



Aerogelputs för hållbar renovering av putsade byggnader



Aerogelputs för hållbar renovering av putsade byggnader

Chalmers tekniska högskola



Energimyndighetens projektnummer: P2022-00872

E2B2



Förord

E2B2s vision är en resurs- och energieffektiv byggd miljö.

Bebyggelsesektorn svarar för cirka en tredjedel av Sveriges totala energianvändning och en effektivare energianvändning är en viktig del av utvecklingen av energisystemet. Hållbarhet, effektivitet och robusthet i bebyggelsen behöver stärkas och utvecklas. Lösningarna behöver samspela för att fungera och utnyttjas. Forskning, utveckling, innovation och kommersialisering spelar en avgörande roll.

I E2B2 arbetar forskare och andra aktörer tillsammans för att utveckla samhällets byggande och boende och effektivisera energianvändningen. Syftet med E2B2 är att ta fram ny kunskap, teknik, tjänster och metoder som bidrar till en hållbar energi- och resursanvändning i bebyggelsen.

E2B2 är ett forsknings- och innovationsprogram från Energimyndigheten där IQ Samhällsbyggnad är koordinator. Programmet startade 2013 och en andra programperiod pågår mellan 2018 och 2024. Projektet som beskrivs i den här rapporten har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten.

Stockholm, 21 december 2022

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att Energimyndigheten tar ställning till framförda slutsatser, resultat eller eventuella åsikter.



Sammanfattning

Aerogelbaserad puts har en relativt låg värmeledningsförmåga vilket skapar nya alternativ för tilläggsisolering av tidigare oisolerade betong- och murverksstrukturer. Särskilt kan putsen vara intressant för byggnader med kulturhistoriskt värde eller med andra begränsningar i utformningen av lösningar för tilläggsisolering. För att säkerställa en fuktsäker konstruktion krävs god kännedom om bland annat materialens fuktupptagning vid regnbelastningar, initial uttorkning av byggfukt och långsiktig uttorkning i olika klimat. När det gäller aerogelputs är detta områden där de praktiska erfarenheterna varit begränsade. Därför genomfördes i detta projekt mätningar i laboratorium och fält under olika klimatbelastningar. Försöken kompletterades med numeriska hygrotermiska (kopplad värme och fukt) och energisimuleringar för att undersöka fuktupptagning och uttorkningstiden. Effekten av ytbehandlingsens vattenavvisande egenskaper och ytsprickor undersöktes också.

Resultaten från laboratoriemätningarna visade en låg fuktupptagning i oskadade putssystem med aerogelbaserad puts. Användningen av vattenavvisande färg på utsidan minskade vattenupptagningen med upp till 50%, utan att minska uttorkningen. För putssystem med inducerade ytsprickor ökade fuktupptagningen 3–5 gånger på grund av ökat hydrostatiskt vattentryck på ytan. Kapillärsugningstest på enbart den aerogelbaserad putsen visade en ökad vattenupptagning med antalet upprepade fuktexponeringar. För hela putssystemet visade motsvarande tester däremot en konstant fuktupptagning. Fältmätningarna indikerade att byggfukten i putsen torkade ut inom sex månader. Hygrotermiska simuleringar för fyra svenska städer visade en uttorkningstid på 4–12 månader beroende på klimat och tidpunkt för applicering. Över tid visade putsen ingen fuktackumulering. För väggar utsatta för slagregn noterades en ökad relativ fuktighet i putsen med tiden vilket ledde till en genomsnittlig ökning av värmeledningsförmågan med upp till 9%.

Energisimuleringarna visade en energibesparingspotential motsvarande ca 63 ± 41 GWh årligen som lägst på hela byggnadsbeståndet. Detta med antagandet att 10% av de befintliga flerbostadshusen med putsade fasader skulle kunna tilläggsisoleras med aerogelbaserade putssystem. Resultaten indikerar att det undersökta putssystemet utgör en fuktsäker lösning för utvändigt tilläggsisolering av betong- och murverksstrukturer. Systemet hindrade i stort fuktackumulering från regn. Vid framtida projektering och utvärdering av putssystemet i fält är det viktigt att beakta den förväntade tiden för uttorkning av byggfukt och ökningen av värmeledningsförmågan till följd av förhöjd relativ fuktighet.

Puts, aerogel, energirenovering, fukt, slagregn



Summary

Aerogel-based coating mortars have a low thermal conductivity of 0,03–0,05 W/(m·K) which create new opportunities for insulating previously non-insulated concrete and masonry structures. This is especially interesting for buildings of cultural significance or with other limitations on possible energy efficiency measures. To secure a moisture safe design, good understanding of, for instance, the moisture absorption under rain loads, early-stage drying of built-in moisture and long-term drying in various climates are important. For aerogel-based coating mortars, experiences from practical applications are limited. Therefore, laboratory and field measurements in different climate conditions were performed in this project. These were supplemented with numerical hygrothermal (heat and moisture) and energy simulations to investigate the moisture absorption and drying time. The effect of water-repellent properties of surface treatments and surface cracks was also evaluated.

The results from the laboratory measurements showed a low moisture absorption in the undamaged systems with aerogel-based coating mortars. The use of water-repellent paint on the exterior reduced the moisture absorption by up to 50 %, without reducing the drying capacity. For systems with surface cracks, the moisture absorption increased 3–5 times due to increased hydrostatic water pressure on the surface. Capillary suction tests on the aerogel-based coating mortar alone showed increasing moisture absorption with the number of repeated moisture exposures. Contrarily, measurements on the complete coating system showed a stable performance. Field measurements indicated that built-in moisture in the coating system dried out within six months. Hygrothermal simulations for four Swedish cities showed drying times of 4–12 months, depending on the climate and time of application. Over time, the coating system showed no moisture accumulation. However, for walls exposed to wind-driven rain an increased relative humidity with time was found in the coating mortar, leading to an average increase in thermal conductivity by up to 9 %.

The energy simulations showed an energy saving potential equivalent to approximately 63±41 GWh annually on building stock level. This assumes that 10 % of the existing multi-family buildings with rendered façades could be retrofitted using aerogel-based coating systems. The results show that the investigated coating system is a moisture-safe solution for external renovation of concrete and masonry buildings. The system prevented largely moisture accumulation from rain. However, in future design and evaluation of the coating system, it is important to consider the expected time for early-stage drying and the expected increase in thermal conductivity due to increased relative humidity.

Coating mortar, aerogel, energy renovation, moisture, wind-driven rain



INNEHÅLL

1	INLEDNING OCH BAKGRUND	7
1.1	BAKGRUND	7
1.2	SYFTE OCH MÅL	7
1.3	OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR	8
2	GENOMFÖRANDE	9
3	RESULTAT	10
3.1	TUNNSLIPSANALYS: STRUKTUREN AV AP	10
3.2	LABORATORISKA MÄTNINGAR: FUKTUPPTAGNING VID OLIKA UPPFUKTNINGSSCENARIER	11
3.3	FÄLTMÄTNINGAR OCH HYGROTERMISKA SIMULERINGAR: UTTORKNING I SVENSKA KLIMAT	14
3.3.1	FÄLTMÄTNINGAR	14
3.3.2	HYGROTERMISKA SIMULERINGAR	14
3.3.3	FÖRVÄNTAD FUKTBEROENDE ISOLERINGSFÖRMÅGA FÖR REGNUTSATTA FASADER	15
3.4	ENERGIBESPARINGSPOTENTIAL PÅ NATIONELL NIVÅ	16
4	DISKUSSION	17
5	SLUTSATSER	18
6	PUBLIKATIONSLISTA	19
6.1	VETENSKAPLIGA TIDSKRIFTER	19
6.2	DOKTORSAVHANDLING	19
6.3	KONFERENSBIDRAG	19
6.4	POPULÄRVETENSKAPLIGA BIDRAG	19
7	REFERENSER	20



1 Inledning och bakgrund

Puts används traditionellt som fasadens vattenavledande skikt och skyddar den bakomliggande konstruktionen. Putsade fasader tillhör den vanligaste typen av fasadmateriäl i flerfamiljshus i Sverige med cirka 41 miljoner kvadratmeter, motsvarande 27 % av fasadarean. Bristande energiprestanda och inomhusklimat är bland de vanligaste anledningarna till renovering av dessa byggnader. Därmed finns en stor potential att använda nya och mer effektiva isoleringslösningar för putsade byggnader. Aerogelbaserad puts framställs på samma sätt som vanlig puts, med skillnaden att sanden i ballasten ersätts delvis eller helt med aerogelpartiklar. I detta projekt undersöks ett putssystem där aerogelbaserad puts utgör merparten av den tillkommande tjockleken.

1.1 Bakgrund

Detta projekt är en fortsättning på ett tidigare forskningsprojekt finansierat av Energimyndigheten (46822-1). I detta projekt utvecklades verktyg och bedömningsmetoder för aerogelbaserad puts. Denna har en värmeledningsförmåga på 0,03–0,05 W/(m·K) (Karim et al., 2022) och kan därmed ersätta både den befintliga putsen och isoleringen i ytterväggarna. Detta förbättrar byggnadens energiprestanda i ett enda skikt vilket möjliggör en minskning av väggens tjocklek. Samtidigt skapar putssystemet nya lösningar för renovering och tilläggsisolering av kulturhistoriskt värdefulla byggnader. Genom att ersätta den befintliga putsen med aerogelbaserad puts kan dessa byggnader energieffektiviseras samtidigt som deras karaktärsdrag bevaras. Materialet har använts sedan 2013 i flera Centraleuropeiska länder och visat sig lämplig både för invändig och utvändigt användning. Tidigare fältförsök har visat att det är möjligt att minska U-värdet på oisolerade väggar med upp till 70%. Mycket av tidigare forskning har fokuserat på putsens isolerande förmåga, medan dess fuktegenskaper, särskilt med avseende på fuktupptagning och uttorkning i fält under olika regnscenarier, inklusive slagregn, är relativt okända. Dessutom är tidigare studier inte fullständigt representativa för svenskt klimat. Detta karakteriseras ofta av hög fuktbelastning (slagregn) på byggnader och begränsade uttorkningsmöjligheter. Det finns även brist på data om fuktegenskaperna hos skadade putssystem (ytsprickor). För att möjliggöra utveckling av fuktsäkra och energieffektiva renoveringslösningar behövs kunskap om fuktprestandan under realistiska och representativa klimatförhållanden.

1.2 Syfte och mål

Syftet med projektet var att bidra med kunskap om putssystem med aerogelbaserad puts för att möjliggöra ökad energiprestanda i oisolerade putsade byggnader. Målet var att expandera de tidigare materialstudierna till att omfatta hela putssystemet för att ta fram projekteringsanvisningar för tilläggsisolering med aerogelbaserade putssystem på byggnader i svenskt klimat. Målet var även att sammanställa resultat från det första svenska fältförsöket med systemet samt komplettera med beräkningar och specialutvecklade pilotförsök i laboratorium för fuktsäker användning.



Målen för projektet var att:

- öka kunskapsbasen om appliceringsfasen för putssystemet samt dess påverkan på och systemets långtidsegenskaper i svenskt klimat,
- ta fram rekommendationer för hur putssystemet kan används för att utnyttja dess potential maximalt i svenska förhållanden, samt
- verifiera den beräknade energibesparingen på upp till 74 GWh på byggnadsbeståndsnivå.

1.3 Omfattning och avgränsningar

Trots de stora internationella forskningsinsatserna, saknas fortfarande en komplett och tillförlitlig uppsättning av hygrotermiska och mekaniska egenskaper för putssystemet. Aerogelbaserad puts är ett nytt material som har andra egenskaper än konventionell puts. Inom ramen för projektet har olika standardiserade testmetoder studerats ingående och nya testmetoder har utvecklats för att på ett tillförlitligt sätt utvärdera fuktegenskaper och termiska egenskaper på det kompletta putssystemet under uppfuktning och uttorkning. Studierna fokuserar på utvändigt tilläggsisolering av massiva murverkskonstruktioner eftersom många kulturhistoriskt värdefulla byggnaderna i Sverige är av denna typ. Mätningar och analyser genomförs för ett kommersiellt putssystem som testas i klimatförhållandena i Sverige.

Det är av stor betydelse att användaren känner till putssystemets särskilda möjligheter och begränsningar samt kan säkerställa att den uppfyller de uppställda tekniska kraven. Därför är det viktigt att tidigt kommunicera forskningsresultaten med byggherrar, konsulter, tillverkare och forskare inom energiområdet för att förkorta tiden mellan forskning och tillämpning.



2 Genomförande

Fokus i projektet har främst varit på att fördjupa kunskapen om fuktegenskaper och termiska egenskaper hos putssystemet. Fuktupptagning för olika designalternativ under olika regnscenarier, systemets uttorkning av byggfukt i tidigt skede, samt förväntat fuktberoende termisk isoleringsförmåga under realistiska klimatförhållanden i fält utvärderades i projektet. Påverkan av vattenavvisande ytskikts egenskaper och ytsprickor på fuktupptagning och uttorkningsförmåga undersöktes också. Samtliga studier och deras resultat är beskrivna i detalj i tre vetenskapliga tidskriftsartiklar [I-III], fyra konferensbidrag [a-d], två populärvetenskapliga artiklar [e-f] samt sammanställda i en doktorsavhandling [IV].

I projektet kombinerades laboratiemätningar, pilotstudier och fältmätningar med numeriska hygrotermiska (fukt och värme) simuleringar. En nyutvecklad småskalig uppställning i laboratoriet användes för att simulera regnvattenavrinning på fasader, baserat på den historiskt mest frekventa slagregnsintensiteten i Sverige [II]. Denna uppställning användes för att studera prestandan hos putssystemet med olika vattenavvisande egenskaper och ytsprickor vid uppfuktning och uttorkning. Klimatet i laboratoriet styrdes för att efterlikna realistiska klimatförhållanden i form av temperatur (T) och relativ luftfuktighet (RF). Mätningarna kompletterades med standardiserade tester av den fria kapillärsugningen vid kontakt med en vattenmättad yta samt Karstenrörstest [I-II]. I detta försök kan det hydrostatiska trycket skapat av ett stigrör användas för att mäta vattenabsorption vid högt tryck (slagregn) mot fasader motsvarande en vindhastighet på upp till cirka 43 m/s.

Som komplement till mätningarna av fuktupptagning och uttorkning på putssystemet genomfördes även studier på materialnivå på den aerogelbaserade putsen. Genom så kallad tunnslipsanalys undersöktes putsens homogenitet och porstruktur, vilka är av betydelse för fuktegenskaperna. I tunnslipsanalysen skärs en mycket tunn skiva (tunnslip) av ett material ut vilken undersöks under ett polarisationsmikroskop för att få information om homogenitet och porstruktur.

Den tidigare påbörjade fältstudien i Göteborg slutfördes där uttorkningen av putssystemet, applicerat utvändigt på en tegelfasad, övervakades under en period på 15 månader mellan januari 2022 och mars 2023 [III]. Målet med fältförsöket var att samla kunskap och erfarenheter om appliceringsprocessen för putssystemet samt att undersöka hur uttorkningen av den initiala byggfukten i putssystemet fortskred vid applicering vintertid. Numeriska hygrotermiska (kopplad värme och fukt) simuleringar användes som komplement för att studera uttorknings- och långtidsprestandan på putssystemet i fyra olika klimat i Sverige (Göteborg, Stockholm, Östersund och Kiruna). Numeriska energiberäkningar användes för att uppskatta potentialen för energibesparing på byggnadsbeståndsnivå.

Genom att kombinera ovanstående metoder har en analys av energi- och fuktprestandan hos putssystemet genomförts. Mätningarna och analyserna har mynnat ut i rekommendationer för användning av aerogelbaserade putssystem i svenska byggnader.



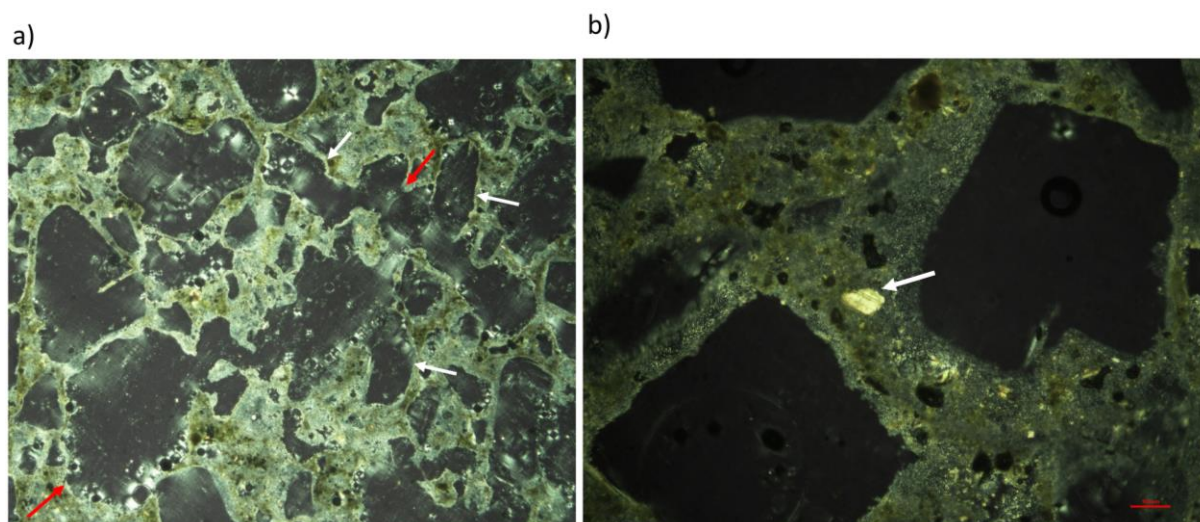
3 Resultat

Kapitlet är strukturerat efter de olika metoderna som använts i projektet. Inledningsvis presenteras resultat på materialnivå för de försök där det enbart var den aerogelbaserade putsen som testades. Fuktupptagning och uttorkning testades dels på materialnivå, dels för hela putssystemet med de av tillverkaren rekommenderade materialskikten.

3.1 Tunnslipsanalys: struktur på materialnivå

Tunnslipsanalys utfördes i ett polarisationsmikroskop för att studera den övergripande strukturen, kornstorleken på ballasten, hålrummen, sekundära strukturer samt orenheterna i putsblandningen. I experimenten studerades 0,03 mm tunnslip av den aerogelbaserade putsen. För analysen tillverkades en rektangulär provkropp (ca 160x40x40 mm). För att få maximal spridning i variationen i prismats strukturella egenskaper utfördes två tunnslipar (ca 40x20 mm) av två ytor vinkelräta mot varandra.

Figur 1 visar två exempel från tunnslipsanalysen. Bildanalysen visade att huvudbeståndsdelarna i putsmaterialet var kalk och aerogelgranulat som var jämnt fördelat i massan, liknande ballasten i traditionella kalkbruk. Liksom för konventionella putsblandningar observerades vissa orenheter såsom obrända kalkkorn, Figur 1b och bruna korn med skarpa kanter, samt sekundärt bildade strukturer såsom rekristalliseringar och runda blåsbildningar. Mängden observerade orenheter är i samma omfattning som för konventionella putsblandningar. Den genomsnittliga ballaststorleken var ca 1,6–2,1 mm och hålrummen ca 2,1–4,4 mm. Beräkningar av ytan av övriga hålrum utan aerogel gav 13–15 % hålrum.

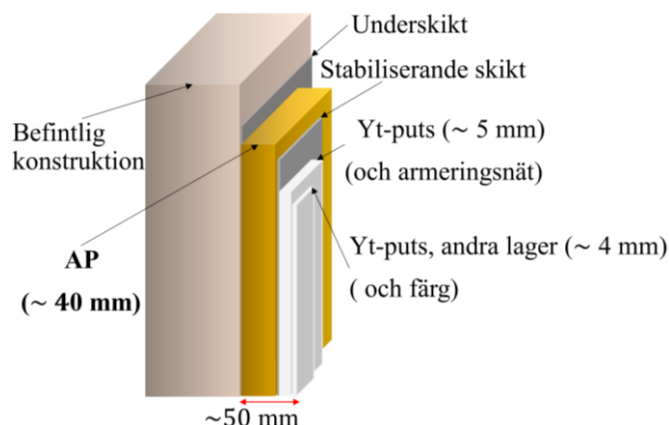


Figur 1. Bilder från polarisationsmikroskop på tunnslipsanalys av den aerogelbaserade putsen. a) Hålrums (mellan röda pilar: 5mm avstånd) och aerogel granulat (vita pilar) som har "smält" ihop med hålrummen. b) Exempel på ett obränt kalkstenskorn (vit pil). Foton: Ole Stilborg (Stilborg, 2022).



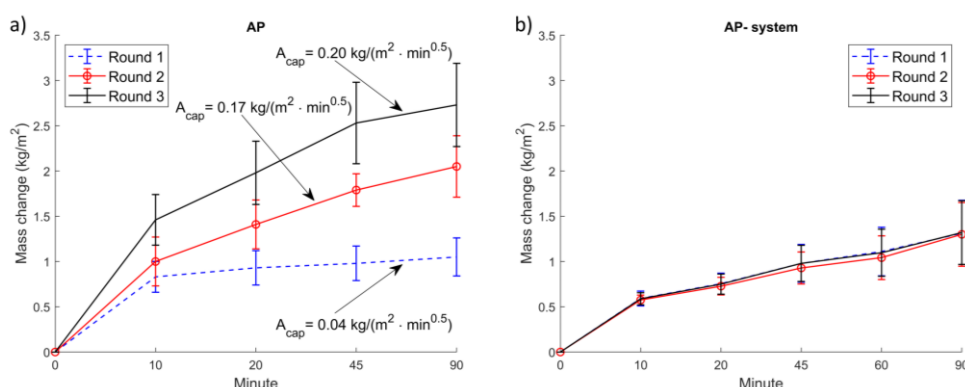
3.2 Laboratiemätningar: fuktupptagning vid olika uppfuktningsscenarier

Detta kapitel presenterar resultaten från de experimentella studierna som genomfördes i laboratorium för att undersöka fuktupptagning och uttorkningsprestandan på materialnivå och för hela putssystemet, Figur 2, under tre olika fuktscenarier [I, II]. För att undersöka kapillärsugnings-egenskaperna mättes fuktupptagningen manuellt under en period om 90 minuter. Mätningarna upprepades tre gånger för att undersöka förändringarna i provens kapilläregenskaper vid upprepade uppfuktning, vilket efterliknar förhållanden som materialen utsätts för i fält vid upprepade regntillfällen under lång tid. Varje provset av material och putssystem innehöll tre identiska provkroppar vardera. Mellan omgångarna torkades proven till deras initiala förhållanden genom uttorkning i rumsklimat (20°C, 50% RF). Andra torkningsförhållanden undersöktes också [I, II].



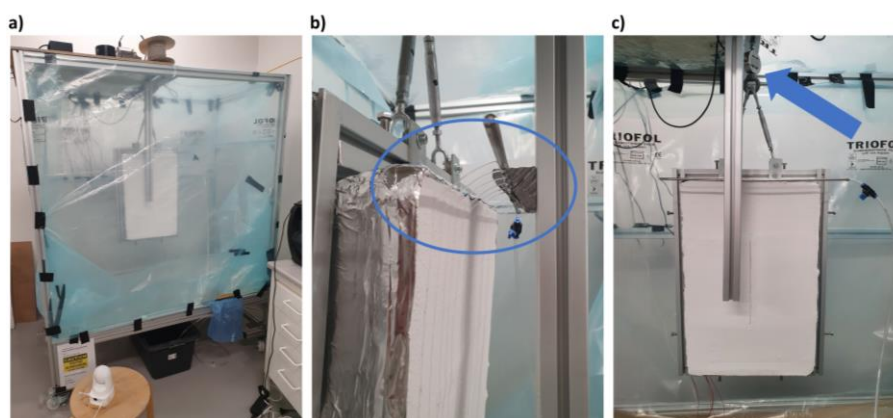
Figur 2. Schematisk illustration av hur ett putssystem med 40 mm aerogelbaserad puts är uppbyggd.

Den uppmätta fuktupptagningen (kg/m^2) under en period av 90 minuter visas på materialnivå, Figur 3a, och för hela putssystem, Figur 3b. Den motsvarande standardavvikelsen ges också för varje mätpunkt. Resultaten representerar genomsnittsvärdena från de tre provkropparna för både material och hela putssystemet. Resultaten indikerar ökad fuktabsorption i materialet på grund av kapillärsugning efter varje omgång av uppfuktning. Den genomsnittliga viktökningen under den första omgången var $1,05 \text{ kg/m}^2$, medan den i den tredje omgången ökade till $2,73 \text{ kg/m}^2$, vilket visar en 2,6-faldig ökning jämfört med den initiala omgången. Dock minskade ökningstakten mellan den andra och tredje omgången. I den tredje omgången var ökningen 1,95 gånger högre än i den andra omgången. För putssystemet avvek massförändringen under 90 minuter i den andra och tredje omgången med mindre än 7% från den första omgången. Dessa resultat indikerar att hela putssystemet, uppvisar en betydligt stabilare prestanda jämfört med endast den aerogelbaserade putsen på materialnivå. Detta är en av anledningarna till att den aerogelbaserade putsen används som en del av ett komplett putssystem (Figur 2) och inte som ett exponerat material i praktiken.



Figur 3. Fuktupptagning för den aerogelbaserade putsen (a) och hela systemet (b) vid tre upprepade omgångar på 90 minuter vardera. På materialnivå är även kapillärsugningskoefficienterna från varje omgång redovisade.

För att mäta fuktupptagningen på hela putssystemet med olika ytegenskaper under regnvattenavrinning vid slagregn användes en nyutvecklad småskalig uppställning, Figur 4 [II]. Flera fuktsensorer placerades på olika djup i putsen för att spåra fukttransporten, och provkroppen hängdes från en lastcell för kontinuerlig vägning och mätning av förändringar i total fukthalt under uppfuktning och uttorkning. Under uppfuktningsfasen fuktades testväggarna kontinuerligt med vatten som rann över ytan för att simulera vattenavrinning vid slagregn. Under denna fas hölls utrymmet stängt för att bibehålla hög luftfuktighet ($90\% \pm 5\% \text{ RH}$), likt fuktighetsnivåerna under regn, och för att minimera avdunstning från de fuktmättade ytorna på proven. Vid uttorkning öppnades utrymmets framsida. Målet med den nya testmetoden är att simulera mer realistiska och lågintensiva regnbelastningar, representativa för vanligt förekommande slagregn i Sverige. Den småskaliga testningen möjliggjorde ökad effektivitet och fler testomgångar jämfört med befintliga standardtester för vattentäthet vid slagregn som kräver längre tid. Dessutom möjliggjorde de implementerade övervakningssystemen kontinuerlig och realtidsövervakning, vilket ledde till snabbare upptäckt av mätfel och avbrott.



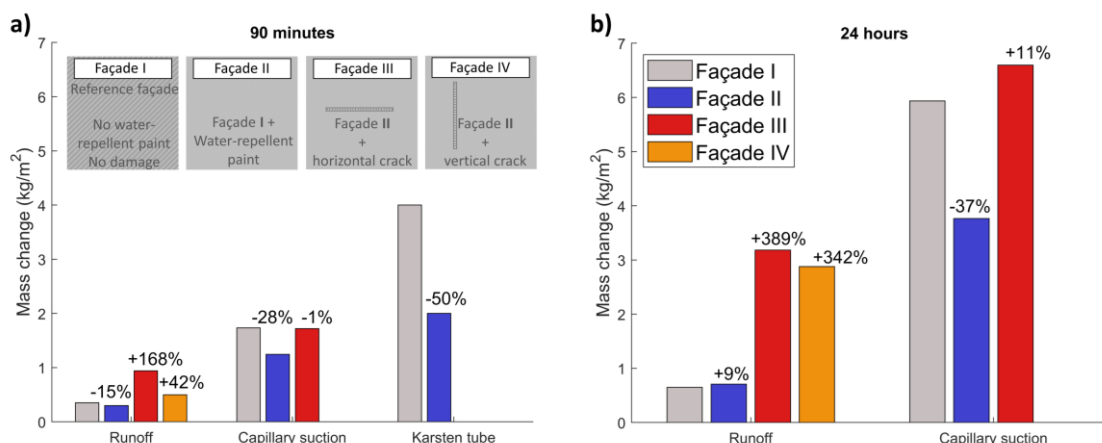
Figur 4. a) Vy från framsidan av med slutet utrymme under uppfuktningsfas som vid uttorkning öppnades. b) Vattenpågjutning från rör vid fast position framför testväggen (blå oval). c) Prov med vertikal ytspricka hängande från lastcellen (blå pil) för kontinuerlig vägning under uppfuktnings- och uttorkningsfasen.



Fyra väggprototyper, fasad I–IV i Figur 5a, tillverkades. Varje prototyp hade olika ytegenskaper fasad I och II var oskadade. Därtill hade fasad II ytbeläggning med en mineralbaserad, genomsläpplig och vattenavvisande färg, medan ytan på fasad I var obehandlad. Två prototyper med inducerade skador tillverkades för att undersöka inverkan av ytsprickor på fuktupptagningen hos putssystemet. På fasad III och IV skapades en horisontell respektive vertikal spricka med en längd på 300 mm, cirka 9 mm djup och $1 \pm 0,5$ mm bred.

Förutom kapillärsugning och vattenavrinning utfördes även Karstenrörstest. Detta test innebär att en glaskupa med en diameter på 30 mm och ett cylindriskt rör med en volym på 10 ml (vattenpelarhöjd 100 mm) användes i testet. Kupan fästes på ytan av provkroppar av putssystemet. Testet simulerade ett övertryck på 1 100 Pa (motsvarande en vindhastighet på 43 m/s vid slagregn). Figur 7 presenterar resultatet för absolut (kg/m^2) och relativ (%) fuktupptagning för fasaderna II, III och IV jämfört med fasad I som används som referens. Tre olika uppfuktningsscenarier redovisas 1) vattenavrinning, 2) kapillärsugning och 3) Karstenrör. Analysen omfattar både kortvarig (90 minuter) och långvarig (24 timmar) uppfuktning.

Bland de olika uppfuktningsscenarierna gav vattenavrinning den lägsta fuktupptagningen för alla fasaderna. För de skadade fasaderna III och IV observerades en fuktupptagning under 24 timmar som var 3–5 gånger högre än för de oskadade fasaderna I och II. Fasad III, med en horisontell spricka, uppvisade den högsta fuktupptagningen av de skadade fasaderna. I kapillärsugningstestet visade fasad II, med oskadad yta och vattenavvisande färg, den lägsta fuktupptagningen. Efter 90 minuter var fuktupptagningen för fasad II 28% lägre än för fasad I, och efter 24 timmar var den 37% lägre. Karstenrörstestet visade att fasad II hade 50% lägre vattenabsorption än fasad I, vilket troligen beror på den vattenavvisande ytan. Efter 90 minuters uppfuktning med Karstenröret var fuktupptagningen för fasad I cirka $4,0 \text{ kg/m}^2$, medan den var cirka $1,7 \text{ kg/m}^2$ för kapillärsugning och $0,35 \text{ kg/m}^2$ för avrinning. Det innebär att uppfuktning med höga tryckskillnader över fasaden resulterade i 2–12 gånger högre fuktupptagning jämfört med lågt eller inget hydrostatiskt tryck över fasaden.



Figur 5. Maximal och relativ fuktupptagning hos fasaderna I–IV under olika uppfuktningsscenarier för 90 minuter (a) och 24 timmar (b). Kapillärsugningstestet genomfördes enbart på fasad 3 av de två skadade fasaderna medan Karstenrörstesterna enbart utfördes på fasad I och fasad II.



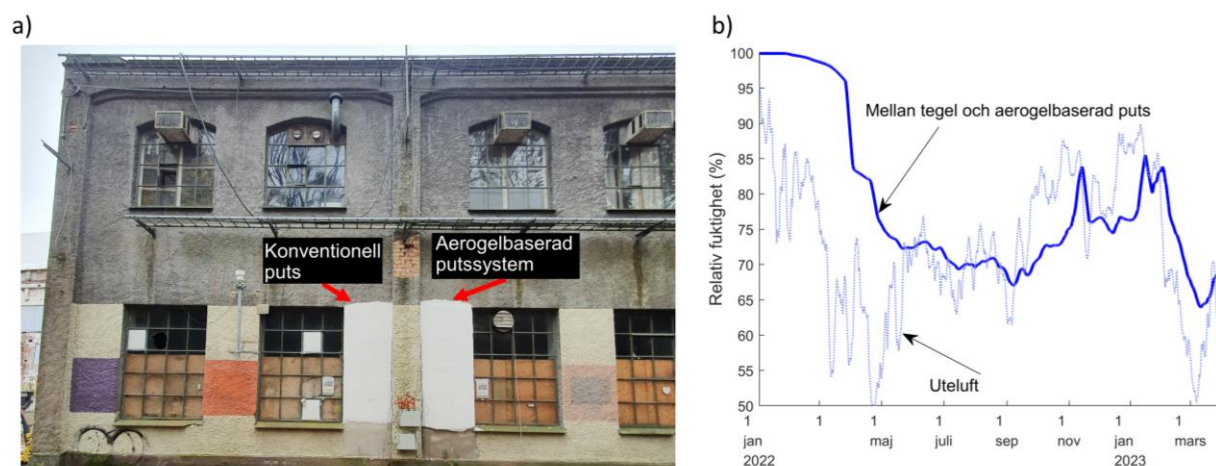
3.3 Fältmätning och hygrotermisk simulering: uttorkning i svenska klimat

Uttorkningsförsöken genomfördes dels genom ett fältförsök som initierats genom tidigare forskningsprojekt, dels genom numeriska hygrotermiska (kopplad värme och fukt) simuleringar. I detta projekt sammanställdes och dokumenterades erfarenheter från fältförsöket samt analyserades hur olika klimatförhållanden och appliceringstiden på året påverkar den tidiga uttorkningsfasen.

3.3.1 Fältmätningar

För att undersöka uttorkningen av putssystemet genomfördes ett fältförsök på en tegelbyggnad från 1921 i Mölndal [III]. En mindre del av fasaden isolerades med cirka 40 mm aerogelbaserad puts, medan en närliggande del täcktes med konventionell puts som referens, se Figur 6a. Fältförsöket övervakades med 15 fukt- och temperatursensorer på olika djup i tegelväggen och putssystemet. Mätningar gjordes även av utomhusluftens temperatur, relativ fuktighet samt regnintensitet. Uttorkningen av byggfukten i testväggarna utfördes under 15 månader (januari 2022-mars 2023).

Mätresultaten visade att putsen torkade ut efter cirka sex månader, se Figur 6b. Fullt uttorkad puts definierades här som att den relativa fuktigheten i väggen nått 70%. Under uttorkningen fördelades fukt från putsen till tegelväggen. Uttorkningen var som väntat långsammare för det tjockare putssystemet med aerogelbaserad puts (50 mm) jämfört med den konventionella putsen (10 mm). Efter att byggfukten torkat ut följde den relativa fuktigheten i väggen förhållandena i utomhusluften. Ingen fuktopptagning noterades således under de första 15 månaderna.



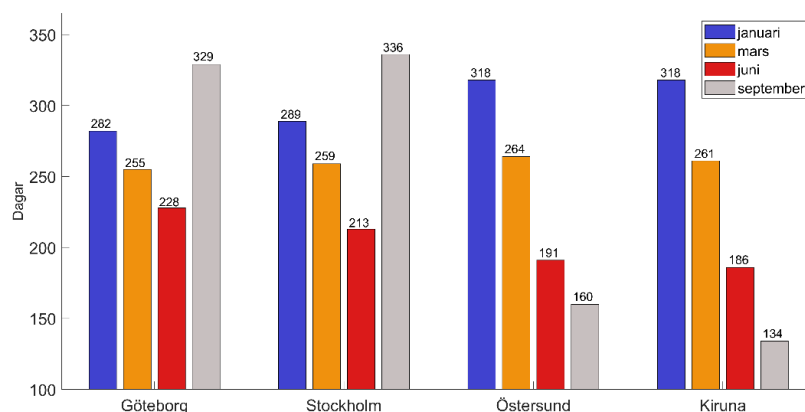
Figur 6. a) Delar av fasaden på en byggnad i Göteborg täcktes med delat putssystemet med aerogelbaserad puts, dels med konventionell puts. Uttorkningen övervakades under de första 15 månaderna efter applicering. b) Relativ fuktighet mellan bärande tegelkonstruktion och den aerogelbaserade putsen, jämfört med utomhusluften.

3.3.2 Hygrotermiska simuleringar

För att undersöka hur olika klimatförhållanden och appliceringstiden på året påverkar den tidiga uttorkningsfasen analyserades applicering under årets fyra årstider för fyra städer (Göteborg, Stockholm, Östersund och Kiruna). Uttorkningsprocessen antogs starta den 1 januari, 1 mars, 1 juni och 1 september för respektive fall. Analysen utfördes med hjälp av hygrotermiska simuleringar i



verifierade numeriska modeller (Wufi 2D-3.4). Det visade sig att uttorkningsperioden kan variera från fyra månader upp till ett år, se Figur 7. Under uttorkningsperioden har putssystemet lägre värmemotstånd till följd av den högre fuktnivån som ökar värmeledningen genom putsen (Tabell 1).



Figur 7. Simulerad uttorkningsperiod i tidigt skede i AP i fyra svenska städer vid de fyra årstiderna.

Tabell 1. Fuktberoende värmeledningsförmåga hos aerogelbaserad puts, uppmätt på Chalmers laboratorium enligt standard ISO 22007-2:2022.

Relativ fuktighet (%)	Värmeledningsförmåga [W/(m·K)]
0	0,040
50	0,040
80	0,045
90	0,050
100	0,400

3.3.3 Resultaterande fuktberoende isoleringsförmåga för regnutsatta fasader

Den ökade värmeledningen genom puts i fasader som är särskilt utsatta för slagregn simulerades i de fyra svenska städerna Göteborg, Stockholm, Östersund och Kiruna. Den fuktberoende värmeledningsförmågan från Tabell 2 användes i beräkningen. I denna analys antogs att ingen extra ytbehandling applicerades på ytan. Simuleringarna visade en ökad fuktupptagningen vilket resulterade i en högre genomsnittlig värmeledningsförmåga på upp till 9% i den aerogelbaserade putsen [IV]. Slutsatsen från beräkningarna är att upptagningen av regnvatten på den yttre ytan bör begränsas för att förbättra den termiska isoleringsförmågan hos putssystemet på fasader som är särskilt utsatta för slagregn.



3.4 Energibesparingspotential på byggnadsbeståndsnivå

För att uppskatta den potentiella energibesparingen för hela byggnadsbeståndet med aerogelbaserade putssystem utfördes beräkningar för en representativ referensbyggnad. Detta resultat skalades sedan upp till byggnadsbeståndsnivå. Analysen baserades på ett typiskt område från 1950-talet med putsade byggnader i Torpa i östra Göteborg (Karim et al., 2020). En förenklad energimodell, baserad på en klumpmodell (en zon med samma inomhustemperatur), användes för att beräkna energibesparingen. Tre scenarier med tilläggsisolering på 40 mm aerogelbaserad puts undersöktes med hänsyn till den förväntade fuktberoende värmeledningsförmågan. Beräkningarna visar att energianvändningen för uppvärmning kan minska med 17–20 kWh/m² väggyta per år för de tre fallen av tilläggsisolering, se Tabell 2. Med antagandena att 1) 90% av den lägsta energibesparingen kan uppnås på byggnadsbeståndsnivå och att 2) 10% av alla putsade byggnader (total fasadyta: 41±27 Mm² (Boverket, 2020)) är möjliga att putsa med det aerogelbaserade putssystemet, skulle energibesparingen vara 63±41 till 74±49 GWh årligen. Detta inkluderar även om alla byggnader utsätts för kraftigt slagregn vilket leder till en högre värmeledningsförmåga på putsen. Denna potentiella besparing utgör en mindre, men inte försumbar, andel av den totala energianvändningen för uppvärmning av bygg- och fastighetssektorn i Sverige, som var 109 TWh år 2021 (Boverket, 2024).

Tabell 2. Energianvändning för referensbyggnaden och årlig energibesparing för hela byggnadsbeståndet om 10% av alla putsade byggnader är möjliga att tilläggsisoleras med det aerogelbaserade putssystemet.

Scenario		Energianvändning för referensbyggnaden		Årlig energibesparing på byggnadsbeståndsnivå (GWh _{år})
		(kWh/m ² _{golvyt}) a)	(kWh/m ² _{väggyta})	
A- Referensfall med 10 mm konventionell puts	Ingen tilläggsisolering [$\lambda=0,9 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$]	247	58	-
B- Tilläggsisolering med 40 mm aerogelbaserad puts	Deklarerad värmeledningsförmåga [$\lambda=0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$]	204	38	74±49
C- Tilläggsisolering med 40 mm aerogelbaserad puts	Fasad skyddad från regnupp-fuktning [$\lambda=0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$]	208	40	66±44
D- Tilläggsisolering med 40 mm aerogelbaserad puts	Fasad utsatt för kraftigt slagregn [$\lambda=0,049 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$]	210	41	63±41



4 Diskussion

Det finns stor potential för energibesparing genom att använda nya och effektivare isoleringslösningar för putsade byggnader som det studerade aerogelbaserade putssystemet. Dessutom kan putssystemet möjliggöra energieffektivisering av kulturhistoriskt värdefulla byggnader vid renovering, samtidigt som byggnadens karaktärsbärande element bevaras.

Till följd av de avvikande egenskaperna för den aerogelbaserad puts jämfört med konventionell puts var det nödvändigt att anpassa standardiserade mätmetoder och att utveckla nya testmetoder. Dessa egenskaper inkluderar bland annat lägre densitet, reducerad mekanisk hållfasthet, ökad bräcklighet och högre hydrofobicitet jämfört med konventionella putsblandningar.

Rekommendationerna och resultaten i denna rapport fokuserar huvudsakligen på utvändigt användning av putssystemet i betong och murverkskonstruktioner. Vid invändig användning av putssystemet behövs fördjupad analys för att säkerställa tillräcklig uttorkning och fuktsäkerhet. Detsamma gäller för applicering på lätta konstruktioner med organiskt material. Särskild uppmärksamhet bör ägnas åt att säkerställa fasadens motstånd mot vatteninträngning vid renovering av befintliga byggnader, särskilt de med redan existerande fuktskador. Studierna visar att det undersökta putssystemet utgör en fuktsäker lösning för utvändigt renovering av betong och murverkskonstruktioner, vilket förhindrar fuktupptagning från regnvatten. Dock krävs ytterligare bedömning för fall med ökad risk för kapillärt stigande fuktighet och saltutfällning. Denna bedömning måste även ta hänsyn till väggens invändiga egenskaper och byggnadens inre klimatförhållanden.

Aerogelbaserad puts är känsligare för avvikelser under blandnings- och appliceringsfaserna på grund av att dess materialegenskaper skiljer sig från konventionella putsbruk. Därför är det avgörande att följa instruktionerna i databladet noggrant för att undvika oönskade materialegenskaper och skador på materialet. Användning av väderskydd med kontroll av temperatur och luftfuktighet är viktigt under appliceringsfasen. För att bibehålla mekanisk integritet och skydda mot skador, sprickor och vatteninträngning genom ojämnheter rekommenderas användning av glasfiberförstärkningsnät i områden utsatta för stora spänningar som fönsterdetaljer och fogar.

Vid bedömning av termisk prestanda och återbetalningstid för putssystemet är det viktigt att beakta den initiala torkningsperioden på cirka 4–12 månader. Aerogelbaserad puts kan öka i termisk ledningsförmåga med upp till 9% på grund av regnvattenupptagning, vilket kan motivera användningen av vattenavvisande färg på fasader som är kraftigt utsatta för slagregn. Valet av vattenavvisande behandling för kulturellt värdefulla byggnader måste dock balanseras mot kraven på att bibehålla fasadens uttryck.

Möjligheterna för användning av materialet i större skala, framförallt i kulturhistoriskt värdefulla områden och byggnader med karaktärsbärande element, bör utforskas vidare genom fler fallstudier. Långtidsegenskaper och kompatibilitet med andra byggmaterial bör undersökas ytterligare för att motivera de högre investeringskostnaderna för aerogelbaserad puts. Miljöpåverkan och möjligheten till återanvändning, återbruk eller återvinning bör också studeras närmare.



5 Slutsatser

Detta forskningsprojekt har primärt fokuserat på att utforska termiska egenskaper och fuktegenskaper hos aerogelbaserade putssystem. Särskilt har deras utvändiga applicering på betong- och murverksstrukturer under svenska klimatförhållanden studerats. Projektet har utvärderat putssystemets fuktupptagning vid olika regnscenarier, tidig uttorkning av byggfukt och förväntad termisk isoleringsförmåga i verkliga fältförhållanden. Dessutom har projektet analyserat hur ytvattenavvisande egenskaper och ytsprickor påverkar fuktupptagning och uttorkningsförmågan hos putssystemet, vilket i sin tur påverkar isoleringsförmågan. Energibesparingspotentialen för renovering och tilläggsisolering av befintliga putsade fasader med aerogelbaserade putssystem har också beräknats på byggnadsbeståndsnivå. Metoderna som använts inkluderade laboratoriemätningar, fältmätningar samt numeriska hygrotermiska och energisimuleringar.

Kapillärsugningstester på enbart den aerogelbaserade putsen visade på en betydande ökning av fuktupptagning med varje upprepad uppfuktnings- och uttorkningscykel. Ökningstakten minskade för varje cykel vilket kan tyda på en varierande prestanda över materialets livslängd om det utsätts för fritt vatten. För hela putssystemet visade motsvarande tester däremot en konstant fuktupptagning.

Pilotstudier i laboratorium utfördes för att bedöma fuktupptagningen hos putssystemet när det utsattes för vattenavrinning i samband med slagregn. Putssystemet visade begränsad fuktupptagning även under långvarig uppfuktning i 24 timmar. Vid närvaro av en ytspricka ökade fuktupptagningen 3–5 gånger på grund av det ökade hydrostatiska trycket på ytan. Resultaten från Karstenrörstester visade också 2–12 gånger högre fuktupptagning under övertryck, medan applicering av vattenavvisande färg minskade absorptionen med upp till 50%.

Fältmätningar av uttorkningen av putsen under 15 månader indikerade att byggfukten i putsen torkade ut inom sex månader. Numeriska hygrotermiska simuleringar visade att uttorkningsperioden är 4–12 månader i svenska klimat. För väggar som är kraftigt utsatta för slagregn ökade fuktupptagningen och därmed den relativa fuktigheten i putssystemet. I förlängningen kan detta leda till en genomsnittlig ökning av värmeledningsförmågan med upp till upp till 9%.

Resultaten från detta forskningsprojekt indikerar att aerogelbaserade putssystem utgör en fuktsäker lösning för utvändigt tilläggsisolering av betong- och murverksstrukturer. På byggnadsbeståndsnivå uppskattas energibesparingspotentialen motsvara ca 63±41 GWh årligen med antagandet att 10 % av de befintliga flerbostadshusen med putsade fasader skulle kunna tilläggsisoleras med aerogelbaserade putssystem. Putssystemet kan skapa nya möjligheter för renovering av kulturhistoriskt värdefulla byggnader utan att avsevärt förändra deras utseende. Vid framtida projektering och utvärdering av putssystemet i fält är det viktigt att beakta den förväntade tiden för uttorkning av byggfukt och ökningen av värmeledningsförmågan till följd av förhöjd relativ fuktighet



6 Publikationslista

6.1 Vetenskapliga tidskrifter

- I. Karim A N, Johansson P, Sasic Kalagasidis A (2022). Increasing Water Absorptivity of an Aerogel-Based Coating Mortar in Subsequent Wetting and Drying. *Gels*, Vol. 8 (12) Special Issue Recent Advances in Silica Aerogel Composites for Thermal Superinsulation, page 764; <http://doi.org/10.3390/GELS8120764>.
- II. Karim A N, Kalagasidis AS, Johansson P (2023). Moisture absorption of an aerogel-based coating system under different wetting scenarios. *Building and Environment*, Vol. 245; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110905>.
- III. Karim A N, Sasic Kalagasidis A, Johansson P (2024). Drying of an aerogel-based coating system in Swedish climates: Field tests and simulations. *Journal of Building Engineering*, Vol. 84; <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108532>.

6.2 Doktorsavhandling

- IV. Karim A N (2023). Wetting and drying of aerogel-based coating mortars in Swedish climates, Doctoral thesis, Ny serie nr 5391, Department of Architecture and Civil Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

6.3 Konferensbidrag

- a. Karim A N, Hagentoft C-E. *Determination of the Effective Thermal Conductivity of Aerogel-based Coating Mortars Using Numerical Simulations- Random Packing*. Proceedings of the 5th International Conference on Building Energy and Environment, Montreal, Canada, July 2022.
- b. Karim A N, Johansson P, Sasic Kalagasidis A. *Duration of Early Stage Drying of Aerogel-based Renders: Field Tests and Simulations in Four Swedish Cities*. Proceedings of the 15th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelope of Whole Buildings, Clearwater Beach, Florida, USA, December 2022.
- c. Karim A N, Sasic Kalagasidis A, Johansson P. *Experimental study on the capillary water absorptivity of an aerogel-based coating mortar under subsequent drying and wetting cycles*. Proceedings of the 13th Nordic Symposium on Building Physics, Aalborg, Denmark, June 2023.
- d. Karim A N, Sasic Kalagasidis A, Johansson P. *A small-scale test setup for measurement of moisture conditions in wall assemblies during runoff wetting and drying*. Proceedings of the 9th International Building Physics Conference (IBPC 2024), Toronto, Canada, July 2024.

6.4 Populärvetenskapliga bidrag

- e. Karim A N, Johansson P, Sasic Kalagasidis A. *Superisolerande puts ett steg närmare verklighet i Sverige – erfarenheter från fältförsök*. Bygg och teknik, nr 2, s. 46–48, 2022.
- f. Karim A N, Johansson P, Sasic Kalagasidis A. *Hållbara putssystem kräver kunskap om uttorkning - erfarenheter från tester av aerogelbaserade putssystem*. Bygg och teknik, nr 2 s. 27-29 2024.



7 Referenser

Boverket (2011). *Teknisk status i den svenska bebyggelsen –resultat från projektet BETSI 2011*. <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2011/betst-teknisk-status.pdf>.

Boverket (2024). *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/>.

ISO 22007-2:2022. Plastics. Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity. Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method.

Karim AN, Johansson P, Kalagasidis AS (2020). *Super insulation plasters in renovation of buildings in Sweden: energy efficiency and possibilities with new building materials*. IOP Conf Ser Earth Environ Sci 2020;588:042050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/4/042050>.

Karim AN, Johansson P, Sasic Kalagasidis A (2022). *Knowledge gaps regarding the hygrothermal and long-term performance of aerogel-based coating mortars*. Constr Build Mater 2022;314:125602. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125602>.

Stilborg (2022). *Analys av modernt putsbruk*. Opublicerad rapport, SKEA Stilborg Keramikanalys.



Runt 35 procent av all energi i Sverige används i bebyggelsen. I forskningsprogrammet E2B2 arbetar forskare och samhällsaktörer tillsammans för att ta fram kunskap och metoder för att effektivisera energianvändningen och utveckla byggandet och boendet i samhället. I den här rapporten kan du läsa om ett av projekten som ingår i programmet.

*E2B2 är Energimyndighetens program där IQ Samhällsbyggnad är koordinator.
Läs mer på www.E2B2.se.*

