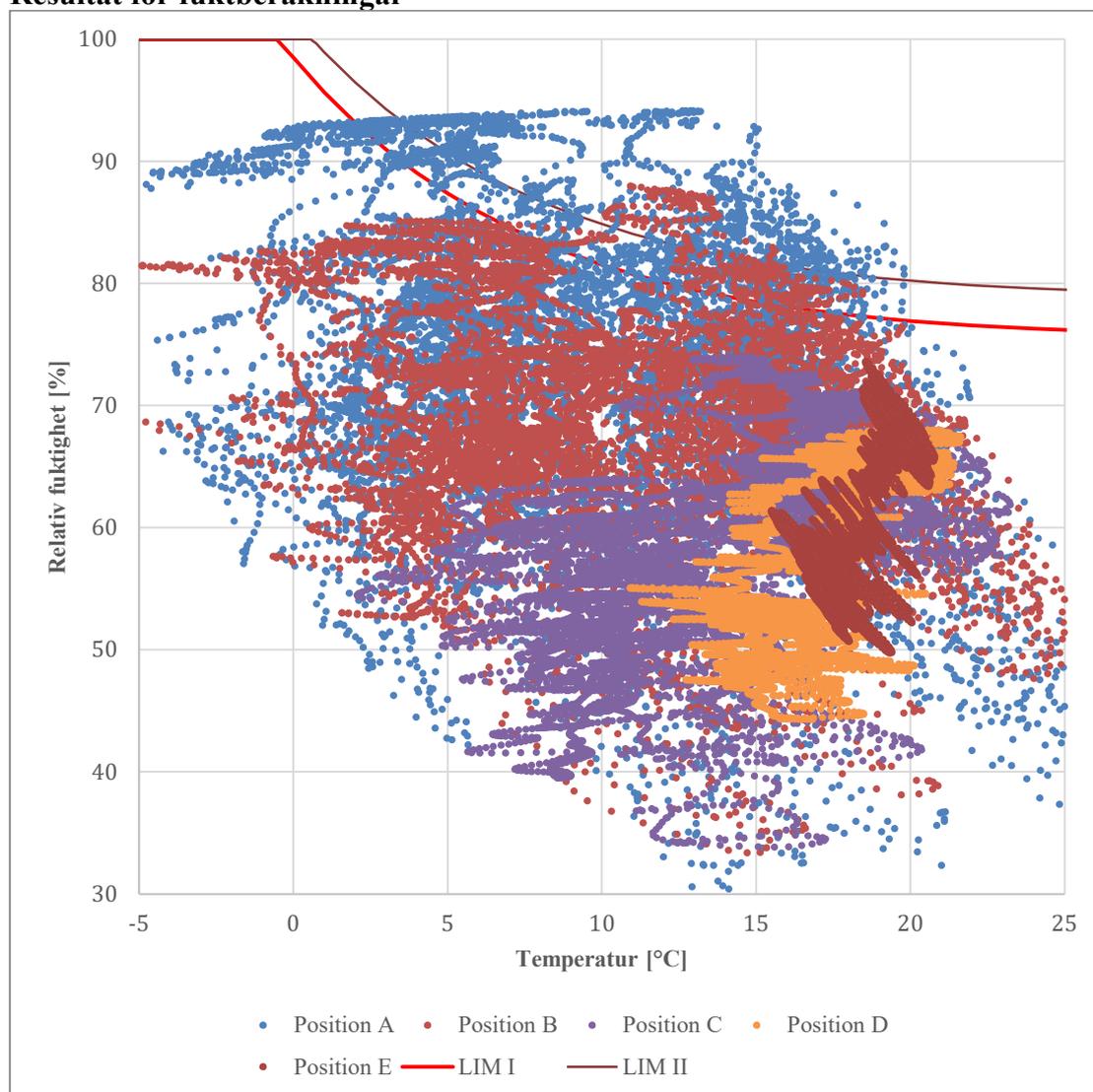
Resultat för beräkning av U-värde och materialkostnad

Tabell 10 Beräkningsresultat för vägghkonstruktion 2.

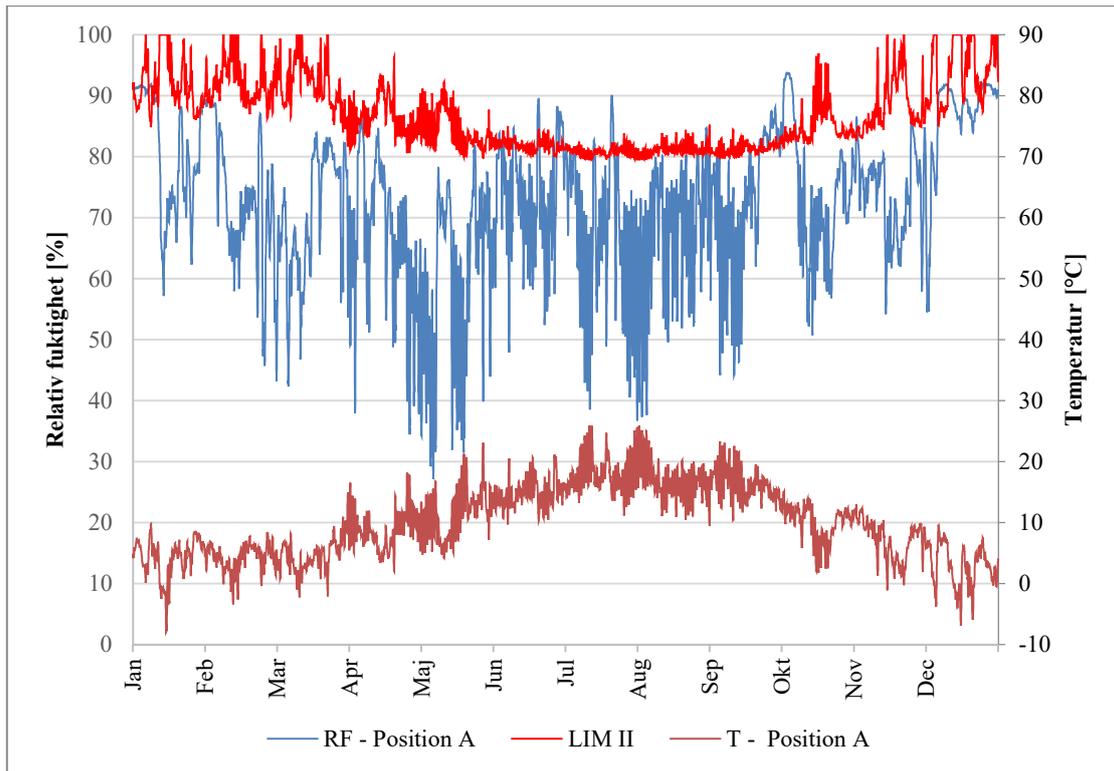
		Vägghkonstruktion 2	Referensvägg ²	Skillnad
U-värde	[W/m ² K]	0,122	0,122	0
Tjocklek	[mm]	253	357	-104
Area ¹	[mm]	5,56	7,70	-2,14
Materialkostnad	[SEK/m ²]	1744	652	+1092

¹ Avser av ytterväggarna upptagande area för en Attefallsbyggnad om 4,0 x 7,5 m²
² Avser vägg med samma U-värde med motsvarande mängd mineralullsisolering.

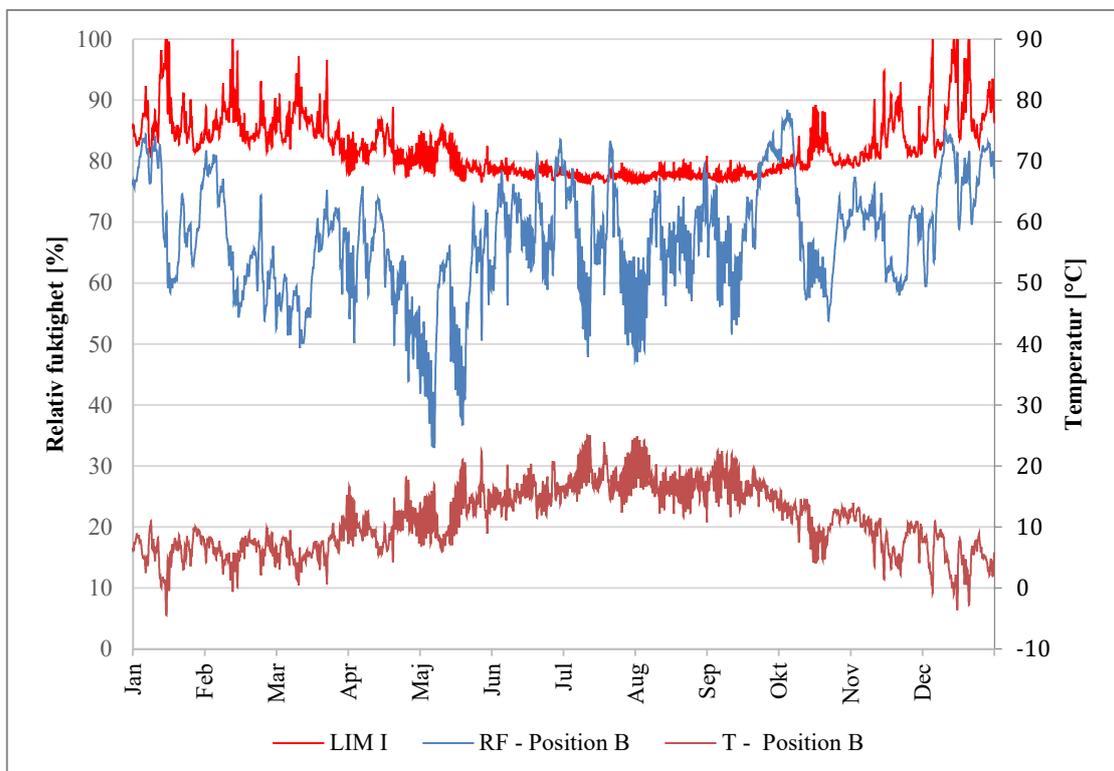
Resultat för fuktberäkningar



Figur 16 Beräknad temperatur och RF i position A, B, C, D och E, vägghkonstruktion 2, fasad mot söder.



Figur 17 Beräknad temperatur och RF i position A, väggkonstruktion 2, fasad mot söder.



Figur 18 Beräknad temperatur och RF i position B, väggkonstruktion 2, fasad mot söder.

5.3 Vägghkonstruktion 3 (PF 25 mm)

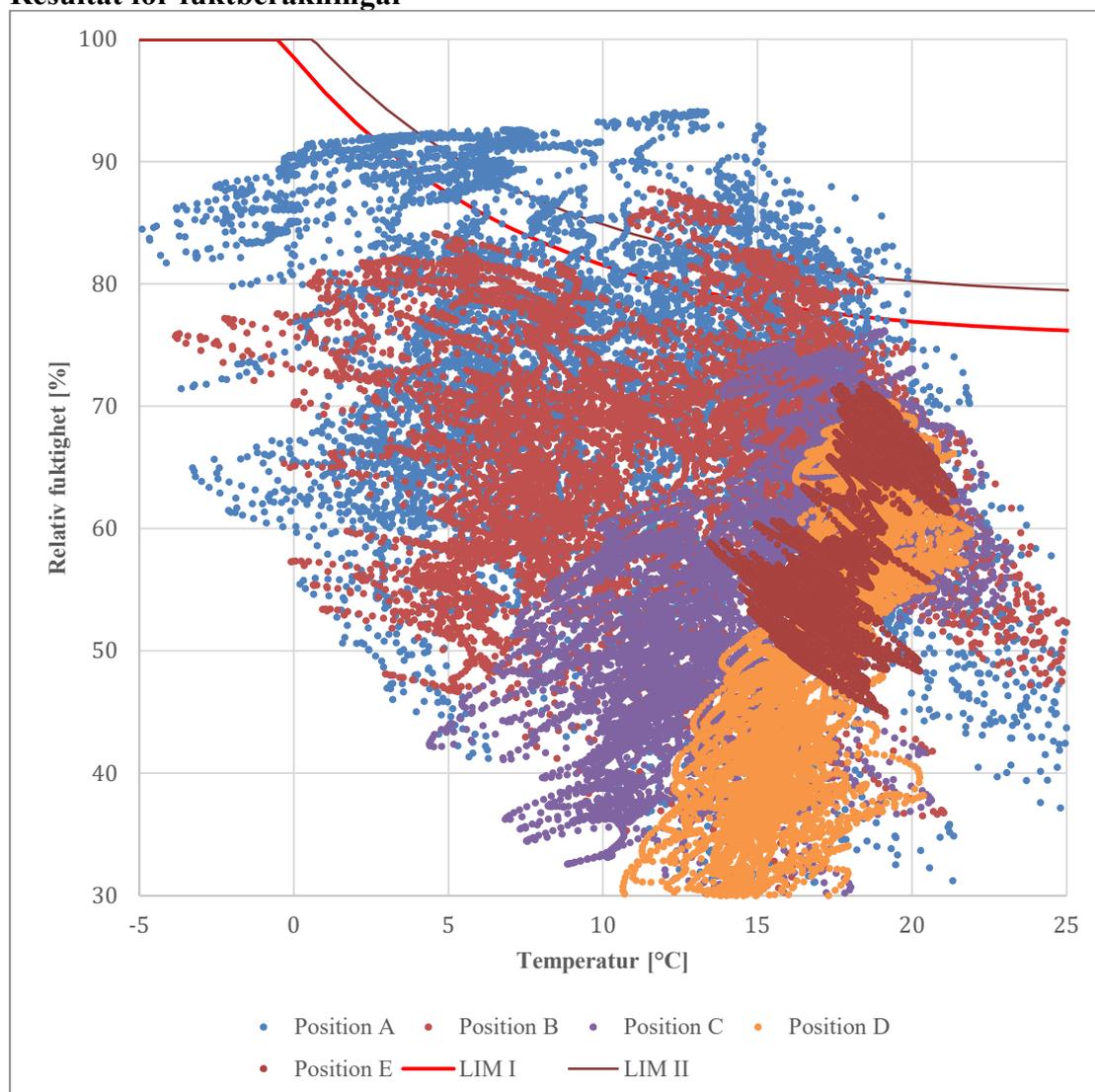
Resultat för beräkning av U-värde och materialkostnad

Tabell 11 Beräkningsresultat för vägghkonstruktion 3.

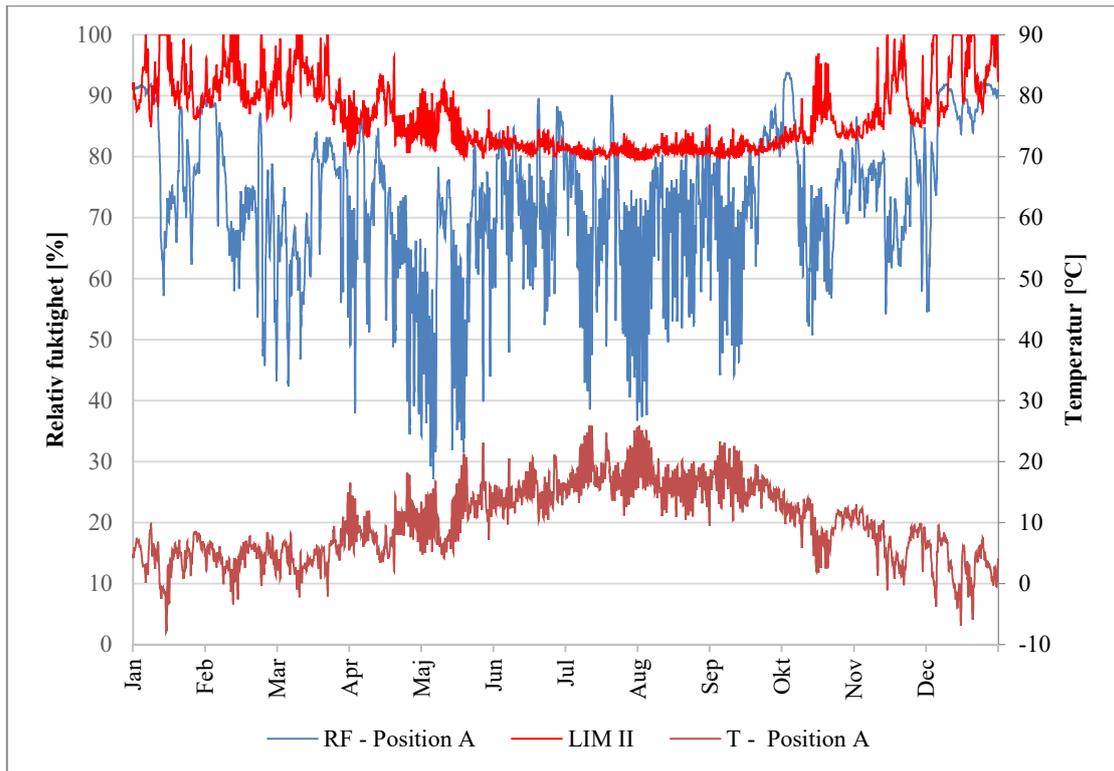
		Vägghkonstruktion 3	Referensvägg ²	Skillnad
U-värde	[W/m ² K]	0,171	0,171	0
Tjocklek	[mm]	258	275	-17
Area ¹	[mm]	5,67	6,02	-0,35
Materialkostnad	[SEK/m ²]	680	616	+64

¹ Avser av ytterväggarna upptagande area för en Attefallsbyggnad om 4,0 x 7,5 m²
² Avser vägg med samma U-värde med motsvarande mängd mineralullsisolering.

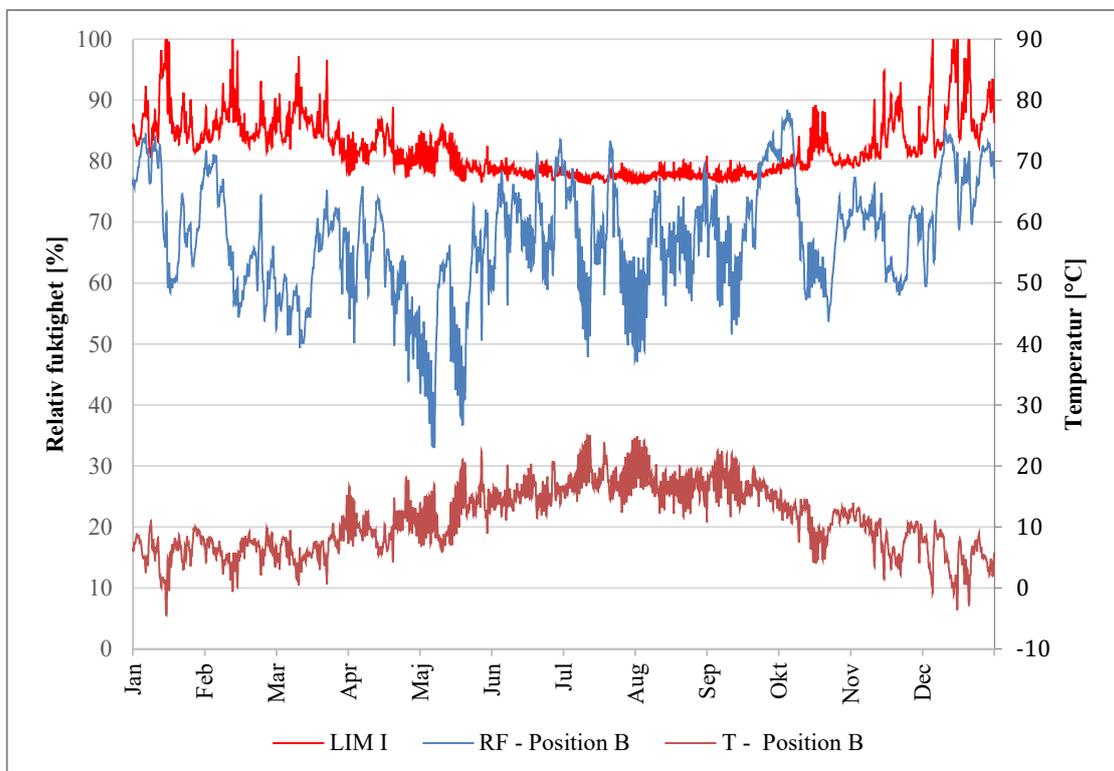
Resultat för fuktberäkningar



Figur 19 Beräknad temperatur och RF i position A, B, C, D och E, vägghkonstruktion 3, fasad mot söder.



Figur 20 Beräknad temperatur och RF i position A, väggkonstruktion 3, fasad mot söder.



Figur 21 Beräknad temperatur och RF i position B, väggkonstruktion 3, fasad mot söder.

5.4 Vägghkonstruktion 4 (PF 25 mm och PF 50 mm)

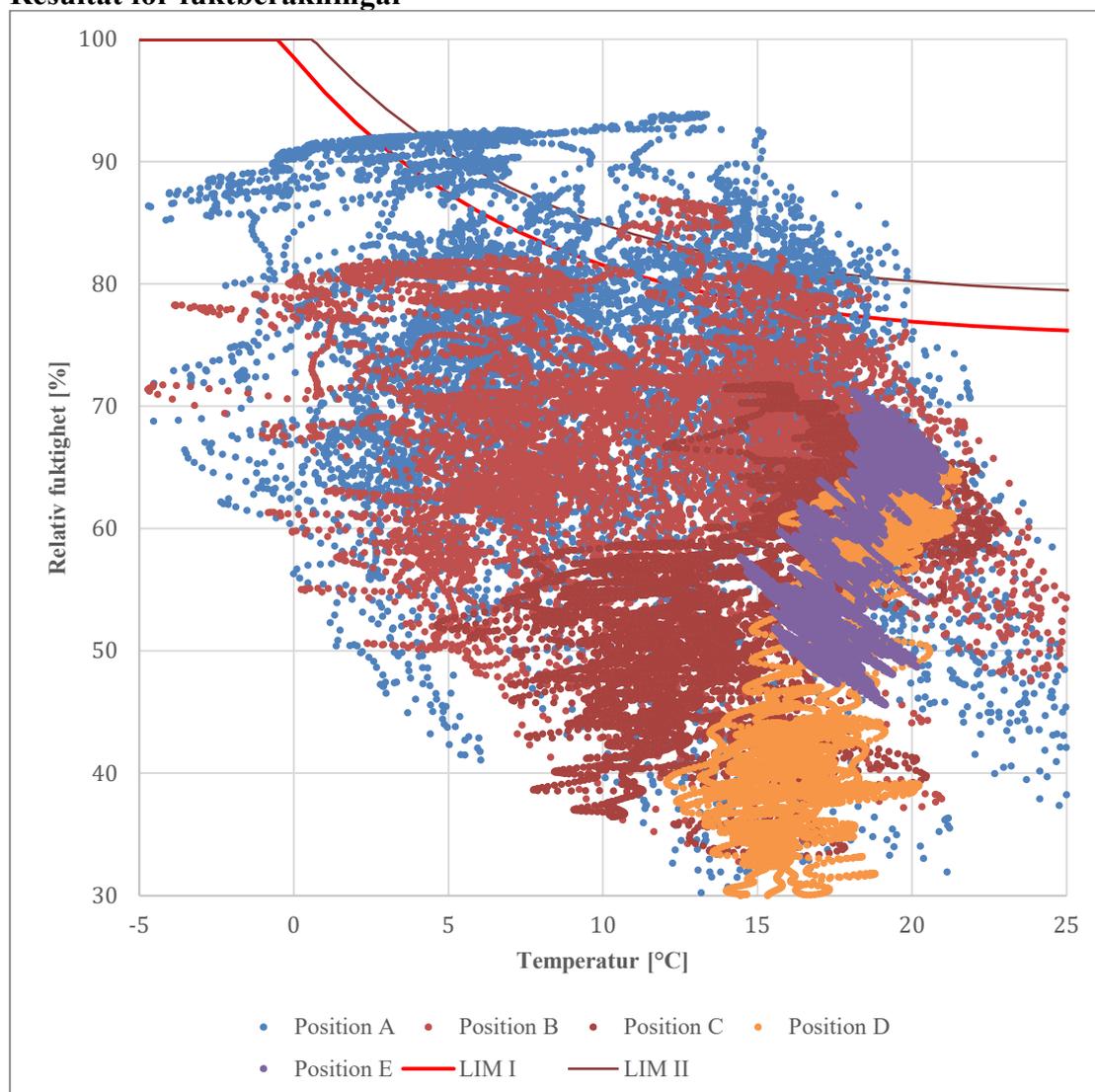
Resultat för beräkning av U-värde och materialkostnad

Tabell 12 Beräkningsresultat för vägghkonstruktion 4.

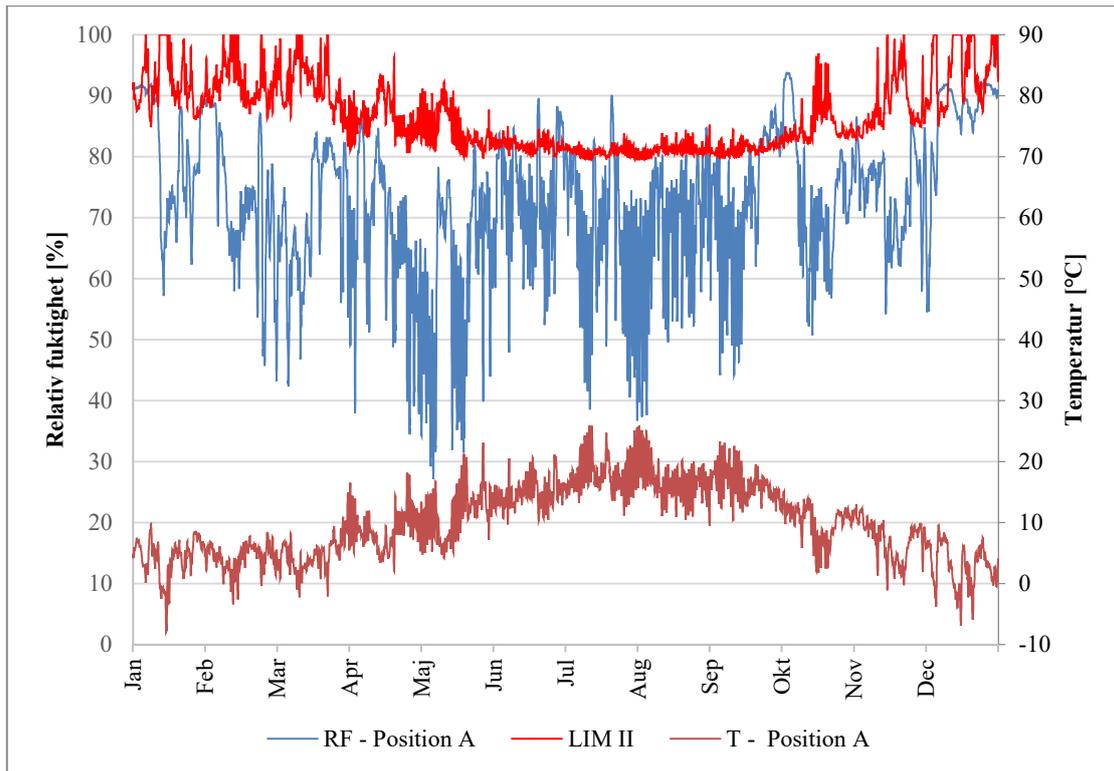
		Vägghkonstruktion 4	Referensvägg ²	Skillnad
U-värde	[W/m ² K]	0,154	0,154	0
Tjocklek	[mm]	258	298	-40
Area ¹	[mm]	5,67	6,50	-0,83
Materialkostnad	[SEK/m ²]	792	626	+166

¹ Avser av ytterväggarna upptagande area för en Attefallsbyggnad om 4,0 x 7,5 m²
² Avser vägg med samma U-värde med motsvarande mängd mineralullsisolering.

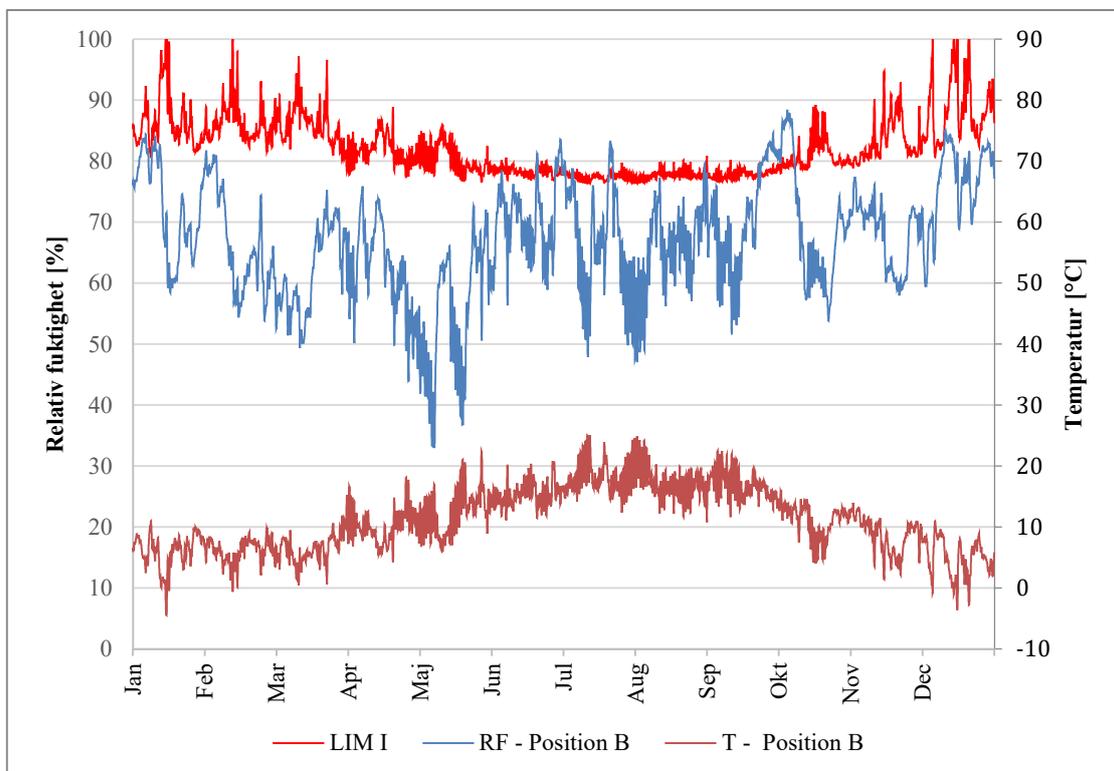
Resultat för fuktberäkningar



Figur 22 Beräknad temperatur och RF i position A, B, C, D och E, vägghkonstruktion 4, fasad mot söder.



Figur 23 Beräknad temperatur och RF i position A, väggkonstruktion 4, fasad mot söder.



Figur 24 Beräknad temperatur och RF i position B, väggkonstruktion 4, fasad mot söder.

5.5 Referensväggen

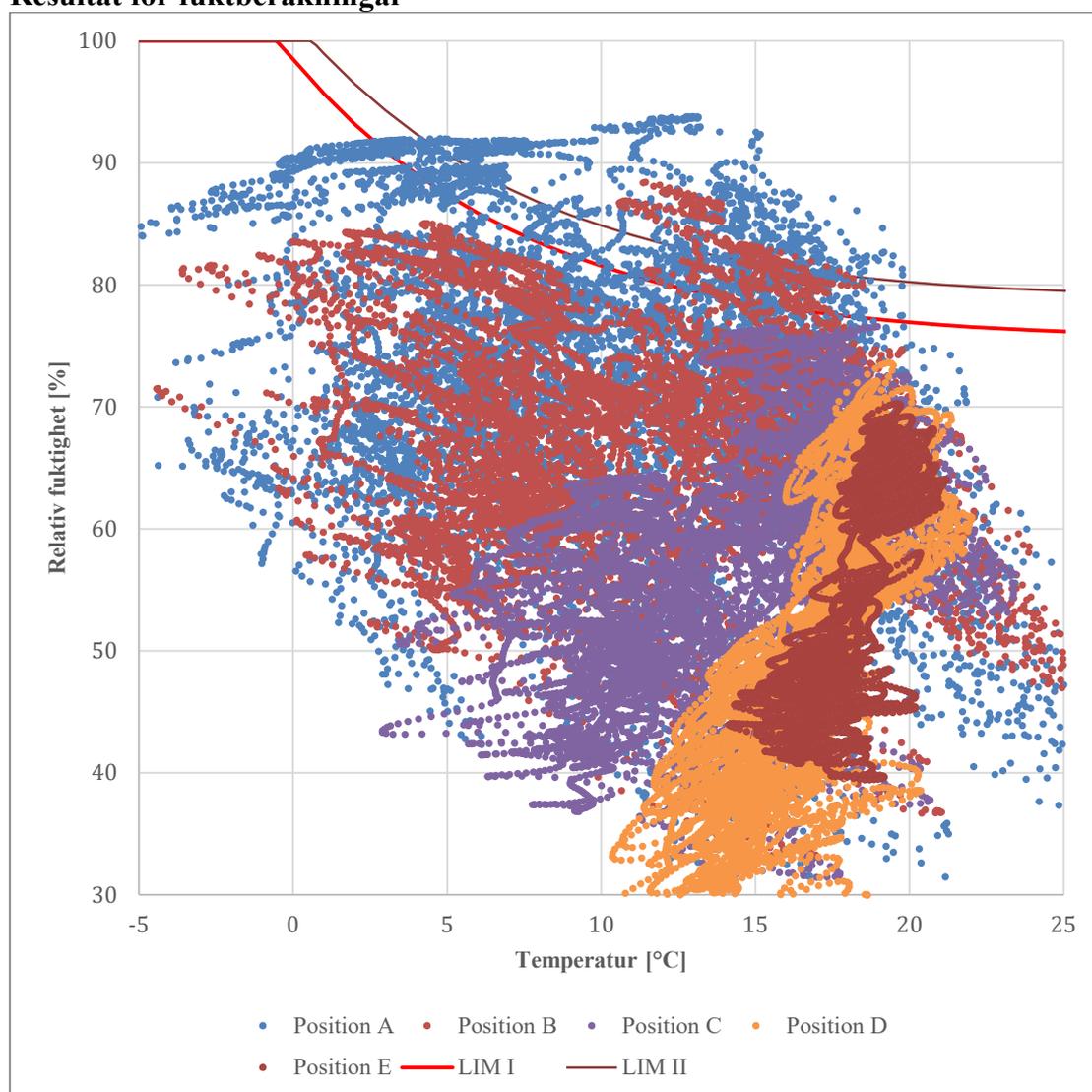
Resultat för beräkning av U-värde och materialkostnad

Tabell 13 Beräkningsresultat för referensväggen.

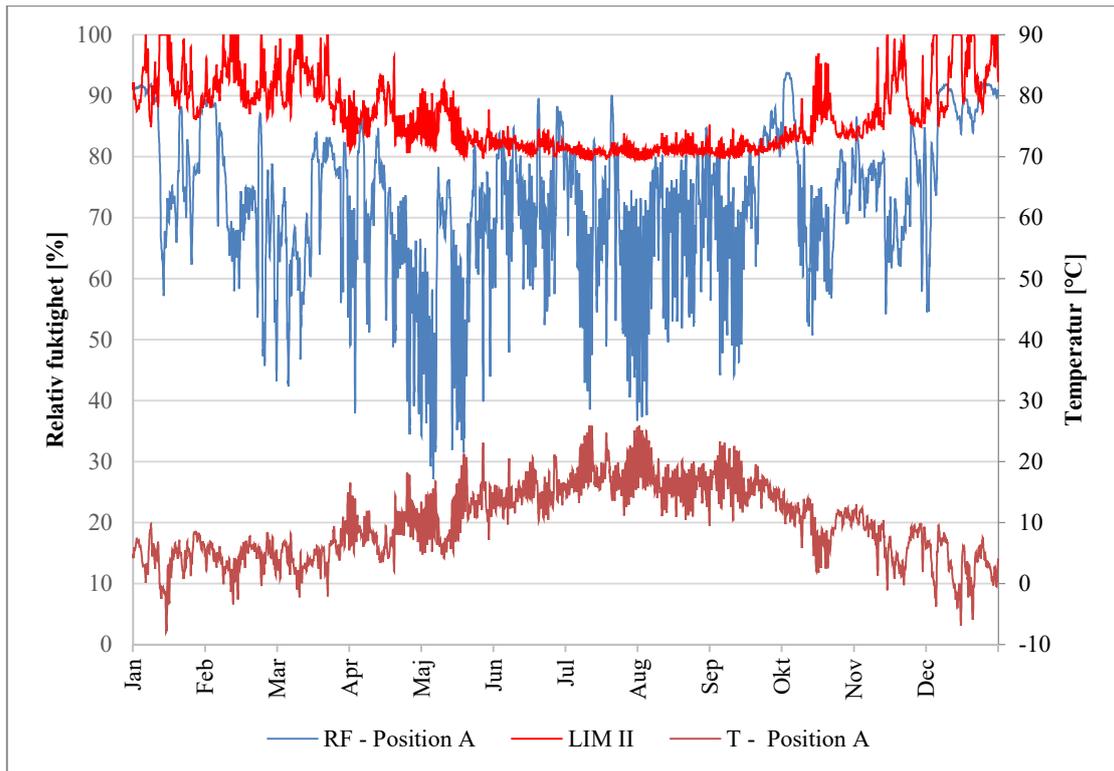
Referensväggen		
U-värde	[W/m^2K]	0,168
Tjocklek	[mm]	278
Area ¹	[mm]	6,08
Materialkostnad	[SEK/m^2]	629

¹ Avser av ytterväggarna upptagande area för en Attefallsbyggnad om 4,0 x 7,5 m²

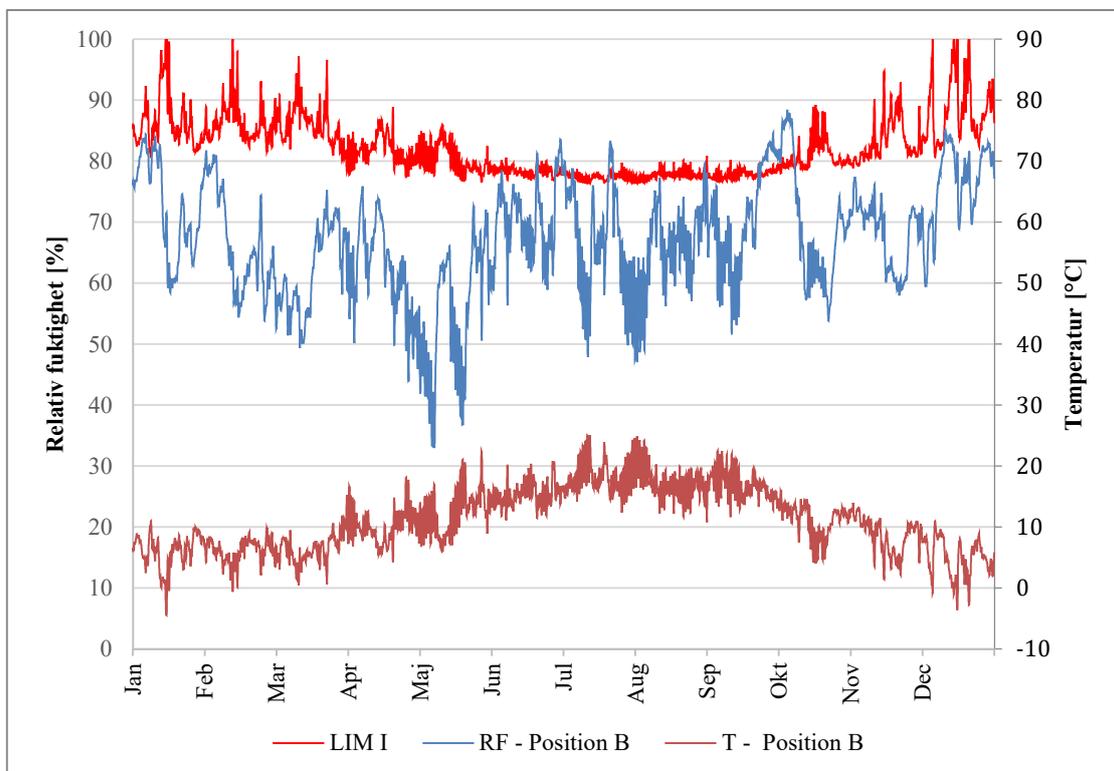
Resultat för fuktberäkningar



Figur 25 Beräknad temperatur och RF i position A, B, C, D och E, referensväggen, fasad mot söder.



Figur 26 Beräknad temperatur och RF i position A, referensväggen, fasad mot söder.

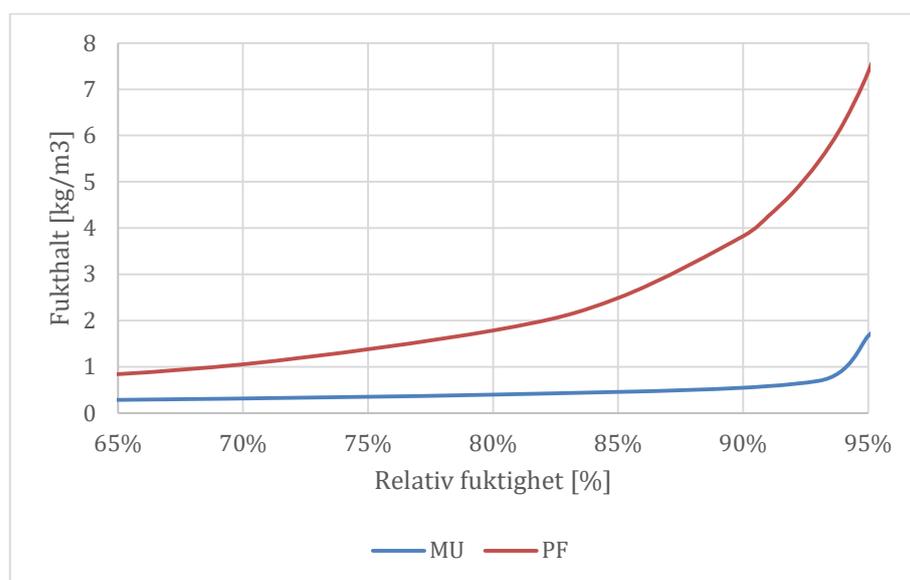


Figur 27 Beräknad temperatur och RF i position B, referensväggen, fasad mot söder.

6 Diskussion

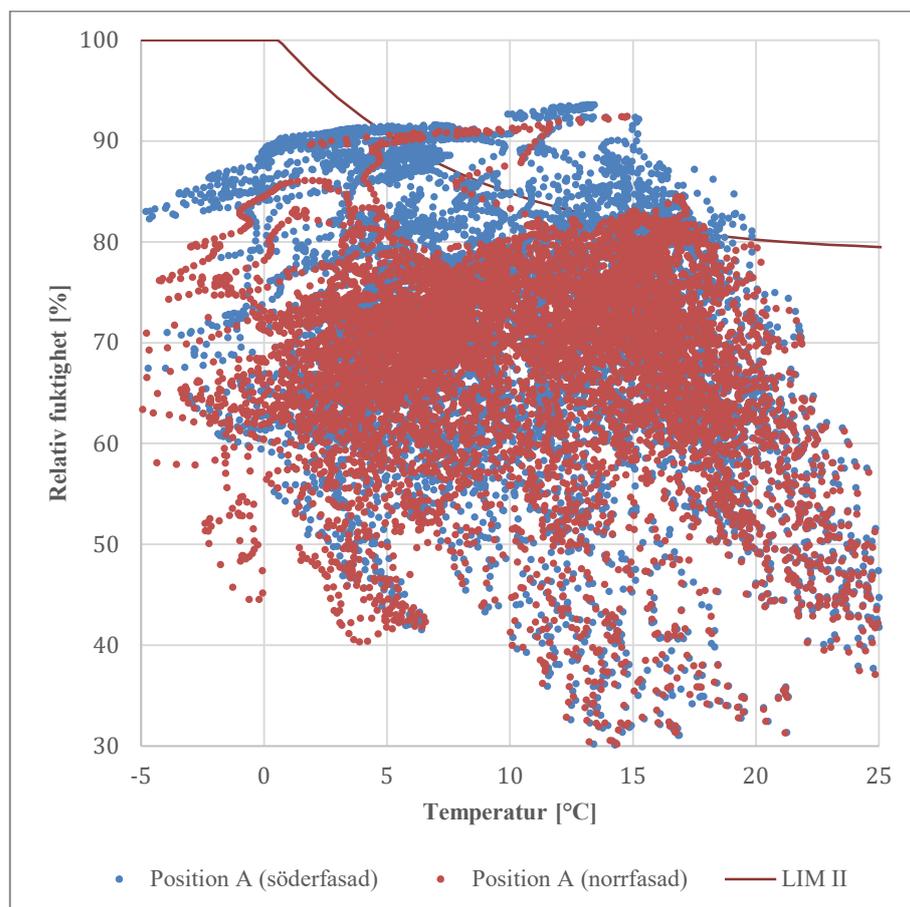
WUFI Pro är begränsat till beräkningar av homogena materialskikt vilket gör att skikt med träreglar modellerats utan träreglar. Trä leder värme cirka fyra gånger bättre än mineralull. Trä har dessutom betydligt högre densitet och värmekapacitet än mineralull vilket bör leda till att träreglar i konstruktionen reagerar trögare på temperaturskiftningar än mineralullsisoleringen. Sammantaget leder detta till att den beräknade temperaturfördelningen avviker från ett verkligt scenario i och omkring träreglar i konstruktionen. En högre temperatur än den beräknade leder till en lägre RF för en given ånghalt. Det beror i sin tur på att mätnadsånghalten minskar med en lägre temperatur. En högre temperatur i träreglarna skulle samtidigt leda till en något lägre kritisk fuktnivå för mikrobiell tillväxt, se Figur 1. Även omsättningen i luftspalten har inverkan på fukttillstånden (Hägerstedt, 2012). I beräkningarna antogs en konstant omsättning på 30 oms/h. I ett verkligt scenario varierar omsättningen beroende på utformning men också faktorer som vind och temperatur. För att dra några slutsatser kring om resultaten från beräkningarna ligger på säkra sidan skulle man behöva göra en jämförelse av beräknade tillstånd mot mätdata eller beräkningar i WUFI 2D som kan hantera icke-homogena materialskikt. Någon sådan jämförelse har inte gjorts i denna studie vilket gör att resultaten bör tolkas med viss försiktighet.

Vägg 1 och 2 har VIP i konstruktionen vilket genererar ett stort värmemotstånd i det mellanliggande isoleringsskiktet. Detta leder i sin tur till något lägre temperaturer i stomskikt och fasadskiva än övriga väggförslag. Dessa lägre temperaturer ger högre RF (eftersom mätnadsånghalten blir lägre) och bör vara den huvudsakliga anledningen till att dessa konstruktioner visar på fler antal timmar med kritiska fuktnivåer, se Tabell 7. Det förklarar dock inte varför vägg 2 som har lägst U-värde av konstruktionerna har färre kritiska timmar jämfört med vägg 1. Detta är troligen ett resultat av skillnader i isoleringsmaterialens fuktbufferande förmåga och hur dessa modelleras i WUFI. Vid 80% RF har PF-isoleringen en jämviktshalt på 1,79 kg/m³ medan mineralullens är 0,4 kg/m³. I Figur 28 redovisas fuktlagringsfunktionen för de material som använts i WUFI för PF och MU. Samma mönster kan ses om man jämför antalet timmar för vägg 3 och vägg 4.



Figur 28 Fuktlagringsfunktionen i WUFI Pro för MU och PF.

För samtliga konstruktioner uppstår kritiska fukttillstånd i position A och B några kortare perioder under sommarmånaderna följt av en längre period från mitten på september en bit in i oktober. Samma mönster syns i resultaten för referensväggen med enbart mineralull. Dessa kritiska fuktförhållanden framgår tydligast i beräkningarna för söderfasad som får störst andel slagregn i Göteborg. I Figur 29 som visar beräkningsresultatet för position A (fasadskivan) för referensväggen syns en tydlig skillnad mellan syd- och norrfasad. Man kan alltså dra slutsatsen att detta till stor del beror på inträngande slagregn.



Figur 29 Beräknade fuktförhållanden i position A för referensväggen, syd- samt norrfasad.

I Tabell 10 redovisas en sammanställning av ökningen av materialkostnader och intjänad boarea. En enkel slutsats är att möjligheten att spara boarea med högpresterande isolering blir högre ju lägre U-värde som eftersträvas. Detta beror på att vissa materialskikt bara går att minska ner till en viss gräns. Stomskiktet måste exempelvis ha tillräcklig bärighet och installationsskiktet behöver vara cirka 45 mm för att rymma elinstallationer. Dessutom tillkommer krav på brand och akustik som inte utreds i detta arbete men som ytterligare kan förtjocka ytterväggarna. Detta gör att den boarea som kan tjänas in med den utformning som valts i denna studie blir begränsad om U-värden i storleksordningen 0,18 W/m²K eftersträvas. Däremot finns det stora möjligheter att öka energiprestandan med lägre U-värden utan en ytterligare förtjockning av ytterväggarna. För väggkonstruktion 1 och 2 med U-värde på 0,133 respektive 0,122 W/m²K blir den intjänade boarean cirka 2 m² jämfört med en vägg med mineralull med motsvarande U-värde. Båda dessa väggar har VIP i

konstruktionen vilket leder till en markant ökning av materialkostnaderna i storleksordningen 35–40 000 SEK per m² intjänad boarea. För väggkonstruktion 3 och 4 som använder PF i konstruktionen ökar materialkostnaderna inte lika påfallande och är i storleksordningen 12–14000 SEK per m² intjänad boarea. Värmemotståndet i installationsskiktet hade kunnat ökas något genom att byta ut MU mot PF vilket hade minskat U-värdet med ytterligare cirka 0,01 W/m²K för samtliga konstruktioner. En konsekvens av det vore dock att alla eldosor och rör måste fräsas ner i de styva PF-skivorna vilket medför ökade arbetskostnader.

7 Slutsatser

- Det är möjligt att kompensera ett högt U-värde för ytterväggarna genom att öka värmemotståndet i andra delar av klimatskalet. Effekten begränsas dock av att ytterväggarna upptar ca 40–50% av klimatskärmens omslutande area för ett Attefallshus.
- Möjligheten att spara boarea med högpresterande isolering blir högre ju lägre U-värde som eftersträvas.
- Med den valda utformningen av väggkonstruktionerna blir den insparade boarean för ytterväggar med relativt höga U-värden (0,17–0,18 W/m²K) begränsad till ca 0,35 m² i jämförelse med mineralull.
- För väggkonstruktion 1 och 2 med U-värde på 0,133 respektive 0,122 W/m²K blir den intjänade boarean cirka 2 m² jämfört med en vägg med mineralull med motsvarande U-värde.
- För väggkonstruktion 1 och 2 med VIP visar resultatet en ökning i materialkostnad på 35–40 000 SEK per intjänad kvadratmeter boarea.
- För väggkonstruktion 3 och 4 med PF-isolering visar resultatet en ökning i materialkostnad på 12–14 000 SEK per intjänad kvadratmeter boarea.

En avslutande tanke kring detta arbete är varför regelverket för Attefallshus ser ut som det gör idag. Det hade kanske varit bättre om reglerna angav en maximal boarea i stället för idag 30 m² byggnadsarea. Begränsningen i byggnadsarea skulle kunna leda till en lägre ambition i energiprestanda i syfte att tjäna in boarea. Något som kan upplevas som kontraproduktivt i en tid av höga klimatambitioner och energipriser.

8 Referenser

- Arfvidsson, J., Harderup, L. & Samuelson, I. (2017). *Fukthanbok: Praktik och teori (4. uppl.)*. Svensk Byggtjänst.
- Bouquerel, M., Duforestel, T., Baillis, D., & Rusaouen, G. (2012). *Heat transfer modeling in vacuum insulation panels containing nanoporous silicas—A review*. *Energy and Buildings*, 54, 320–336. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.034>
- Boverket. (2018). Lovbefriade åtgärder, utvändiga ändringar och anmälan – analys och förslag (Rapportnummer 2018:17). https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2018/slutrapport-lovbefriade-atgarder_utvandiga-andringar-och-anmalan.pdf
- Boverket. (2019) *Fördjupad utvärdering av God Bebyggd Miljö 2019*. <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2019/fordjupad-utvardering-av-god-bebyggd-miljo.pdf>
- Boverket. (2020). *Boverkets byggregler (2011:6) – föreskrifter och allmänna råd, BBR*. https://www.boverket.se/contentassets/a9a584aa0e564c8998d079d752f6b76d/konsoliderad_bbr_2011-6.pdf
- Boverket. (2021, 11 oktober) *Attefallshus*. <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/lov--byggande/anmalningsplikt/bygglovbefriade-atgarder/attefallshus/>
- Boverket. (2021, 20 december) *Bygg- och fastighetssektorns energianvändning uppdelat på förnybar energi, fossil energi och kärnkraft*. <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/energianvandning/>
- Falk, J. (2010). *Ventilerad luftspalt i yttervägg: luftomsättningar och konvektiv fukttransport*. Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.
- Fraunhofer Bau. (n.d.). *Fraunhofer CSE and Partners Develop New Bio-Based Phenolic Foam*. Hämtad 15 maj, 2020 från <https://www.bau.fraunhofer.de/en/fieldsofresearch/advancedmaterials/phenolicfoam.html>
- Green Building Advisor. (2018, 24 maj). *Phenolic foam insulation revisited*. <https://www.greenbuildingadvisor.com/article/phenolic-foam-insulation-revisited>
- Hägerstedt, S.O. (2012). *Fuktsäkra träkonstruktioner: vägledning för utformning av träbaserade väggar*. Lund: Avdelningen för byggnadsfysik, Lunds universitet.
- Isover. (n.d.). *Fasadskiva* [Produktbild]. Isover.se.
- Isover. (2016). *Isover fasadskiva 30* [Prestandadeklaration] <https://www.isover.se/sites/isover.se/files/assets/documents/se001-30-a2-1.pdf>

Johansson, P., Ekstrand-Tobin, A., Mjörnell, K., Sandberg, P.-I., Sikander, E. (2005). *Kritiskt fukttillstånd för mikrobiell tillväxt på byggmaterial – kunskapsammanfattning* (Rapport 2005:11). SP Technical Research Institute of Sweden, SP Energiteknik.

Kim, J.-H., Kim, S.-M., & Kim, J.-T. (2020). Study on Long-term Performance of Phenolic Foam Insulation through Accelerated Aging Test. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 40(2), 11–23. <https://doi.org/10.7836/kses.2020.40.2.011>

Kim, J.-H., Boaf, F. E., Kim, S.-M., & Kim, J.-T. (2017). *Aging performance evaluation of vacuum insulation panel (VIP)*. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.09.003>

Kingspan. (2017, april 25). *Vacuum insulation Oprim-R* [Produktbild]. Kingspan.com. <https://ks-kentico-prod-cdn-endpoint.azureedge.net/kingspan-live/kingspanmeati/media/meati-media/untitled.png>

Kingspan. (2021a). *Kooltherm K12 Regelisolering* [Produktblad]. https://ks-kentico-prod-cdn-endpoint.azureedge.net/netxstoreviews/assetOriginal/134834_Kooltherm%20K12%20Regelisolering_productsspecs_SE.pdf

Kingspan. (2021b). *Optim-R Vakuumisolering* [Produktblad]. https://ks-kentico-prod-cdn-endpoint.azureedge.net/netxstoreviews/assetOriginal/144907_OPTIM-R_productsspecs_SE.pdf

Kingspan holdings. (2006). *A phenolic foam* (EP 1922356 B1). European Patent Office. <https://data.epo.org/publication-server/document?iDocId=4148529&iFormat=0>

Mao, S., Kan, A., Zhu, W., & Yuan, Y. (2020). *The impact of vacuum degree and barrier envelope on thermal property and service life of vacuum insulation panels*. *Energy and Buildings*, 209, 109699. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109699>

Paroc. (n.d.). *Yttervägg med dubbel stomme* [Produktbild]. Paroc.se. <https://www.paroc.se/losningar/byggisolering/vaggar/-/media/758344d341f84ff799e250dedfa1ed2d.ashx>

Petersson, B. (2013). *Tillämpad byggnadsfysik (5:2. uppl.)*. Studentlitteratur.

Samuelsson, I., Jansson, A. (2009). *Putsade regelväggar* (Rapport 2009:16). Technical Research Institute of Sweden, SP Energiteknik. https://www.fuktcentrum.lth.se/fileadmin/fuktcentrum/Publikationer/SP_RAPP_2009_16.pdf

Sedlbauer, K. (2002). *Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation*. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 25(4), 321–336. <https://doi.org/10.1177/0075424202025004093>

Skanska. (2012). *Praktisk tillämpning av högpresterande isolering* (Rapportnummer 12455). <https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/6ac56b52-4e98-4bf0-9021->

[dadebdef5d79/FinalReport/SBUF%2012455%20Slutrapport%20Praktiska%20till%203%20A4mpningar%20av%20h%20C3%B6gpresterande%20v%20C3%A4rmeisolering%20i%20ombyggnadsprojekt.pdf](#)

Svenska institutet för standarder. (2001). *Byggmaterials och byggprodukters termiska egenskaper - Bestämning av värmemotstånd med hjälp av plattapparat med skyddszon och värmeflödesmätarapparat - Produkter med stort och medelstort värmemotstånd* (SS-EN 12667:2001).

TräGuiden. (2003, september 1). *Ytterväggar*. En digital handbok för trä och träbyggande. <https://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktiv-utformning/stomme/vaggar/ytervaggar/>

TräGuiden. (2003, September 1). *Yttervägg med liggande panel* [3D-ritning]. TräGuiden.se. <https://www.traguiden.se/contentassets/853a941033bf4237b36c15428edba27/vagg-ytervagg-liggande-panel-v53-3d.png>

Unilin. (2019). *Safe-R Fenolisolering* [Produktblad]. <https://cdn.unilininsulation.com/-/media/sites/insulation/downloads/se-downloads/broschyrer/072019%20safe%20r%20brochure.se.ashx?rev=485a2f09b2084cb0be1267947feedd4c&mode=inline&hash=E9C52134ED8E1937D60F4EC53DB9A5BA>

Wahlgren, P. (2010). Goda exempel på lufttäta konstruktionslösningar (SP Rapport 2010:09). SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/2ED98491-5740-4ACE-9803-09D29DCFA8C2/FinalReport/SBUF%2011989%20Slutrapport%20SP%20Rapport%202010_9%20Goda%20exempel%20p%20C3%A5%20luftt%C3%A4ta%20konstruktionsl%C3%B6sningar.pdf

Wegger, E., Jelle, B. P., Sveipe, E., Grynning, S., Gustavsen, A., Baetens, R., & Thue, J. V. (2011). *Aging effects on thermal properties and service life of vacuum insulation panels*. *Journal of Building Physics*, 35(2), 128–167. <https://doi.org/10.1177/1744259111398635>

9 Bilagor

9.1 Bilaga 1 – Inställningar i WUFI

Inställningar för fuktberäkningar i WUFI Pro.

Orientering/Lutning/Höjd	
Orientering	Norr/ Söder
Lutning	90°
Byggnadens höjd	Låg byggnad, höjd upp till 10 m
Slagregnskoefficient	R1=0; R2=0,07 s/m
Ytövergångskoefficient yttre yta	
Värmemotstånd	0,0588 m ² K/W (Yttervägg)
Vindberoende	Nej
Sd-värde	Ingen ytbehandling
Absorptionstal för kortvågig strålning	Ingen absorption/emission
Terräng, kortvågig reflexionsförmåga	0,2 (Standardvärde)
Absorptionstal för regnvatten	0,7 (Beroende på komponentens lutning)
Ytövergångskoefficient inre yta	
Värmemotstånd	0,125 m ² K/W (Yttervägg)
Sd-värde	Ingen ytbehandling
Begynnelsevillkor	
Begynnelsefuktighet i byggnadsdel	Medelvärde över byggnadsdel
Begynnelsetemp. I byggnadsdel	Medelvärde över byggnadsdel
Relativ fuktighet vid start	0,8
Begynnelsetemp i byggnadsdel	20 °C
Numerik	
Värmetransportberäkning	Ja
Fukttransportberäkning	Ja
Utan kapillärtransport	Nej
Utan latent värme ånga-vätska	Nej
Exkluderar temperaturberoende pga fasomvandling	Nej
Utan latent värme vätska-fast	Nej
Exkluderar värmeledningsförmågans temperatur- och fuktberoende	Nej
Ökad noggrannhet	Ja
Konvergensförbättring	Ja
Adaptiv tidsstegs kontroll	Sätt på (Steg 3; Max steg 5)
Geometri	Kartesiska

9.2 Bilaga 2 – Beräkningar av materialkostnad

Referensvägg	Materialkostnad [SEK/m ²]	Materialkostnad 69 m ² [SEK]
Dubbelfasspont 22x120 mm	170,43	11 759 ,67
Spikläkt 28x70 mm s600	21,32	1471,08
Fasadskiva 30 mm	80,37	5545,53
Vindskyddsduk	18,48	1275,12
Stomme 45x95 mm s600	109,65	7565,85
Isolering MU 95 mm	76,40	5271,6
Isolering MU 45 mm	46,53	3210,57
PE-folie 0,2 mm	13,43	926,67
Träregel 45x45 mm s600	25,02	1726,38
Isolering MU 45 mm	33,53	2313,57
Gipsskiva	33,70	2325,3
SUMMA	628,86	43 391 ,34

Väggkonstruktion 1	Materialkostnad [SEK/m ²]	Materialkostnad 69 m ² [SEK]
Dubbelfasspont 22x120 mm	170,43	11 759 ,67
Spikläkt 28x70 mm s600	21,32	1471,08
Fasadskiva 30 mm	80,37	5545,53
Vindskyddsduk	18,48	1275,12
Stomme 45x95 mm s600	109,65	7565,85
Isolering MU 95 mm	76,40	5271,6
Isolering VIP 20 mm	1050,00	72 450
PE-folie 0,2 mm	13,43	926,67
Träregel 45x45 mm s600	25,02	1726,38
Isolering MU 45 mm	33,53	2313,57
Gipsskiva	33,70	2325,3
SUMMA	1632,33	112 630 ,77

Väggkonstruktion 2	Materialkostnad [SEK/m²]	Materialkostnad 69 m² [SEK]
Dubbelfasspont 22x120 mm	170,43	11 759 ,67
Spikläkt 28x70 mm s600	21,32	1471,08
Fasadskiva 30 mm	80,37	5545,53
Vindskyddsduk	18,48	1275,12
Stomme 45x95 mm s600	109,65	7565,85
Isolering MU 45 mm	33,53	2313,57
Isolering PF 50 mm	155,00	10 695
Isolering VIP 20 mm	1050,00	72 450
PE-folie 0,2 mm	13,43	926,67
Träregel 45x45 mm s600	25,02	1726,38
Isolering MU 45 mm	33,53	2313,57
Gipsskiva	33,70	2325,3
SUMMA	1744,46	120 367 ,74

Väggkonstruktion 3	Materialkostnad [SEK/m²]	Materialkostnad 69 m² [SEK]
Dubbelfasspont 22x120 mm	170,43	11 759 ,67
Spikläkt 28x70 mm s600	21,32	1471,08
Fasadskiva 30 mm	80,37	5545,53
Vindskyddsduk	18,48	1275,12
Stomme 45x95 mm s600	109,65	7565,85
Isolering MU 95 mm	76,40	5271,6
Isolering PF 25 mm	98,00	6762
PE-folie 0,2 mm	13,43	926,67
Träregel 45x45 mm s600	25,02	1726,38
Isolering MU 45 mm	33,53	2313,57
Gipsskiva	33,70	2325,3
SUMMA	680,33	46 942 ,77

Väggkonstruktion 4	Materialkostnad [SEK/m²]	Materialkostnad 69 m² [SEK]
Dubbelfasspont 22x120 mm	170,43	11 759 ,67
Spikläkt 28x70 mm s600	21,32	1471,08
Fasadskiva 30 mm	80,37	5545,53
Vindskyddsduk	18,48	1275,12
Stomme 45x95 mm s600	109,65	7565,85
Isolering MU 45 mm	33,53	2313,57
Isolering PF 50 mm	155,00	10 695
Isolering PF 25 mm	98,00	6762
PE-folie 0,2 mm	13,43	926,67
Träregel 45x45 mm s600	25,02	1726,38
Isolering MU 45 mm	33,53	2313,57
Gipsskiva	33,70	2325,3
SUMMA	792,46	54 679 ,74

9.3 Bilaga 3 – Beräkningar av U-värde

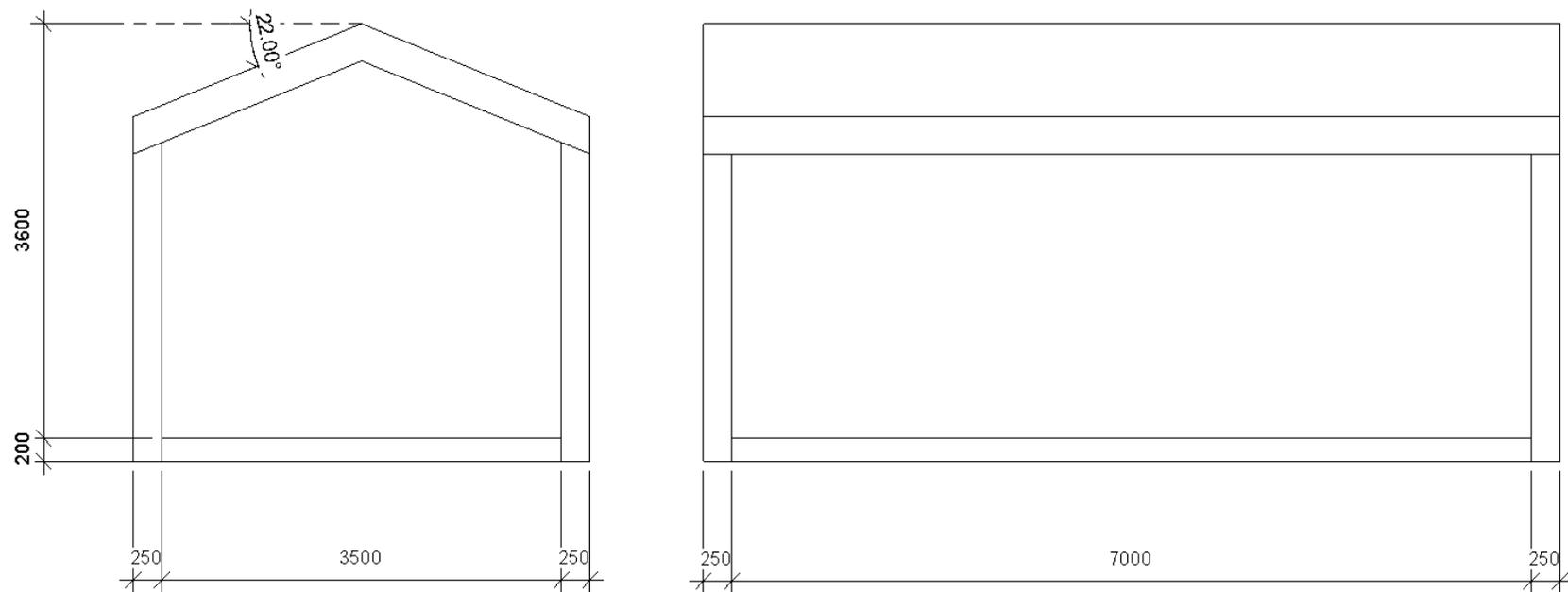
Beräkning av U-värde konstruktion 1 (VIP 20mm)											
Lambdavärdesmetoden										Uvärdesmetoden	
Skikt [i]	Namn	λ_{Ai}	ρ_{Ai}	λ_{Bi}	ρ_{Bi}	d_i	λ_i	R_i		R_{mu}	$R_{trä}$
1	Gips	0,25	100%	0	0%	0,013	0,25	0,052		0,052	0,052
2	MU+regel	0,035	88%	0,14	12%	0,045	0,0476	0,945378		1,285714	0,321429
3	VIP	0,007	100%	0	0%	0,02	0,007	2,857143		2,857143	2,857143
4	MU+regel	0,035	88%	0,14	12%	0,095	0,0476	1,995798		2,714286	0,678571
5	Fasadskiva MU	0,032	100%	0	0%	0,03	0,032	0,9375		0,9375	0,9375
Rsi								0,13		0,13	0,13
Rse								0,04		0,04	0,04
Rluftspalt								0,2		0,2	0,2
Rtot_lambda								7,157819		Rtot_i	8,216643
										Andel	88%
										Rtot_U	7,856643
Rtot	7,507231092										
Uvägg	0,133204904										

Beräkning av U-värde konstruktion 2 (VIP 20mm + FENOLSKUM 50mm)											
Lambdavärdesmetoden										Uvärdesmetoden	
Skikt [i]	Namn	λ_{Ai}	ρ_{Ai}	λ_{Bi}	ρ_{Bi}	d_i	λ_i	R_i		R_{mu}	$R_{trä}$
1	Gips	0,25	100%	0	0%	0,013	0,25	0,052		0,052	0,052
2	MU+regel	0,035	88%	0,14	12%	0,045	0,0476	0,945378		1,285714	0,321429
3	VIP	0,007	100%	0	0%	0,02	0,007	2,857143		2,857143	2,857143
4	MU+regel	0,035	88%	0,14	12%	0,045	0,0476	0,945378		1,285714	0,321429
5	PF+regel	0,02	88%	0,14	12%	0,05	0,0344	1,453488		2,5	0,357143
6	Fasadskiva MU	0,032	100%	0	0%	0,03	0,032	0,9375		0,9375	0,9375
Rsi								0,13		0,13	0,13
Rse								0,04		0,04	0,04
Rluftspalt								0,2		0,2	0,2
Rtot_lambda								7,560888	Rtot_i	9,288071	5,216643
									Andel	88%	12%
									Rtot_U	8,7995	
Rtot	8,180193766										
Uvägg	0,122246493										

Beräkning av U-värde konstruktion 3 (FENOLSKUM 25mm)											
Lambdavärdesmetoden										Uvärdesmetoden	
Skikt [i]	Namn	λ_{Ai}	ρ_{Ai}	λ_{Bi}	ρ_{Bi}	d_i	λ_i	R_i		R_{mu}	$R_{trä}$
1	Gips	0,25	100%	0	0%	0,013	0,25	0,052		0,052	0,052
2	MU+regel	0,035	88%	0,14	12%	0,045	0,0476	0,945378		1,285714	0,321429
3	PF	0,021	100%	0	0%	0,025	0,021	1,190476		1,190476	1,190476
4	MU+regel	0,035	88%	0,14	12%	0,095	0,0476	1,995798		2,714286	0,678571
5	Fasadskiva MU	0,032	100%	0	0%	0,03	0,032	0,9375		0,9375	0,9375
Rsi								0,13		0,13	0,13
Rse								0,04		0,04	0,04
Rluftspalt								0,2		0,2	0,2
Rtot_lambda								5,491153	Rtot_i	6,549976	3,549976
									Andel	88%	12%
									Rtot_U	6,189976	
Rtot	5,840564426										
Uvägg	0,171216329										

Beräkning av U-värde konstruktion 4 (FENOLSKUM 25mm + 50mm)											
Lambdavärdesmetoden										Uvärdesmetoden	
Skikt [i]	Namn	λ_{Ai}	ρ_{Ai}	λ_{Bi}	ρ_{Bi}	d_i	λ_i	R_i		R_{mu}	$R_{trä}$
1	Gips	0,25	100%	0	0%	0,013	0,25	0,052		0,052	0,052
2	MU+regel	0,035	88%	0,14	12%	0,045	0,0476	0,945378		1,285714	0,321429
3	PF	0,021	100%	0	0%	0,025	0,021	1,190476		1,190476	1,190476
4	MU+regel	0,035	88%	0,14	12%	0,045	0,0476	0,945378		1,285714	0,321429
5	PF+regel	0,02	88%	0,14	12%	0,05	0,0344	1,453488		2,5	0,357143
6	Fasadskiva MU	0,032	100%	0	0%	0,03	0,032	0,9375		0,9375	0,9375
Rsi								0,13		0,13	0,13
Rse								0,04		0,04	0,04
Rluftspalt								0,2		0,2	0,2
Rtot_lambda								5,894221	Rtot_i	7,621405	3,549976
									Andel	88%	12%
									Rtot_U	7,132833	
Rtot	6,513527099										
Uvägg	0,154										

9.4 Bilaga 4 – Exempel på omslutande area för olika byggnadsdelar i ett Attefallshus



Förutsättningar: Byggnadsarea $7,5 \times 4 \text{ m}^2$; nockhöjd 3,8 m; vägg tjocklek 250 mm; taktjocklek 300 mm; golvtjocklek 200 mm; taklutning 22° ; fönsterarea 20% av golvytan.

A_i (area för byggnadsdel mot uppvärmd sida)	m^2	%
A_{golv}	24,5	22,8
A_{tak}	26,4	24,6
$A_{\text{fönster}}$	4,9	4,6
$A_{\text{dörr}}$	2,0	1,9
$A_{\text{vägg}}$	49,5	46,1
A_{om}	107,3	100

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se



CHALMERS