

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Bevara och energieffektivisera kulturhistoriskt värdefull bebyggelse genom att använda superisoleringsmaterial	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Preserve and improve energy efficiency in listed buildings using super insulation materials	
Universitet/högskola/företag Chalmers tekniska högskola	Avdelning/institution Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, Byggnadsteknologi
Adress 412 96 Göteborg	
Namn på projektledare Pär Johansson	
Namn på ev övriga projektdeltagare Paula Wahlgren, Petra Eriksson	
Nyckelord: 5-7 st Energieffektivisering, invändig tilläggsisolering, superisolering, kulturhistorisk inventering, fukt	

Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten (P42856-1) och pågick från 1 december 2016 till 31 december 2019. Projektledare var Pär Johansson och övriga deltagare i projektet var Paula Wahlgren och Petra Eriksson (Uppsala Universitet, Kulturvård). Projektet har genomförts i samverkan med Energimyndighetens program Spara & Bevara projekt 40461-1 "Om-renovering: Möjligheten att öka energieffektiviteten och återskapa kulthistoriska värden" och E2B2 projekt P40798-1 "Långsiktig prestanda hos superisoleringsmaterial i byggnader".

Till projektet har en referensgrupp varit knuten som träffats två gånger under projektets gång. Gruppen bestod av Tor Broström (Professor, Uppsala Universitet, Kulturvård), Kia Bengtsson Ekström (Tekniklektor, Chalmers, Arkitekturens teori och metod), Henrik Carlsson (Konstruktör, Seniorkonsult, WSP Byggprojektering), Roland Skogh (Projektledare/förvaltare, MölnDala Fastighets AB), Jenny Tonning (Fastighetsutvecklare, MölnDala Fastighets AB), Maria Alm (Innemiljöspecialist, Göteborgs Stad, Lokalförvaltningen) och Maria Ros (Bebyggelseantikvarie, White Arkitekter, Stockholm).

I projektet byggdes en testvägg upp i en industriell tegelbyggnad från 1896 på Forsåkersområdet i Mölndal. Byggnaden ägs av Mölndala Fastighets AB och ligger i ett område med stora kulturhistoriska värden.

Under projektet har flera studenter arbetat genom examensarbeten, kandidatarbeten och praktik. Stort tack till alla som varit med och bidragit med sin kunskap i projektet.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Summary	3
Inledning	4
Genomförande	6
WP 1 Inventering av dagens kunskapsläge och kunskapsluckor.....	7
WP 2 Provning av material och konstruktioner, datorsimuleringar.	7
WP 3 Provning i full skala och sammanställning av fältförsök.....	7
Resultat	8
Kompatibilitet och möjligheter med SIM.....	8
Risker med invändig tilläggsisolering	9
Resultat från fältförsök	9
Beständighetsproblem i tegelkonstruktioner	11
Saltutfällning och långsiktig hållbarhet	11
Resultat från internationella fallstudier.....	12
Diskussion.....	12
Publikationslista.....	14
Referenser, källor.....	16
Bilagor	16

Sammanfattning

Syftet med projektet har varit att visa hur superisoleringsmaterial (SIM) kan användas för att spara energi och utrymme, samt bidra till bevarande av kulturhistoriskt viktiga inslag samtidigt som temperatur- och fuktförhållanden i väggar vid renovering i byggnader byggda före 1945 hålls på en säker nivå. Projektet har genomförts av forskare inom områdena byggnadsfysik och kulturvård. Tegelbyggnader i Sverige har varit huvudfokus eftersom det är dessa byggnader som har de största energieffektivitetspotentialerna i hela byggnadsbeståndet. Tegelbyggnader utmanar ofta ingenjörer och arkitekter genom att det ställs motsägande krav på energieffektivitet och bevarande av kulturvärden. Ofta har dessa byggnaders fasader värdefulla karaktärsbärande element som gör dem svåra att tilläggsisolera. Det finns också problem med de byggteknik, teknisk livslängd och bristande termisk komfort inomhus. Utvärdering av inverkan på kulturvärden har framförallt skett genom intervjuer och praktiskt arbete vid studiebesök och granskning av ritningar och bygghandlingar och har utförts av arkitekt och byggnadsantikvarie. Samarbetspartners, knutna till referensgruppen, bidrog till projektet med sin kunskap genom intervjuer, möten och seminarier. I samverkan med IEA EBC Annex 65 har information om olika superisoleringsmaterial och deras egenskaper sammanställts. Ett fullskaligt fältförsök i en övergiven tidigare industribyggnad från 1896 i Forsåkersområdet utanför Göteborg genomfördes. Ett mindre testrum byggdes upp inne i byggnaden invid ytterväggen av massiv tegel. Det genomsnittliga beräknade U-värdet minskade med 69% för 20 mm aerogelbaserad komposit (AB) och 80% för 20 mm vakuumisoleringspaneler (VIP), medan mätningar i testrummet gav en reduktion på 82-83% för AB och 81-84% för VIP. På byggnadsnivå skulle detta

innebära att energianvändningen skulle kunna minskas med upp till 20%. Projektet har lett fram till en ökad kunskap om de tekniska svårigheter som finns vid bevarande av kulturvärden och energieffektivisering av byggnader med superisoleringsmaterial. Fördelarna med superisoleringsmaterial, särskilt flexibla material som aerogelfiltar, framgår när detaljer ska bevaras. På grund av de risker invändig tilläggsisolering av ytterväggar medför är det viktigt att först utreda om väggen tillåter invändig isolering, framförallt när det gäller fuktförhållanden i väggen.

Summary

The aim of the project has been to show how super insulation materials (SIM) can be used to save energy and space, as well as to contribute to preservation of character defining elements while maintaining the temperature and humidity performance of the walls when renovating buildings built before 1945. The project was performed by researchers in the fields of building physics and building conservation. Brick buildings in Sweden have been in focus, as these buildings have one of the largest energy efficiency potentials in the entire building stock. Brick buildings often challenge engineers and architects by having contradicting demands on energy efficiency and cultural heritage values. Often, the façades of these buildings have valuable character defining elements that make them difficult to insulate. There are also problems with the building components, technical service life and insufficient thermal comfort indoors. Experts in architecture and building conservation have contributed with knowledge through interviews and practical work at study visits and by examination of drawings and construction documents. Collaboration partners, linked to the reference group, contributed to the project with their knowledge in interviews, meetings and seminars. In collaboration with IEA EBC Annex 65, information on various super insulation materials has been compiled. A full-scale field test was carried out in an abandoned former industrial building from 1896 in the Forsåker area outside Gothenburg. A small test room was built up inside the building adjacent to a homogenous brick masonry wall. The average calculated U-value decreased by 69% for 20 mm aerogel-based composites (AB) and 80% for 20 mm vacuum insulation panels (VIP), while measurements in the test room showed a reduction of 82-83% for AB and 81-84% for VIP. On building level this would mean that the energy use could be reduced by up to 20%. The project has led to an increased knowledge and understanding of technical difficulties that exist when preserving character defining elements while imposing energy efficiency measures with super insulation materials in buildings. The advantages of super insulation materials, using flexible materials such as aerogel blankets, are evident when details are to be preserved. Due to the risks with interior additional insulation of walls it is important to investigate if the wall allows interior insulation, in particular with respect to moisture conditions.

Inledning

Under de senaste åren har energianvändningen för uppvärmning och kylning av byggnader ökat. Av energianvändningen i den svenska byggsektorn står uppvärmning och kylning av byggnader för cirka 78%. Den återstående delen är huvudsakligen knuten till bygg-, renoverings- och rivningsverksamhet. Cirka 25% av energin för uppvärmning används i byggnadsbeståndet från före 1941 [2]. Enligt EU Building Stock Observatory (BSO) [3] är mer än 20% av den europeiska byggnadsmassan från före 1945, och en stor del av dessa byggnader har mycket låg energiprestanda.

Andelen bostadshus i med en mycket dålig energiklass (D) i energideklarationen (EPC) var i genomsnitt mer än 50% i de undersökta länderna. Som jämförelse kan nämnas att U-värdet i äldre oisolerade ytterväggar är ungefär 1-1,4 W/m²K [3]. Enligt BSO [3] har 75% av byggnaderna ett genomsnittligt U-värde högre än 1,44 W/m²K. Energianvändningen till följd av så höga U-värden är naturligtvis beroende av de lokala klimatförhållandena. En slutsats från analysen av data för 16 europeiska länder/regioner, som täcker 66% av den totala byggnadsytan i Europa, är emellertid att över 87% av byggnadsbeståndet måste uppgraderas för att uppfylla visionen om ett klimatneutralt Europa till 2050 [3]. Följaktligen planeras nu för nationella renoveringsstrategier för byggnader för att uppnå låga eller noll koldioxidutsläpp från byggsektorn fram till 2050. Detta innebär att många befintliga byggnader snart måste anpassas till de moderna energikraven.

Det finns flera olika metoder för att minska energianvändningen och förbättra inomhusmiljön (både med avseende på termisk komfort och luftkvalitet). I en delstudie till detta projekt undersökte Johansson och Wahlgren [4] vanliga renoveringsåtgärder. Exempel på dessa är tilläggsisolering (vägg, tak, grund, inklusive minskning av köldbryggor), byte av fönster eller tillägg av isolerrutor, ändring eller uppgradering av värme- och installationstekniska system och ökad lufttäthet. Tilläggsisolering kan leda till förändrade fuktförhållanden och detta kan, i sin tur, leda till minskad fukttransport. Fukt kan ge problem som allvarligt skadar strukturens hållbarhet, försämrar inomhusmiljön och leder till ökad energianvändning. Ökad fukttransport kan uppstå genom otätheter i fasader, tak, grund (regnvatten och grundvatten), anslutningar och områdena kring genomföringar är särskilt utsatta. Vid uppskattning av de mest lämpliga renoveringsstrategierna finns det flera byggnadsfysikaliska funktionskrav för en byggnad som måste beaktas och uppfyllas på (t.ex. regnbarriär och vindbarriär).

I detta projekt har byggnader i Sverige från före 1945 varit huvudfokus eftersom det är dessa byggnader som har de största energieffektivitetspotentialerna i hela byggnadsbeståndet. Tegelbyggnader utmanar ofta ingenjörer och arkitekter genom att det ställs motsägande krav på energieffektivitet och bevarande av kulturvärden. Ofta har dessa byggnader karaktärsbärande element som gör dem svåra att tilläggsisolera. Det finns också problem med de olika byggnadsdelarna, teknisk livslängd och bristande termisk komfort inomhus. Invändig tilläggsisolering studeras främst eftersom detta är en av få möjliga lösningarna i många byggnader med kulturvärden.

Isoleringsmaterial klassificeras normalt som porösa material. Porerna är luftfyllda där den stillastående luften ger en extremt bra isoleringsförmåga i jämförelse med fasta material. Därför är densiteten hos isoleringsmaterial låg. Den termiska konduktiviteten (värmeledningsförmågan) för stillastående luft vid 20°C är 0,026 W/(m·K). Värme överförs huvudsakligen via följande transportmekanismer: ledning, konvektion och strålning. Värmeledning definieras som energiöverföringen mellan närliggande atomer och molekyler i fast, flytande eller gasform. Konvektiv värmeöverföring sker genom en rörelse i en vätska eller gas, till exempel luft. Värmeöverföring via strålning är långvågig elektromagnetisk strålning som utsänds från alla ytor och därmed sker ett utbyte mellan ytor på grund av deras temperatur [5].

Högrepresterande isoleringsmaterial (superisoleringsmaterial, SIM) kan i hög grad bidra till minskad energianvändning i byggnader om tillförlitliga data (materialegenskaper) och säker implementeringsteknik tillhandahålls för arkitekter, konstruktörer och byggare. Utveckling av SIM baseras på att minska den konvektiva värmeöverföringen i materialet. Detta uppnås antingen genom att minimera porstorleken i isoleringsmaterialen, och därmed förhindra luftrörelser i materialets porer, eller genom att byta ut luften i materialets porer till en annan (tyngre) gas med bättre isoleringsförmåga. Ett annat sätt är att evakuera gasen från materialets porer d.v.s. skapa vakuum [5].

En viktig aspekt när nya typer av material planeras att användas i äldre byggnader handlar om hur kompatibla materialen är med material och konstruktionen i den befintliga byggnaden. Johansson et. al [6] undersökte skillnader, fördelar och nackdelar mellan traditionella material och SIM baserat på fyra fallstudier. Traditionella byggtekniker bygger på principen att de tekniskt svagaste materialen finns i de yttre lagren och ju längre in i konstruktionen man kommer, desto starkare är det från ett tekniskt perspektiv. Ur ett antikvariskt perspektiv är det därför viktigt att studera hur befintliga material kommer att interagera med nya typer av material, såsom SIM, innan det introduceras som en möjlig metod för att energieffektivisera äldre byggnader med kulturvärden.

Syftet med projektet är att visa hur SIM kan användas för att spara energi och utrymme, samt öka graden av bevarande av kulturhistoriskt viktiga inslag samtidigt som temperatur- och fuktförhållanden i väggar vid renovering i byggnader byggda före 1945 hålls på en säker nivå. Det är inte möjligt att inkludera alla möjliga SIM i projektet. Därför bestämdes att arbetet skulle begränsas till två huvudtyper av SIM nämligen vakuumisoleringspaneler (VIP) och aerogelbaserade kompositer (AB). Projektet har utgått från de utmaningar, avvägningar och motstridiga krav som ställs på bevarande av kulturvärden, energieffektivitet, livslängd och fuktsäkerhet. Resultaten har kommunicerats och spridits genom populärvetenskapliga och vetenskapliga publikationer.

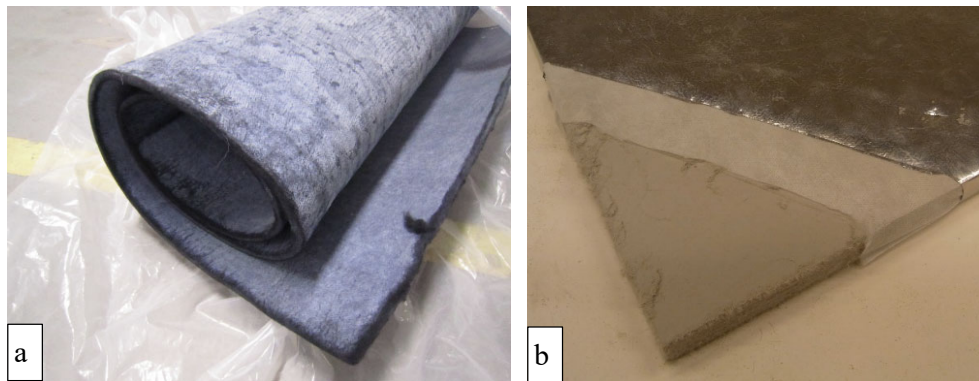
Mer specifikt syftar projektet till att möjliggöra en minskad energianvändning i det redan byggda beståndet med 20–30% vilket skulle ge en energibesparing på uppskattningsvis 4–6 TWh i Sverige och 14–21 TWh i Europa. Detta gjordes genom att exempel på typiska väggkonstruktioner i byggnader från före 1945 studerades i 2 fallstudier [5, 7]. Målet var att ta fram en exempelsamling med bra,

och dåliga, tillämpningar av superisoleringsmaterial vid renovering för att öka kunskapsbasen och förtroendet i byggbranschen för superisoleringsmaterial.

Energimyndigheten finansierade projektet (P42856-1) som pågick från 1 december 2016 till 31 december 2019. Projektet leddes av Pär Johansson, Chalmers tekniska högskola (Docent i byggnadsfysik, specialistkunskap: tillämpningar för SIM). Övriga deltagare i projektet var Paula Wahlgren, Chalmers tekniska högskola (Docent i byggnadsfysik, specialistkunskap: luftförelser i klimatskalet och beständighet) och Petra Eriksson, Uppsala Universitet (Universitetsadjunkt och doktorand (GU) i kulturvård, specialistkunskap: byggnadsantikvariskt perspektiv vid energieffektivisering).

Genomförande

Flera olika tillvägagångssätt har använts för att visa på hur SIM bör och inte bör brukas. Framförallt har två typer av SIM studerats, se Figur 1.



Figur 1. Superisoleringsmaterial (SIM) som studerats är framförallt; a) aerogelbaserade kompositer, aerogelfilt (AB), b) vakuumisoleringspanel (VIP)

I projektet har tre vetenskapliga områden sammanförts:

- Byggnadsfysik: energieffektivitet, fuktsäkerhet, lufttäthet
- Kulturvård/byggnadsvård: möjligheter för att bevara kulturhistoriskt viktiga inslag i byggnaden
- Arkitektur: arkitektoniska möjligheter och begränsningar

Projektet har varit indelat i tre arbetspaket (WP) som delvis bedrivits parallellt och i nära samverkan med två forskningsprojektet finansierade av Energimyndigheten:

- ”Om-renovering: Möjligheten att öka energieffektiviteten och återskapa kulthistoriska värden”. Projektet leddes av Docent Paula Femenías och förutom projektdeltagarna i detta projekt deltog Docent Liane Thuvander.
- ”Långsiktig prestanda hos superisoleringsmaterial i byggnader”. Chalmers tekniska högskola medverkade i IEA EBC Annex 65 ”Long-Term Performance of Super-Insulating Materials in Building Components & Systems”. Detta projekt leddes av Docent Bijan Adl-Zarrabi. I projektet deltog även Docent Pär Johanson, Professor Holger Wallbaum och Tekn. Dr. Jun Kono.

WP 1 Inventering av dagens kunskapsläge och kunskapsluckor.

Här genomfördes litteraturstudie, intervjuer, studiebesök och undersökning av energieffektiviserande åtgärder som genomförts i typiska ytterväggar i byggnader uppförda före 1945 i Sverige. Utvärdering av inverkan på kulturvärden har framförallt skett genom intervjuer och praktiskt arbete vid studiebesök och granskning av ritningar och bygghandlingar och har utförts av arkitekt och byggnadsantikvarie. Samarbetspartners, knutna till referensgruppen, bidrog till projektet med sin kunskap genom intervjuer, möten och seminarier. Möjliga objekt för fullskaliga försök i fält identifierades.

WP 2 Provning av material och konstruktioner, datorsimuleringar.

Detta paket bedrevs i samverkan med IEA EBC Annex 65 där information om olika superisoleringsmaterial och deras egenskaper sammanstälts. Erfarenheter från materialprovning i laboratorium användes för att ge input till datorsimuleringar av hela byggnadsdelar. Det internationella nätverket inom IEA användes för att finna exempel på byggnadsdelar som isolerats med SIM. Exempel på dessa sammanställdes och publicerades i en rapport [7].

WP 3 Provning i full skala och sammanställning av fältförsök

Genom forskningssamarbete med NTNU/Sintef i Trondheim finns kompetens kring fullskalig provning av väggar i laboratorium. Försök med tegelväggar med olika invändig tilläggsisolering under varierande klimatbelastning användes som bas för att utveckla ett fullskaligt fältförsök i Göteborg. En övergiven byggnad från 1896 i Forsåkersområdet användes som fallstudie. Ett mindre testrum byggdes upp inne i byggnaden invid ytterväggen av massiv tegel, se Figur 2. Temperatur- och fuktfördelning mättes kontinuerligt under projektet i tegelväggen. Väggen delades in i tre provningsfält där en användes som referens medan två övriga isolerades invändigt med vardera VIP och AB.



Figur 2. a) Industribyggnad från 1896 söder om Göteborg där ett testrum byggdes upp, b) Testrummet inuti byggnaden värmdes upp till cirka 23°C, c) Temperatur- och fuktsensorer monterades i väggen.

Resultat

Projektet har lett fram till en ökad kunskap om de tekniska svårigheter som finns vid bevarande av kulturvärden och energieffektivisering av byggnader med superisoleringsmaterial (SIM). Egenskaper och förutsättningar för historiska byggnader varierar mycket. En lösning för att förbättra energiprestandan kan fungera bra i en historisk byggnad men sämre i en annan. Kompatibilitet måste utvärderas både ur teknisk och historisk synvinkel och syftet med renoveringen måste definieras tydligt innan ett renoveringsprojekt påbörjas. Därför är det viktigt att kunna använda isoleringsmaterial med olika egenskaper på olika platser och utvärdera dessa egenskaper både i laboratorium och i fältstudier.

Fördelarna med SIM, särskilt flexibla material som aerogelfiltar, framgår när detaljer ska bevaras. Det kan vara runda trappuppgångar, fönsterinfästning, takfot, anslutning mellan grund och fasad. SIM kan vara effektiv för att minska påverkan av köldbryggor. Ett exempel är att använda en kombination av isolerfönster och SIM vid köldbryggor runt fönstret, istället för att byta hela fönstret och ramen. Detta är också fördelaktigt för att minimera luftläckage runt fönster. Ett annat exempel är att använda SIM vid träbalksändar (inuti väggen) för att förhindra att dessa blir för kalla och fuktiga, med beständighetsproblem som följd.

Kompatibilitet och möjligheter med SIM

En del av denna studie bestod av workshops och intervjuer med experter inom området energieffektivitet, arkitektur och kulturvård. Ett av ämnena som diskuterades var fördelar, nackdelar, möjligheter och begränsningar av invändig tilläggsisolering med SIM. Olika kompetenser var representerade i gruppen; inomhusmiljöexpert (fokus fuktproblem), erfaren seniorkonstruktör och byggfysiksext (konsult), professor med fokus på bevarande, byggnadsantikvarie (konsult), seniorarkitekt (fokus omvandling och restaurering), projektledare och fastighetsskötare.

Eftersom SIM kan vara tunnare än konventionell isolering, för samma energiprestanda, kan detaljer i fasaden bevaras i högre utsträckning. Det är viktigt att inledningsvis avgöra i vilken utsträckning fasaden kan ändras. Det första steget är att identifiera byggnadens viktiga karaktärsbärande element. Detta gäller både för ytterfasaden (för utvändigt isolering) och för insidan av ytterväggarna (invändig isolering). Att använda SIM ger flera möjligheter att minska påverkan på viktiga karaktärsbärande element. Dock är den detaljerade utformningen av fasaden som krävs tidskrävande och uppmätning av den ursprungliga fasaden måste vara noggrann. Följaktligen är det nödvändigt att ha tillräckligt med tid och resurser för detta i renoveringsprojektet. Det är bra att inkludera detta moment i upphandlingsprocessen från början för att undvika tidskrävande icke-standardiserade lösningar med mycket anpassning på plats.

I byggbranschen idag finns det en viss motvilja mot att använda icke-standardiserade lösningar. Projektörer och hantverkare måste vara skickliga och ha tillräcklig kunskap för att kunna utveckla och bygga de lösningar som krävs för att använda SIM på bästa sätt. Kompatibiliteten med andra material och

konstruktioner är heller inte alltid kända. Att använda invändig isolering, oavsett om det är SIM eller inte, leder till en kallare ursprunglig konstruktion. Detta kan i sin tur leda till hög fukthalt i konstruktionen, med risk för beständighetsproblem, såsom mögelpåväxt på trätytor eller frostsprängning av tegelstenar.

Uttorkningskapaciteten för tegelväggar minskar också när isolering appliceras.

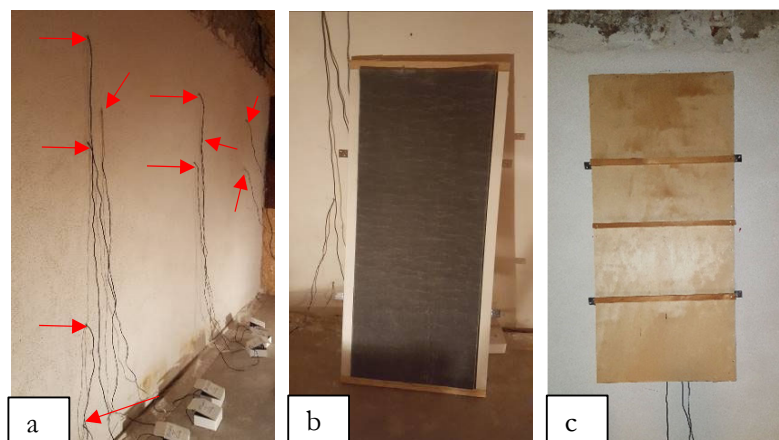
Eftersom väggar med SIM kommer att kräva mindre uppvärmning än icke-isolerade väggar, kan det vara möjligt att minska antalet radiatorer, vilket kommer att öka användbarheten och flexibiliteten. Invändig SIM kommer också att leda till en mindre minskning av golvytan än konventionell isolering på grund av dess mindre tjocklek.

Risker med invändig tilläggsisolering

På grund av de risker invändig tilläggsisolering av ytterväggar medför är det viktigt att först utreda om väggen tillåter invändig isolering. Annars bör andra lösningar för att öka energieffektivitet och termisk komfort inomhus användas när den yttre fasaden måste bevaras. Sådana lösningar inkluderar isolering av takkonstruktionen, byte av fönster, utgrävning och isolering av grund- och golvkonstruktion samt förbättrade värme- och installationstekniska system. I många fall, vid renovering av äldre byggnader, måste grundläggningen ändå åtgärdas. Detta var också fallet med fallstudiebyggnaden, där ytterväggarna var mycket våta och vatten konstant absorberades från marken och från regnvatten.

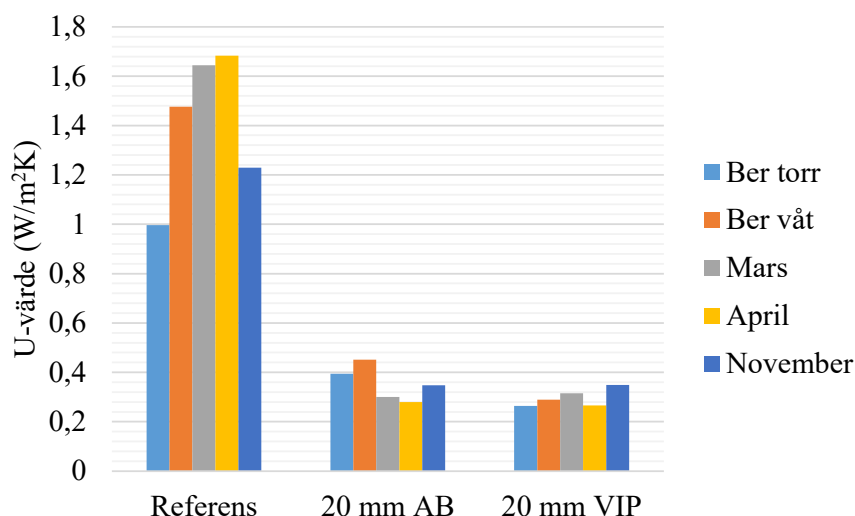
Resultat från fältförsök

I projektet genomfördes ett fältförsök i mindre skala. Ett testrum (2.1 x 2.6 x 4.0 m) byggdes upp i en övergiven byggnad från 1896 i Forsåkersområdet utanför Göteborg. Rummet isolerades med 170 mm mineralull i golvet, innerväggarna och taket. Den exponerade 470 mm tjocka tegelväggen delades invändigt in i tre delar (500 x 1 200 mm) där 20 mm AB respektive VIP testas på insidan och jämförs med ett oisolerat väggfält som referens, se Figur 3.



Figur 3. a) Hygrotermiska sensorer (markerade med pilar) inuti teglet i den putsade väggen, b) AB isolering i testfält som kan monteras ner för inspektion, c) Installerat testfält med respektive AB och VIP på insidan.

Innan installationen av den invändiga isoleringen togs den befintliga putsen bort från tegelytan. Det förkom betydande kapilläruppsugning från marken och stort fukttillskott från regn. I väggen monterades 10 temperatur- och fuktsensorer som varje timme registrerar temperaturen och relativ fuktighet i väggen. Värmeflödesgivare (tjocklek 5,4 mm, diameter 80 mm) användes för att utvärdera väggens termiska funktion med och utan isolering. Varje testfält (referens, AB, VIP) har två sensorer, uppe och nere, och värmeflödet utvärderades vid tre tillfällen (mars, april och november). De genomsnittliga resultaten visar att värmeflödet reduceras väsentligt med invändig SIM, se Figur 4.



Figur 4. U-värde av den 470 mm tjocka tegelväggen utan isolering, jämfört med 20 mm AB och 20 mm VIP, baserat på beräknat värmefflöde och mätningar i väggen.

Den uppmätta skillnaden i värmefflöde mellan de två isolerade skikten är mindre än väntat sett till beräkningarna. För torrt tegel antogs värmeledningskoefficienten vara 0,61 W/(m·K) och för det våta teglet 1,0 W/(m·K), vilket är medelvärde av torrt och helt vått tegel. Med våta tegelstenar reduceras det genomsnittliga beräknade U-värdet med 69% för AB och 80% för VIP, medan mätningarna gav en reduktion på 82-83% för AB och 81-84% för VIP. På byggnadsnivå skulle detta innebära att energianvändningen skulle kunna minskas med upp till 20%, förutsatt att 25% av energianvändningen i byggnader från denna tidsperiod orsakas av värmefförluster genom fasaden och med 80% minskning i U-värdet på fasaden.

Enligt fallstudien kan cirka 20% av energianvändningen sparas genom att använda 20 mm invändig SIM. Om man antar samma andel oisolerade flerfamiljshus i tegel från före 1945 på nationell nivå som i Göteborg är det totala antalet lämpliga byggnader 8 900. Den totala potentiella energibesparingen är då 0,5 TWh, vilket kan jämföras med den totala energianvändningen för uppvärmning och kylning i Sverige som var 80 TWh 2016. Uppvärmningen av byggnader i Sverige avger i genomsnitt 68 gCO₂/kWh. Detta ger en minskning av koldioxidutsläppen med 37 000 ton CO₂-ekvivalenter, vilket är 0,7% av de totala koldioxidutsläppen för uppvärmning av det svenska byggnadsbeståndet.

Beständighetsproblem i tegelkonstruktioner

Byggnaden där fallstudien genomfördes byggdes 1896 och har byggts om flera gånger sedan dess. Byggnaden användes tidigare för papperstillverkning och var i drift tills pappersbruket stängde 2005. Därefter har byggnaden lämnats ouppvärmad och med bara nödvändigt underhåll. Materialen har snabbt börjat brytas ned på grund av det kalla och fuktiga klimatet. Innan provningen inleddes under våren 2018 togs den befintliga putsen bort från den inre tegelytan. Det var betydande kapilläruppsugning från marken och från slagregn från sydväst, vilket är den dominerande vindriktningen. Den gamla putsen var lös upp till ungefär 1 meter ovanför betongplattan och kom lätt ner, medan den övre delen av väggen krävde bilning för att ta bort putsen. Den preliminära materialprovningen visade att vattenflödet i tegelstenarna var ungefär tre gånger högre än i moderna tegelsorter.

För att hindra vatten från att ta sig in i konstruktionen utifrån, föreslogs i projektet att en vattenavvisande ytbehandling (hydrofob impregnering) kunde användas vid energieffektiviserande åtgärder. Dock stod det snabbt klart att det sällan är lämpligt att använda denna typ av ytbehandling på tegelbyggnader från denna tidsperiod (<1945). Speciellt för renovering av byggnader kan det vara problematiskt om ytbehandlingen används schablonmässigt eftersom den är mycket bra teoretiskt men svår att tillämpa i praktiken. Det bästa är att investera för att få tegelfasaden i gott skick så att den hydrofoba ytbehandlingen inte behövs. Ytbehandlingen har en begränsad livslängd och behöver underhållas med 8–10 årsintervall. Om behandlingen behövs är förmodligen tegelfasaden i dåligt skick och bör istället repareras. Om det har förekommit fuktskador tidigare bör vattenavvisande behandlingar inte användas eftersom det kan förvärra situationen. Följaktligen kan behandlingen förhindra insugning av vatten och därmed nedbrytning av tegelfasaden men kan samtidigt stänga in fukt i fasaden, vilket kan förvärra befintliga problem.

Saltutfällning och långsiktig hållbarhet

Redan i slutet av januari 2018 bildades saltkristaller (saltutfällning) på insidan av tegelmuren i fallstudien. Utfällningen började närmast marken, i den nedre delen av väggen, där fukttinnehållet kan förväntas vara högre. Avdunstningen från väggen ökade väsentligt när temperaturen höjdes i provrummet vilket påskyndade utfällningen av saltkristaller. Saltutfällning kan ge upphov till mikrosprickor som förstör tegelmurens yta och bryter ned materialets struktur [8]. På grund av de skadliga effekterna av saltutfällning applicerades ett lager hydraulisk kalkbaserad puts på väggen. Detta utfördes i början av maj 2018. Putsen fungerar som ett offerskikt för att förhindra att tegelmurens skick försämras. Efter att putsen applicerades fortsatte saltkristaller bildas på ytan av putsen, men utan att tegelmuren skadas. Saltkristallerna borstas kontinuerligt från väggen och det krävs att offerputsens inspekteras regelbundet för att inte försämras och därmed exponera tegelmuren.

Med tiden förväntas saltutfällningen minskar när salterna inuti tegelmuren transporteras till ytan. Beroende på saltkällan varierar tiden för denna process.

Byggnadens långsiktiga hållbarhet och bärande konstruktion måste säkerställas. Eftersom uppvärmning av denna typ av byggnader är skadligt för tegelmurens beständighet behövs fortsatta åtgärder. En lösning som implementerades i november 2019 var att täcka hela byggnaden med ett plastomslag. Taket var redan från början av studien täckt av ett väderskyddstält för att förhindra vattenläckage från regn.

Resultat från internationella fallstudier

I projektet har praktiska och tekniska svårigheter identifierats som, tillsammans med långtidsmätning av materialprestanda, ger underlag till uppskattning av materialens livslängd. Högpresterande isoleringsmaterial som VIP är en ny typ av material som kan behöva testas under olika förhållanden och med andra metoder jämfört med konventionella isoleringsmaterial. VIP har hittills mest använts i kyl- och transportindustrin och de första exemplen på användning i byggnader är från 1990-talet. AB har använts sedan 1930-talet och i större kommersiell omfattning sedan tidigt 2000-tal. Dessvärre är det enbart i undantagsfall som projekt följs upp, och avvikelser från projekterad prestanda dokumenteras i ännu färre fall [7].

Inom IEA Annex 65 samlades totalt 32 fallstudier in. Fallstudierna är utspridda över 12 länder på 3 kontinenter. De fördelas på 7 fallstudier med aerogelfilt ($2\,600\text{ m}^2$), 3 med kiselbaserade skivor och 22 med VIP ($91\,000\text{ m}^2$). Vissa av fallstudierna har följts upp genom att sensorer för temperatur, relativ fuktighet och/eller värmeflödesmätare installerats i konstruktionen. Få av dem har utvärderats av en tredje part som är oberoende av materialproducent eller byggnadens ägare. De resultat från långtidsmätning och uppföljning som finns för 4 av fallstudierna (Kanada, Schweiz och Sverige) rapporterar om små förändringar i prestandan efter flera års användning.

Slutsatser från fallstudierna med aerogelfiltar visade bland annat att de passar bra för konstruktioner som inte är helt plana. Den höga ångpermeabiliteten medför en fortsatt uttorkningsmöjlighet genom konstruktionen, även om ångpermeabiliteten blir lägre än fallet utan isoleringen. Filtarna går att använda i upp till 5 lager (50 mm) utan större svårigheter. För kiselbaserade skivor visade erfarenheterna att köldbryggor mellan skivorna kan behöva undersökas vidare. De leder normalt sett inte till en minskad ångtransport genom konstruktionen, utan tvärtom ökar väggens fuktbuffrande förmåga. Flera fallstudier med VIP demonstrerade hur invändig uthyrningsbar golvyta kunde finansiera den ökade kostnaden, samt att byggnadens karakteristik kunde bevaras efter tilläggsisolering. Däremot försvårades uttorkning avsevärt med VIP. Ytterligare en nackdel med VIP visade sig vara att de inte kan anpassas i efterhand på byggarbetsplatsen. Se vidare Adl-Zarrabi och Johansson [7].

Diskussion

Det finns både fördelar och nackdelar med invändig isolering med SIM. Den optimala tjockleken på isoleringsskiktet (ur värme- och fuktperspektiv) för en specifik byggnad måste beräknas för att uppnå bästa prestanda ur ägarens och

brukarnas perspektiv. SIM ger ökad flexibilitet när det gäller invändiga detaljer och ökad möjlighet att bevara karaktärsbärande element i byggnadernas exteriör. En nackdel är att det finns få exempel på byggnader med SIM i Sverige, samt bristande erfarenhet av bygga med SIM bland såväl arkitekter, andra beslutsfattare och hantverkare.

Det finns flera utmaningar som arkitekter och ingenjörer står inför för att bevara tegelbyggnader med kulturvärden. Några utmaningar är rent byggnadstekniska medan andra är en kombination av krav på energieffektivisering och bevarande. Praktiska riktlinjer baserade på byggnadsfysikaliska prestandakriterier kan bidra till att utveckla kontinuerliga underhållsplaner för att undvika skador i dessa byggnader. I detta projekt användes en fältundersökning i en äldre industriell tegelbyggnad för att studera nedbrytningen av material i konstruktionen. Nedbrytning av material kan gå snabbt och om det finns tecken på saltutfällning är det viktigt att snabbt täcka väggen på insidan med ett lager (t.ex. hydraulisk kalkputs) som lätt kan fästas på väggen och bytas ut när den har försämrats för att förhindra fortsatt nedbrytning.

Byggnaden i detta projekt behöver ytterligare skyddsåtgärder för att minska vattnet som transporters till väggen. Därför installerades en plastpresenning runt byggnaden. Konsekvenserna av detta kommer kontinuerligt att övervakas för att ge prestandakriterier för att utveckla praktiska riktlinjer för restaurering av denna typ av byggnad. Förfallet går snabbt när en byggnad väl har övergivits. Därför är kontinuerligt underhåll och uppvärmning av byggnaden viktig för att en byggnad med kulturvärden ska bevaras.

Vakuumisoleringspaneler (VIP) tillverkas i förbestämda mått och panelerna kan inte anpassas eller skäras på byggplatsen. Detta leder till att skraddarsydda VIP måste beställas i förväg. Producenter har utvecklat planeringsprogramvara för att ta fram monteringsanvisningar för konstruktioner med VIP. Dessa CAD-baserade program minskar tröskeln för att använda produkten och förenklar designen. Trots detta krävs särskild omsorg under installationen eftersom VIP kan punkteras vid monteringen. Därför kan det finnas behov av certifiering av hantverkare och behov av särskild utbildning.

Byggbranschen är i allmänhet konservativ mot nya lösningar och material. Branschen regleras av många koder och standarder, och det tar lång tid att införa nya material och lösningar. Det pågående standardiseringsarbete på material- och produktnivå kan accelerera lansering av byggkomponenter med integrerade SIM på marknaden. Indata (materialegenskaper) för SIM bör finnas tillgänglig i de kommersiella byggnadsfysikaliska designverktygen exempelvis WUFI. Detta bidrar också till att öka kunskapen bland arkitekter och konstruktörer. Projektet har uppmärksammat behovet av att ytterligare utveckla och fördjupa arbetet med att förstå hur tekniskt avancerade material som SIM kan bidra till att spara energi och samtidigt bidra till att bevara en större del av byggnaders karaktärsbärande fasadelement.

Publikationslista

I projektet har följande publicerats:

Adl-Zarrabi, B., Johansson, P., Batard, A., Brunner, S., Capozzoli, A., Galliano, R., Heinemann, U., Gudmundsson, K., Fantucci, S., Karami, P., Mukhopadhyaya, P., Lorenzati, A., Perino, M., Quenard, D., Sprengard, C., Treml, S., Yrieix, B. (2020). *Annex 65, Long-Term Performance of Super-Insulating-Materials in Building Components and Systems*. Report of Subtask III: Practical Applications – Retrofitting at the Building Scale – Field scale.

Adl-Zarrabi, B., Johansson, P. (2017) *Superisoleringsmaterial i byggnader: Rekommendationer från IEA EBC Annex 65*. Eskilstuna: Statens Energimyndighet, Rapport 2017:24.

Adl-Zarrabi, B., Johansson, P., Marzbanrad, A. (2019). *Determination of Anisotropic Thermal Conductivity of VIP Laminate using Transient Plane Source Method*. 14th International Vacuum Insulation Symposium, September 19-20, 2019, Kyoto, Japan. (Paper)

Gelot, M. (2018). *Evaluating heat flux sensors by using a heat flux apparatus*. École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers. Praktik under sommaren 2018 på Chalmers. (Opublicerad rapport)

Hagetoft, C.-E., Johansson, P. (2019). Generic algorithm to assess moisture susceptibility of simplified wall assemblies. *Canadian Journal of Civil Engineering*, special issue Durability and Climate Change; <http://doi.org/10.1139/cjce-2018-0592>.

Johansson P., Josefsson G., Daoud Rajha, M. (2018). *Energieffektivisering av tegelfasad med kulturhistoriskt värde*. Kandidatarbete ACEx10-18-14, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Johansson, P. (2017). *Results from real life performance assessment of aerogel blankets in buildings*. Advanced Building Skins Conference, October 2-3, 2017, Bern, Switzerland. (Presentation)

Johansson, P., Adl-Zarrabi, B. (2017). *Practical Applications of SIMs: Retrofitting at the Building Scale*. 13th International Vacuum Insulation Symposium, September 20-21, 2017, Paris, France. (Poster)

Johansson, P., Adl-Zarrabi, B., Wallbaum, H., Kono, J. (2018). *Superisoleringsmaterial i byggnader: Rekommendationer från IEA EBC Annex 65. Bygg och teknik*, 2/2018, sid. 18-21.

Johansson P., Donarelli A., Strandberg, P. (2018). *Performance of new materials for historic buildings: case-studies comparing super insulation materials and hemp-lime mortar*. 3rd Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings, EEHB 2018, September 26-27, 2018, Visby, Sweden. (Paper)

Johansson, P., Eriksson, P., Wahlgren, P (2019). *Superisoleringsmaterial – hur kan de användas vid renovering?*, in Olander S., Mjörnell K., Femenias P.,

Helsing E., Wallentén P. (ed.) *Hållbar renovering ur ett helhetsperspektiv - En antologi från forskarmiljön SIREn*. SIREn rapport 2019:2.

Johansson, P., Wahlgren, P. (2018a). Provnings av invändig supertilläggsisolering av äldre tegelkonstruktioner i fält. *Bygg och teknik*, 5/2018, sid. 16-19.

Johansson, P., Wahlgren, P. (2018b). *Interior insulation retrofit of a brick wall using super insulation materials: design of a field testing in an industrial brick building*. 7th International Building Physics Conference, IBPC 2018, September 23-26, 2018, Syracuse, NY, USA. (Paper)

Johansson, P., Wahlgren, P. (2017a). *Using SIMs to re-create cultural historical values in buildings from before 1945*. 13th International Vacuum Insulation Symposium, September 20-21, 2017, Paris, France. (Extended abstract)

Johansson, P., Wahlgren, P. (2017b). *Renovation of buildings from before 1945: status assessment and energy efficiency measures*. 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, June 11-14, 2017, Trondheim, Norway. (Paper)

Johansson, P., Wahlgren, P. (2017c). *Recreation of cultural historical values in buildings from before 1945: Inventory with focus on building physics performance*. 14th International Conference on Building Materials and Components, DBMC 2017, May 28-31, 2017, Ghent, Belgium. (Paper)

Johansson, P., Wahlgren, P., Eriksson, P. (2020). *Interior super insulation in heritage buildings: challenges and possibilities to conserve heritage values and increase energy performance* (Report ACE 2020:2). Chalmers University of Technology, Department of Architecture and Civil Engineering, Gothenburg, Sweden.

Johansson, P., Wahlgren, P., Eriksson, P. (2019). *Field Testing of Interior Super Insulation Materials on a Brick Wall in an Industrial Building*. Buildings XIV Conference, 9-12 December, 2019, Clearwater Beach, FL, USA. (Paper)

Nilsson O. (2017). Hydrofob ytbehandling av tegel. Examensarbete BOMX03-17-40, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Ytterligare fyra konferenspaper är skickade på granskning:

Hagentoft, C-E., Johansson, P. (2020). *The future climate moisture susceptibility of wall assemblies. Analysis based on Monte Carlo simulation using a simplified deterministic hygrothermal simulation model*. 15th Int. Conf. on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020), June 30-July 3, Barcelona, Spain.

Johansson, P., Wahlgren, P. (2020a). *Interior insulation using super insulation materials: saving energy and space*. Beyond 2020, Built Environment Conference (WSBE), 9-11 juni, 2020, Göteborg.

Johansson, P., Wahlgren, P. (2020b). *Deterioration in brick buildings: hygrothermal performance and measures to save them*. 12th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2020, June 14-17, 2020, Tallinn, Estonia.

Johansson, P., Wahlgren, P. (2020c). *Experiences from Interior Super Insulation of a Brick Wall from the 1800s*. 15th Int. Conf. on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020), June 30-July 3, Barcelona, Spain.

Referenser, källor

- [1] Boverket (2019). *Bygg- och fastighetssektorns energianvändning uppdelat på förnybar energi, fossil energi och kärnkraft* (7 januari 2020). Tillgänglig: <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/energianvandning>
- [2] Statens Energimyndighet (2014). *Programbeskrivning för programmet Spara och bevara etapp 3*. (Eskilstuna: Statens Energimyndighet)
- [3] EU Building Stock Observatory (BSO) n.d. *Building Stock Characteristics* (Dataset) (18 januari 2020). Tillgänglig: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/eu-bso>
- [4] Johansson, P. och Wahlgren, P. (2017). *Renovation of buildings from before 1945: status assessment and energy efficiency measures*. Proceedings of the 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, Trondheim, Norge, 11-14 Juni, 2017.
- [5] Berge, A., och Johansson, P. 2012. *Literature Review of High Performance Thermal Insulation* (Report 2012:2). Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering.
- [6] Johansson, P., Donarelli, A. och Strandberg, P. (2018). *Performance of new materials for historic buildings: case-studies comparing super insulation materials and hemp-lime mortar*. Proceedings of the 3rd Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings, EEHB 2018, Visby, 26-27 September, 2018.
- [7] Adl-Zarrabi, B., Johansson, P. Batard, A., Brunner, S., Capozzoli, A., Galliano, R., Heinemann, U., Gudmundsson, K., Fantucci, S., Karami, P., Mukhopadhyaya, P., Lorenzati, A., Perino, M., Quenard, D., Sprengard, C., Treml, S., och Yrieix, B. 2020. *Annex 65, Long-Term Performance of Super-Insulating-Materials in Building Components and Systems. Report of Subtask III: Practical Applications – Retrofitting at the Building Scale – Field scale*.
- [8] Cultrone, G., och Sebastián, E. 2008. Laboratory simulation showing the influence of salt efflorescence on the weathering of composite building materials. *Environmental Geology*, 56(3):729-740.

Bilagor

Administrativ bilaga.

Övriga publikationer och rapporter publiceras i konferensproceedings och online på <https://research.chalmers.se/>, studentarbeten på <https://odr.chalmers.se/>.