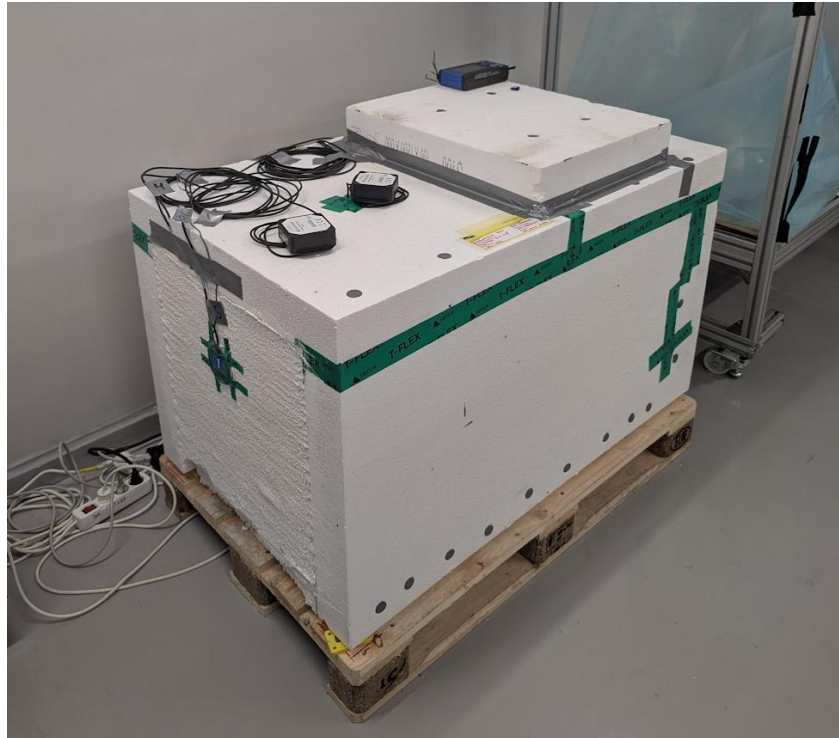




**CHALMERS**



# Analys av värmeflödesmätningar och värmeinträngning i tegelvägg med aerogelputs

Danial Humayun  
Casper Wallvin  
Emil Åkerman

**INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK**  
**ACEX11-VT25-12**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2025  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)

## **Förord**

Denna studie är skriven på institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik vid Chalmers Tekniska Högskola.

Vi vill börja med att tacka vår handledare Ali Naman Karim som har varit till stor hjälp genom hela arbetet tack vare hans kompetens inom området och hans aktiva stöd genom hela processen. Ali har även skrivit ett stort antal rapporter om just aerogelputs som har kommit till stor användning för faktainsamling inom studien. Ett tack till laboratorieansvarig Bruno Oliviera Gonçalves som både har skaffat material och hjälpt oss konstruera "hot-boxen". Vi vill också ge ett speciellt tack till Anton Gustafsson som var med och skrev kandidatarbetet 2024. Anton har lärt oss om mätarna och hur dem fungerar, samt hjälpt oss diskutera och resonera kring resultat under arbetets gång.

## Sammanfattning

Denna rapport undersökte två huvudområden. Det första är hur aerogelputs kan förbättra isoleringsförmågan hos en tegelvägg, samt hur fukten från putsen kan påverka väggens värmetransport under uttorkningsperioden. Det andra området som undersöks parallellt är skillnader och likheter med ett kandidatarbete som genomfördes 2024, där värmefflöde och temperatur genom en tegelvägg utan aerogelputs undersökts. I kandidatarbetet från 2024 uppkom avvikande resultat från de teoretiska modellerna som använts, vilket denna studie undersöker närmare i syfte av att finna eventuella felkällor.

Laborationen utfördes genom att mäta temperatur, värmefflöde och relativ fuktighet på en begränsad tegelvägg med och utan aerogelputs. Ett hölje med EPS skivor byggdes på ena sidan av tegelväggen för att få ett isolerat tomrum (hot-box) där en värmekälla placerades. Mätningarna pågick i ett klimatrums med konstant temperatur (20 °C) och relativ fuktighet (50 %) där tegelväggen utan aerogelputs mättes i 10 dygn och väggen med aerogelputs mättes i 28 dygn. Syftet med de olika tidsintervallen var att den byggfukt som tillkommer vid applicering av aerogelputsen krävde ett längre tidsintervall än 10 dagar för att torka ut. Anledningen till att uttorkning erfordrades var för att man ville vara säker på att man uppnått ett stationärt tillstånd så att jämförelsen mellan mätningen med och utan aerogelputs blev korrekt.

Resultatet av mätningen på tegelvägg utan puts var ett U-värde på 1,1 W/(m<sup>2</sup>\*K) och en tidsförskjutning på cirka 20 timmar, vilket till stor del stämmer överens med teorin (1,14 W/(m<sup>2</sup>\*K) och 20 timmar). För mätningen med aerogelputs blev U-värdet 0,75 W/(m<sup>2</sup>\*K) och tidsförskjutning cirka 25 timmar. U-värdet har här förbättrades gentemot teorin (0,92 W/(m<sup>2</sup>\*K)) och den teoretisk tidsförskjutningen var 25 timmar. Felkällor på detta kan vara att aerogelputsen var ojämnt putsad eller fel uppskattade lambdavärden på materialen. Från studien går det att dra slutsatsen att fukten från putsen inte tränger långt in i väggen och därför har en relativt liten påverkan på väggen i sin helhet. Putsen hann inte uppnå ett helt stationärt tillstånd med omgivningen innan mätningen avslutades, utan hade fortfarande lite byggfukt kvar i sig (52 % relativfuktighet).

Det avvikande resultatet för kandidatarbetet 2024 syftar på att det uppmätta U-värde låg i intervallet 0,6–0,77 W/(m<sup>2</sup>\*K) och det beräknade U-värdet var 0,915 W/(m<sup>2</sup>\*K).

Det som låg bakom avvikelsen i deras fall var att flertalet felkällor hade uppkommit som påverkade resultaten, däribland inte tillräcklig hänsyn till randvillkoren, undermåliga infästningar av sensorerna och otätheter. Sammanfattningsvis tolkas resultatet som att aerogelputsen har en god påverkan på väggens isoleringsförmåga och att mätdata, på de allra flesta plan, stämmer överens med teorin. Det har även påvisats att infästningen av värmefflödesmätarna har stor betydelse för spridning och noggrannhet av mätresultaten.

## Abstract

This study focuses on two main areas. The first one is focused on how aerogel coating mortar (ACM) can improve the insulation of a brick wall, as well as how the moisture from the ACM affects the wall. The second area that is examined is the difference and similarities with the previous year's bachelor's degree project where they only studied the heat flow on a brick wall without ACM. The results from the candidate report of 2024 deviate from the theoretical modules that were used, which this report further investigated with the aim of finding sources of error.

The experiment was conducted by measuring temperature, heat flow and relative humidity on a test wall with and without ACM. A casing with EPS boards was built on one side of the brick wall to create an insulated void (hot-box) where a heat source was placed. The measurements were carried out in a climate room with constant temperature (20 °C) and constant relative humidity (50 %), where the brick wall without ACM measured for 10 days and the wall with applied ACM was measured for 28 days. The purpose with the different time intervals was that the building moisture from the ACM required a longer time than 10 days to dry out. The reason for drying out was to ensure that a steady state was achieved so that the comparison between the measurements of a wall with and without ACM was correct.

The result for the measurements of the brick wall without ACM was a U-value of 1.1 W/(m<sup>2</sup>\*K) and a time shift of 20 hours, which is largely in line with theory (1.14 W/(m<sup>2</sup>\*K) and 20 hours). From the measurement with ACM, the U-value was 0.75 W/(m<sup>2</sup>\*K) and the time shift was 25 hours. The U-value here improved compared to theory (0.92 W/(m<sup>2</sup>\*K)) and the theoretical time shift was 25 hours. Sources of error could be that the ACM was unevenly distributed over the wall or that the materials thermal conductivity were estimated incorrectly. It can also be concluded that the moisture from the ACM does not penetrate far into the wall and therefore has a relatively small impact on the wall in its entirety. The ACM did not achieve a static state with the surroundings before the measurement was completed but still had some moisture remaining in it (52 % relative humidity).

Regarding the deviated results from the bachelor's degree project of 2024, which refers to the fact that the measured value was in the range of 0.6-0.77 W/(m<sup>2</sup>\*K) and the calculated value was 0.915 W/(m<sup>2</sup>\*K). The reason for the deviation was that several sources of errors affected the results, including boundary conditions, inadequate fastenings of the sensors and leakage. In summary, the results are interpreted so that ACM has a good impact on the thermal resistance of the wall and that the measured heat flux, at most levels, agrees with the theory. It has also been shown that the attachment of the heat flow sensors is of great importance for the tolerance of the measurement results.

## Innehållsförteckning

Nomenklatur.....	1
1. Inledning.....	3
1.1 Bakgrund.....	3
1.1.1 Mätteknik.....	3
1.1.2 Kandidatarbete 2024 .....	4
1.2 Syfte .....	4
1.3 Problemformulering.....	4
1.4 Metod .....	5
1.5 Avgränsningar .....	5
1.6 AI användning .....	6
1.7 Disposition .....	6
2. Teori.....	7
2.1 Material .....	7
2.1.1 Tegel.....	7
2.1.2 Aerogelputs.....	7
2.1.3 Expanderad polystyren (EPS).....	8
2.2 Beräkningsteori.....	8
2.2.1 Värme flöde .....	8
2.2.2 Värmekonduktivitet.....	9
2.2.3 Värmelagringskapacitet och tidsförskjutning.....	9
2.2.4 Fukt .....	11
3. Laboration .....	12
3.1 Förklaring till mätinstrumenten.....	12
3.2 Mätning av tegelfasad .....	13
3.2.1 Förberedelser inför första mätning.....	13
3.2.2 Genomförande av första mätning.....	15
3.2.3 Resultat av mätning på tegelvägg .....	15
3.3 Mätning av tegelfasad med aerogelputs.....	18
3.3.1 Förberedelser av andra mätning.....	18
3.3.2 Genomförande av andra mätning.....	20
3.3.3 Resultat av mätning på tegelvägg med aerogelputs .....	21
4. Teoretiska beräkningar .....	26
4.1 Kretsanalys av tegelvägg.....	26
4.2 Kretsanalys av tegelvägg från kandidatarbetet 2024 .....	28
4.3 Tidsförskjutning.....	29
5. Diskussion och resultat .....	30

5.1 Jämförelse av resultat mellan (Alharami, o.a., 2024) och denna rapport .....	30
5.1.1 Jämförelse av de teoretiska resultaten .....	30
5.1.2 Jämförelse av mätmetodiken .....	31
5.1.3 Jämförelse av erhållna mätdata.....	31
5.1.4 Jämförelse av tidsförskjutning .....	36
5.2 Jämförelse av resultat mellan tegelvägg med och utan aerogelputs .....	37
5.2.1 Jämförelse mellan empirisk och teoretisk data för tegelvägg med aerogelputs .....	37
5.2.2 Uttorkning av aerogelputs.....	38
5.2.3 Fuktens påverkan på tegelväggen .....	38
5.2.4 Jämförelse av empirisk data från tegelvägg med och utan aerogelputs .....	40
5.2.5 Jämförelse av tidsförskjutning mellan tegelvägg med och utan aerogel.....	40
5.2.6 Jämförelse av värmeflödesmätarnas infästning på aerogel och tegel .....	41
6. Slutsats .....	43
7. Referenser .....	45
8. Appendix.....	46
8.1 MATLAB kod: Kretsanalys och tidskonstant .....	46
8.1.1 Kretsanalys_Tegelvägg_2025.....	46
8.1.2 Kretsanalys_Tegelvägg_Aerogel_2025 .....	47
8.1.3 Kretsanalys_Tegelvägg_2024.....	48
8.1.4 Kretsanalys_Tegelvägg_Aerogel_2024 .....	49
8.1.5 Tidsförskjutning tegelvägg.....	50
8.1.6 Tidsförskjutning för tegelvägg med aerogelputs .....	50
8.2 MATLAB kod: Analys av mätdata.....	51
8.2.1 Processad rådata från mätning av tegelvägg.....	51
8.2.2 Processad rådata från mätning av tegelvägg med aerogelputs .....	55
8.2.3 Analys av data från fuktsensorer.....	58
8.3 MATLAB kod: Jämförelse av mätdata.....	63
8.3.1 Jämförelse figur, med data från 2025.....	63
8.3.2 Jämförelse figur, med data från 2024.....	67
8.3.3 Tidsförskjutning tegelvägg.....	71
8.3.4 Jämförelse figur, med data från aerogelputs-mätning.....	72
8.3.5 Jämförelse av tidsförskjutning emellan tegelvägg med och utan aerogelputs.....	74
8.3.6 Jämförelse av VFu1's variation .....	76

## Nomenklatur

$A$  = yta mot luften av värmelagrande struktur ( $m^2$ )

$A_e$  = strukturens omslutningsarea

$A_{om}$  = yta mot luften för konstruktionen ( $m^2$ )

$C_p$  = specifik värmekapacitet beroende på material ( $\frac{J}{kgK}$ )

$d_{eff}$  = effektiv värmelagringstjocklek (m)

$d_i$  = tjocklek på respektive materialskikt (m)

$d_p$  = periodiskt penetrationsdjup (m)

$i$  = antal materialskikt

$K_i$  = konduktans för konstruktionsdel ( $\frac{W}{K}$ )

$K_{iso}$  = konduktansen för isoleringen ( $\frac{W}{K}$ )

$K_{kb}$  = konduktansen för köldbryggor ( $\frac{W}{K}$ )

$K_{vägg}$  = konduktansen för tegelväggen i sin helhet ( $\frac{W}{K}$ )

$K_{V1}$  = konduktansen från den insidan till mitten på tegelväggen ( $\frac{W}{K}$ )

$K_{V2}$  = konduktansen från mitten av tegelväggen ut genom sidorna ( $\frac{W}{K}$ )

$K_{V3}$  = konduktansen från mitten till utsidan på tegelväggen ( $\frac{W}{K}$ )

$n = 1$  om det fasta materialet har mycket högre värmekonduktivitet

$n = -1$  om porernas medium har mycket högre värmekonduktivitet

$n$  = luftomsättningar av den inneslutna luften

$\rho * c$  = volymmetrisk värmelagringkapacitet av det värmelagrande materialet ( $\frac{J}{m^3K}$ )

$\rho_a * c_a$  = luftens volymmetriska värmelagringkapacitet ( $\frac{J}{m^3K}$ )

$Q$  = värmeflöde som uppkommer från värmekällan (W)

$R_{se}$  = övergångsmotstånd för utvändig yta normalt:  $0,04 \left( \frac{m^2K}{W} \right)$

$R_{si}$  = övergångsmotstånd för invändig yta normalt:  $0,13 \left( \frac{m^2K}{W} \right)$

$T_e$  = temperaturen på utsidan av tegelväggen ( $^{\circ}C$ )

$T_{inne}$  = temperaturen på insidan av tomrummet ( $^{\circ}C$ )

$T_{mitt\_vägg}$  = temperaturen i mitten av tegelväggen ( $^{\circ}C$ )

$U$  = U-värde för hela strukturen  $\left( \frac{W}{m^2K} \right)$

$V$  = den inneslutna luftens volym ( $m^3$ )

$V_k$  = volym andel för det fasta materialet

$V_p$  = volym andel för porerna

$V_s$  = volym av värmelagrande struktur ( $m^3$ )

$\lambda$  = värmekonduktivitet för det värmelagrande skiktet  $\left( \frac{W}{mK} \right)$

$\lambda_i$  = värmekonduktivitet för respektive materialskikt  $\left( \frac{W}{mK} \right)$

$\lambda_k$  = värmekonduktivitet för det fasta materialet  $\left( \frac{W}{mK} \right)$

$\lambda_p$  = värmekonduktivitet för porernas medium  $\left( \frac{W}{mK} \right)$

$\sigma$  = korrektionsfaktor

$\psi_{kb} * l_{kb}$  = konduktansen för linjära köldbryggor  $\left( \frac{W}{K} \right)$

## 1. Inledning

I dagens samhälle är energieffektiva byggnader av stor betydelse, särskilt eftersom uppvärmning av en tredjedel av byggnadsbeståndet i Sverige fortfarande görs med icke-förnybara energikällor (Boverket, 2025). För att minska energibehovet och minska vår påverkan på klimatet är det nödvändigt att optimera byggnadens energibalans, där klimatskalets energiprestanda spelar en central roll (Petersson, 2018). Många äldre byggnader i Sverige, som byggdes för flera decennier sedan, är inte särskilt energieffektiva. Ofta på grund av lågkvalitativa fönster, brister i tätningar men även på grund av att isoleringsmaterial inte nyttjades i större utsträckning då uppvärmningskostnaderna förr i tiden var små med tanke på de billiga oljepriserna. Att förbättra klimatskalets energiprestanda genom traditionell tilläggsisolering är en möjlig lösning, men detta medför ofta höga kostnader, större vägg tjocklek och förlust av användbar yta. Detta är särskilt problematiskt i stadskärnor, där varje kvadratmeter av boarea är viktigt. Det är även problematiskt vid renovering av historiska byggnader där man vill bevara den ursprungliga arkitekturen. I många fall är det endast tillåtet att isolera invändigt då man inte vill ändra den utvändiga arkitekturen. Detta medför sämre förhållande med hänsyn till fuktsäkerhet på byggnaden som dessvärre oftast har fuktskador redan innan renovationen.

En betydande del av Sveriges flerfamiljshus har putsade fasader, cirka 27 % av fasadarean (Johansson, 2022). Detta gör traditionell tilläggsisolering komplicerad och arbetskrävande. Därför behövs lösningar som är anpassade till putsade fasader och kräver minimala förändringar av väggen. Aerogelputs har visat sig vara ett lovande alternativ, en lösning som kombinerar putsbruk med aerogelpartiklar för att förbättra isoleringen (Johansson, 2022).

Aerogel är ett mycket poröst material som framställs genom att exempelvis kisel utsätts för högt tryck och hög temperatur, vilket driver ut vätska och gas ur hela materialets porsystem ända ner på nanonivå (Johansson, 2022). Det som återstår är ett material som huvudsakligen består av luft, vilket ger goda isoleringsegenskaper. För att producera aerogelputs används samma metodik som för vanligt putsbruk, dock byts en del av eller all sand emot aerogelpartiklar (Karim, Johansson, & Sasic Kalagasidis, 2022). Aerogelputs har en värmeledningsförmåga på 0,03–0,05 W/(m\*K), vilket går att jämföra med konventionella isoleringsmaterial som mineralull eller polyester. Genom att tilläggsisolera en putsad fasad med ett lager aerogelputs kan fasadens energiprestanda förbättras, samtidigt som den minimerar påverkan på byggnadens struktur och utseende.

### 1.1 Bakgrund

För att nyttiggörandet av aerogelputs ska bli så stort som möjligt och för att det ska vara ekonomiskt försvarbart att applicera putsen på en fasad krävs det att man identifiera byggnader som har undermåligt isolerande fasader. För att identifiera dessa fasader krävs det att in-situ mätningar görs då information om vilka material som förekommer i en specifik äldre fasad kan vara obefintlig.

#### 1.1.1 Mätteknik

En metod för att bestämma hur bra energiprestanda en fasad har är att mäta värmeflödet genom en fasad med hjälp av värmeledningsmätare. Dessa placeras på väggens yta och genom att registrera temperaturskillnaden över ett tunt skikt i sensorn kan man få värden på värmegenomgång (W/m<sup>2</sup>) (Hukseflux Thermal Sensors BV, 2025). Metoden är särskilt användbar för att utvärdera energiprestanda i befintliga byggnader. Dock finns det många

faktorer som kan leda till felmätta värden såsom inverkan av solstrålning, vind och även närliggande köldbryggor (Hukseflux Thermal Sensors BV, 2025). Sensorerna måste placeras med särskild hänsyn tagen till alla dessa faktorer. Dessutom kan fasadens värmelagrande förmåga göra att det uppmätta värmeflödet ej korresponderar tydligt med de temperaturfluktuationerna som uppstår. Även fuktinnehållet i väggen kan påverka mätresultatets pålitlighet (Alharami, o.a., 2024). Fuktinnehållet påverkar genom att vatten har mycket högre värmeledningsförmåga än luft (se avsnitt 2.2.2 och 2.2.4) och värmesensorerna kan visa ett betydligt högre värde än vad det skulle ha varit utan påverkan av fuktinnehåll. För en djupgående förklaring på mätinstrumenten, se avsnitt 3.1.

### 1.1.2 Kandidatarbete 2024

2024 bedrevs ett kandidatarbete (Alharami, o.a., 2024) där man bland annat genomförde en mätning av värmeflödet genom en tegelvägg för att beräkna väggens U-värde (se avsnitt 2.2.1 nedan). Resultatet av deras mätning var att det fanns en tydlig skillnad emellan det teoretisk beräknade U-värdet och det uppmätta U-värdet för fasaden. Deras uppmätta värde låg i intervallet  $0,6-0,77 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  och deras beräknade värde var  $0,915 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

Eventuella orsaker till denna differens beskriver de i rapporten kan vara att murbruket i väggen då var ny applicerat och innehöll byggfukt (Alharami, o.a., 2024). Enligt deras rapport framgick det också att isoleringen av "hot-boxen" de konstruerat (se avsnitt 3.2) var undermåligt utförd vilket även det kan ha påverkat resultatet. Ytterligare så hade de även problem med att två av deras sensorer lossnade vilket gjorde att de inte kunde använda all mätdata (se avsnitt 5.1). Då experimentet utfördes inomhus i en labbmiljö utan fönster fanns det ingen inverkan av varken solstrålning och eller vind som kan ändrat resultaten. Däremot så var "hot-boxen" placerad i en icke strikt kontrollerad innemiljö vilket ledde till att mätdata fluktuerade med förändringar i innemiljön. Detta har åtgärdats i denna studie genom att placera "hot-boxen" i ett klimatrum med strikt kontrollerad temperatur och relativ fuktighet på  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  respektive  $50 \%$ .

För att förstå betydelsen av fukten, isoleringen runt väggen och infästningen av sensorerna upprepas nu experimentet efter ett år för att man nu ska kunna vara säker på att murbruket torkat ut helt och att fuktinnehållet är i jämvikt med inomhusmiljön (se avsnitt 3.2 nedan). Samtidigt förbättrades även tätning och isoleringen av "hot-boxen". Nu kan exakt samma experiment upprepas med samma värmeflödessensorer för att kunna jämföra värden och potentiellt få ut värden som ligger närmare det teoretiska samt öka förståelsen kring eventuella felkällor.

## 1.2 Syfte

Syftet med studien är att analysera värmeinträngning och värmelagring i en tegelvägg med och utan aerogelputs. Det ska även undersökas hur värden från mätningarna stämmer överens med teoretiska modeller, vilket kommer kunna avgöra rimligheten i resultaten. Även felkällor och osäkerheter kring mätningarna ska undersökas. Det övergripande målet är sammanfattningsvis att vidga kunskapen inom värmeinträngning, värmelagring och värmeflödesmätning samt undersöka vilken påverkan aerogelputs har på områdena.

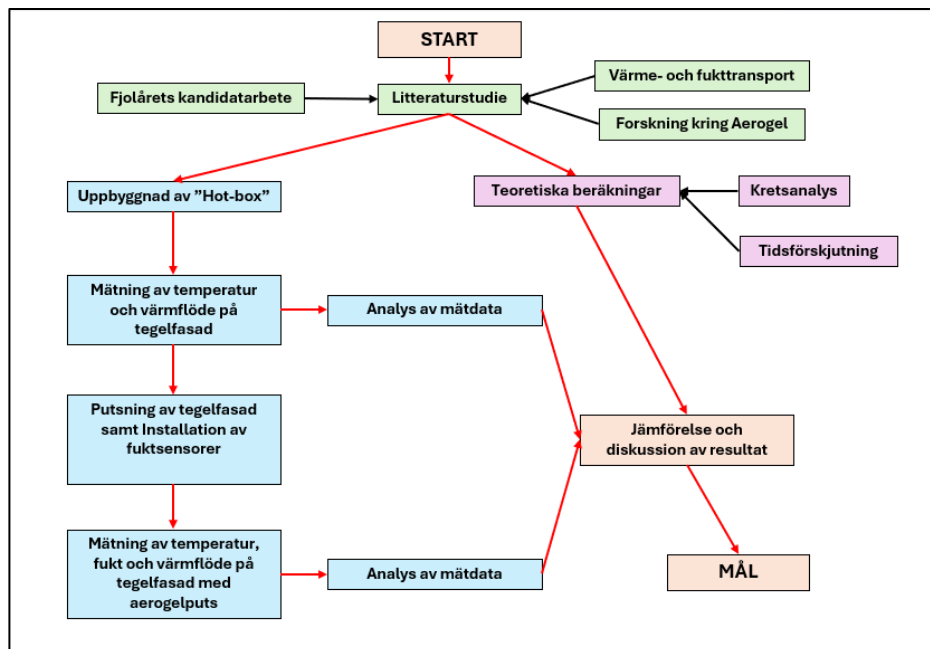
## 1.3 Problemformulering

För att systematiskt genomföra projektet ska syftet delas upp i 5 delmål. Dessa delmål är alltså svar på frågeställningar som tillsammans kan bidra till att vidga den nuvarande kunskapen inom värmeinträngning och värmelagring. Följande frågeställningar kommer undersökas i projektet:

- Hur beter sig värmeledningen i stationärt tillstånd efter applicering av aerogelputs?
- Hur påverkas väggens värmeinträngning vid applicering av aerogelputs?
- Hur påverkas värmeledningen av byggfukten i det initiala skedet vid applicering av aerogelputs?
- Vilka felkällor finns vid värmeflödes mätningar?
- Stämmer empirin överens med teoretiska beräkningar?

## 1.4 Metod

Metodiken som användes för att besvara frågeställningarna bestod av både teoretiska och praktiska moment, se *figur 1*. Litteratur användes för insamling av data och fakta, samt matematiska formler som exempelvis beskriver värmeflödet genom en vägg. De teoretiska beräkningarna som gjorts samt analys av mätdata genomfördes i MATLAB, se appendix för koderna.



Figur 1: Schematisk överblick av projektets genomförande och utveckling. Den gröna färgen representera den initiala faktainsamlingen. Markerat i blått är det som kopplar till den empiriska datainsamlingen, dvs laborationen. Markerat i lila är den teoretiska dataframställningen, dvs beräkningar.

Det genomfördes laborationsmätningar kring temperatur, värmeflöde och fuktinnehåll/flöde genom en tegelvägg baserad på en tillförsel av konstant värmeeffekt. Dessa mätningar gjordes både med och utan aerogelputs. Resultaten jämfördes sedan med varandra, med teoretiska beräkningar och även med resultat från tidigare kandidatarbete. Mätningen på tegelväggen pågick i 10 dygn och mätningen på tegelfasad med aerogelputs skedde över en fyra veckors period för att ett stationärt tillstånd skulle kunna uppnås. Syftet med att mätningen med aerogelputs spänner över en längre tid är för att byggfukten ska hinna torkas ut. Mätningen med aerogelputs påbörjades direkt efter applicering för att även kunna se byggfuktens påverkan på värmeflödet genom väggen.

## 1.5 Avgränsningar

Denna studie beaktar hur fukt samt värmelagring påverkar värmeledning genom en murad tegelvägg med och utan aerogelputs. Studien utförs i kontrollerande klimatförhållanden. Effekter från varierande randvillkor som kan uppkomma i fält eller med andra dimensioner på

provkroppen analyseras därmed inte. Fuktens påverkan beräknas inte teoretiskt, utan kommer endast att analyseras genom att se likheter och skillnader mellan den empiriska datan.

För mätningen av tegelväggen utan aerogelputs kommer uppställningen ske på liknande sätt som i en tidigare studie (Alharami, o.a., 2024), se avsnitt 3. Detta för att man ska kunna jämföra resultaten på ett tillförlitligt sätt och sedan dra en slutsats kring till vilken grad den initiala fuktkvoten efter murning av väggen påverkat resultat.

## **1.6 AI användning**

Artificiell intelligens utnyttjas inte under studien då inga tydliga fördelar med AI för detta arbete var uppenbara.

## **1.7 Disposition**

Rapporten behandlar först ett avsnitt om material och vad för rapporten bedöms som nödvändig beräkningsteori. Därefter följer ett avsnitt om laborationen som inleds med en beskrivning av mätinstrumenten. Laborationsdelen är indelad i två separata delar där vardera del behandlar förberedelser, genomförande samt resultat av respektive mätning. Först behandlas mätningen av en tegelvägg och därefter behandlas mätningen av en tegelvägg med ett skikt av aerogelputs. Nästföljande avsnitt behandlar de teoretiska beräkningar som genomförts och därefter kommer diskussion och resultat där jämförelser av de bearbetade mätresultat och teorin diskuteras. Diskussionsdelen är uppdelad så att resultaten från denna studie och resultaten föregående kandidatarbete jämförs först. Därefter jämförs resultaten av aerogelputsens påverkan på tegelväggen. Avslutningsvis följer ett avsnitt om slutsatser som kan dras från studien.

## 2. Teori

För att förstå hur aerogelputsen påverkar värmeflödet genom tegelväggen kommer denna del redovisa egenskaper för de relevanta materialen samt den teori som ligger till grund för de beräkningarna som återfinns avsnitt 4.

### 2.1 Material

Studien fokuserar som tidigare nämnt på en tegelvägg med och utan aerogelputs till följd av detta följer här nedan en beskrivning av dessa material. I avsnittet följer även en kort beskrivning av materialet: expanderad polystyren, som använts under studien.

#### 2.1.1 Tegel

Som många keramiska material så är tegel uppbyggt av lera som bränns i en ugn vid cirka 1000–1200 °C. Avgörande för teglets egenskaper är dock vilken typ av lera som används. Bland annat så påverkar lerans sammansättning, smältpunkten och därav även den temperatur som teglet bränns vid (Burström, 2021).

Bränningsgraden hos teglet påverkar i sin tur materialets fuktegenskaper det vill säga en hög bränntemperatur ger en låg vattenabsorption och en liten kapillär stighastighet, medan en lägre bränntemperatur ger en högre vattenabsorption och en större kapillär stighastighet (Burström, 2021). Generellt är tegel ett kraftigt kapillärt sugande material medan det samtidigt har en mycket låg hygroskopicitet. Med det menas att tegel inte absorberar några större mängder vattenånga, utan den största delen av fukten lagras kapillärt (Burström, 2021).

Bränningsgraden påverkar inte bara teglets fuktegenskaper utan även teglets termiska egenskaper (Burström, 2021). Ett exempel på detta är att bränningsgraden direkt påverkar teglets densitet som i sin tur är avgörande för materialets värmeledningsförmåga. Relationen mellan bränningsgrad och densitet kan nästan beskrivas linjärt efter det att sintrings temperaturen har uppnåtts. Sintring innebär att lerpartiklarna uppnår en viss temperatur där de börjar smälta samman i kontaktpunkterna (Burström, 2021). Värmeledningsförmågans relation till densiteten kan i sin tur även den beskrivas nästan linjärt, där värmeledningsförmågan ökar med ökande densitet.

#### 2.1.2 Aerogelputs

Som tidigare nämnts är aerogel ett material med mycket hög porositet och mycket låg densitet. Dessa egenskaper leder i sin tur till att aerogel har låg värmeledningsförmåga. När aerogelpartiklar används i putsbruket kommer aerogelputsen ha en värmeledningsförmåga på cirka 0,03–0,05 W/(m\*K) vid torkande förhållanden (Karim, Johansson, & Sasic Kalagasidis, 2022).

Aerogel granulat har mycket låg fuktkvot då den mesta fukten torkas ut på grund av den höga temperatur som behövs under tillverkningsprocessen. Dock kommer putsen som aerogelpartiklar blandas ut med att ha en betydligt högre andel vatten i sig. Som en följd av förhöjda fuktnivåer under tiden putsen torkas ut, uppvisar putsen högre värmekonduktiviteten än de deklarerade värdena (se avsnitt 2.2.2 och 2.2.4). Aerogelputsen brukar appliceras i system kombinerat med flera lager förstärkningsputs med armeringsnät vid behov. Detta görs för att kompensera för materialets låga mekaniska egenskaper. I vanliga fall appliceras aerogelen i ett lager med en total tjocklek på 5 cm (Karim, Johansson, & Sasic Kalagasidis, 2022).

### 2.1.3 Expanderad polystyren (EPS)

EPS är en form av styrencellplast som tillverkas genom att man expanderar polystyren vilket gör att man erhåller ett porsystem med öppna eller slutna porer (Burström, 2021). Porerne är i sin tur fulla av en gas som har låg värmeledning exempelvis luft, vilket gör att materialet lämpar sig som isolering. EPS framställs genom att plastkulor som innehåller kolväte värms upp med hjälp av vattenånga vilket gör att de expanderar (Burström, 2021). De expanderade kulor läggs sedan i formar där de återigen värms upp så att kulorna smälter samman i kontaktpunkterna. Värmeledningsförmågan för EPS varierar emellan cirka 0,03–0,05 W/(m\*K) vilket är ungefär samma intervall som för aerogelputs (Burström, 2021).

## 2.2 Beräkningsteori

I detta avsnitt kommer den beräkningsteorin som är relevant för studien att behandlas, i fokus ligger värmetransport och fuktens påverkan på den samma.

### 2.2.1 Värmefflöde

Värmetransportmekanismer kan delas upp i tre delar, strålning, konvektion och ledning. Gemensamt för ledning och strålning är att det är en bakomliggande temperaturdifferens som driver värmefflödet. Detta skiljer sig från konvektion där det är en skillnad i lufttryck som ger upphov till att luften börjar strömma och för med sig värme (Burström, 2021). I praktisk bemärkelse särskiljer man dock sällan vilken typ av värmetransport som sker genom materialet eller konstruktionsdetaljen. Generellt sett så beaktas samtliga när man pratar om värmekonduktiviteten hos ett material (Burström, 2021).

För att beskriva värmetransporten genom en konstruktion i stationära förhållanden använder man sig ofta av en genomsnittlig värmegenomgångskoefficient  $U$  W/(m<sup>2</sup>\*K).  $U$ -värdet beskriver en genomsnittlig värmeförlust genom konstruktionens klimatskärm (Pettersson, 2018), och beräknas på följande vis:

$$U = \frac{\sum K_i}{A_{om}} \left( \frac{W}{m^2 K} \right) \quad (1)$$

$K_i$  = konduktans för konstruktionsdel  $\left( \frac{W}{K} \right)$

$A_{om}$  = omslutnings area för konstruktionen (m<sup>2</sup>)

$i$  = antal bidragande konduktanser

Konduktansen  $K_i$  (W/K) för en enskild konstruktionsdel med homogena materialskikt kan beräknas på följande vis (Hagentoft & Sandin, 2017):

$$K = \frac{A}{R_{si} + \sum \left( \frac{d_i}{\lambda_i} \right) + R_{se}} \left( \frac{W}{K} \right) \quad (2)$$

$A$  = arean av konstruktionsdelen (m<sup>2</sup>)

$R_{si}$  = övergångsmotstånd för invändig yta normalt:  $0,13 \left( \frac{m^2K}{W} \right)$

$R_{se}$  = övergångsmotstånd för utvändig yta normalt:  $0,04 \left( \frac{m^2K}{W} \right)$

$d_i$  = tjocklek på respektive materialskikt (m)

$\lambda_i$  = värmekonduktivitet för respektive materialskikt  $\left( \frac{W}{mK} \right)$

$i$  = antal materialskikt

### 2.2.2 Värmekonduktivitet

Värmekonduktiviteten i porösa material så som tegel och aerogel består av två delar en värmekonduktivitet för porernas medium samt en värmekonduktivitet för det fasta materialet (Burström, 2021). Detta faktum tydliggör att porositeten och vilket medium som finns i porerna har en stor inverkan på den totala värmekonduktiviteten för materialet. Ett sätt att uppskatta den totala värmekonduktiviteten för ett poröst material är (Burström, 2021):

$$\lambda^n = V_p \lambda_p^n + V_k \lambda_k^n \quad \left( \frac{W}{mK} \right) \quad (3)$$

$V_p$  = volym andel för porerna

$\lambda_p$  = värmekonduktivitet för porernas medium  $\left( \frac{W}{mK} \right)$

$V_k$  = volym andel för det fasta materialet

$\lambda_k$  = värmekonduktivitet för det fasta materialet  $\left( \frac{W}{mK} \right)$

$n = 1$  om det fasta materialet har mycket högre värmekonduktivitet

$n = -1$  om porernas medium har mycket högre värmekonduktivitet

### 2.2.3 Värmelagringskapacitet och tidsförskjutning

Alla material lagrar i viss mån värme och måttet på hur mycket värmeenergi ett material kan lagra kallas normalt värmelagringskapacitet. Värmelagringskapaciteten har enheten  $J/(m^3 \cdot K)$  och definieras som den energimängd det tar att höja en kubikmeter av materialet med en grad Kelvin (Petersson, 2018). Till följd av denna värmelagring så uppstår det en tidsförskjutning emellan det att temperaturen ändras på ena sidan av materialet tills det att temperaturen ändras på andra sidan materialet, denna tidsförskjutning kan beskrivas med den så kallade tidskonstanten (Petersson, 2018). Temperatur skiftning som ger upphov till temperatur gradienten kan bestå av exempelvis en varierande utetemperatur eller ett värmeflödestillskott i form av en startad värmekälla. Tidskonstanten för en byggnad med en periodiskt svängande innetemperatur beräknas som (Ståhl, 2009):

$$t_c = \frac{\rho * c * V_s}{A_e * U + n * V * \rho_a * c_a} \quad (s) \quad (4)$$

$V_s$  = volym av värmelagrande struktur ( $m^3$ )

$\rho * c$  = volymmetrisk värmelagringskapacitet av det värmelagrande materialet  $\left( \frac{J}{m^3K} \right)$

$A_e$  = strukturens omslutningsarea

$U$  = U-värde för hela strukturen ( $\frac{W}{m^2K}$ )

$n$  = luftomsättningar av den inneslutna luften

$V$  = den inneslutna luftens volym ( $m^3$ )

$\rho_a * c_a$  = luftens volymmetriska värmelagringkapacitet ( $\frac{J}{m^3K}$ )

Volymen av den värmelagrande strukturen beräknas som:

$$V_s = A * d_{eff} \quad (m^3) \quad (5)$$

$A$  = area av värmelagrande struktur ( $m^2$ )

$d_{eff}$  = effektiv värmelagringstjocklek (m)

Den effektiva värmelagringstjockleken definieras i sin tur som den del av det värmelagrande skiktet som bidrar till strukturens termiska massa och beräknas som:

$$d_{eff} = \sigma * d_p \quad (m) \quad (6)$$

$\sigma$  = korrektionsfaktor

$d_p$  = periodiskt penetrationsdjup (m)

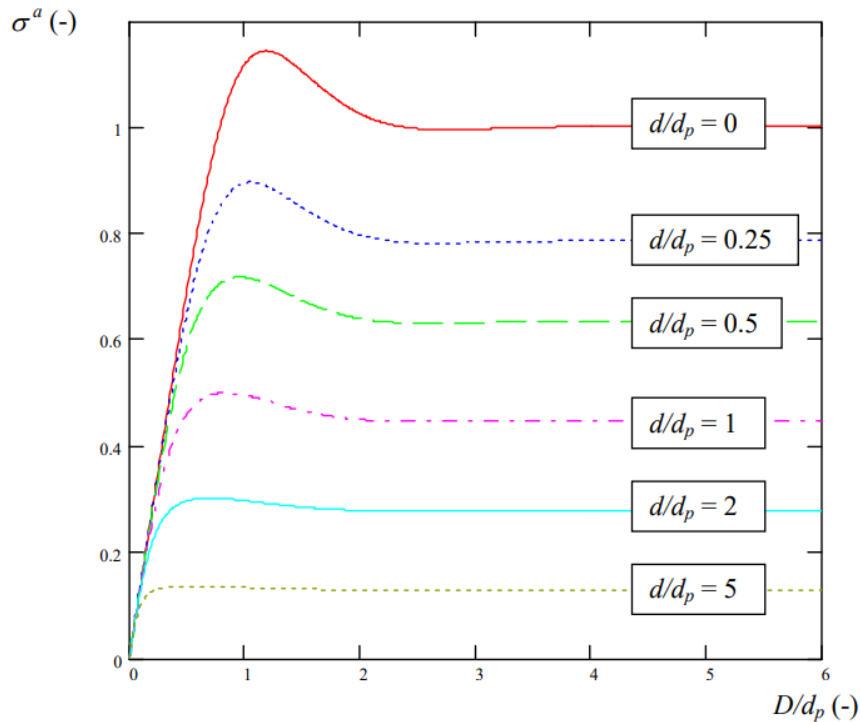
Det periodiska penetrationsdjupet beräknas som (Ståhl, 2009):

$$d_p = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho * c} * \frac{24 * 3600}{\pi}} \quad (m) \quad (7)$$

$\lambda$  = värmekonduktivitet för det värmelagrande skiktet ( $\frac{W}{mK}$ )

$\rho * c$  = volymmetrisk värmelagringkapacitet av det värmelagrande materialet ( $\frac{J}{m^3K}$ )

Korrektionsfaktorn  $\sigma$  fås ur *figur 2* som är hämtad från (Ståhl, 2009).



Figur 2: Korrektionsfaktorn  $\sigma$  som funktion av strukturens tjocklek  $D$  dividerat med det periodiska penetrationsdjupet  $d_p$  (Ståhl, 2009).  $d/d_p$  beskriver olika övergångsmotstånd till det värmelagrande materialet. Där  $d = R_{si} * \lambda$  och är en ekvivalent tjocklek för övergångsmotståndet beskrivet i det värmelagrandedmaterialet (Ståhl, 2009).

#### 2.2.4 Fukt

Fukt spelar en viktig roll i värmetransporten genom byggnadsmaterial, särskilt i porösa material som tegel och aerogelputs. Fukten kan påverka materialets termiska egenskaper genom att ändra värmekonduktivitet och värmelagringskapacitet (Burström, 2021). Detta sker på grund av att vatten har högre värmekonduktivitet än luft vilket i sin tur leder till ökade värmeförluster.

När aerogelputs appliceras på tegelväggen innehåller den en hel del vatten som måste torkas ut. Detta sker bland annat genom diffusion som innebär att fukt rör sig från högre till lägre fuktkvot. Uttorkningen sker också genom kapillärtransport genom aerogelputs (Burström, 2021). När fukten kommer till en materialyta kan konvektionsprocessen börja avdunsta fukt från ytan. Enligt (Karim, Johansson, & Sasic Kalagasidis, 2024) ligger typisk uttorkningstid runt 6 månader för aerogel puts utomhus i svenska orter.

### 3. Laboration

Två olika mätningar av värmeflöde och temperatur, samt en mätning av fukt genomfördes för att få fram data till beräkningar och analyser av U-värde, uttorkningshastighet och värmeinträngning. Som nämnts tidigare är ena mätning på en tegelfasad utan aerogelputs och andra mätning på en tegelfasad med aerogelputs. Mätningen av tegelväggen utan aerogelputs mätte enbart värmeflöde och temperatur, medan mätningen på tegelväggen med applicerad aerogelputs även mätte fukt.

#### 3.1 Förklaring till mätinstrumenten

För att undersöka värmeflödet genom tegelväggen användes Hukseflux flödesmätare HFP01 (Hukseflux Thermal Sensors BV, 2025) och för att mäta temperaturen användes termoelement. Detta är sedan kopplat till HIOKO:s datalogger LR-8431-20. På insidan av tegelväggen, i "hot boxen", fästes Hukseflux mätarna med silikon, då dessa inte behöver plockas bort någon gång under studien. Insidan är också mer kritisk än utsidan, då den utsätts för högre temperatur. Att förbättra infästningen med silikon ansågs vara nödvändigt då två av flödesmätarna lossnade i (Alharami, o.a., 2024). Där var samtliga mätare enbart monterade med silvertejp. På utsidan fästes Hukseflux mätaren endast med T-flex tätningstejp, se *figur 4*. Termoelementen fästes också endast med hjälp av T-flex tätningstejp på ytorna av flödesmätarna, men även fritt hängande i luften för att kunna mäta lufttemperaturen. För exakt placering av temperatur och flödesmätarna, se *tabell 2, 3*.

Sensitiviteten och toleransen varierar beroende på värmeflödesmätarna, vilket används för att beräkna värmeflödet enligt (Hukseflux Thermal Sensors BV, 2025). Värden på sensitivitet och tolerans visas i *tabell 1*. Notera att HF-5 enbart är relevant i avsnitt 3.3 och användes inte under första mätningen.

*Tabell 1: Sensitivitet och tolerans för de olika värmeflödesmätarna som användes. För mätningen på endast tegelvägg användes HF-4 som VFu1, medan för mätningen med aerogel så användes HF-4 som VFiv1 och HF-5 blev VFu1. För mer information om indexering se tabell 2 och 3.*

Värmeflödesmätare	Index	Sensitivitet $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$	Tolerans $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
HF-1	VF1	61,65	1,87
HF-2	VF2	62,59	1,87
HF-3	VF3	62,31	1,87
HF-4	VFiv1, VFu1 (tegel)	62,36	1,87
HF-5	VFu1 (Aerogel)	62,21	1,87

Under mätningen med aerogelputs så genomfördes även mätning av fukt. För detta användes 3 Sahlen fuktgivare som är uppkopplade till Omnisense gateway. Dessa fuktgivare mäter både fuktkvot, relativ luftfuktighet (RF) och temperatur. Dessa är placerade mellan tegelväggen och aerogelputsen, mitt i väggen och fritt hängande i tomrummet. Mätningarna genomförs i ett klimatrum under kontrollerade klimatförhållanden med en konstant temperatur på 20 °C samt konstant relativ luftfuktighet på 50 %.

Värt att notera är att det finns en mätosäkerhet för de olika mätinstrumenten. För Hukseflux flödesmätare finns det under ideala förhållanden en osäkerhet som gör att mätvärdena kan variera med  $\pm 6\%$  (Hukseflux Thermal Sensors BV, 2025). För termoelementen som mäter temperatur finns en osäkerhet på ungefär  $\pm 1\text{ °C}$  eller 0,75 % (Dwyer Omega, u.d.). Bidragande faktorer som påverkar osäkerheterna för mätarna kan vara bland annat kalibrering

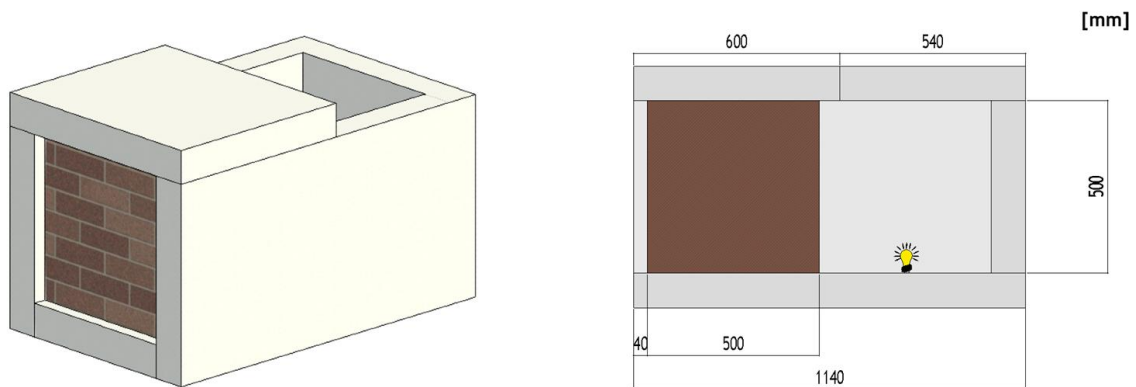
och de omgivande materialens värmeledningsförmåga. Fuktgivarna har en felmarginal på upp till  $\pm 3,5\%$  relativ fuktighet (Omnisense, u.d.).

### 3.2 Mätning av tegelfasad

Första mätningen på tegelfasaden utan aerogelputs gjordes av flera anledningar. Bland annat för att undersöka likheterna med den tidigare rapporten (Alharami, o.a., 2024) och se ifall resultaten överensstämmer, alternativt hur ett års torkning av murbruket har påverkat värmeflödet. Mätningen genomförs också för att se eventuella effekter av de förändrade infästningarna av värmeflödesmätarna och för att se om detta kan ha påverkat den tidigare studiens resultat. Att få mätdata för att kunna se skillnader i hur värmeinträngningen ändras när aerogelputsen appliceras gentemot utan puts är också en anledning till första mätningen.

#### 3.2.1 Förberedelser inför första mätning

För att resultaten ska jämföras med rapporten (Alharami, o.a., 2024) så konstruerades den nya uppställningen för att efterlikna föregående rapportens uppställning. Samma tegelkub användes och även samma typ av isolerings skivor. Tegelkubens sidor var 500 mm och isolerings skivorna är 100 mm tjocka EPS skivor som placerades likt ett rätblock runt och bakom tegelfasaden, se *figur 3*. Skivorna placerades så att ett tomrum (hot-box) bildas med samma volym som fasaden.



*Figur 3: Cad visualisering över hur EPS skivorna är konstruerade runt tegelväggen. Den vänstra bilden visar uppställningen snett framifrån, medan den högra bilden visar ett tvärsnitt över uppställningens sida. Det bruna området representerar tegelväggen och det vit-gråa representerar hot-boxen, där värmekällan placerades.*

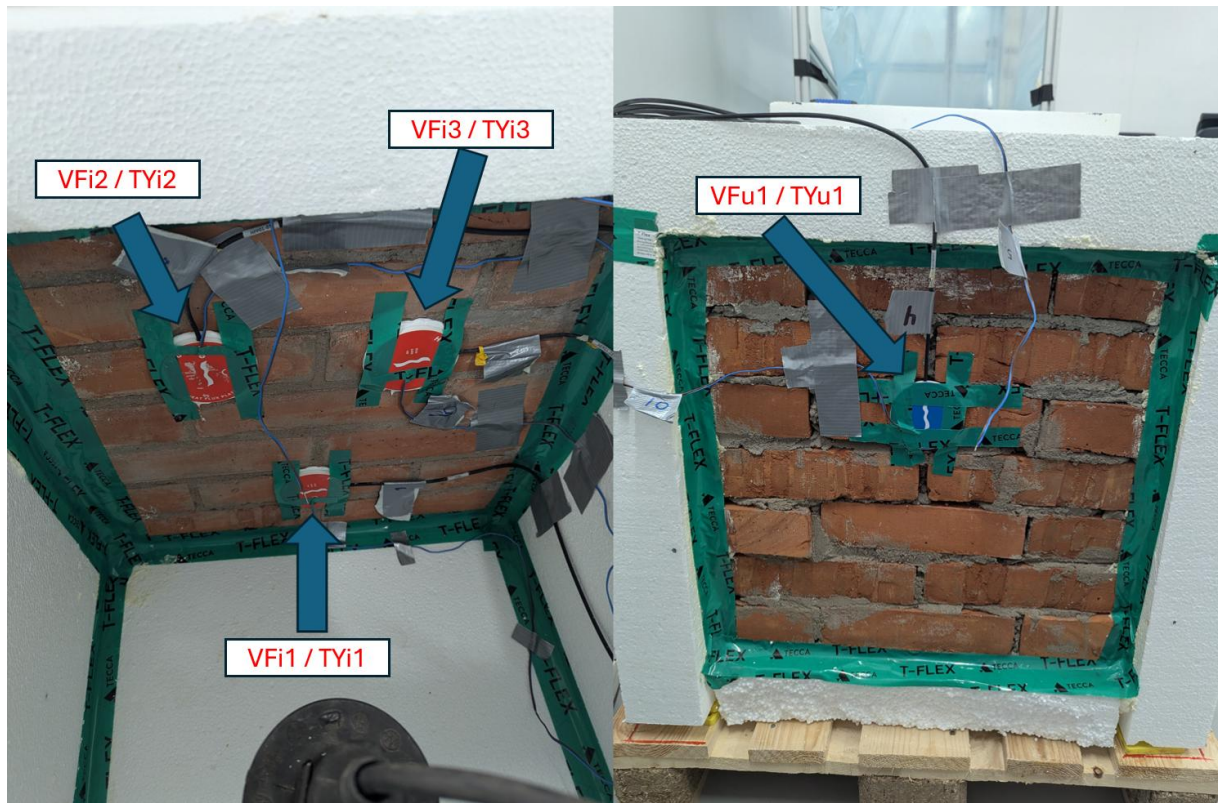
Då ena sidan av tegelkuben är strävare så byggdes ”hot-boxen” mot den släta sidan. Detta var för att flödesmätarna fäster bättre mot en plan yta. EPS skivorna sticker i medel ut 4 cm åt yttersidan på tegelfasaden, då detta ger en gräns för tjockleken på aerogelputsen som kommer att appliceras. När EPS skivorna sätts på plats uppstår springor mellan dem, vilket kan skapa läckage och otätheter och påverka resultatet. För att minska otätheter samt öka isolering mellan EPS skivorna och fasaden används fogskum. För att täta glipor mellan EPS skivor används främst T-flex tätningstejp. På taket av ”hot-boxen” konstruerades en borttagbar lucka genom att limma ihop två lager EPS skivor. Denna lucka behövs för att kunna ha tillgång till ”hot-boxen” mellan mätningarna. Under mätningarna tejpas luckan fast för att minska läckage till så hög grad som möjligt. Mitt i ”hot-boxen” placeras en lampa på 10 W som verkar som värmekälla, se *figur 3*.

När hela uppställningen var konstruerad fästes sensorerna och termoelement som sedan kopplades in i en datalogger. Indexering av respektive mätare och dess ändamål redovisas i *tabell 2*.

Tabell 2: Mätarnas index och respektive sensors uppgift samt position redovisas i tabellen. Index på värmeflödesmätaren beskrivs exempelvis som VFi1 och betecknar Värm-Flödesmätare-Inne-1. Index på termoelement beskrivs exempelvis som TYi1, TLi och betecknar Termoelement-Yta-Inne-1 respektive Termoelement-Luft-Inne.

Index	Mätartyp	Sökt enhet	Position	Placering (se figur 4)
VFi1	Värmeflödesmätare	W/m <sup>2</sup>	Insida	Botten
VFi2	Värmeflödesmätare	W/m <sup>2</sup>	Insida	Mitten
VFi3	Värmeflödesmätare	W/m <sup>2</sup>	Insida	Mitten
VFu1	Värmeflödesmätare	W/m <sup>2</sup>	Utsida	Mitten
TLu	Termoelement	°C	Utsida	Lufttemperatur
TLi	Termoelement	°C	Insida	Lufttemperatur
TYi1	Termoelement	°C	Insida	Yttemperatur på sensor VFi1
TYi2	Termoelement	°C	Insida	Yttemperatur på sensor VFi2
TYi3	Termoelement	°C	Insida	Yttemperatur på sensor VFi3
TYu1	Termoelement	°C	Utsida	Yttemperatur på sensor VFu1

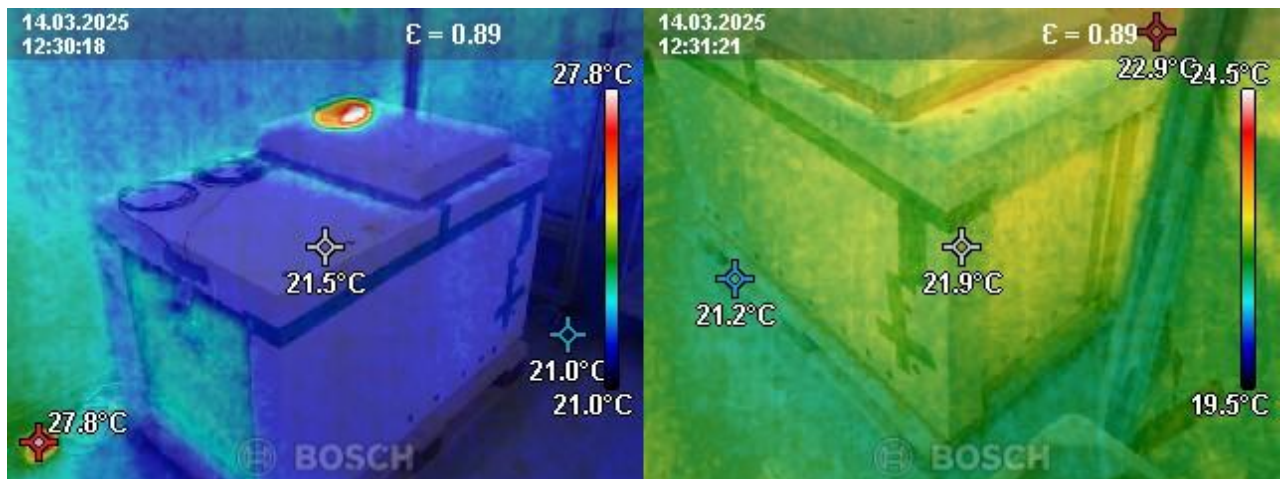
I figur 4 visas det var de olika beteckningarna från tabell 2 befinner sig. På insidan av tegelfasaden fästes tre flödesmätare med varsitt termoelement, medan det endast placerades en värmesensor på utsidan av fasaden, se figur 4. Två termoelement som mäter lufttemperaturen tejpades även fast, en på insidan av tomrummet och en på utsidan framför tegelväggen. Efter detta stängdes luckan till hot-boxen, värmekällan sattes på och mätningen påbörjades.



Figur 4: Vänster: Sensorernas placering på insidan med visualisering till de olika portarnas placering, Höger: Sensors placering på utsidan. TLu och TLi mäter lufttemperatur och är placerad i luften på varsin sida om tegelväggen.

### 3.2.2 Genomförande av första mätning

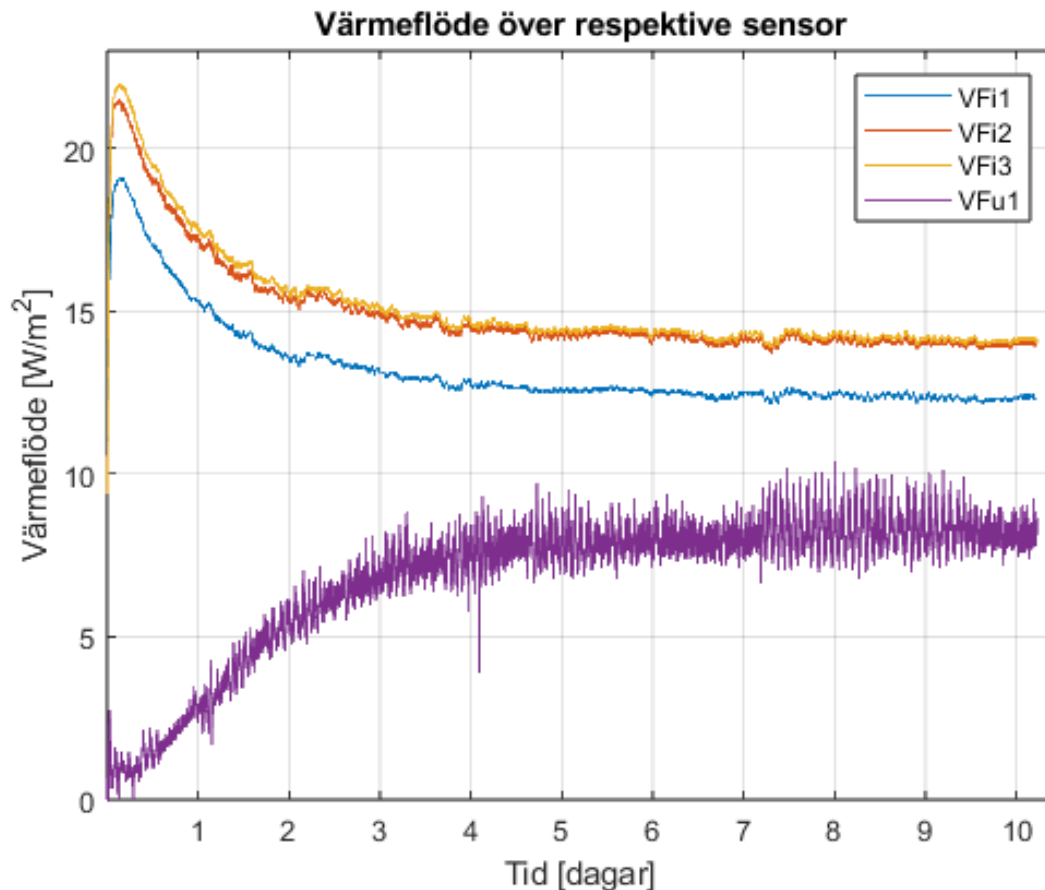
Mätningen av tegelväggen pågick i 10 dygn för att uppnå ett stationärt värme flöde genom väggen. Under mätperioden användes även en värmekamera för att visualisera uppkomsten av köldbryggor och eventuellt luftläckage, se figur 5. Detta användes för att ytterligare täta "hot-boxens" lucka innan nästa mätning skulle påbörjas, se avsnitt 3.3.1.



Figur 5: Bilder från en värmekamera på uppställningen för att visa på vart de oönskade värmeförlusterna inträffar. Det syns att otätheter främst uppkommer runt locket på "hot-boxens" tak.

### 3.2.3 Resultat av mätning på tegelvägg

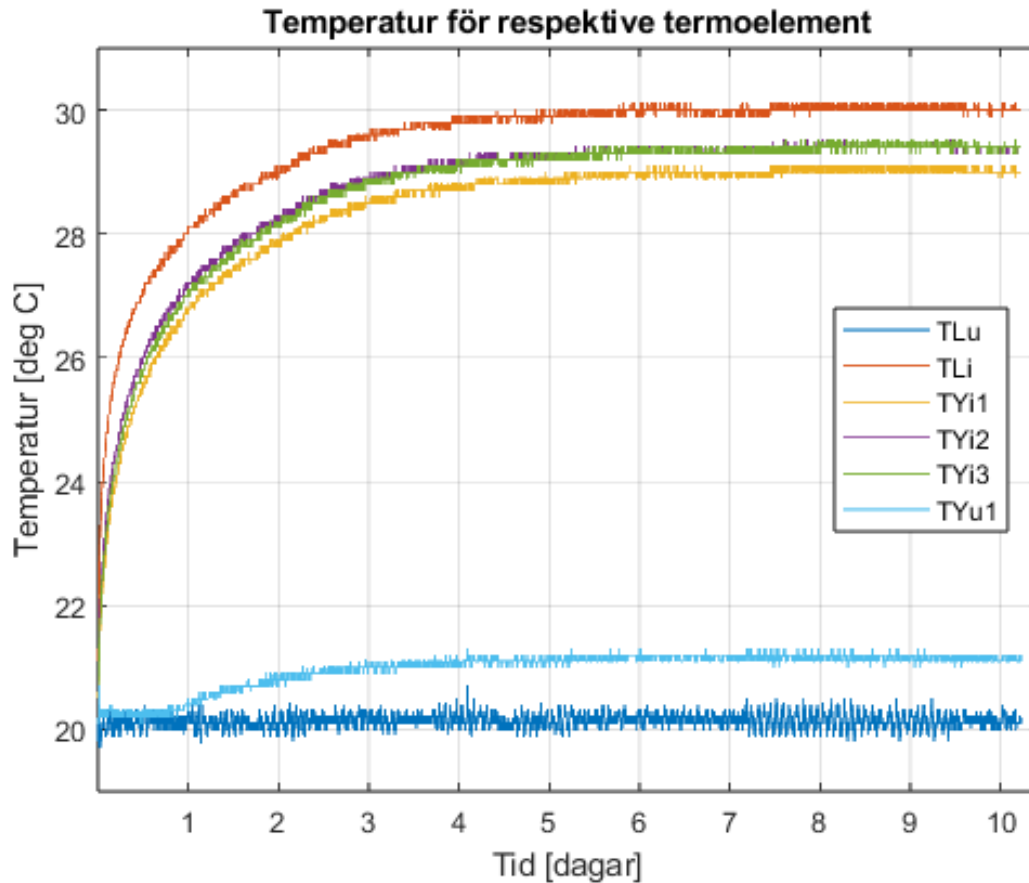
Mätvärdena från tegelväggen visas nedan där figur 6 är värmeflödet ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).



Figur 6: Rådata av värmeflödet genom tegelväggen under 10 dygn (se appendix 8.2.1). Respektive mätare förklaras i tabell 2.

Det går att se hur samtliga mätare visar att värmeflödet rör sig mot ett stationärt tillstånd, då kurvorna tydligt planas ut desto längre mätningen pågår. Efter ungefär 4 dygn har värmeflödet stabiliserat sig och flödet varken ökar eller minskar märkbart. Figuren visar att VFi1 till VFi3, (som är placerade på insidan av uppställningen), stabiliserar sig på 13–14  $\text{W/m}^2$ . VFu1 som sitter på utsidan av tegelväggen stabiliserar sig runt 8  $\text{W/m}^2$ . Det är värt att notera att amplituden på VFu1 är större än för övriga flödesmätare.

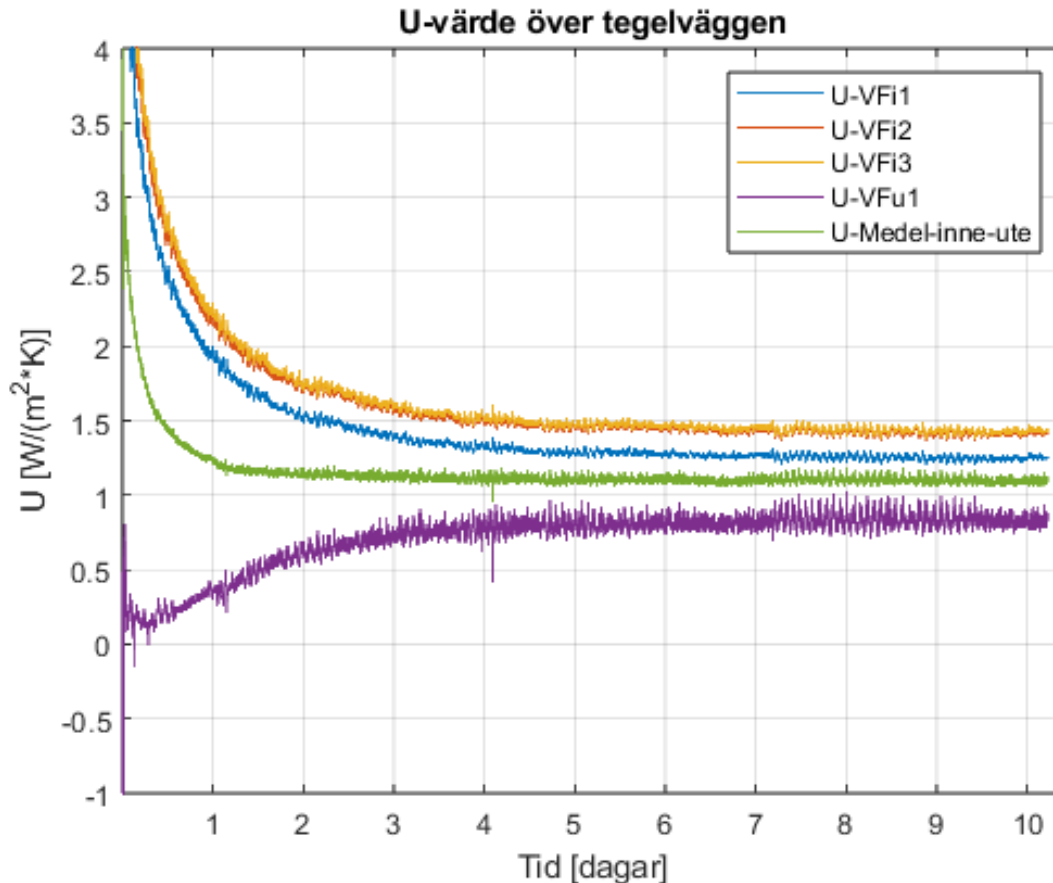
Mätvärdena för temperaturvariationen ( $^{\circ}\text{C}$ ) visas i figur 7.



Figur 7: Rådata av ytemperaturen på tegelväggen, samt lufttemperaturen (se appendix 8.2.1). Respektive mätare förklaras i tabell 2.

För temperaturen kan man se två distinkta områden. TLi till TYi1 befann sig på insidan av uppställningen och visar därför högre värden gentemot TLu och TYu1 som satt på utsidan. TLi mätte specifikt lufttemperaturen på insidan och är därför något högre i jämförelse med de övriga temperaturerna från insidan. Det går att avläsa att ytemperaturen på insidan i ”hot-boxen” var 29 °C, medan lufttemperaturen på samma sida var 30 °C. För utsidan var ytemperaturen ungefär 21 °C, medan lufttemperaturen på utsidan höll sig på 20 °C.

I figur 8 visas U-värdet för de olika mätarna, vilket beräknades genom att dividera värmeflödet som erhålls från sensorerna (se figur 6) med temperaturdifferensen som uppmättes på de bägge sidorna av tegelväggen (se appendix 8.2.1).



Figur 8: Beräknat  $U$ -värde på tegelväggens in och utsida med mätdata (se appendix 8.2.1). Även  $U$ -medel för hela väggen är beräknad och visas i figuren. För att beräkna  $U$ -medel används ekvation 8.

Värdena för  $U$ -inne ligger runt  $1,25 - 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , medan värdena för utsidan hamnade på  $0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . För att beräkna  $U$ -värdet för hela väggen togs medelvärdet av mätarna på insidan och mätaren på utsida:

$$U_{\text{Medel\_inne\_ute}} = \frac{\frac{U_{VFi1} + U_{VFi2} + U_{VFi3} + U_{Vfu1}}{3}}{2} \quad (8)$$

Detta resulterar i att  $U$ -medel ligger på runt  $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  (se appendix 8.2.1).

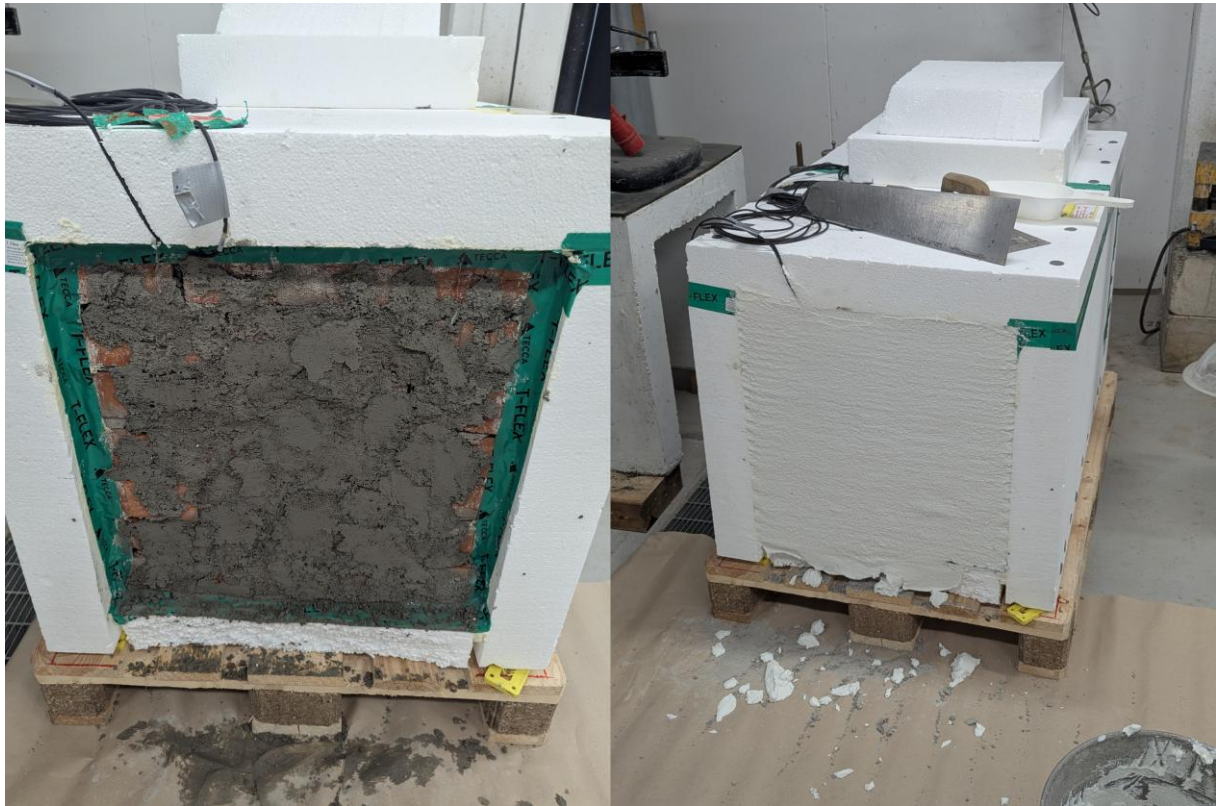
### 3.3 Mätning av tegelfasad med aerogelputs

Den andra mätningen undersökte värmeflödet genom en fasad med aerogelputs, men här mättes även fukttransporten. I denna mätning fästes också en flödesmätare och fuktsensor mellan tegelväggen och aerogelputsen (se figur 10). Det placerades också en fuktsensor i mitten av tegelväggen samt en inne i ”hot-boxen”. Detta ger en bättre bild över hur uttorkningsprocessen går till och även hur värmeflödesgradienten i väggen ser ut.

#### 3.3.1 Förberedelser av andra mätning

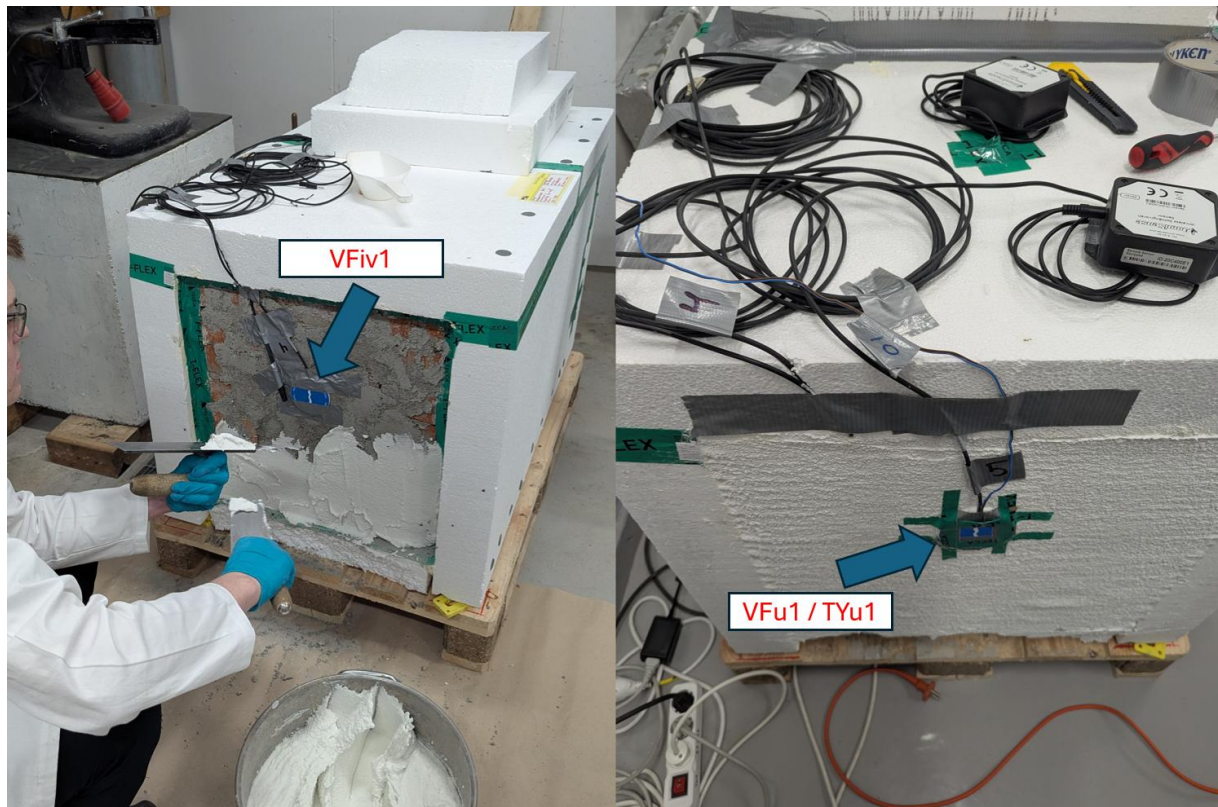
Processen innan aerogelputs applicering involverade några förberedelser. Först applicerades ett tunt lager med Rajasil SPB (Heck Wall Systems, 2016), en sorts primer, på tegelväggens yta för att säkerställa god vidhäftning. Primern läts sedan torka i 18 timmar, se figur 9. Fukt och värmesensorn tejpades fast på väggen innan appliceringen av aerogelputsen, med syfte att kunna mäta fukt, temperatur och värmeflöde mellan teglet och putsen.

Mitt i väggen borrades det även ett hål för att kunna placera en fuktmätare med syfte att kunna få mätdata inifrån väggen. Tätningen runt omkring fuktmätaren gjordes med hjälp av mineralull och tejp.



Figur 9: Vänster: Bild på primern, Höger: Bild på det färdiga resultatet av applicerad aerogelputs med tjocklek på ca 4 cm.

Efter detta tillverkades aerogelputsen enligt instruktioner från databladet (Heck Wall Systems, 2021). Putsen applicerades i ett cirka 40 mm tjockt lager och slätades till, se figur 9. Aerogelputsen lät torkas i 3 dygn. När aerogelputsens yta var torr fästes övriga sensorer fast på samma ställe som innan. Otätheterna som syntes i figur 5 åtgärdades ytterligare genom mer tejpning och mätningen påbörjades, se figur 10.



Figur 10: Vänster: Applicering av aerogelputs över flödesmätaren och fuktgivaren, Höger: Placering över mätarna vid putsen. Övriga mätare befinner sig på samma position som visats innan, se figur 4.

### 3.3.2 Genomförande av andra mätning

Mätningen genomfördes genom att samtliga värmesensorer och termoelement kopplades in i en datalogger. Indexering av respektive mätare och dess ändamål redovisas i *tabell 3*. Notera att det finns en viss skillnad från *tabell 2* då det i denna mätning befinner sig en värme-flödesmätare i skiktet mellan tegelväggen och aerogelputsen. Fuktsensorerna kopplades till routern och laddar upp data till molnet.

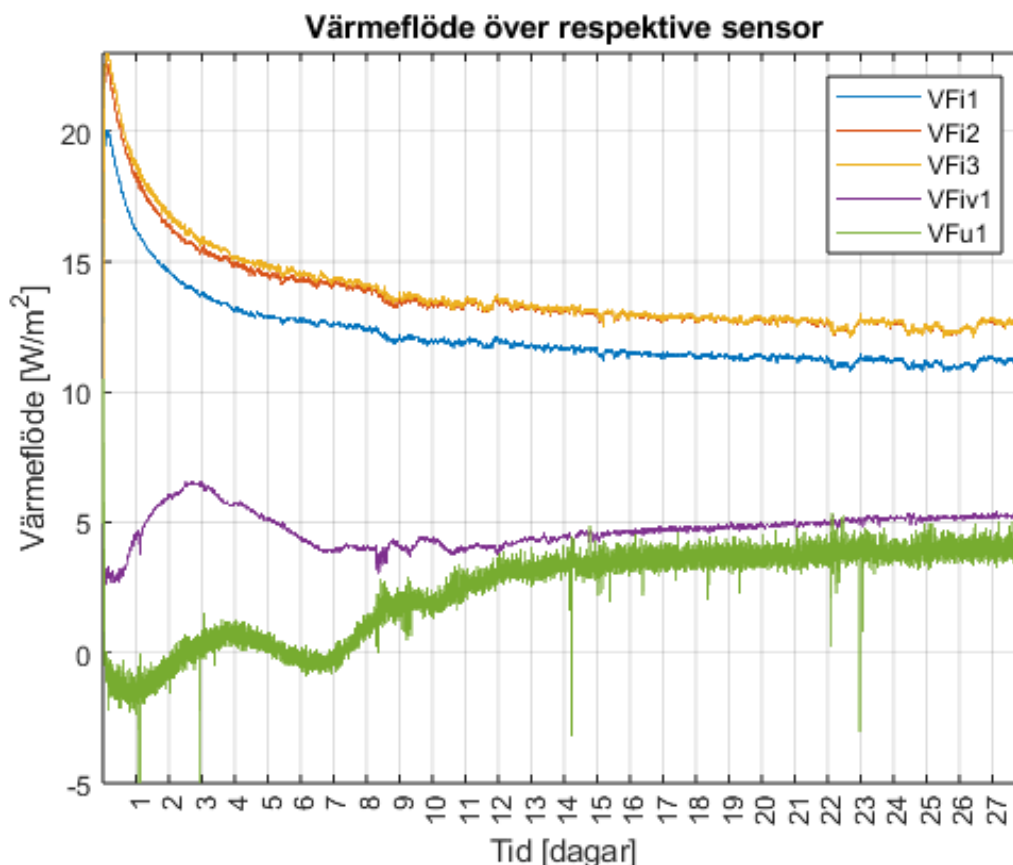
*Tabell 3: Dataloggerens portar och respektive sensors uppgift samt position redovisas i tabellen. Index på värme-flödesmätaren beskrivs exempelvis som VFi1, VFiv1 och betecknar Värm-Flödesmätare-Inne-1 samt Värme-Flödesmätare-inuti-vägg-1. Index på termoelement beskrivs exempelvis som TYi1, TLi och betecknar Termoelement-Yta-Inne-1 respektive Termoelement-Luft-Inne.*

Index	Mätartyp	Sökt enhet	Position	Placering (se figur 4 och 10)
VFi1	Värme-flödesmätare	W/m <sup>2</sup>	Insida	Botten
VFi2	Värme-flödesmätare	W/m <sup>2</sup>	Insida	Mitten
VFi3	Värme-flödesmätare	W/m <sup>2</sup>	Insida	Mitten
VFiv1	Värme-flödesmätare	W/m <sup>2</sup>	Inuti väggen	Mitten
VFu1	Värme-flödesmätare	W/m <sup>2</sup>	Utsida	Mitten
TLi	Termoelement	°C	Insida	Lufttemperatur
TYi1	Termoelement	°C	Insida	Ytemperatur på sensor VFi1
TYi2	Termoelement	°C	Insida	Ytemperatur på sensor VFi2
TYi3	Termoelement	°C	Insida	Ytemperatur på sensor VFi3
TYu1	Termoelement	°C	Utsida	Ytemperatur på sensor VFu1

Värmeffödesmätningen pågick i 28 dygn, tills dess att både fukt och temperaturen närmade sig ett stationärt tillstånd. Notera att fuktsensorerna startades 3 dygn innan värmekällan och värmeffödesmätningen det vill säga direkt efter att aerogelputsen applicerats (se figur 15).

### 3.3.3 Resultat av mätning på tegelvägg med aerogelputs

Mätvärdena för tegelvägg med applicerad aerogelputs visas nedan, figur 11 visar värmeffödet ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

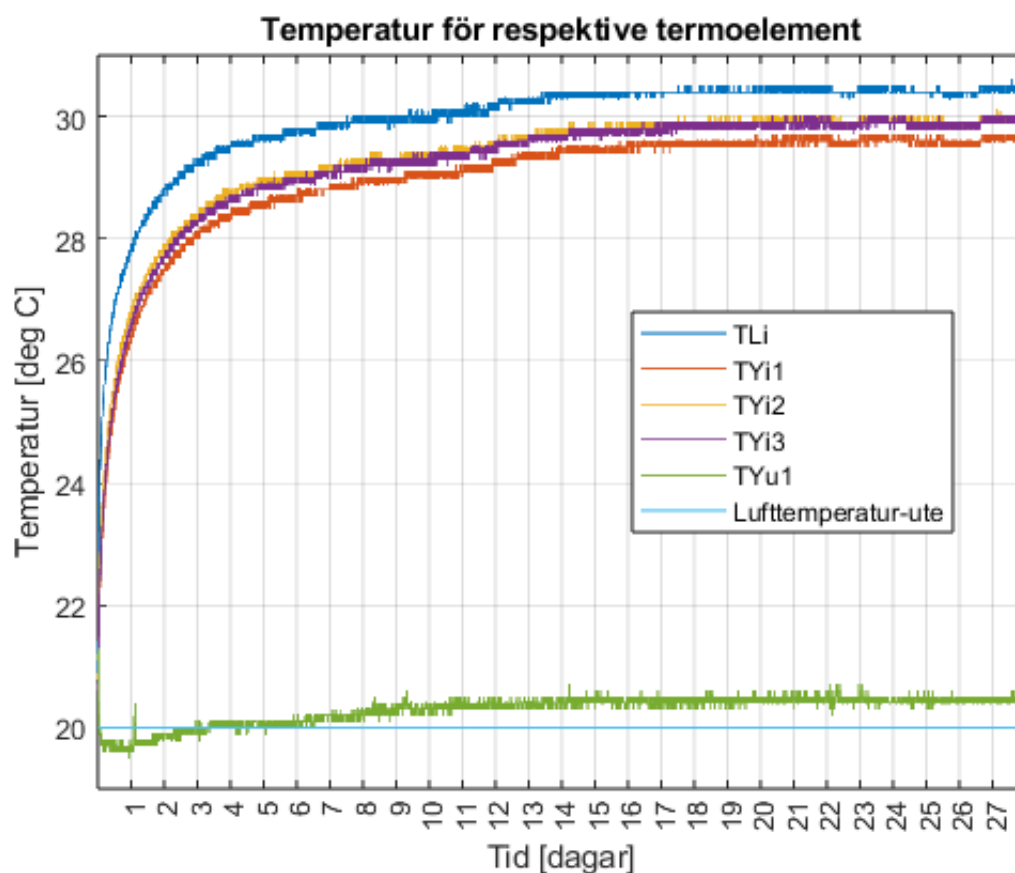


Figur 11: Rådata av värmeffödet genom tegelväggen med aerogelputs under 28 dygn (se appendix 8.2.1). Respektive mätare förklaras i tabell 3.

Här syns det att alla mätare går mot ett stationärt tillstånd, det vill säga värmeffödet blir stabilt. För VFi1 till VFi3, (insidan av tomrummet), uppstår ett relativt stationärt tillstånd efter ungefär 25 dygn. Flödet in i väggen är då mellan  $11\text{--}12,5 \text{ W}/\text{m}^2$ .

För VFiv-1, som sitter mellan aerogelputs och tegelvägg och har stor påverkan av fukt, så förändras värmeffödet som mest i början. Det går att se hur flödet först stiger och hamnar på ungefär  $7 \text{ W}/\text{m}^2$  runt dygn 3, medan det sedan sänks till  $4 \text{ W}/\text{m}^2$  vid dygn 7. Värmeffödet stiger sedan långsamt och landar på strax över  $5 \text{ W}/\text{m}^2$  när mätningen avslutades. VFu1 som även den påverkades av fukten från en uttorkande aerogel hade ett vågigt beteende i början då värmeffödet både ökar och minskar. Men även den närmade sig ett stationärt flöde runt  $4 \text{ W}/\text{m}^2$ .

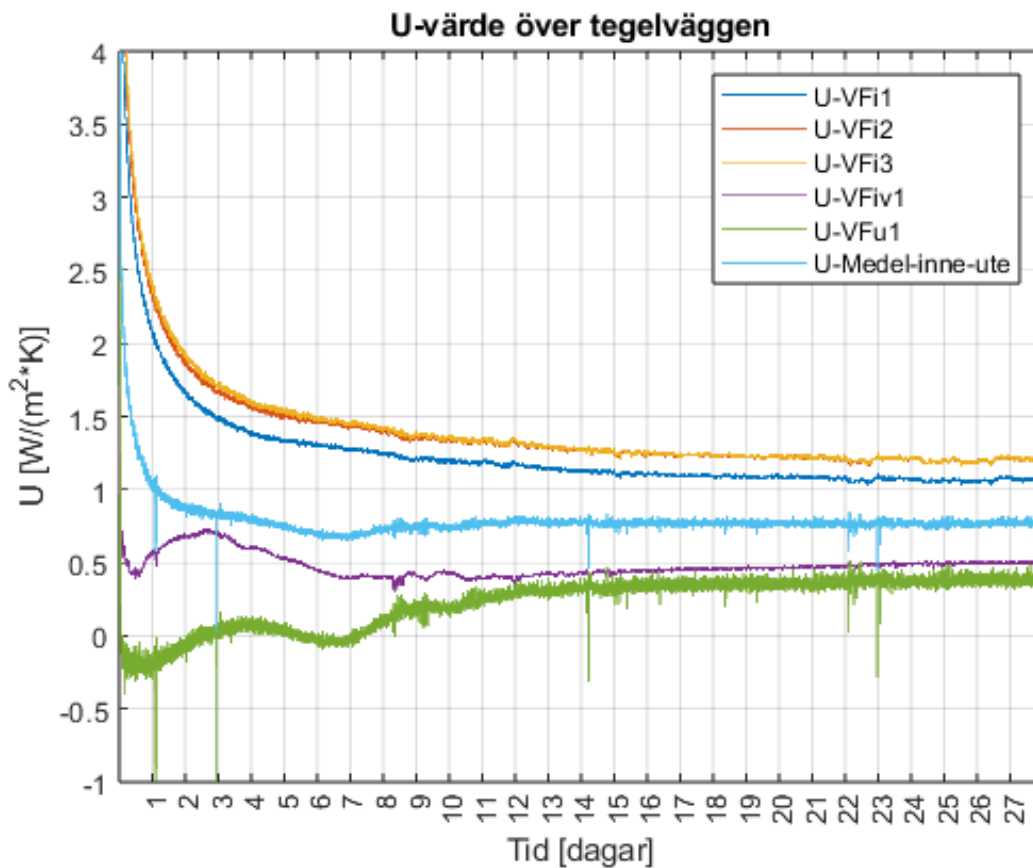
I figur 12 nedan visas temperaturförändringen ( $^{\circ}\text{C}$ ) över tid:



Figur 12: Rådata av yttemperaturen på väggen med applicerad aerogelputs, samt lufttemperaturen i "hot-boxen" (se appendix 8.2.1). Respektive mätare förklaras i tabell 3.

Lufttemperaturen på insidan (TLi) av tomrummet uppgick till  $30,5^{\circ}\text{C}$ , medan yttemperaturerna mot tegelväggen (TYi1 till TYi3) uppgick till något lägre  $29,5\text{--}30^{\circ}\text{C}$ . På utsidan ser man att det är betydligt lägre temperaturer. Det raka horisontella sträcket ligger på  $20^{\circ}\text{C}$  och representerar temperaturen i klimatrumsrummet som har mycket små variationer (se figur 7), detta gör att den antas konstant i denna mätning. Yttemperaturen på utsidan av aerogelputsens (TYu1) ligger på runt  $20,5^{\circ}\text{C}$ . Samtliga mätare visar att temperaturen har uppnått, eller är mycket nära att uppnå stationärt tillstånd.

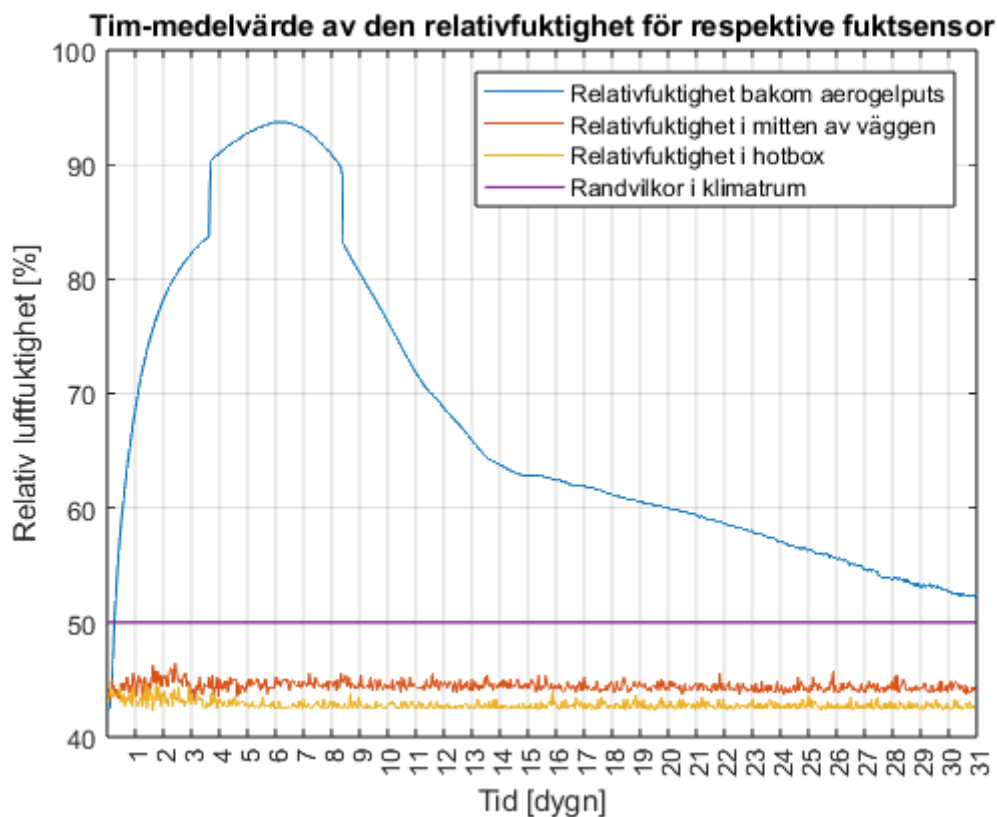
I figur 13 nedan visas det beräknade U-värdet. Beräkningarna för dessa är detsamma som för figur 8 (se appendix 8.2.1).



Figur 13: Beräknat U-värde på väggens in och utsida med applicerad aerogelputs utifrån mätdata (se appendix 8.2.1).

I figur 13 går det att se att alla mätare på insidan rör sig på ett förutsägbart sätt, medan de två yttersta mätarna som påverkades mest av den fuktiga aerogelputsen, ger värden som gör att U-värdet varierar mycket i början. U-värdet på insidan hamnar på mellan 1,05–1,25  $W/(m^2 \cdot K)$  och U-värdet på utsidan landar på ungefär 0,4  $W/(m^2 \cdot K)$ . När ett medelvärde för alla mätare tas fram, på samma vis som i figur 8, ser man att U-värdet hamnar på 0,75  $W/(m^2 \cdot K)$  (se appendix 8.2.2).

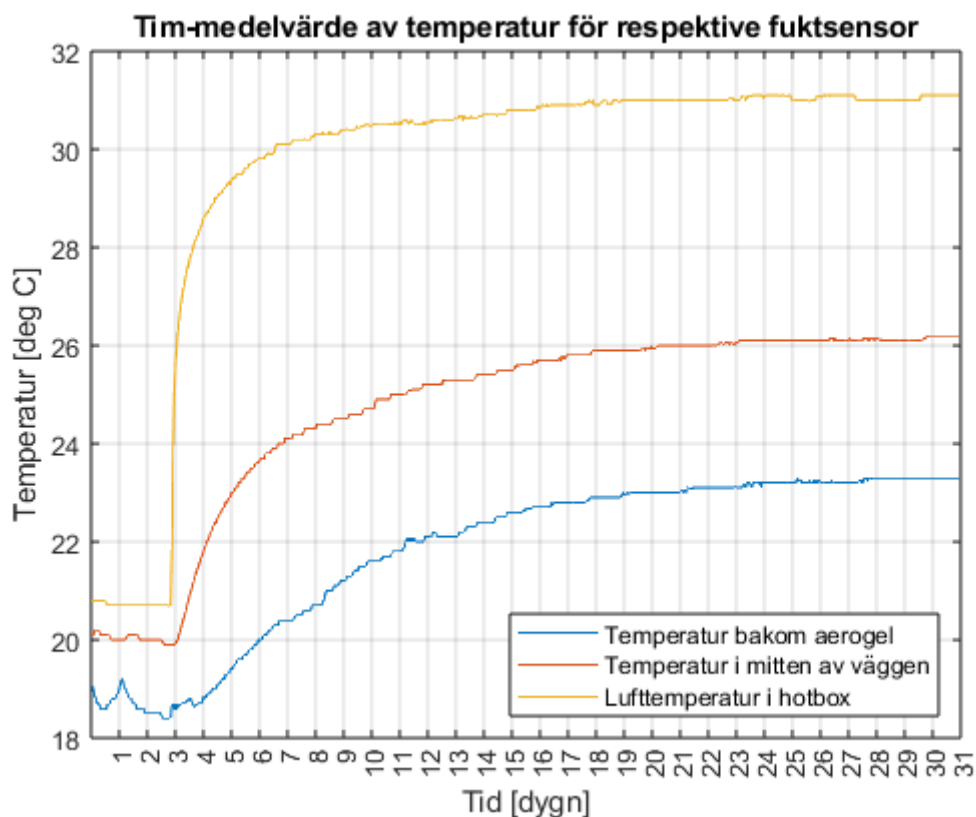
Resultaten från fuktmätarna ses nedan där *figur 14* är den relativa fuktigheten som uppmättes.



Figur 14: Tim-medelvärde av den relativa fuktigheten för respektive fuktmätare samt randvillkor i klimatrum (appendix 8.2.3).

För mätaren som satt bakom aerogelputsen märks den största förändringen, där RF ökade upp till runt 95 % under de första 5 dygnen. Efteråt minskar den och låg på ungefär 52 % när mätningen avslutades. De andra två fuktmätarna låg stabilt över hela mätningen på runt 43–45 %, den mätaren som befann sig inne i boxen ligger på något lägre RF.

I figur 15 visas tim-medelvärdet av de uppmätta temperaturerna över mätperioden som gavs från fuktsensorena.



Figur 15: Tim-medelvärde av temperaturen för respektive sensor. Notera att man kan uttyda att värmekällan i "hot-boxen" startades först efter tre dygn. Detta för att man först då hade möjlighet att flytta "hot-boxen" till klimatrummet där mätningen skulle ske.

Lufttemperaturen inne i hot-boxen mättes här till 31 °C, vilket är högre än vad termoelementet visade. Temperaturen i mitten av tegelväggen uppnår strax över 26 °C när mätningen avslutades. Fuktmätaren som befann sig bakom aerogelen och påverkades mest av byggfukten låg de första 6 dagarna under 20 °C (vilket är omgivningens temperatur). Detta tyder på att aerogelputsens härdning är ett endotermt förlopp. Ytterligare en möjlig orsak till den låga temperaturen kan vara att det krävdes mycket energi för att förångna vattnet i aerogelputsen. Efter detta ökade även denna temperatur och landade på lite över 23 °C.

## 4. Teoretiska beräkningar

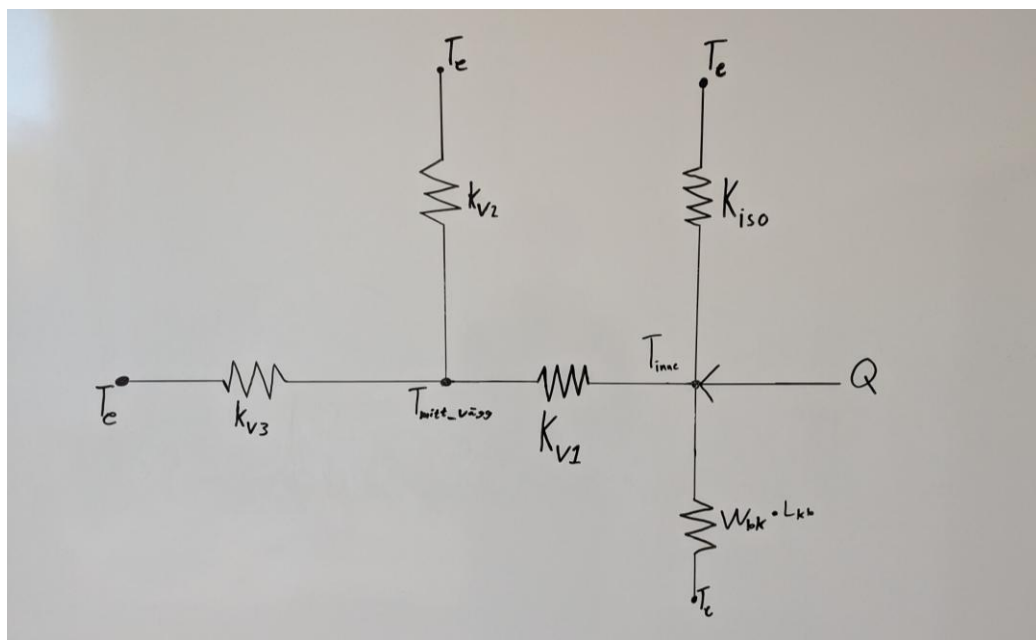
I detta avsnitt beräknas de teoretiska värdena för temperatur, U-värde och tidskonstant i syfte av att undersöka eventuella likheter och skillnader mellan empiri och teori. Beräkningarna genomfördes i Matlab och baserades på en antagen och förenklad teoretisk modell av väggen (kretsanalys), se avsnitt 4.1.1. I (Alharami, o.a., 2024) används en mer förenklad kretsanalys över systemet som ej beaktar randeffekter i tegelväggen, vilket också används i beräkningarna för att undersöka skillnader mellan de två antagna kretsanalyserna. Indata och egenskaper för de olika relevanta materialen finns i *tabell 4*.

Tabell 4: Indata för tegel och EPS från (Alharami, o.a., 2024) och aerogelputs från (Heck Wall Systems, 2021).

Indata	Tegel	EPS	Aerogelputs
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1700	20	250
$\lambda$ (W/(m*K))	0,6	0,031	0,04
$C_p$ (J/(kg*K))	800	1260	-

### 4.1 Kretsanalys av tegelvägg

För att kunna utföra beräkningarna så var grunden att göra en kretsanalys. Kretsanalysen ska vara tillräckligt detaljerad för att visa flödet över hela systemet och alla parametrar som kan påverka. Kretsanalysen som antogs visas i *figur 16*. Denna krets gör ett försök att approximera de randförluster som uppstår till följd av att väggen är mycket liten. Randförlusterna approximeras med hjälp av  $K_{V2}$ , se appendix 8.1.1.



Figur 16: Ritad kretsanalys, där värmefflöde och konduktanser visas över hela systemet.

$Q$  = värmefflöde som uppkommer från lampan (W)

$T_{inne}$  = temperaturen på insidan av tomrummet (°C)

$K_{iso}$  = konduktansen för isoleringen ( $\frac{W}{K}$ )

$\Psi_{kb} * l_{kb} =$  konduktansen för linjära köldbryggor  $\left(\frac{W}{K}\right)$

$K_{V1} =$  konduktansen från den insidan till mitten på tegelväggen  $\left(\frac{W}{K}\right)$

$T_{mitt\_vägg} =$  temperaturen i mitten av tegelväggen ( $^{\circ}C$ )

$K_{V2} =$  konduktansen som beaktar randeffekten från mitten av tegelväggen ut genom alla fyra sidor som omsluter tegelväggen  $\left(\frac{W}{K}\right)$

$K_{V3} =$  konduktansen från mitten till utsidan på tegelväggen  $\left(\frac{W}{K}\right)$

$T_e =$  temperaturen på utsidan av tegelväggen ( $^{\circ}C$ )

Denna värmekrets används för att beräkna temperaturer och flöde genom både tegelväggen och tegelväggen med aerogelputs. Skillnaden ligger i  $K_{V3}$  som blir annorlunda när man lägger till aerogelputsens bidrag. Konduktanserna beräknas enligt ekvation (2), men med hänsyn till att provkroppen befinner sig i labb-miljö så ersätts  $R_{se}$  med  $R_{si}$  även på utsidan. U-värdet för väggen beräknas sedan enligt ekvation (1). Kretsanalysen för endast tegelväggen resulterade i följande värden, (se appendix 8.1.1):

$$T_{inne} = 33,1 \text{ } (^{\circ}C)$$

$$T_{mitt\_vägg} = 24,9 \text{ } (^{\circ}C)$$

$$U_{Tegelvägg} = 1,14 \left(\frac{W}{m^2K}\right)$$

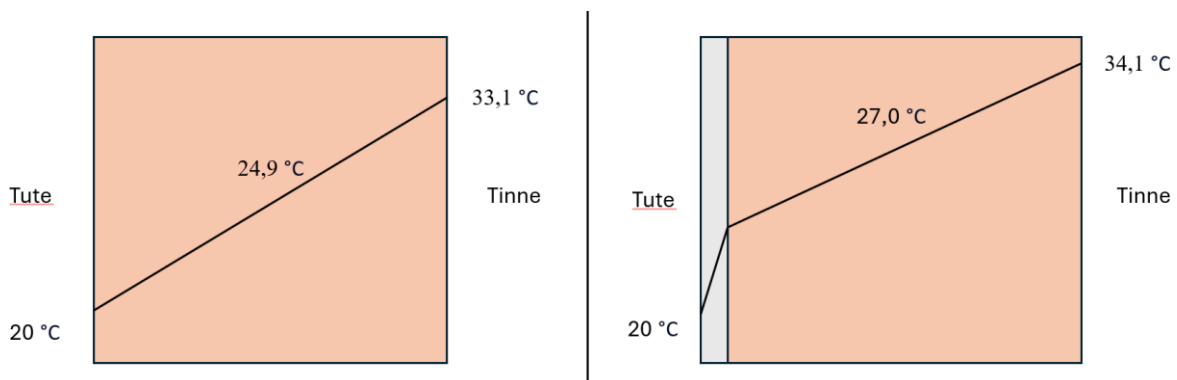
Kretsanalysen för tegelväggen med aerogelputs resulterade i följande värden (se appendix 8.1.2):

$$T_{inne} = 34,1 \text{ } (^{\circ}C)$$

$$T_{mitt\_vägg} = 27,0 \text{ } (^{\circ}C)$$

$$U_{Tegelvägg+aerogelputs} = 0,92 \left(\frac{W}{m^2K}\right)$$

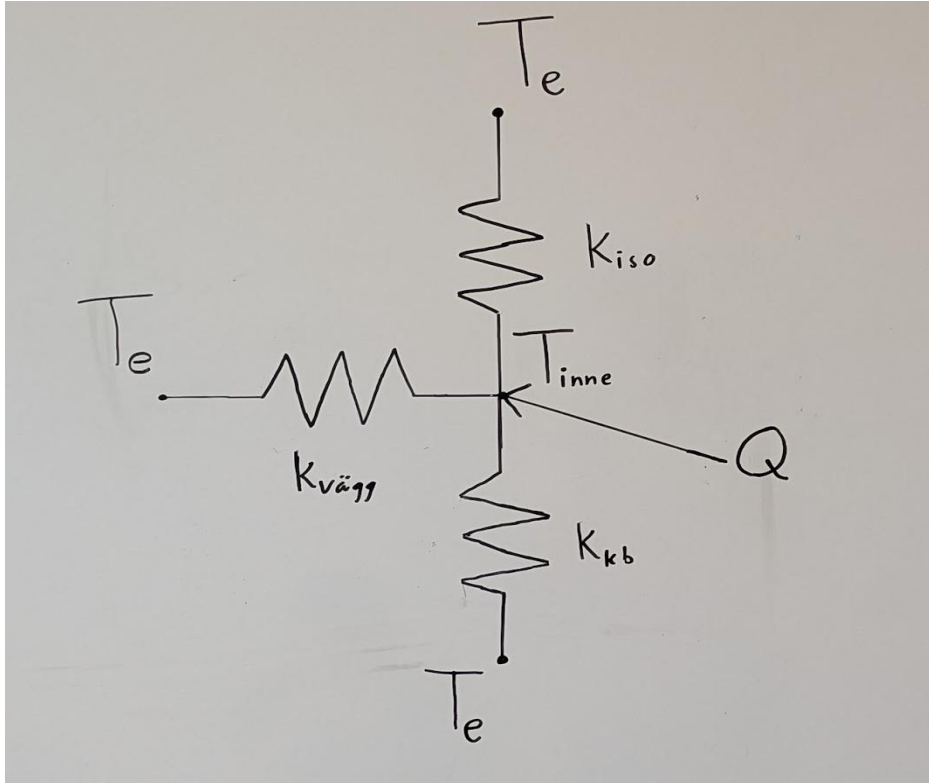
I figur 17 visas hur temperaturen förändras genom väggen om man använder kretsanalys enligt figur 16.



Figur 17: Temperaturens förändring genom väggen enligt teoretiska beräkningar. Vänster: Tegelvägg utan aerogelputs, Höger: Tegelvägg med aerogelputs.

## 4.2 Kretsanalys av tegelvägg från kandidatarbetet 2024

Kretsanalysen som användes över systemet i (Alharami, o.a., 2024) skiljer sig mellan kretsanalysen i denna studie, se *figur 18*. Skillnaden mellan de två är att man i (Alharami, o.a., 2024) inte tog samma hänsyn till randvillkoren för tegelväggen. För att jämföra resultat kommer även värdena från denna kretsanalys att beräknas och redovisas.



Figur 18: Bild över kretsanalysen som kandidatarbetet från 2024 utgick från under beräkningarna.

$Q$  = värmefflöde som uppkommer från lampan (W)

$T_{inne}$  = temperaturen på insidan av tomrummet ( $^{\circ}\text{C}$ )

$K_{iso}$  = konduktansen för isoleringen ( $\frac{\text{W}}{\text{K}}$ )

$K_{kb}$  = konduktansen för köldbryggor ( $\frac{\text{W}}{\text{K}}$ )

$K_{vägg}$  = konduktansen för tegelväggen i sin helhet ( $\frac{\text{W}}{\text{K}}$ )

$T_e$  = temperaturen på utsidan av tegelväggen ( $^{\circ}\text{C}$ )

Här beräknades samma som i avsnitt 4.1.1, då den enda skillnaden är att kretsanalysen antas vara enligt *figur 18*. Ekvationerna (1) och (2) används för att få fram U-värde och konduktansen.  $R_{se}$  ersätts även här med  $R_{si}$  och bidraget från aerogelputsen läggs till på  $K_{vägg}$  under beräkningens andra del. Kretsanalysen över tegelväggen utan puts ger följande värden, (se appendix 8.1.3):

$$T_{inne} = 34,14 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

$$T_{mitt\_vägg} = 27,07 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

$$U_{Tegelvägg} = 0,91 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right)$$

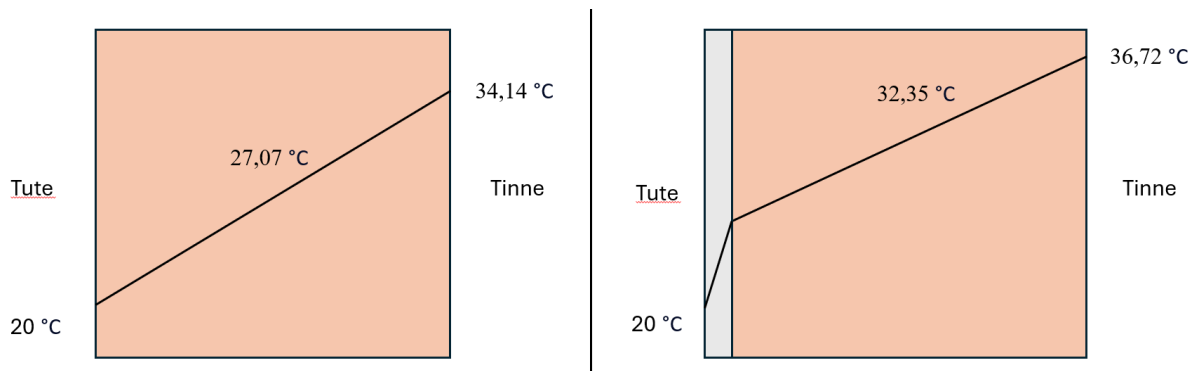
Kretsanalysen med aerogelputsen ger följande värden, (se appendix 8.1.4):

$$T_{inne} = 36,72 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$T_{mitt\_vägg} = 32,35 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$U_{Tegelvägg+aerogelputs} = 0,48 \left( \frac{W}{m^2K} \right)$$

I *figur 19* visas det hur temperaturen förändras genom väggen om man använder kretsanalys enligt *figur 18*.



*Figur 19: Temperaturens förändring genom väggen enligt teoretiska beräkningar från kandidatarbetet 2024. Vänster: Tegelvägg utan aerogelputs, Höger: Tegelvägg med aerogelputs.*

### 4.3 Tidsförskjutning

Tidsförskjutningen för väggen beräknades enligt avsnitt 2.2.3 med antagande att det ej sker någon luftomsättning. Beräkningen utfördes i MATLAB med hjälp av ekvation (4,5,6,7) samt *figur 2* och återfinnes i appendix, se 8.1.5 samt 8.1.6. Resultatet av beräkningen blev en teoretisk tidsförskjutning på 20 timmar för endast tegelvägg och för tegelvägg med aerogelputs blev tidsförskjutningen 25 timmar. I *figur 29* plottas tidsförskjutningen och ytttemperaturen på utsidan i samma graf för att kunna jämföra likheter (se avsnitt 5.2.5).

## 5. Diskussion och resultat

I detta avsnitt behandlas diskussion och resultat av de två huvudområdena för denna studie. Först sker en jämförelse med (Alharami, o.a., 2024) för att se skillnader på mätningarna och beräkningarna. Därefter diskuteras och jämförs resultatet av mätningen på aerogelputs för att undersöka vilken påverkan som applicering av putsen har haft och ifall det blir en påtaglig skillnad mellan enbart en tegelvägg.

### 5.1 Jämförelse av resultat mellan (Alharami, o.a., 2024) och denna rapport

Som nämnts tidigare har denna studie använt sig av en annan värmekrets gentemot den krets som användes i (Alharami, o.a., 2024). Motiveringen bakom detta är att man i tidigare studie inte tog samma hänsyn till de randeffekter som uppkommer på grund av tegelväggens begränsade geometri. Syftet med att beakta dessa randeffekter är att man kan få en mer realistisk beskrivning av vad som faktiskt händer i tegelväggen. Med hjälp av detta kan man sedan dra en slutsats kring om fjolårets avvikelse mellan deras teoretiska U-värdet och det uppmätta till största del beror på mätmetoden i allmänt eller om det är den begränsade geometrin som ligger bakom avvikelsen.

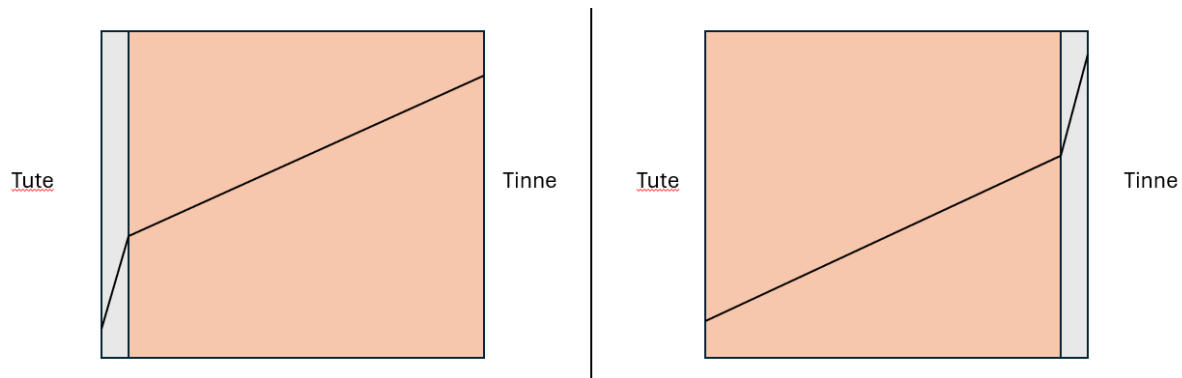
#### 5.1.1 Jämförelse av de teoretiska resultaten

Det man kan se från resultaten av de teoretiska beräkningarna är att innetemperaturen och temperaturen i mitten av väggen blir markant högre, se *tabell 5* om man väljer att inte beakta randeffekterna. Detta gäller för båda scenarierna det vill säga både med och utan aerogelputs. Även U-värdet visar en tydlig trend för båda scenarierna, det vill säga U-värdet minskar markant om man inte beaktar randeffekterna, se *tabell 5*.

*Tabell 5: Skillnaden i procent mellan de teoretiskt beräknade värdena för respektive variabel från avsnitt 4.1 och 4.2, där parametrarna som förändras är värmekretsen och beaktandet av randeffekter.*

Variabel	Vägg utan aerogelputs	Vägg med aerogelputs
T inne	+ 3%	+ 8%
T mitt vägg	+ 9%	+ 20%
U-värde	- 20%	- 48%

Som det framgår i *tabell 5* kan man se att U-värdet minskar med relativt mycket för både vägg med och för vägg utan aerogelputs. Det som också är värt att notera är att randeffekterna spelar ännu större roll när man lägger till aerogelputs. Denna markanta skillnad beror bland annat på aerogelputsens placering där aerogelen i vårt fall är applicerad på utsidan av väggen. Om aerogelputsen i stället hade varit applicerad på insidan av väggen hade väggens temperaturprofil blivit annorlunda vilket i sin tur hade medfört att randeffekternas pådrivande temperaturgradient hade minskat, se *figur 20*.



Figur 20: Visualisering över hur aerogelputsens placering påverkar temperaturen i övrig vägg. Placeras aerogelputsen på utsidan medför detta att tegelväggen har en högre temperatur, vilket orsakar en ökad påverkan för randvillkoren. Är aerogelputsen placerad på insidan av väggen blir temperaturen i resterande del av väggen lägre, vilket medför att randvillkoren påverkar mätningen mindre.

### 5.1.2 Jämförelse av mätmetodiken

I föregående studie uppstod ett problem med mätmetodiken. Det som skedde var att sensorernas uppfästning var undermålig för det förhållandet som uppstod i "hot-boxen" (Alharami, o.a., 2024). Till följd av detta lossnade två sensorer inuti "hot-boxen" vilket medförde att data från dessa sensorer inte kunde brukas i analysen. För att undvika detta problem valde man i denna studie att i stället för silvertejp använda en silikon fog och T-flex tätningstejp (se avsnitt 3.2.1). Resultatet av detta var att samtliga sensorer satt kvar efter mätningen och all inhämtad data kunde användas. Till följd av detta så säkerställde man också att det inte fanns någon luft bakom sensorerna vilket är en möjlig felkälla vid mätning med värmeflödessensorer (Hukseflux Thermal Sensors BV, 2025). Detta skiljer sig från tidigare studie där man endast brukade silvertejp som infästningen på en mycket skrovlig yta (Alharami, o.a., 2024). Ytterligare en skillnad i mätmetodiken var att endast en sensor placerades på utsidan av tegelväggen (se figur 4 och figur 10). Detta på grund av att de begränsade portarna på dataloggern inte räckte till, vilket ledde till att andra sensorplaceringar prioriterades.

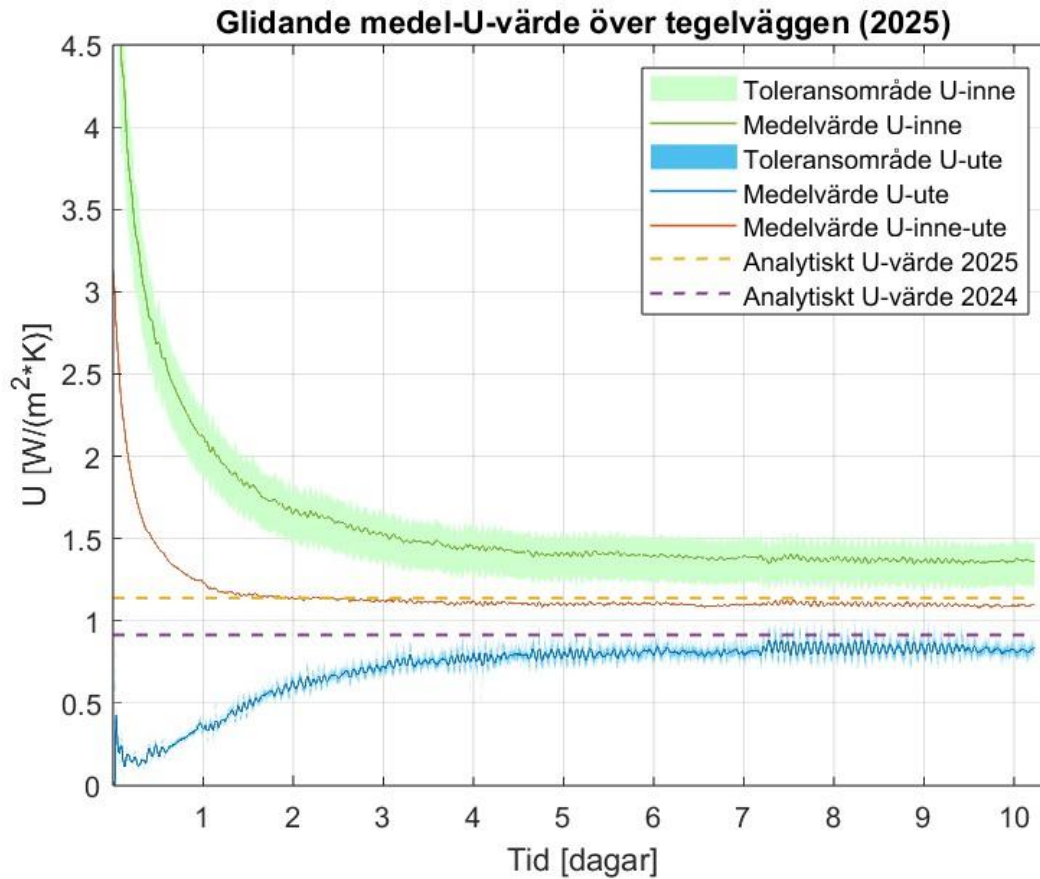
Ytterligare så tätades och isolerades "hot-boxen" mycket mer utförligt än i tidigare studie för att minska köldbryggor och luftläckage. Detta är en bidragande faktor till att lufttemperaturen inne i "hot-boxen" ökat med ca 2,5 °C (se avsnitt 5.1.3). En annan faktor som kan ha påverkat temperaturen i "hot-boxen" är om tegelväggens värmeledningsförmåga har förändrats. Under förra experimentet var tegelväggen nybyggd och murbruket hade förmodligen inte torkats ut helt. När experimentet replikeras efter ett år är det betydligt mer troligt att murbruket har torkat ut helt och fuktinnehållet har minimal påverkan på mätningen.

Det är även av vikt att man i den tidigare studien ej hade placerat mätuppställningen i klimatrium, vilket ledde till att lufttemperaturen på utsidan varierade mer. I denna studie valde man att placera mätuppställningen i klimatrium vilket man kan se har påverkat resultaten då klimatriummet har gett upphov till en stationär utemiljö vilket har medfört att mätdata är mycket jämnare i denna studie (se avsnitt 5.1.3).

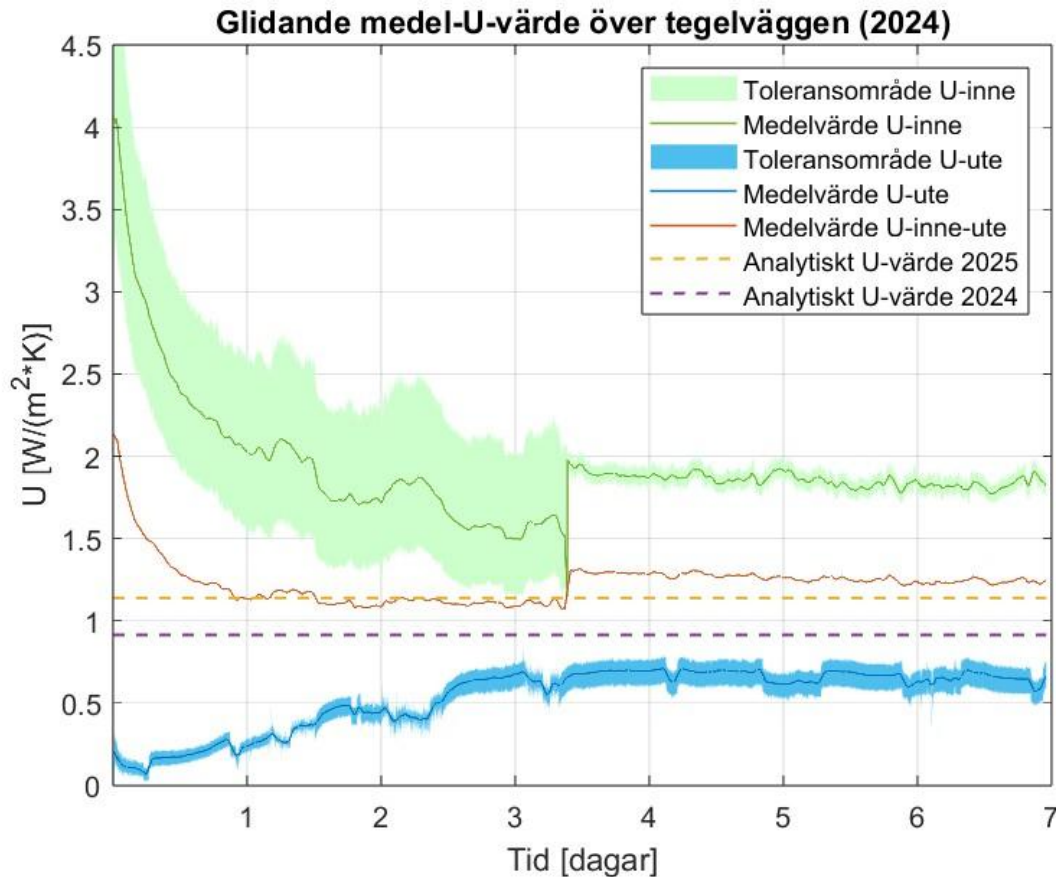
### 5.1.3 Jämförelse av erhållna mätdata

Mätdata från denna studie sträcker sig över ett spann om 10 dagar och illustreras i figur 21. Detta skiljer sig från föregående studie där mätdata endast sträcker sig över 7 dagar, se figur 22. I respektive figur ser man det glidande tim-medlet av sensorerna inne i och utanför "hot-boxen". Anledningen till att man har valt att använda glidande tim-medelvärde är för att släta

ut mätdata så att den ger en tydligare visuell figur som är lättare att jämföra. I respektive figur framgår även det glidande tim-medlet av samtliga sensorer samt det teoretiskt beräknade U-värdet med denna och föregående studies kretsanalys (se avsnitt 4.1). Sensorernas toleransområde illustreras också i figuren och är framtaget som de maximala och minimala värdena med hänsyn till respektive sensors uppmätta värde korrigerat med sensorns egen tolerans (se appendix 8.3.1, 8.3.2).

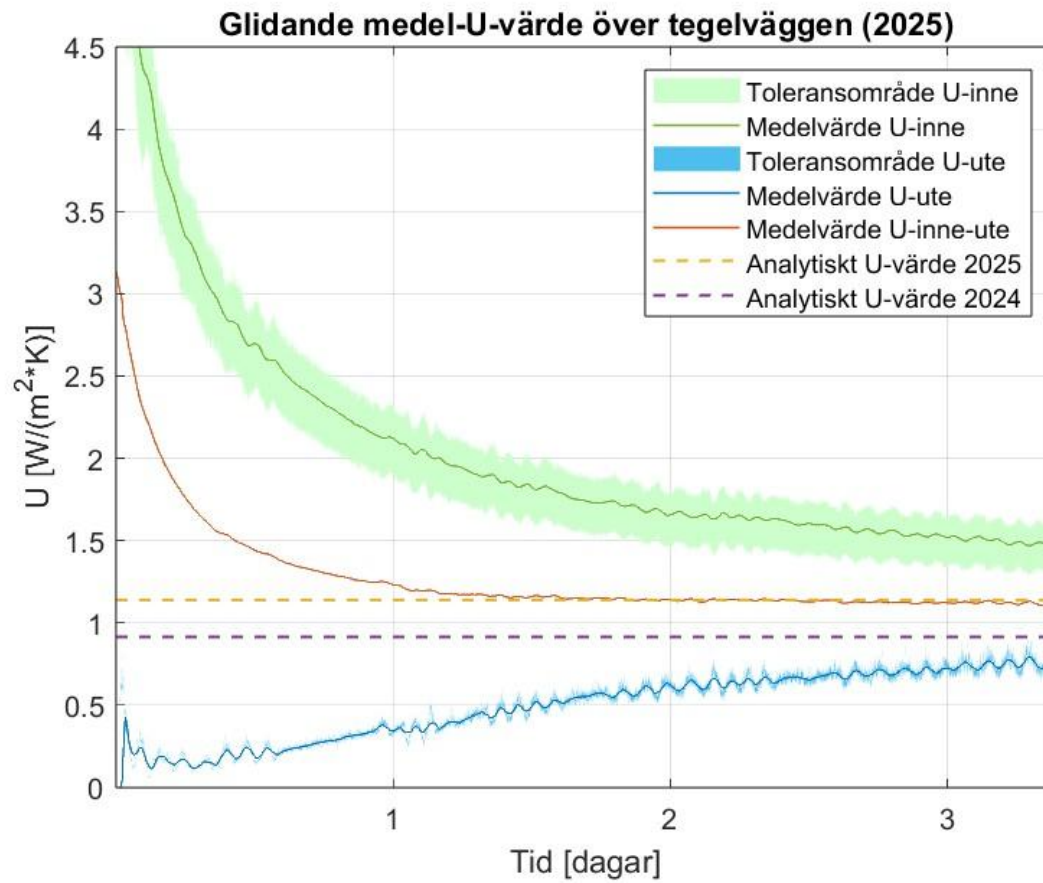


Figur 21: Figuren illustrerar det glidande tim-medlet för sensorerna inne och ute för mätdata hämtad under en tio dagars period 2025. De ifyllda områdena illustrerar toleransområdet för det uppmätta U-värdet med sensorerna inne i "hot-boxen" eller utanför "hot-boxen". De streckade linjerna representerar det teoretiskt framtagna U-värdena med de två olika kretsanalyserna som beskrivs i avsnitt 4.1.1. Det glidande tim-medlet för sensorerna inne i och utanför "hot boxen" betecknas: Medelvärde U-inne-ute (se appendix 8.3.1).

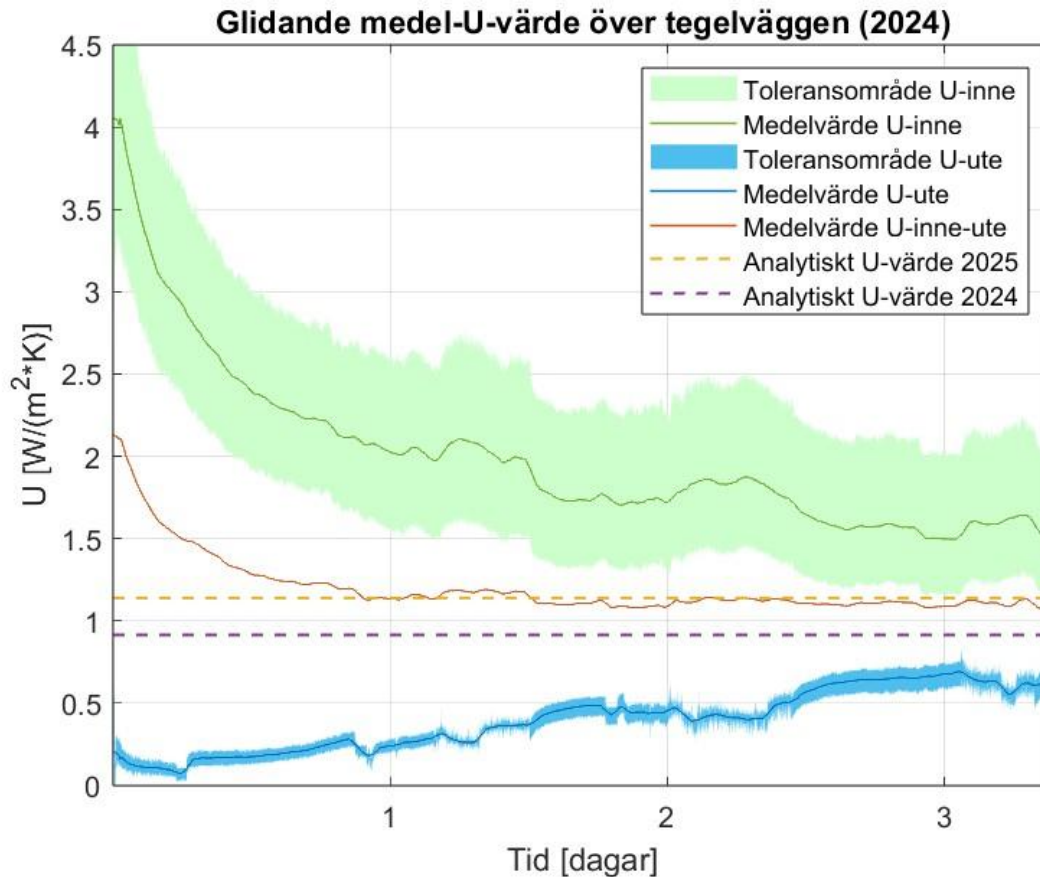


Figur 22: Figuren illustrerar det glidande tim-medlet för sensorerna inne och ute för mätdata hämtad under en sju dagars period 2024. De ifyllda områdena illustrerar toleransområdet för det uppmätta  $U$ -värdet med sensorerna inne i "hot-boxen" eller utanför "hot-boxen". De streckade linjerna representerar det teoretiskt framtagna  $U$ -värdena med de två olika kretsanalyserna som beskrivs i avsnitt 4.1.2. Det glidande tim-medlet för sensorerna inne i och utanför "hot boxen" betecknas: Medelvärde  $U$ -inne-ute. Hoppet i grafen vid cirka tre och en halv dag för sensorerna inne är ett resultat av att två värmeflödesmätare lossnade under mätningen (se appendix 8.3.2).

Hoppet vid cirka tre och en halv dag i figur 22 är till följd av att två värmeflödesmätare lossnade under mätningen (se avsnitt 5.1.2). För att jämförelsen mellan respektive mätning ska kunna göras oberoende av detta och oberoende av att mätningarna fortskred under olika tidsperiods valde man att begränsa den mätdata man jämför till endast de första tre och en halv dagarna. För att lättare illustrerar detta område avgränsas både figur 21 och figur 22, vilket resulterar i figur 23 respektive figur 24. Däremot kan man ändå se en tydlig trend i figur 22 som visar på att Medelvärde  $U$ -inne borde ha planat ut om de två andra sensorerna inte hade lossnat.



Figur 23: Figuren illustrerar det glidande tim-medlet för sensorerna inne och ute för mätdata begränsad till en 3,5 dagars period 2025 (se appendix 8.3.1)



Figur 24: Figuren illustrerar det glidande tim-medlet för sensorerna inne och ute för mätdata begränsad till en 3,5 dagars period 2024 (se appendix 8.3.2).

Det första man kan se när man jämför *figur 23* och *figur 24* är att toleransområdena skiljer sig åt både ute och inne, dock mest inne. Att toleransområdet ute skiljer sig beror i största mån på att endast en sensor användes på utsidan i denna studie vilket skiljer sig från (Alharami, o.a., 2024) då man använde tre både ute och inne (se avsnitt 5.1.2). Detta gör att toleransområdet ökar eftersom varje sensor är unik och har en egen sensitivitet och tolerans, se *tabell 1*. Även placeringen på de olika sensorerna kan ge en viss påverkan här då väggen i verkligheten inte är helt homogen samtidigt som man även har en viss spridningen av värmefflödet genom väggen. Det som dock är mer intressant med toleransområdena är att området inne för föregående studie är betydligt mycket större än i denna studie (se *figur 21, 22*). En bakomliggande faktor för detta kan vara att det inte var exakt samma sensorer som placerades på samma platser. Bland annat så användes inte den sensorn som gav väldigt höga och avvikande värden i föregående studie (Alharami, o.a., 2024), utan den ersattes med en annan.

Det är dock inte bara uppåt som toleransområdet sticker i väg utan även nedåt är toleransen större i föregående studie. Två andra möjliga orsakerna till den stora spridningen i U-värdet är att det antingen var byggfukten i väggen som skapade en större icke homogen värmespridning i väggen eller så var det infästningen av själva sensorerna som påverkade. Den mest sannolika av de två är att det är infästningen som har påverkat spridningen. Anledningen till att detta är det mest sannolika är för att om det vore så att byggfukten hade påverkat så borde även toleransområdet utvändigt varit betydligt större. Infästningen inne i "hot-boxen" av sensorerna har varierat enligt avsnitt 5.1.2. Till följd av denna skillnad så har som tidigare nämnts inte luft kunnat ta sig in bakom sensorn och på så vis påverka sensorns

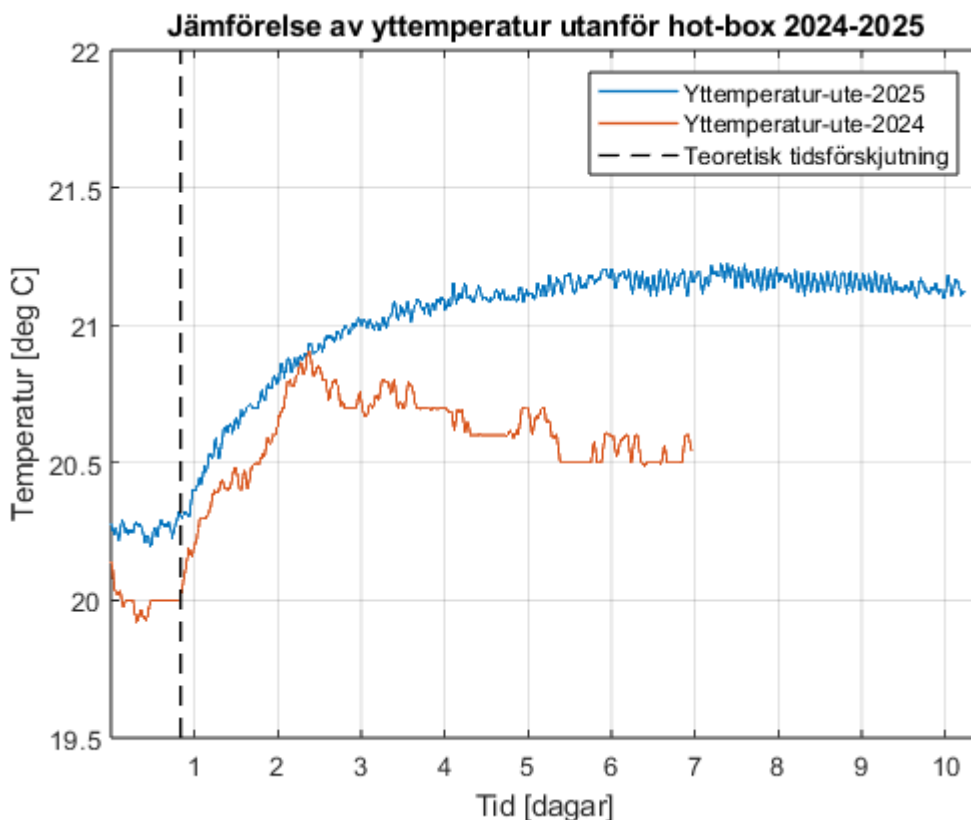
värmeflödesmotstånd. Detta har i sin tur gjort att U-värdet över sensorerna inte har varierat lika mycket.

I *figur 21* och *figur 22* kan man också se att *Medelvärde U-inne-ute* i bägge fall konvergerar emot det med denna studiens kretsanalys framtagna U-värdet *Analytiskt U-värde 2025* (se avsnitt 4.1.1). Detta styrker kretsanalysen validitet som en approximation på laborationsväggens U-värde. Man kan i och med detta också se att det teoretiskt framtagna U-värdet *Analytiskt U-värde 2024* (se avsnitt 4.1.2) som ej betraktar randeffekterna ligger en bit under mätdatans medelvärde, vilket är rimligt (se *figur 21, 22*).

I och med att båda mätningarna konvergerar mot samma värde och i princip samtidigt kan man dra slutsatsen att den tidigare förmodade byggfukten troligtvis har hunnit torka ut eller också så har den mängden byggfukt som var kvar inte haft någon större påverkan på U-värdet. Trots detta kan man ändå spekulera i att byggfukten kan ha gett upphov till den lilla tidsavvikelse som har uppstått emellan mätningarna. Det vill säga att mätdatan från föregående studie har "uppnått" det teoretiska värdet efter cirka en dag medan det i denna studie "uppnås" efter cirka en och en halv dag. Detta beror däremot inte nödvändigtvis på fukt utan kan lika gärna vara en effekt av att man i denna studie placerade "hot-boxen" i ett klimatrums (se avsnitt 5.1.2).

#### 5.1.4 Jämförelse av tidsförskjutning

Enligt avsnitt 4.3 så är den beräknade tidsförskjutningen för väggen cirka 20 timmar. Detta går att jämföra med mätdata från både denna och föregående studie. I *figur 25* illustreras hur yttemperaturen på väggens utsida, taget från *figur 7*, förändras som funktion av tid.



*Figur 25: Figuren illustrerar yttemperaturens tim-medelvärde på tegelväggens utsida som en funktion av tiden (se appendix 8.3.3). Även väggens beräknade tidsförskjutning illustreras som en streckad vertikal linje.*

Som *figur 25* visar så stämmer den teoretiska beräkningen mycket bra överens med den uppmätta datan. Det som också är intressant med *figur 25* är att man kan se att tidsförskjutningen är relativt konstant på 20 timmar för både denna studie och föregående. Detta stärker ytterligare att byggfukten troligtvis har varit uttorkad även under föregående studie eller om något haft en marginell påverkan på den mätningen.

## 5.2 Jämförelse av resultat mellan tegelvägg med och utan aerogelputs

Under detta avsnitt diskuteras och jämförs resultaten mellan mätningen med och utan aerogelputs. Mätningen skedde både på insidan av ”hot-boxen”, på utsidan av aerogelputsens och mitten av tegelväggen, samt mellan aerogelputsens och tegelväggen. Det som jämförs är både putsens påverkan på isoleringsförmågan hos väggen och hur det påverkas över tid medan putsen torkar. Då det på insidan fanns två olika sensortyperna som båda mätte lufttemperaturen, kommer skillnader som uppstått mellan dem diskuteras och vad skillnaden mellan värdena kan bero på.

### 5.2.1 Jämförelse mellan empirisk och teoretisk data för tegelvägg med aerogelputs

I *tabell 6* redovisas en sammanfattning av teoretiska och uppmätta värden från tegelväggen med aerogelputs. Notera att eftersom de båda sensorerna som mätte lufttemperatur inne i ”hot-boxen” fick olika värden så redovisas bägge värdena i tabellen.

*Tabell 6: De teoretiska värdena från beräkningar, samt de uppmätta värdena presenteras i tabellen. Även skillnaden i procent för de framtagna värdena visas i syfte att enklare demonstrera storleksskillnaden. Anledningen till att två värden visas för innetemperaturen beror på att termoelementet och fuktsensorn visade olika, se appendix 8.2.3.*

Variabel	Teoretiska värden	Empiriska värden	Procentuell skillnad
T inne	34,1 °C	30,5 / 31,1 °C	11 / 9 %
T mitt vägg	27,0 °C	26,2 °C	3 %
U-värde	0,92 W/(m <sup>2</sup> *K)	0,75 W/(m <sup>2</sup> *K)	18 %

I *tabell 6* syns det att båda temperaturerna som uppmättes är lägre än de som beräknades med ekvationer, se avsnitt 4.1.1. Man kan dock se i tabellen att skillnaden mellan teoretiska och empiriska värden för temperatur är betydligt lägre i väggens mitt, gentemot insidan. Detta kan tolkas som att otätheter mellan EPS skivorna bidrar till en relativt stor del av värmeförlusten inne i tomrummet. Då ”hot-boxen” tätades med endast tejp på vissa ställen, så kan det ha lett till att större otäthet uppkommit än vad som räknats på. Värt att notera är också att skillnaden mellan den empiriska och teoretisk innetemperaturen i ”hot-boxen” är cirka 3 grader vilket även var skillnaden i föregående mätning med bara tegelväggen.

Bidraget till temperaturdifferensen i väggens mitt kommer troligen från randvillkorens påverkan, då väggens begränsade storlek bidrar till att randvillkoren spelar en större roll än i en verklig tegelvägg. Det är värt att nämna att alla temperaturer inte nödvändigtvis hade nått ett stationärt tillstånd när mätningen avslutades, vilket skulle kunnat öka vissa empiriska värden något (dock långt ifrån tillräckligt för att nå upp till de teoretiska temperaturerna).

Skillnaden mellan U-värdena är den största, där det teoretiska värdet blev större än det empiriska. Orsaker som kan ha lett till att detta uppkommit är en underskattning på lambdavärdena för materialen. Värdena från *tabell 4* har tagits från olika källor och är en uppskattning då exakt information om just materialen som används i laborationen är svårt att veta. Aerogelputsen applicerades även på en ojämn sida av tegelväggen så tjockleken med puts var inte helt jämn. EPS skivorna stack ut cirka 4 cm för att i teorin ha det som riktvärde, men

då ojämnheterna på ytan var så pass grova har tjockleken på aerogelputsen blivit varierande. Lagret puts kan ha varierat mellan uppskattningsvis 3–6 cm. Då de teoretiska beräkningarna gjordes på tjockleken 4 cm så kan skillnaden som uppkommit ha bidragit till en stor förändring för U-värdet. Temperaturen som sensorerna uppmätt kan också ha gett ett förvrängt värde vid beräkning av U-värdet då man kan se att det finns två värden på innetemperaturen beroende på om man kollar på fuktmätarnas eller termoelementens värde. I detta avseende används fortsatt termoelementens värden för att samtliga resultat skulle vara jämförbara med den tidigare mätningen av endast tegelväggen där endast termoelementen var installerade.

### 5.2.2 Uttorkning av aerogelputs

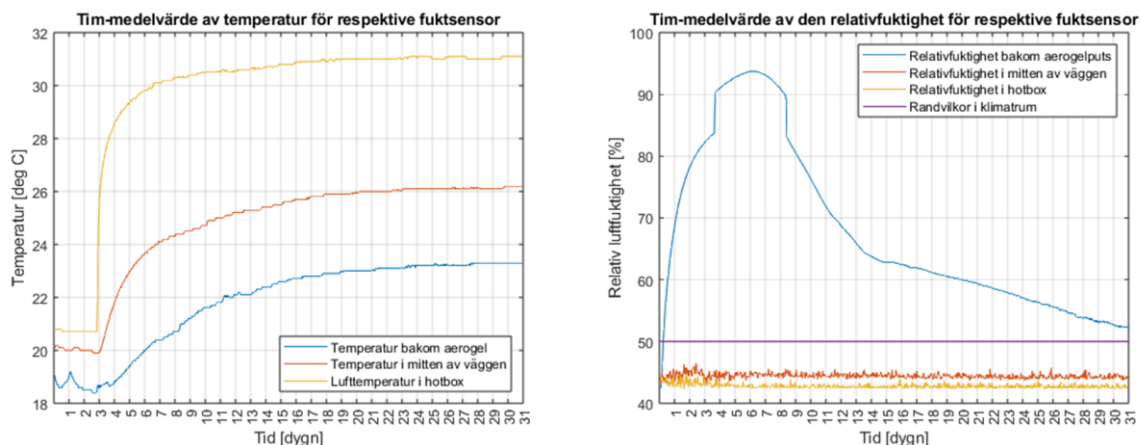
Som tidigare nämnts fästes en fuktsensor mellan tegelväggen och aerogelputsen för att mäta den relativa fuktigheten och temperaturen för putsen, se *figur 14, 15*. Direkt efter att putsen lagts på ökade den uppmätta RF kraftigt, vilket är en logisk utveckling då putsen var väldigt fuktig. Toppen uppkom efter ungefär 5 dygn, vilket i sig inte betyder att aerogelputsen blev fuktigare första dygnet, utan snarare att fukten som nådde sensorn var som mest under denna tid. De två vertikala linjerna som uppkom mellan toppen på RF bör man inte dra några större slutsatser från, utan dessa uppkom antagligen på grund av att fuktsensorerna är gjorda av ett trämaterial och det är runt cirka 20–30% fuktkvot som fritt vatten uppstår i träts porer (Burström, 2021).

Efter detta faller fuktkvoten kraftigt för att sedan minska betydligt långsammare. När mätningen avslutades hade fukten fortfarande inte torkat ut helt, utan det går att se en fortsatt nedåtgående trend. Efter 31 dagar låg RF på 52 %, de vill säga aerogelputsen är fortfarande inte helt torr, utan det finns fortfarande byggfukt kvar i den, se *figur 14*. I avsnitt 2.2.4 står det att putsen kan ha en uttorkningshastighet på uppemot 6 månader i utomhusklimat, så trots att väggen står i ett kontrollerat klimat är det rimligt att den inte uppnådde ett stationärt tillstånd under laborationstiden. Som tidigare nämnts finns det dock en osäkerhet kring mätvärdena på fuktgivarna, de vill säga full uttorkning av byggfukten kan ha uppnåtts, då 52 % RF är inom felmarginal för 50 % RF.

Värt att nämna är att fuktmätningen tilläts fortgå efter att data till figurerna i denna studie hämtas, detta resulterade i att man kunde se att det tog ytterligare 6 dagar för fuktsensorn bakom aerogelputsen att nå 50 % relativ fuktighet och därmed jämnvikt med klimatrummet.

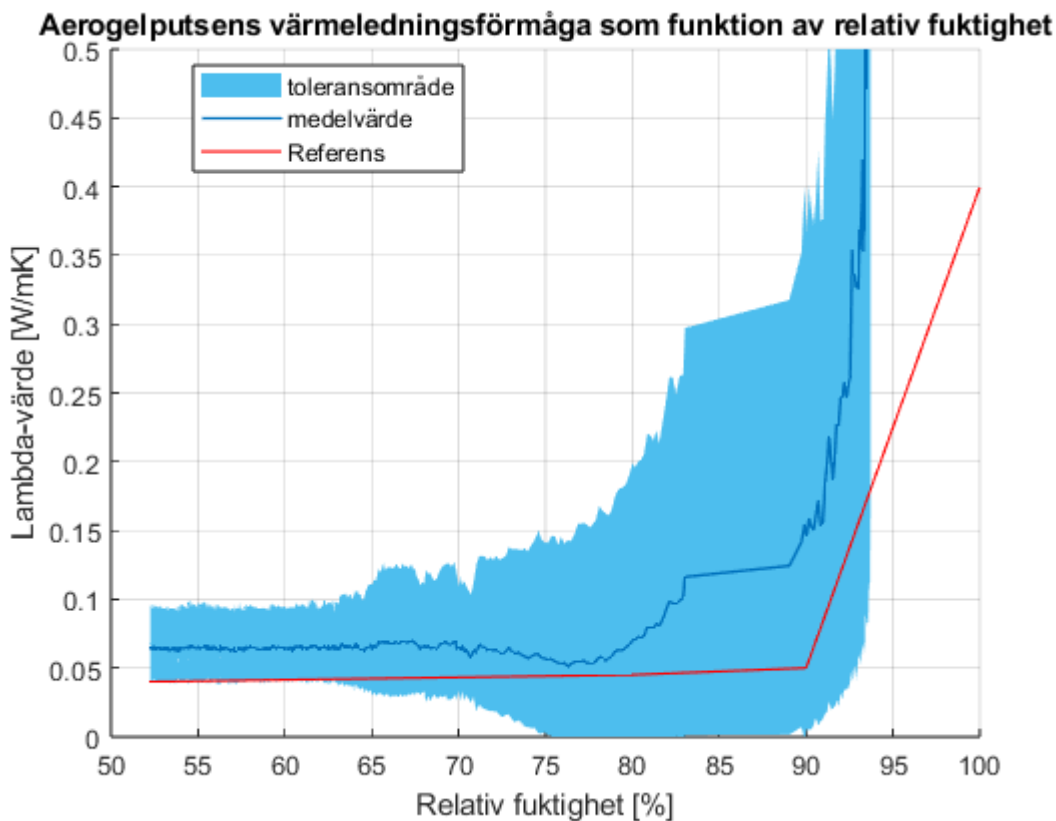
### 5.2.3 Fuktens påverkan på tegelväggen

I *figur 26* visar de givna värdena på temperatur och RF från fuktmätarna. Det går att finna tydliga likheter, i början av mätningen så stiger alla temperaturer förutom temperaturen bakom aerogelputsen. Den sjunker initialt det första dygnet för att sedan stiga och landa strax över 23 °C. Men under den första veckan ligger temperaturen under 20 °C, vilket gör att man kan dra tydliga likheter mellan RF, som ökar snabbt under den första veckan. De övriga mätarna stiger uppåt utan någon större dipp, till dess att dem stabiliserar sig. Detta går också att jämföra med RF för dessa som ligger konstant över hela mätningen. Eftersom RF i mitten av väggen inte påverkas märkbart av den fuktiga putsen, kan man tolka detta som att stora delar av väggen inte påverkades av fukten.



Figur 26: Jämförelse mellan temperatur (vänster) och RF (höger) som uppmättes av fuktmätarna taget från (appendix 8.2.3). Figurerna är tagna från avsnitt 3.3.3.

Fukten hade alltså liten påverkan på tegelväggen utan fuktens påverkan begränsades mycket till själva aerogelputsen och detta visas i figur 27 där man kan se förhållandet mellan RF och lambdavärde för aerogelputsen.



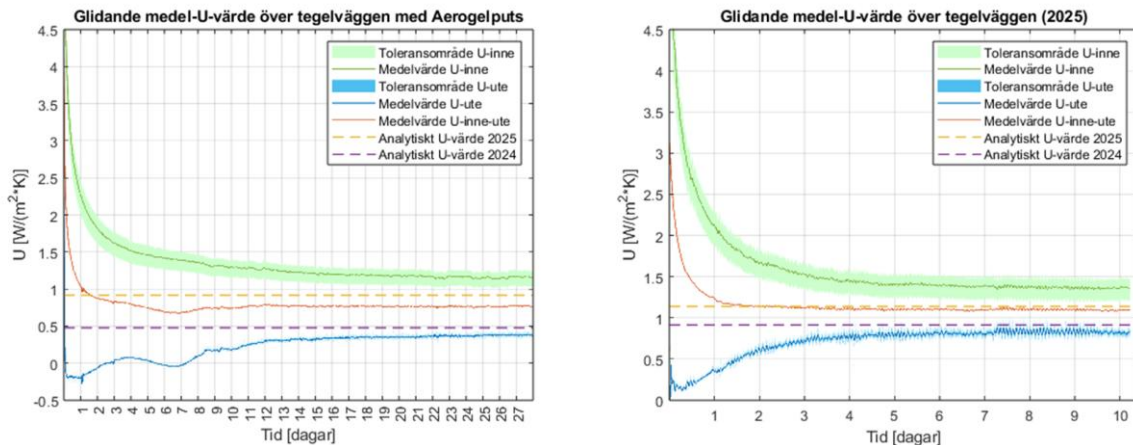
Figur 27: Figuren visar förhållandet mellan relativ luftfuktighet och lambdavärde som är beräknat från mätdata (appendix 8.2.3). Den röda linjen är en referens som hämtats från en tidigare studie och beskriver hur lambda förändras med RF enligt (Karim, Johansson, & Sasic Kalagasidis, 2023). Toleransområdets storlek beror på att det finns en värmeflödesmätare på vardera sida av aerogelputsen och dessa gav olika värmeflöde. Dessa mätare har också olika individuell tolerans från deras kalibrering vilket ökar det totala toleransområdet. Ytterligare beaktar även toleransområdet en varierande tjocklek på aerogelputsens i intervallet 30–60 mm.

Figur 27 visar ett tydligt förhållande mellan att en ökad RF leder till ett försämrat lambdavärde på aerogelputsen. I figuren används även en referens från en tidigare studie som kontroll av att värdena ligger på en rimlig nivå. Försämringen av lambda ökar exponentiellt utefter att RF ökar. När den relativa fuktigheten ligger under 65 % så hålls lambdavärdet i

princip konstant. Slutsatser av detta kan vara att den relativa fuktigheten i princip endast har betydelse på höga nivåer, särskilt över 90 % relativ fuktighet.

### 5.2.4 Jämförelse av empirisk data från tegelvägg med och utan aerogelputs

I *figur 28* kan man se skillnad mellan U-värde i båda graferna. U-värdet för hela tegelväggen utan aerogelputs stabiliserar sig runt 1,1 W/(m<sup>2</sup>\*K) medan U-värdet för tegelväggen med aerogel ligger på 0,75 W/(m<sup>2</sup>\*K). Endast ett cirka 4 cm tjockt skikt kan alltså reducera U-värdet med ungefär 32%.

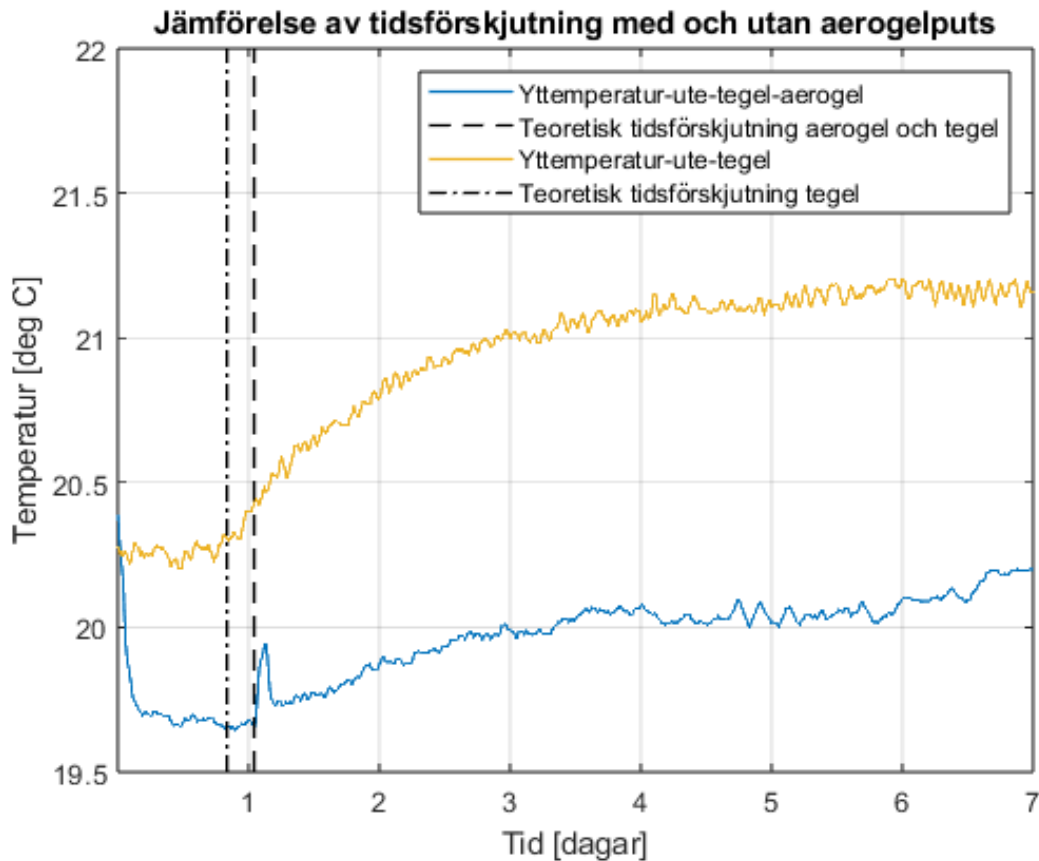


*Figur 28: Jämförelse mellan U-värde av vägg med aerogelputs (vänster) och utan aerogelputs (höger). Observera att det är olika axlar på figurerna.*

En till sak att notera är att grafen utan aerogelputs stabiliserar sig runt 7 dagar medan grafen med aerogelputs vid den tidpunkten fortsätter att sjunka. Detta kan bero på flera faktorer som till exempel fuktinnehållet. I *figur 14* ser man att aerogelputsen fortfarande inte torkats ut helt mot slutet av mätningen. Då mätningen sattes igång ca 3 dygn efter att aerogelputsen hade applicerats på grund av tidsbegränsningar, fanns det helt enkelt inte tillräckligt med tid för total uttorkning. Troligtvis hade U-värdet varit något lägre i fallet med total uttorkning men skillnaden skulle vara minimal då grafen är i princip helt horisontell mot slutet av laborationen. I avsnitt 5.2.3 visades det att aerogelputsens värmeledningsförmåga har mycket lite påverkan av fuktinnehållet i putsen under 90 % RF. Därför kan den främsta orsaken till den långa stabiliseringsperioden sannolikt vara att väggen helt enkelt har blivit tjockare. Mer material betyder mer tid för värmen att överföra genom väggen. Detta gör att det tar längre tid för temperaturprofilen i väggen att stabilisera sig.

### 5.2.5 Jämförelse av tidsförskjutning mellan tegelvägg med och utan aerogel

Som tidigare nämnts så är tidsförskjutningen för tegelväggen utan aerogelputs 20 timmar och med aerogelputs 25 timmar. Tidsförskjutningen och yttemperaturen från *figur 7, 12* visas i *figur 29*.

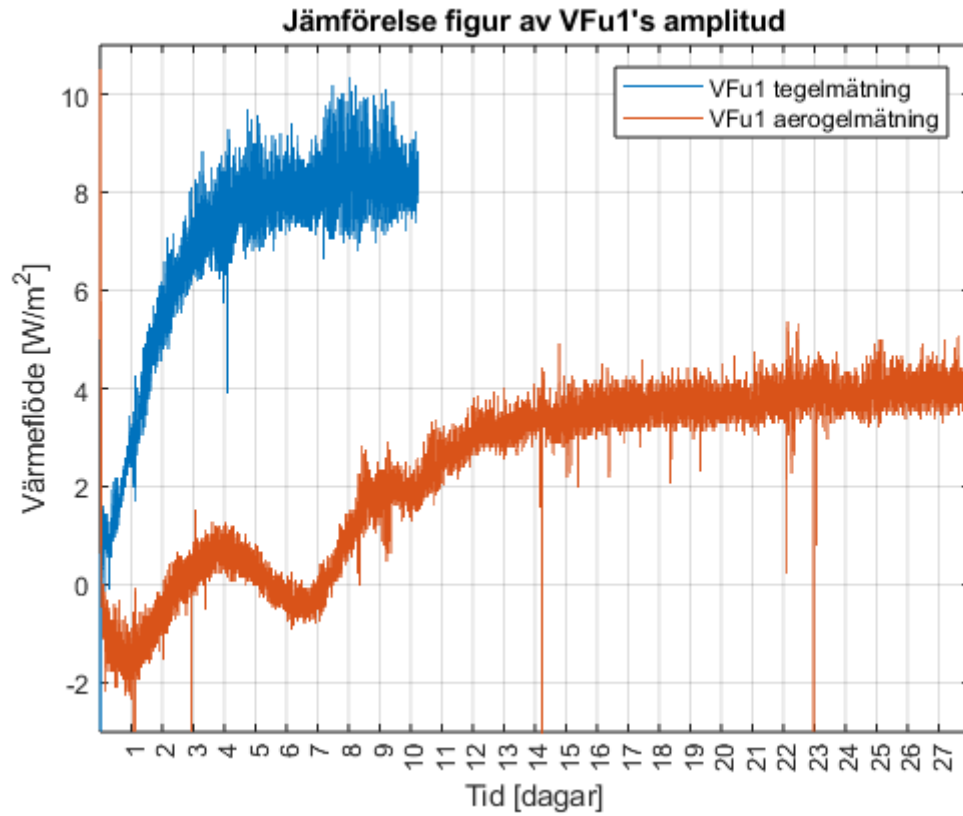


Figur 29: Jämförelse av tidsförskjutning mellan tegelväggen med och utan aerogelputs och hur ytemperaturen ändras över tid (appendix 8.3.5). Figuren är endast plottad för 7 dygn, då längre tidsspann ej är relevant.

I figur 29 syns det att det teoretiska värdet på tidsförskjutningen stämmer väl överens med mätdata, då temperaturen börjar stiga märkbart efter respektive väggs teoretiska tidsförskjutning. Enligt ekvation (4) leder ett sänkt U-värde på tegelväggen till en längre tidsförskjutning. När lagret aerogel applicerades ökade motståndet för värmen att transporteras genom väggen och det totala U-värde minskar (se avsnitt 3.2.3 och 3.3.3), vilket ger upphov till en större tidsförskjutning för vägg med aerogelputs.

### 5.2.6 Jämförelse av värmeflödesmätarnas infästning på aerogel och tegel

I detta avsnitt uppmärksammas skillnaden i mätdata från VFu1 (tegel) och VFu1 (Aerogel) som uppstått mellan mätningen utan och mätningen med aerogelputs se figur 30. Det figuren visar är dels att värmeflödet minskar när man applicerar aerogelputsen och dels att spridningen på mätdata minskat, det vill säga mätningens precision ökar. Detta är intressant eftersom materialet som sensorn fästs på ej bör påverka toleransen utan det som kan ha varit de påverkande faktorerna är antingen infästningen eller att det är en annan sensor som befinner sig på platsen VFu1. Att det är en annan sensor i fallet med aerogelputs bör ej minskat toleransskillnaden eftersom denna sensor har använts i tidigare kandidatarbete och då gett väldigt mycket högre spridning på värdena. Det som då återstår är infästningen och den har varierat emellan mätningarna, skillnaden i infästning består av att man monterade värmeflödesmätaren med tejp för tegelmätningen och med silikon för aerogelmätningen. Denna observation stärker alltså det som lades fram i avsnitt 5.1.3 om att infästning av värmeflödesmätare med silikon ger en ökad precision på mätdata än om montage endast sker med tejp.



Figur 30: Jämförelse figur av VFu1 (tegel) och VFu1 (aerogel) där man kan se spridningen av mätdatan från respektive mätning.

## 6. Slutsats

I studien har det undersökts hur aerogelputs placerad på utsidan av en tegelvägg påverkar både värmeinträngning och värmelagringen. Resultatet jämfördes med teoretiska beräkningar. Studien har även undersökt felkällor inom värmeflödesmätningar och åtgärder för dessa genom att jämföra mätmetodik och resultat från (Alharami, o.a., 2024).

Genom att mäta temperatur, värmeflöde och RF i en kontrollerad labbmiljö kunde det konstateras att aerogelputsen förbättrar väggens isoleringsförmåga markant. U-värdet för den oputsade väggen konvergerade emot  $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  vilket stämmer bra överens med de teoretiska beräkningarna ( $1,14 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Väggen med aerogelputsen konvergerade i stället emot ett U-värde på  $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  som är mindre än det teoretiska ( $0,917 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Förklaring på detta kan vara att aerogelputsen var tjockare än vad som räknas på, alternativt att de uppskattade materialegenskaperna inte stämmer helt. Sammanlagt bekräftar detta att aerogelputs är ett lovande alternativ för att isolera putsade fasader, inte minst i situationer där traditionell tilläggsisolering är svår att implementera.

Värmeinträngning i väggen påverkades bland annat genom att tidsförskjutningen ändras från 20 till 25 timmar när man applicerade aerogelputsen. Även temperaturprofilen i väggen ändras då temperaturen inte sjunker linjärt genom hela tegelväggen när aerogelputs applicerats, se *figur 20*. Detta är fördelaktigt om man exempelvis i en byggnad vill kunna utnyttja teglets värmelagrande förmåga för att reducera maxnivån på uppvärmningseffekten. Icke linjäriteten kan också användas för att reducera randeffekterna på provkroppar, se avsnitt 5.1.1.

Mätningen visade också att fukten från aerogelputsen inte tränger långt in i väggen vilket innebär minimal påverkan på tegelväggen under uttorkningsperioden. Däremot påverkades aerogelputsens värmeledning markant den första tiden då RF fortfarande var hög, se *figur 27*.

I jämförelse med (Alharami, o.a., 2024) visade det sig att förändringar i både mätmetodik och testmiljön, som att exempelvis fästa sensorerna med silikon och förbättra tätningen, har lett till en data med mycket högre precision som dessutom bättre stämmer överens med de teoretiska modellerna. Bland annat ökade lufttemperaturen i "hot-boxen" med ca  $2,5 \text{ °C}$  till följd av förbättrad tätning vilket gjorde att lufttemperaturen kom närmre den teoretiska temperaturen. Studien har dock sina begränsningar, som till exempel att experimentet utfördes i en strikt kontrollerad labbmiljö vilket eliminerar påverkan från strålning, vind och andra faktorer som finns i verkligheten. Experimentet var dessutom begränsat till en så kallad "hot-box" som är betydligt mindre än en verklig tegelvägg. Detta har gjort så att väggens randvillkor är mycket mer betydelsefulla för mätresultatet jämfört med en riktig massiv väggkonstruktion i "normala" dimensioner. Ytterligare slutsats som kan dras från jämförelsen mellan (Alharami, o.a., 2024) och denna studie är att avvikelser i resultatet som uppkom i (Alharami, o.a., 2024) till största del berodde på två saker. Den först är att man ej beaktat randvillkoren i den teoretiska modellen och den andra är att man inte kunde använda all mätdata då två av sensorerna lossnade på grund av undermålig infästning.

Framtida studier skulle kunna grunda sig i att ytterligare undersöka randvillkorens påverkan genom att exempelvis öka isoleringens tjocklek som omsluter väggen. Ett annat sätt att undersöka till vilken grad randvillkoren påverkar vore att mäta värmeflödet ut ur sidorna på tegelväggen. Ett tredje sätt skulle kunna vara att man vänder på väggen så att den putsade sidan vetter mot värmekällan, vilket på så vis hade lett till en annan temperaturprofil i väggen

(se *figur 20*). Ytterligare förslag på forskning skulle kunna vara att man exempelvis studerar påverkan på U-värde med varierande tjocklek på aerogelputsen, eller att man studerar värmeflödet genom väggen när man stänger av värmekällan.

## 7. Referenser

- Alharami, G., Danielsson, J., Durling, S., Gustafsson, A., Jonasson, V., & Mårtensson, S. (2024). *Mätning och simulering av värme flöde och U-värde i tegelbyggnader*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Burström, P. G. (2021). *Byggnadsmaterial: Tillverkning, egenskaper och användning*. Lund: Studentlitteratur.
- Dwyer Omega. (u.d.). *Thermocouple types*. Hämtat från Dwyer Omega: <https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/thermocouple-types>
- Hagentoft, C.-E., & Sandin, K. (2017). *Byggnadsfysik: så fungerar hus*. Lund: Studentlitteratur.
- Heck Wall Systems. (2016). *Rajasil SPB, Technisches Merkblatt*. Hämtat från <https://www.wall-systems.com/>
- Heck Wall Systems. (2021). *HECK AERO iP OWA - Technisches Merkblatt*. Hämtat från <https://www.wall-systems.com/>
- Hukseflux Thermal Sensors BV. (2025). *HFP01 HFP03 manual v2527*. Hämtat från <http://www.hukseflux.com>
- Johansson, P. (2022). *Superisolerande puts för renovering och nybyggnation*. Stockholm: Energimyndigheten.
- Karim, A., Johansson, P., & Sasic Kalagasidis, A. (2022). Knowledge gaps regarding the hygrothermal and long-term performance of aerogel-based coating mortars. *Construction and Building Materials, 314(Part A)*. Hämtat från <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125602>
- Karim, A., Johansson, P., & Sasic Kalagasidis, A. (2023). Moisture absorption of an aerogel-based coating system under different wetting scenarios. *Building and environment*.
- Karim, A., Johansson, P., & Sasic Kalagasidis, A. (2024). Drying of an aerogel-based coating system in Swedish climates: Field tests and simulations. *Building Engineering*.
- Omnisense. (u.d.). *Omnisense*. Hämtat från Omnisense: <https://www.omnisense.com/store>
- Petersson, B.-Å. (2018). *Tillämpad byggnadsfysik*. Lund: Studentlitteratur.
- Ståhl, F. (2009). *Influence of thermal mass on the heating and cooling demands of a building unit*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

## 8. Appendix

### 8.1 MATLAB kod: Kretsanalys och tidskonstant

#### 8.1.1 Kretsanalys\_Tegelvagg\_2025

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-04-04
```

#### indata

```
Te=20; % Temperatur i omgivande klimat rum
Q=10; % Värmflöde som tillförs inne i "hot-boxen"
wbk=0.03; % Antagen negativ effekt av köldbryggor
Lkb=0.5*8; % Längd på köldbryggor
Lt=0.6; % lambda värde för tegel
Li=0.031; % lambda värde för EPS-skivorna
d1=0.25; % halva tegel väggens tjocklek
d2=0.1; % EPS-skivornas tjocklek
A=0.5*0.5; % Ytarea på tegelkuben
Rsi=0.13; % Ytövergångsmotsånd
```

#### Konduktanser

```
Kv1=A/(Rsi+(d1/Lt)); % Konduktans innefrån till mitten av tegelväggen
Kv3=A/(Rsi+(d1/Lt)); % Konduktans från mitten av tegelväggen utåt
% Antag att temperaturen är konstant vinkelrätt mot värmeflödets-
% normalriktningen då kan förlusten utigenom dessa riktningar approximeras
% till Kv2
Kv21=A/(d2/Li +Rsi);
Kv2=Kv21*4; % Total konduktans pga av randeffekter inuti tegelväggen
Kis02=A/(d2/Li + 2*Rsi);
Kiso=Kis02*5; % Total konduktans för isoleringsskivorna som omsluter hålrummet
K12=Kv1+Kv2;
K=1/((1/K12)+(1/Kv3)); % Sammanlagd konduktans för tegelväggen och de EPS-skivor
som omsluter densamma
Ktot=K+Kiso+wbk*Lkb; % Total konduktans för "hot-boxen"
dT=Q/Ktot; % Temperaturskillnaden som uppstår mellan inne och ute till följd av
lampans värmertilförsel
Tinne=Te+dT; % Inne Temperatur i boxen
U_varde_vagg=K/A; % U-värde för väggen
T_vagg_mitt=-((Q-(Kiso+wbk*Lkb)*(Tinne-Te))/(A/(Rsi+(d1/Lt))))+Tinne; % Temperatur
i mitten av väggen
fprintf("T_inne= %2.2f [degC]\n",Tinne)
fprintf("T_vagg_mitt= %2.2f [degC]\n",T_vagg_mitt)
fprintf("U_vagg= %2.2f [W/m2K]\n",U_varde_vagg)
```

T\_inne= 33.10 [degC]

T\_vägg\_mitt= 24.94 [degC]

U\_vägg= 1.14 [W/m2K]

---

*Published with MATLAB® R2022b*

## 8.1.2 Kretsanalys\_Tegelvägg\_Aerogel\_2025

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-04-04
```

### indata

```
Te=20; % Temperatur i omgivande klimat rum
Q=10; % Värmflöde som tillförs inne i "hot-boxen"
wbk=0.03; % Antagen negativ effekt av köldbryggor
Lkb=0.5*8; % Längd på köldbryggor
Lt=0.6; % lambda värde för tegel
Li=0.031; % lambda värde för EPS-skivorna
La=0.04; % teoretiskt lambda värde för aerogelputs
d1=0.25; % halva tegel väggens tjocklek
d2=0.1; % EPS-skivornas tjocklek
d3=0.04; % Aerogelputsens tjocklek
A=0.5*0.5; % Ytarea på tegelkuben
Rsi=0.13; % Ytövergångsmotsånd
```

### Konduktanser

```
Kv1=A/(Rsi+(d1/Lt)); % Konduktans innefrån till mitten av tegelväggen
Kv3=A/(Rsi+(d1/Lt)+(d3/La)); % Konduktans från mitten av tegelväggen utåt
% Antag att temperaturen är konstant vinkelrätt mot värmeledningens-
% normalriktningen då kan förlusten utigenom dessa riktningar approximeras
% till Kv2
Kv21=A/(d2/Li +Rsi);
Kv2=Kv21*4; % Total konduktans pga av randeffekter inuti tegelväggen
Kis02=A/(d2/Li + 2*Rsi);
Kiso=Kis02*5; % Total konduktans för isoleringsskivorna som omsluter hålrummet
K12=Kv3+Kv2;
K=1/((1/K12)+(1/Kv1)); % Sammanlagd konduktans för tegelväggen och de EPS-skivor
som omsluter densamma
Ktot=K+Kiso+wbk*Lkb; % Total konduktans för "hot-boxen"
dT=Q/Ktot; % Temperaturskillnaden som uppstår mellan inne och ute till följd av
lampans värmeförsörjning
Tinne=Te+dT; % Inne Temperatur i boxen
U_varde_vagg=K/A; % U-värde för väggen
```

```
T_vagg_mitt=-((Q-(Kiso+wbk*Lkb)*(Tinne-Te))/(A/(Rsi+(d1/Lt))))+Tinne; % Temperatur i mitten av väggen
```

```
fprintf("T_inne= %2.2f [degC]\n",Tinne)
fprintf("T_vagg_mitt= %2.2f [degC]\n",T_vagg_mitt)
fprintf("U_vagg= %2.2f [W/m2K]\n",U_varde_vagg)
```

```
T_inne= 34.13 [degC]
```

```
T_vagg_mitt= 27.05 [degC]
```

```
U_vagg= 0.92 [W/m2K]
```

---

*Published with MATLAB® R2022b*

### 8.1.3 Kretsanalys\_Tegelvagg\_2024

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-04-04
```

#### indata

```
Te=20; % Temperatur i omgivande klimat rum
Q=10; % Värmflöde som tillförs inne i "hot-boxen"
wbk=0.03; % Antagen negativ effekt av köldbryggor
Lkb=0.5*8; % Längd på köldbryggor
Lt=0.6; % lambda värde för tegel
Li=0.031; % lambda värde för EPS-skivorna
d1=0.5; % halva tegel väggens tjocklek
d2=0.1; % EPS-skivornas tjocklek
A=0.5*0.5; % Ytarea på tegelkuben
Rsi=0.13; % Ytövergångsmotsånd
```

#### Konduktanser

```
K=A/(Rsi+(d1/Lt)+Rsi); % Konduktans tegelväggen
Kis02=A/(d2/Li + 2*Rsi);
Kiso=Kis02*5; % Total konduktans för isoleringsskivorna som omsluter hålrummet
Ktot=K+Kiso+wbk*Lkb; % Total konduktans för "hot-boxen"
dT=Q/Ktot; % Temperaturskillnaden som uppstår mellan inne och ute till följd av lampans värmertilförsel
Tinne=Te+dT; % Inne Temperatur i boxen
U_varde_vagg=K/A; % U-värde för väggen
T_vagg_mitt=-((Q-(Kiso+wbk*Lkb)*(Tinne-Te))/(A/(Rsi+(d1/2/Lt))))+Tinne; % Temperatur i mitten av väggen
fprintf("T_inne= %2.2f [degC]\n",Tinne)
fprintf("T_vagg_mitt= %2.2f [degC]\n",T_vagg_mitt)
```

```
fprintf("U_vagg= %2.2f [W/m2K]\n",U_varde_vagg)
```

```
T_inne= 34.14 [degC]
```

```
T_vagg_mitt= 27.07 [degC]
```

```
U_vagg= 0.91 [W/m2K]
```

.....

*Published with MATLAB® R2022b*

## 8.1.4 Kretsanalys\_Tegelvagg\_Aerogel\_2024

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21  
% Kurs: Kandidatarbete  
% Datum: 2025-04-04
```

### indata

```
Te=20; % Temperatur i omgivande klimat rum  
Q=10; % Värmflöde som tillförs inne i "hot-boxen"  
wbk=0.03; % Antagen negativ effekt av köldbryggor  
Lkb=0.5*8; % Längd på köldbryggor  
  
Lt=0.6; % lambda värde för tegel  
Li=0.031; % lambda värde för EPS-skivorna  
La=0.04; % teoretiskt lambda värde för aerogelputs  
  
d1=0.5; % halva tegel väggens tjocklek  
d2=0.1; % EPS-skivornas tjocklek  
d3=0.04; % Aerogelputsens tjocklek  
A=0.5*0.5; % Ytarea på tegelkuben  
  
Rsi=0.13; % Ytövergångsmotsånd
```

### Konduktanser

```
K=A/(Rsi+(d1/Lt)+(d3/La)+Rsi); % Konduktans tegelväggen  
Kis02=A/(d2/Li + 2*Rsi);  
Kiso=Kis02*5; % Total konduktans för isoleringsskivorna som omsluter hålrummet  
  
Ktot=K+Kiso+wbk*Lkb; % Total konduktans för "hot-boxen"  
  
dT=Q/Ktot; % Temperaturskillnaden som uppstår mellan inne och ute till följd av  
lampans värmertilförsel  
  
Tinne=Te+dT; % Inne Temperatur i boxen  
  
U_varde_vagg=K/A; % U-värde för väggen  
  
T_vagg_mitt=-((Q-(Kiso+wbk*Lkb)*(Tinne-Te))/(A/(Rsi+(d1/2/Lt))))+Tinne; %  
Temperatur i mitten av väggen  
  
fprintf("T_inne= %2.2f [degC]\n",Tinne)  
fprintf("T_vagg_mitt= %2.2f [degC]\n",T_vagg_mitt)  
fprintf("U_vagg= %2.2f [W/m2K]\n",U_varde_vagg)
```

```
T_inne= 36.72 [degC]
```

```
T_vägg_mitt= 32.35 [degC]
```

```
U_vägg= 0.48 [W/m2K]
```

---

*Published with MATLAB® R2022b*

### 8.1.5 Tidsförskjutning tegelvägg

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21  
% Kurs: Kandidatarbete  
% Datum: 2025-04-04
```

#### indata

```
% tegel  
Lam=0.6; % lambda värde  
p=1700; % densitet  
c=800; % värmelagringskapacitet  
A=0.25; % tvärsnittsarea av tegelvägg  
D=0.5; % väggens tjocklek  
  
% allmänt  
Kvagg=0.284849173895949; % hämtat från kretsanalys  
  
Rsi=0.13; % Ytövergångsmotstånd  
d=Rsi*Lam; % övergångsmotståndets ekvivalenta tjocklek;
```

#### penetrationsdjup

```
dp=sqrt((Lam/(p*c))*(24*3600/pi)); % [m]
```

#### korrektionsfaktor sigma

```
ddp=d/dp;  
  
Ddp=D/dp;  
  
sigma=0.55; % Från figur 2
```

#### Effektiv värmelagring volym

```
deff=sigma*dp; % [m]  
Vs=(min(deff,D))*A; % [m^3]
```

#### tidskonstant

```
tc=p*c*Vs/(Kvagg*3600); % [h] antag: ingen luftomsättning, Ae*U=Ktot  
fprintf("Tidskonstant= %2.2f [h]\n",tc)  
Tidskonstant= 20.09 [h]
```

---

*Published with MATLAB® R2022b*

### 8.1.6 Tidsförskjutning för tegelvägg med aerogelputs

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
```

```
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-04-28
```

## indata

```
% tegel
Lam=0.6; % lambda värde
p=1700; % densitet
c=800; % värmelagringskapacitet
A=0.25; % tvärsnittsarea av tegelvägg
D=0.5; % väggens tjocklek

% allmänt
Kvagg=0.229235034934891; % hämtat från kretsanalys med aerogelputs

Rsi=0.13; % Ytövergångsmotstånd
d=Rsi*Lam; % övergångsmotståndets ekvivalenta tjocklek;
```

## penetrationsdjup

```
dp=sqrt((Lam/(p*c))*(24*3600/pi)); % [m]
```

## korrektionsfaktor sigma

```
ddp=d/dp;

Ddp=D/dp;

sigma=0.55; % Från figur 2
```

## Effektiv värmelagring volym

```
deff=sigma*dp; % [m]

Vs=(min(deff,D))*A; % [m^3]
```

## tidskonstant

```
tc=p*c*Vs/(Kvagg*3600); % [h] antag: ingen luftomsättning, Ae*U=Ktot
fprintf("Tidskonstant= %2.2f [h]\n",tc)

Tidskonstant= 24.96 [h]
```

---

*Published with MATLAB® R2022b*

## 8.2 MATLAB kod: Analys av mätdata

### 8.2.1 Processad rådata från mätning av tegelvägg

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-04-10
clear, clc

load("kandidat_data")
```

```

CHt=LCFRO23mtningtegel.Variables;

tid_s=CHt(1:14727,1); % [sekunder]
tid_m=(1:length(tid_s))';
tid_h=(1:(length(tid_m)/60))';
tid_d=(1:(length(tid_h)/24))';
CH=CHt(1:14727,(2:5)); % [V]
T=CHt(1:14727,(6:11)); % [C]

% Sensitivitet
CH1sens=0.00006165;
CH2sens=0.00006259;
CH3sens=0.00006231;
CH4sens=0.00006236;

sens=[CH1sens,CH2sens,CH3sens,CH4sens]; % [V/(W/m^2)]

% Värme flöde

q=CH./sens; % [W/m^2]
dT=(T(:,2)-T(:,1));
U=q./dT;
Umedel=((U(:,1)+U(:,2)+U(:,3))/3)+U(:,4))/2;
U=[U,Umedel];

U_medel_inne_ute=mean(Umedel);
figure (11)

plot(tid_m,U)

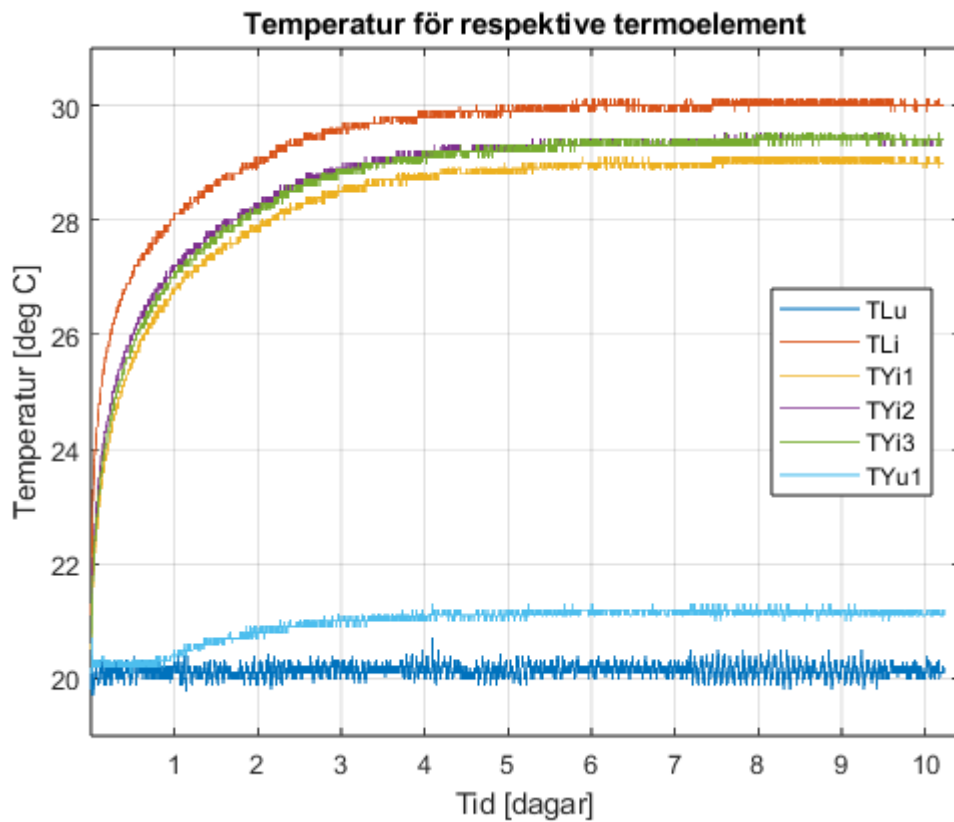
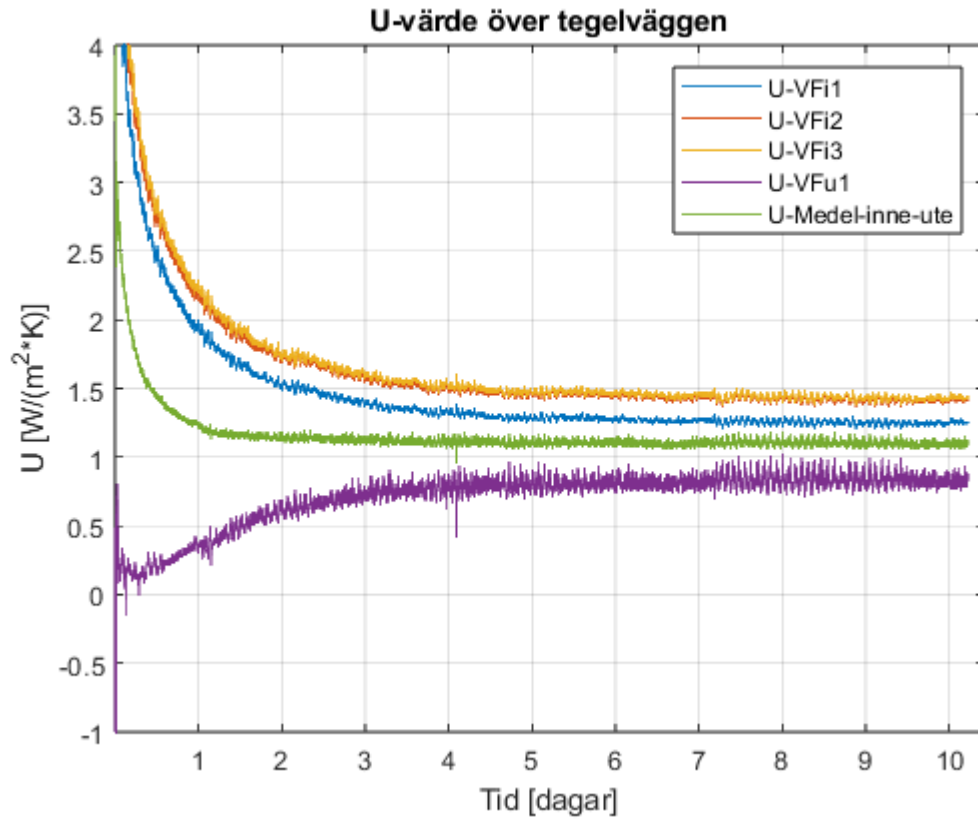
hold on
grid on
ylim([-1,4])
xticks(tid_d*(24*60))
xticklabels(tid_d)
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel('U [W/(m^2*K)]')
legend("U-VFi1","U-VFi2","U-VFi3","U-VFu1","U-Medel-inne-ute")
title("U-värde över tegelväggen")
hold off

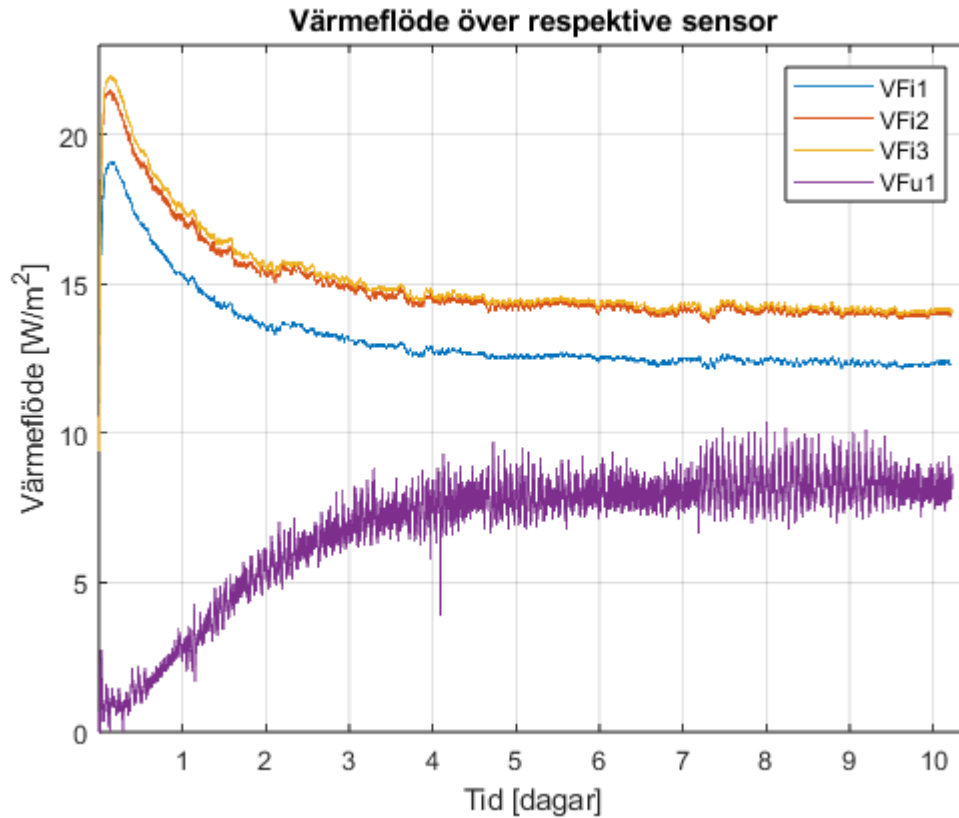
figure (12)
grid on
plot(tid_m,T)
grid on
hold on
ylim([19,31])
xticks(tid_d*(24*60))
xticklabels(tid_d)
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel("Temperatur [deg C]")
legend("TLu","TLi","TYi1","TYi2","TYi3","TYu1",Location="best")
title("Temperatur för respektive termoelement")
hold off

figure (13)
grid on
plot(tid_m,q)
grid on
hold on
ylim([0,23])
xticks(tid_d*(24*60))
xticklabels(tid_d)
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel("Värme flöde [W/m^2]")

```

```
legend("VFi1", "VFi2", "VFi3", "VFu1")  
title("Värmefflöde över respektive sensor")  
hold off
```





*Published with MATLAB® R2022b*

## 8.2.2 Processad rådata från mätning av tegelvägg med aerogelputs

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-04-28
clear, clc

load("mtdata_Aerogel_2025.mat")
CHt=mtdata_Aerogel_2025.Variables;

tid_s=CHt(1:length(CHt(:,1)),1); % [sekunder]
tid_m=2*(1:length(tid_s))';
tid_h=(1:(length(tid_m)/30))';
tid_d=(1:(length(tid_h)/24))';
CH=CHt(1:length(CHt(:,1)),(2:6)); % [V]
T=CHt(1:length(CHt(:,1)),(7:11)); % [C]
T=[T,20.*[ones(1,length(T))]]';

% Sensitivitet
CH1sens=0.00006165;
CH2sens=0.00006259;
CH3sens=0.00006231;
CH4sens=0.00006236;
CH5sens=0.00006221;

sens=[CH1sens,CH2sens,CH3sens,CH4sens,CH5sens]; % [V/(W/m^2)]
```

```

% Värmefflöde

q=CH./sens; % [W/m^2]
dT=(T(:,1)-T(:,6));
U=q./dT;
Umedel=((U(:,1)+U(:,2)+U(:,3))/3)+U(:,5))/2;
U=[U,Umedel];

U_medel_inne_ute=mean(Umedel);
figure (11)

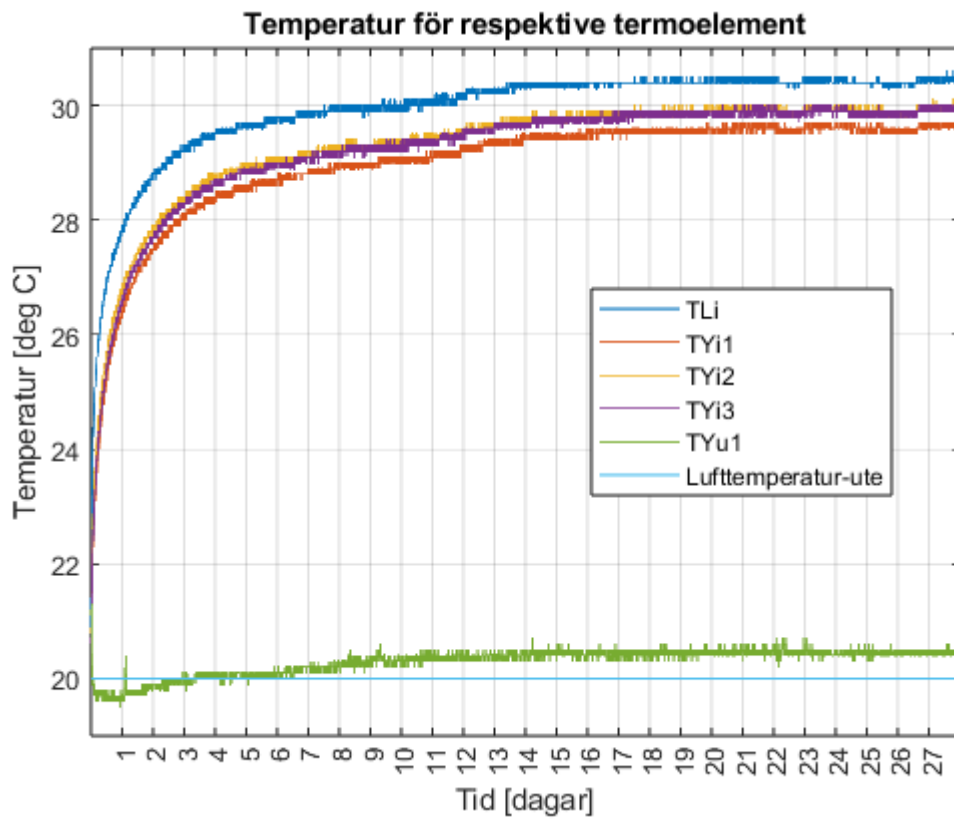
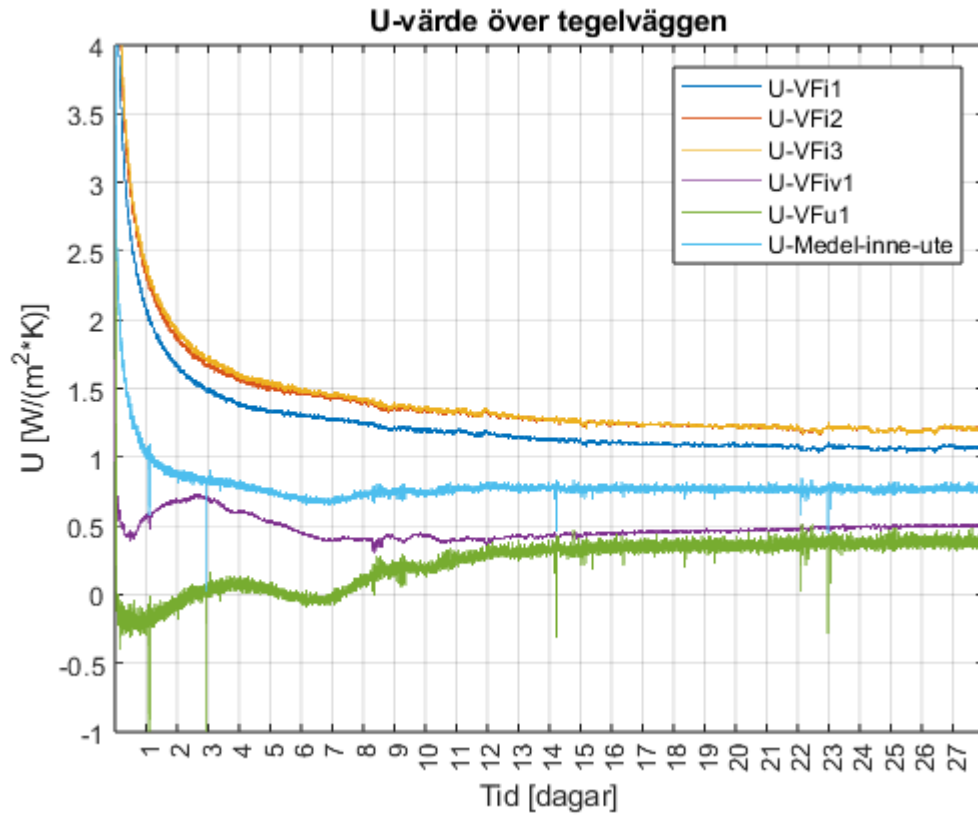
plot(tid_m,U)

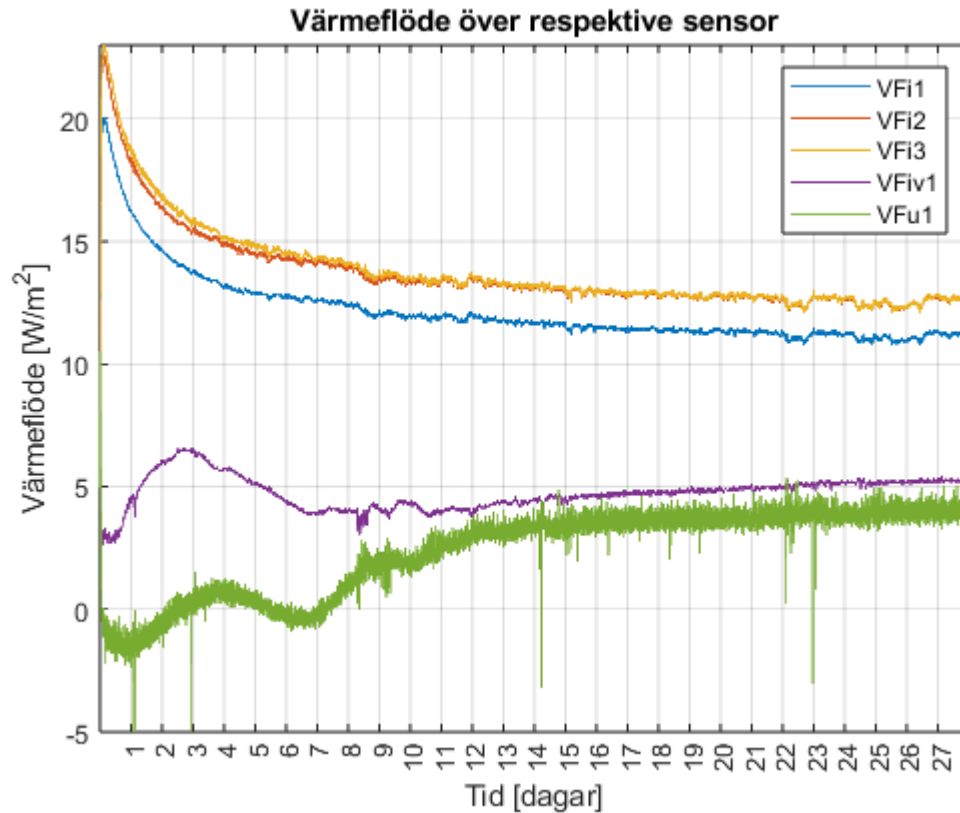
hold on
grid on
ylim([-1,4])
xlim([0,24*60*28])
xticks(tid_d*(24*60))
xticklabels(tid_d)
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel('U [W/(m^2*K)]')
legend("U-VFi1", "U-VFi2", "U-VFi3", "U-VFiv1", "U-VFul", "U-Medel-inne-ute")
title("U-värde över tegelväggen")
hold off

figure (12)
grid on
plot(tid_m,T)
grid on
hold on
ylim([19,31])
xlim([0,24*60*28])
xticks(tid_d*(24*60))
xticklabels(tid_d)
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel('Temperatur [deg C]')
legend("TLi", "TYi1", "TYi2", "TYi3", "TYu1", "Lufttemperatur-ute", Location="best")
title("Temperatur för respektive termoelement")
hold off

figure (13)
grid on
plot(tid_m,q)
grid on
hold on
ylim([-5,23])
xlim([0,24*60*28])
xticks(tid_d*(24*60))
xticklabels(tid_d)
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel('Värmefflöde [W/m^2]')
legend("VFi1", "VFi2", "VFi3", "VFiv1", "VFul")
title("Värmefflöde över respektive sensor")
hold off

```





Published with MATLAB® R2022b

### 8.2.3 Analys av data från fuktsensorer

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-05-05
clear, clc

Bakom_Aerogel=readtimetable("FUKT-data (2).csv","Range","C9:F8750");
I_hotbox=readtimetable("I-hålrummet.csv","Range","C9:F8750");
I_mitten=readtimetable("I_mitten.csv","Range","C9:F8750");

BA=retime(Bakom_Aerogel,"hourly","mean");
IH=retime(I_hotbox,"hourly","mean");
IM=retime(I_mitten,"hourly","mean");

% Temperatur
figure (21)
T1=BA.Var1;
T2=IM.Var1;
T3=IH.Var1;
plot(T1(3:end))
xticks((1:31)*(24))
xticklabels(1:31)
xlim([0,31*24])
grid on
hold on
plot(T2)
plot(T3)
ylim([18,32])
xlabel('Tid [dygn]')
```

```

ylabel("Temperatur [deg C]")
legend("Temperatur bakom aerogel","Temperatur i mitten av väggen","Lufttemperatur i hotbox",Location="southeast")
title("Tim-medelvärde av temperatur för respektive fuktsensor")
hold off

% Relativ fuktighet
figure (22)
plot(BA.Var2)
grid on
hold on
plot(IM.Var2)
plot(IH.Var2)
plot([0,31*24],[50 50],LineWidth=1)
xticks((1:31)*(24))
xticklabels(1:31)
xlim([0,31*24])
xlabel('Tid [dygn]')
ylabel("Relativ luftfuktighet [%]")
legend("Relativfuktighet bakom aerogelputs","Relativfuktighet i mitten av väggen","Relativfuktighet i hotbox","Randvilkor i klimatrum")
title("Tim-medelvärde av den relativfuktighet för respektive fuktsensor")
hold off

% Fukthalt
figure (23)
plot(BA.Var3)
grid on
hold on
plot(IM.Var3)
plot(IH.Var3)
ylim([5,25])
xlabel('Tid [dygn]')
xticks((1:31)*(24))
xticklabels(1:31)
xlim([0,31*24])
ylabel("Fuktkvot [%]")
legend("Fuktkvot bakom aerogelputs","Fuktkvot i mitten av väggen","Fuktkvot i hotbox")
title("Tim-medelvärde av fuktkvot för respektive fuktsensor")
hold off

% Jämförelse figur av lufttemperatur i hotbox emellan olika mätare

load("mtdata_Aerogel_2025.mat")
CHT=mtdata_Aerogel_2025.Variables;

tid_s=CHT(1:length(CHT(:,1)),1); % [sekunder]
tid_m=2*(1:length(tid_s))';
tid_h=(1:(length(tid_m)/30))';
tid_d=(1:(length(tid_h)/24))';
CH=CHT(1:length(CHT(:,1)),(2:6)); % [V]
T=CHT(1:length(CHT(:,1)),(7:11)); % [C]
T=[T,20.*[ones(1,length(T))]]';
Ttbl=table(T);
TT=table2timetable(Ttbl,StartTime="2025-03-31 07:41:25",TimeStep=minutes(2));
TT = splitvars(TT, 'T');
TT=retime(TT,"hourly","mean");

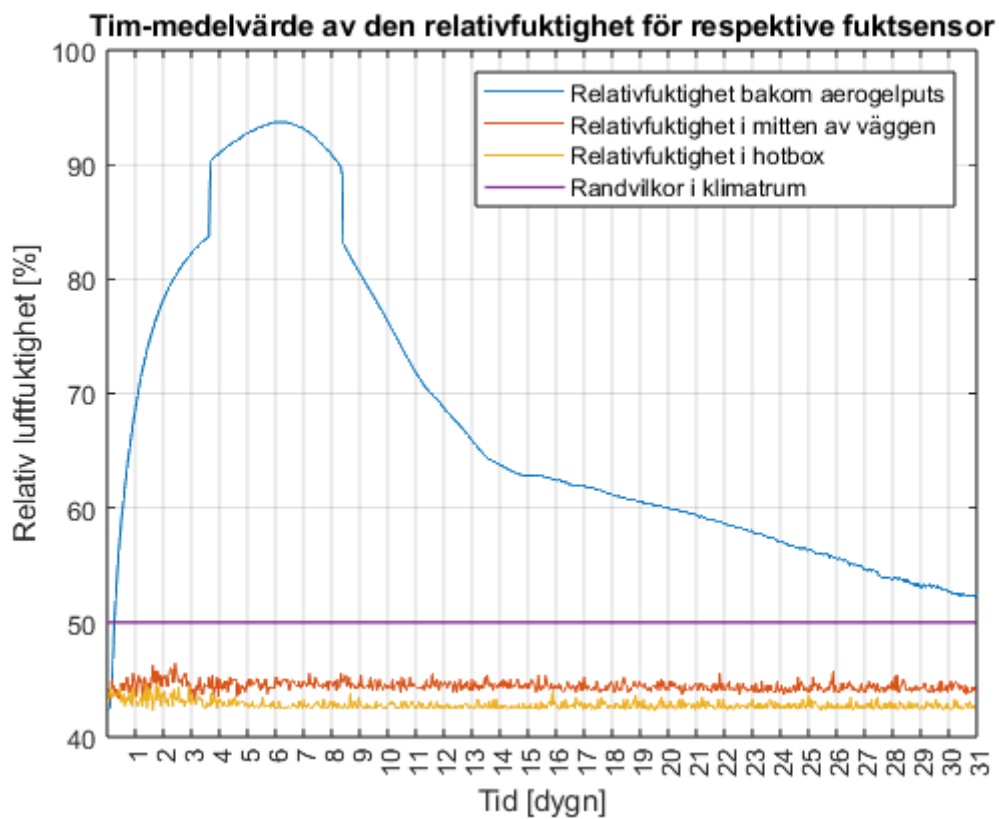
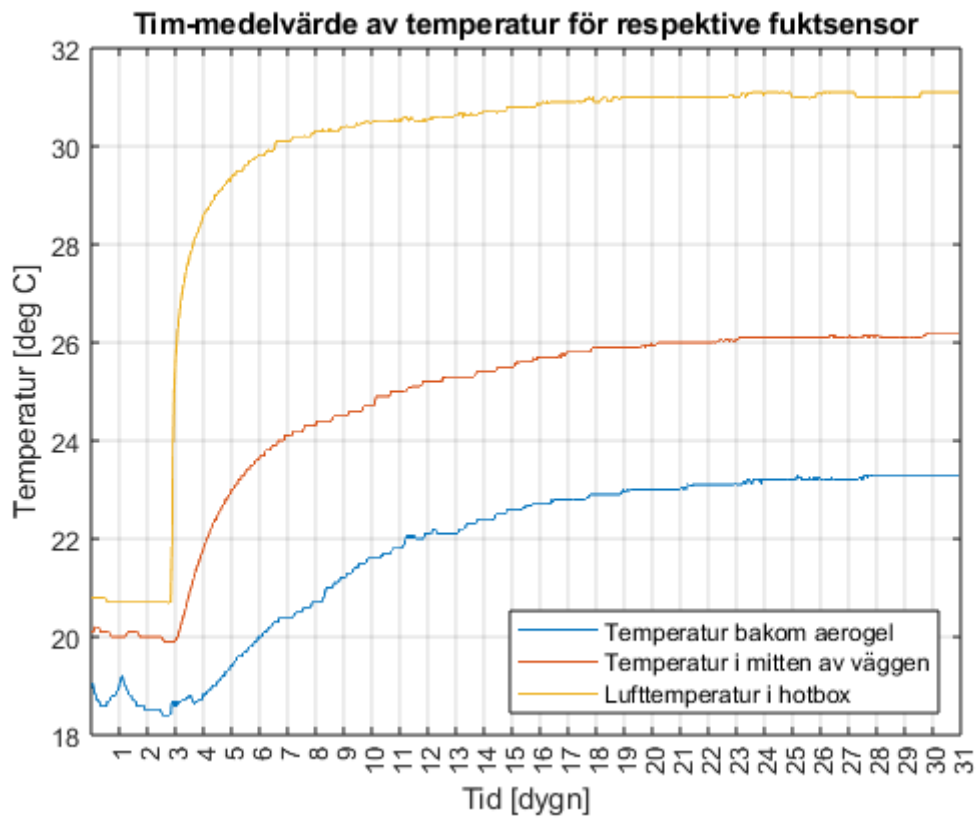
figure (24)
plot(68:740,TT.T_1)
hold on
grid on
plot(T3)
xlabel('Tid [dygn]')
xticks((1:31)*(24))
xticklabels(1:31)

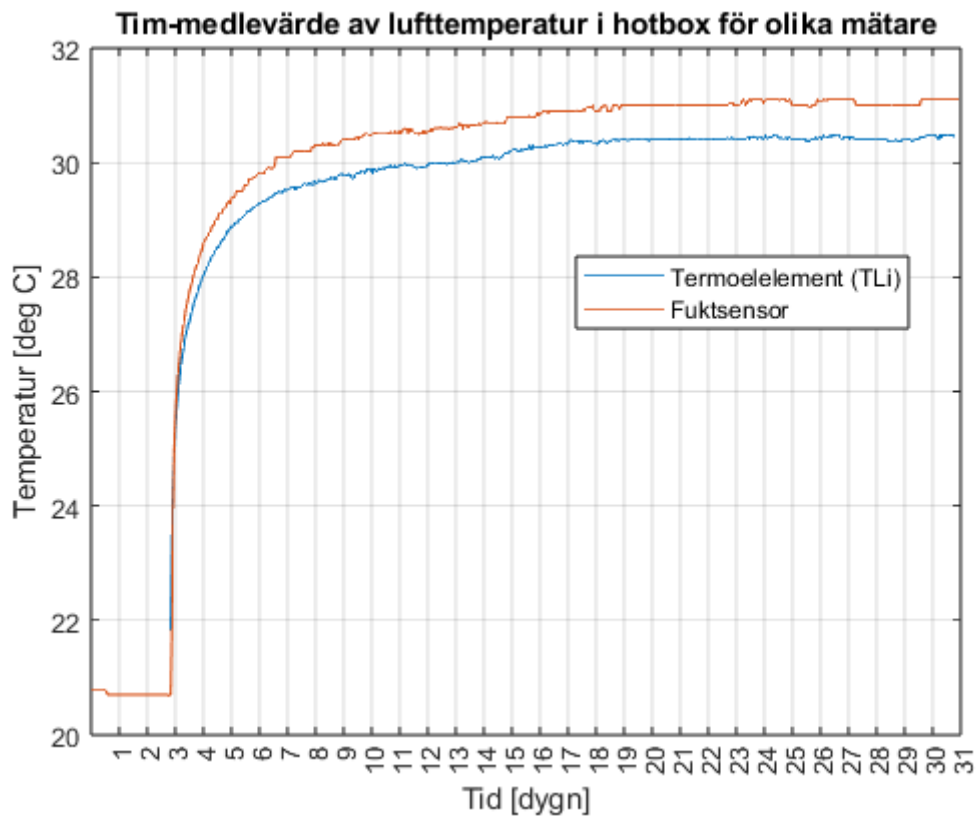
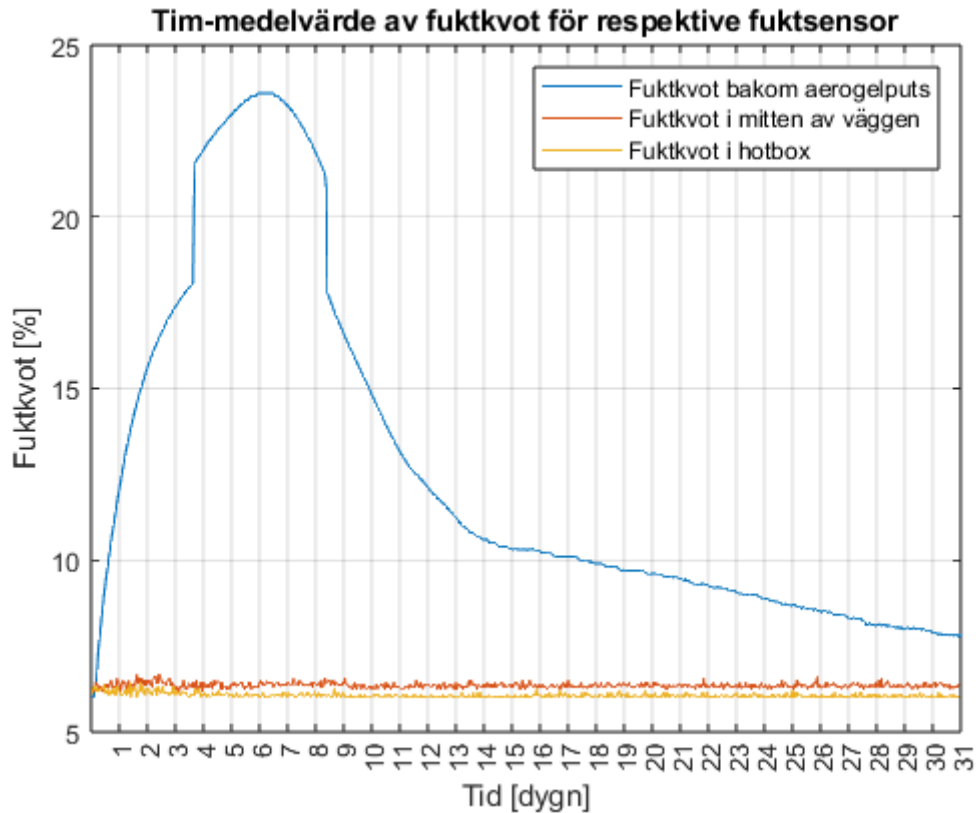
```

```

xlim([0,31*24])
ylabel("Temperatur [deg C]")
legend("Termoelement (TLi)", "Fuktsensor", Location="best")
title("Tim-medelvärde av lufttemperatur i hotbox för olika mätare")
hold off

```





**Aerogelputsens Lambda-värde som funktion av Relativfuktighet. tim-medel**

```
DTTF=retime(Bakom_Aerogel,"hourly","mean");
dTt1=timetable(TT.Time,TT.T_5);
DTT1=retime(dTt1,"hourly","mean");
```

```

TR=timerange(DTT1.Time(80,1),DTT1.Time(end,1)); % tidsintervall. Detta
tidsintervall väjs då det är först vid denna start tid som värmflödet går åt "rätt
håll" dvs innifrån och ut

dt=(DTTF.Var1(TR,:)-DTT1.Var1(TR,:)); % drivande temperaturgradient
Rf=DTTF.Var2(TR,:); % Relativ fuktighet

% Sensitivitet värmeflödesmätare
CH1sens=0.00006165;
CH2sens=0.00006259;
CH3sens=0.00006231;
CH4sens=0.00006236;
CH5sens=0.00006221;

sens=[CH1sens,CH2sens,CH3sens,CH4sens,CH5sens]; % [V/(W/m^2)]

q=[CH(:,4)./CH4sens ,CH(:,5)./CH5sens];
qm=mean(q,2);

qT=array2timetable(qm,StartTime="2025-03-31 07:41:25",TimeStep=minutes(2));
qT=retime(qT,"hourly","mean");

q1=qT(TR,:);

% toleransområde för olika tjocklek samt olika sensitivitet
for i=0.03:0.01:0.05
d=ones(length(Rf),1).*i;

CH1=timetable(CH,StartTime="2025-03-31 07:41:25",TimeStep=minutes(2));
CH1=retime(CH1,"hourly","mean");
CH1=CH1.CH(TR,:);

tol1=1.85*10^-6; tol2=1.88*10^-6; tol3=1.87*10^-6; tol4=tol3; tol5=tol3; %
Sensorernas tolerans

tol=[tol1,tol2,tol3,tol4,tol5];
sens_korr_add=sens+tol;
sens_korr_sub=sens-tol;

q_korr_sens_sub=d.*(CH1./sens_korr_sub)./(dt);
q_korr_sens_add=d.*(CH1./sens_korr_add)./(dt);

tol_max_i=max([q_korr_sens_add(:,4:5), q_korr_sens_sub(:,4:5)],[],2); % Max värde
tol_min_i=min([q_korr_sens_add(:,4:5), q_korr_sens_sub(:,4:5)],[],2); % Min värde

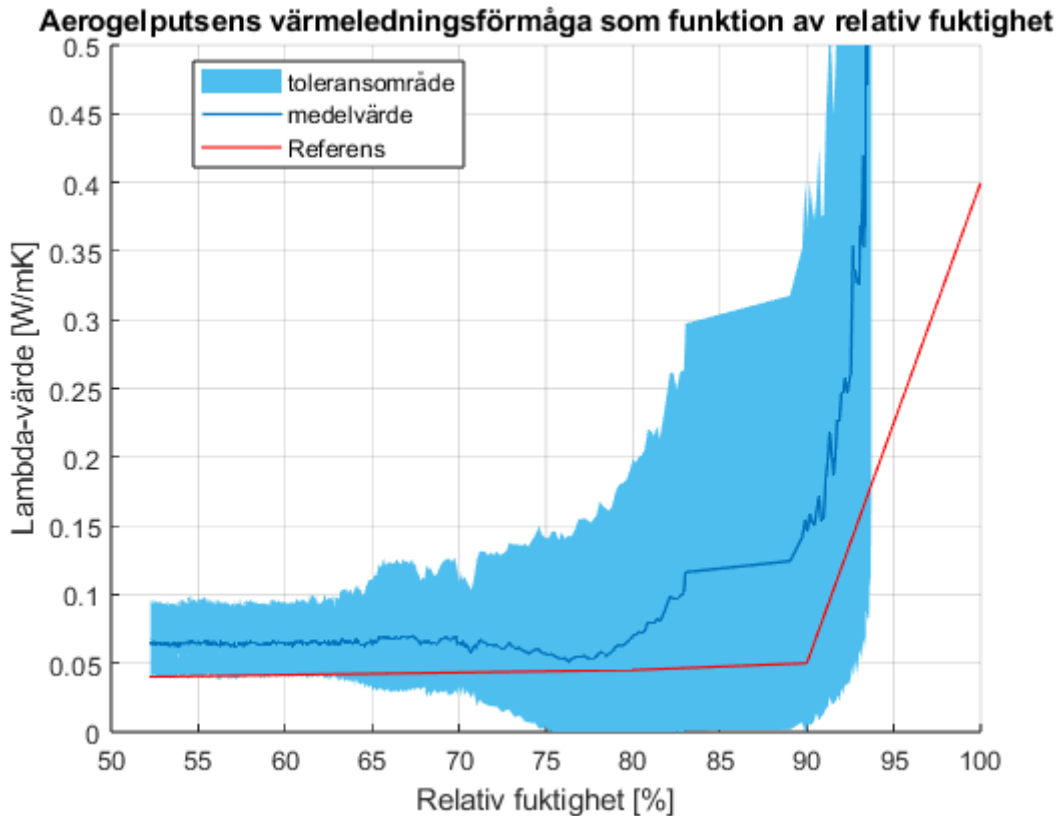
xconf_i=[Rf; Rf(end:-1:1)];
yconf_i=[tol_min_i; tol_max_i(end:-1:1)];

figure(25)
hold on
patch(xconf_i,yconf_i,[0.3010 0.7450 0.9330],EdgeColor="none");
end

% medel
d=ones(length(Rf),1).*0.04; % cirka 40 mm aerogelputs på väggen
lam=(d.*q1.qm./dt);

plot(Rf,lam,LineWidth=1,Color=[0 0.4470 0.7410])
grid on
ylim([0,0.5])
ylabel("Lambda-värde [W/mK]")
xlabel("Relativ fuktighet [%]")
title("Aerogelputsens värmeledningsförmåga som funktion av relativ fuktighet")
plot([min(Rf),80,90,100],[0.04,0.045,0.05,0.4],"r")
legend("tolersansområde","", "", "medelvärde", "Referens",Location="best")

```



*Published with MATLAB® R2022b*

## 8.3 MATLAB kod: Jämförelse av mätdata

### 8.3.1 Jämförelse figur, med data från 2025

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-04-15
clear, clc

load("kandidat_data")
CHt=LCFRO23mtningtegel.Variables;

tid=CHt(1:14727,1); % [sekunder]
tid_m=(1:length(tid))';
tid_h=(1:(length(tid_m)/60))';
tid_d=(1:(length(tid_h)/24))';
CH=CHt(1:14727,(2:5)); % [V]
T=CHt(1:14727,(6:11)); % [C]

tid_los=4879; % Tidpunkt då första sensorn lossnade

% Sensitivitet
CH1sens=0.00006165;
CH2sens=0.00006259;
CH3sens=0.00006231;
CH4sens=0.00006236;

sens=[CH1sens,CH2sens,CH3sens,CH4sens]; % [V/(W/m^2)]
```

```

% Värmefflöde

q=CH./sens; % Värmeflöde [W/m^2]
dT=(T(:,2)-T(:,1)); % Drivande temperatur skillnad
U=q./dT; % U-värde
Umedel=((U(:,1)+U(:,2)+U(:,3))/3)+U(:,4))/2; % Medel U-värde
U=[U,Umedel];

U_hourly_mean = movmean(U,60,1); % Glidande medelvärde med 60 minuters intervall
U_hourly_mean_inne = mean(U_hourly_mean(:,1:3),2);

U_medel_inne=(U(:,1)+U(:,2)+U(:,3))/3;
U_medel_ute=U(:,4);

U_medel_inne_ute=mean(Umedel);

U_varde_analytisk=1.139396695583796; % analytiskt U-värde 2025
U2=0.914634146341463; % analytiskt U-värde 2024

```

## Toleransområde

```

tol1=1.85*10^-6; tol2=1.88*10^-6; tol3=1.87*10^-6; tol4=tol3; % Sensorernas
tolerans

tol=[tol1,tol2,tol3,tol4];
sens_korr_add=sens+tol;
sens_korr_sub=sens-tol;

U_korr_sens_sub=(CH./sens_korr_sub)./dT;
U_korr_sens_add=(CH./sens_korr_add)./dT;

tol_max_i=max([U_korr_sens_add(:,1:3), U_korr_sens_sub(:,1:3)],[],2); % Max värde
tol_min_i=min([U_korr_sens_add(:,1:3), U_korr_sens_sub(:,1:3)],[],2); % Min värde

xconf_i=[tid_m; tid_m(end:-1:1)];
yconf_i=[tol_min_i; tol_max_i(end:-1:1)];

tol_max_u=max([U_korr_sens_add(:,4), U_korr_sens_sub(:,4)],[],2); % Max värde
tol_min_u=min([U_korr_sens_add(:,4), U_korr_sens_sub(:,4)],[],2); % Min värde

xconf_u=[tid_m; tid_m(end:-1:1)];
yconf_u=[tol_min_u; tol_max_u(end:-1:1)];

```

## Graf

```

figure (14)

p=fill(xconf_i,yconf_i,[0.8 1 0.8],EdgeColor="none");
hold on
plot(U_hourly_mean_inne,Color=[0.4660 0.6740 0.1880],LineWidth=0.7)

p2=fill(xconf_u,yconf_u,[0.3010 0.7450 0.9330],EdgeColor="none");
plot(U_hourly_mean(:,4),Color=[0 0.4470 0.7410],LineWidth=0.7)

plot(U_hourly_mean(:,5),Color=[0.8500 0.3250 0.0980],LineWidth=0.7)

plot([1,length(tid_m)],U_varde_analytisk.*[1,1],Color=[0.9290 0.6940
0.1250],LineWidth=1,LineStyle="--")

plot([1,length(tid_m)],U2.*[1,1],Color=[0.4940 0.1840
0.5560],LineWidth=1,LineStyle="--")

grid on
ylim([0,4.5])

```

```

xticks(tid_d*(24*60))
xticklabels(tid_d)

xlabel('Tid [dagar]')
ylabel("U [W/(m^2*K)]")
legend("Toleransområde U-inne","Medelvärde U-inne","Toleransområde U-
ute","Medelvärde U-ute","Medelvärde U-inne-ute","Analytiskt U-värde
2025","Analytiskt U-värde 2024")
title("Glidande medel-U-värde över tegelväggen (2025)")
hold off

% 3,5 dagar
figure (18)

p=fill(xconf_i,yconf_i,[0.8 1 0.8],EdgeColor="none");
hold on
plot(U_hourly_mean_inne,Color=[0.4660 0.6740 0.1880],LineWidth=0.7)

p2=fill(xconf_u,yconf_u,[0.3010 0.7450 0.9330],EdgeColor="none");
plot(U_hourly_mean(:,4),Color=[0 0.4470 0.7410],LineWidth=0.7)

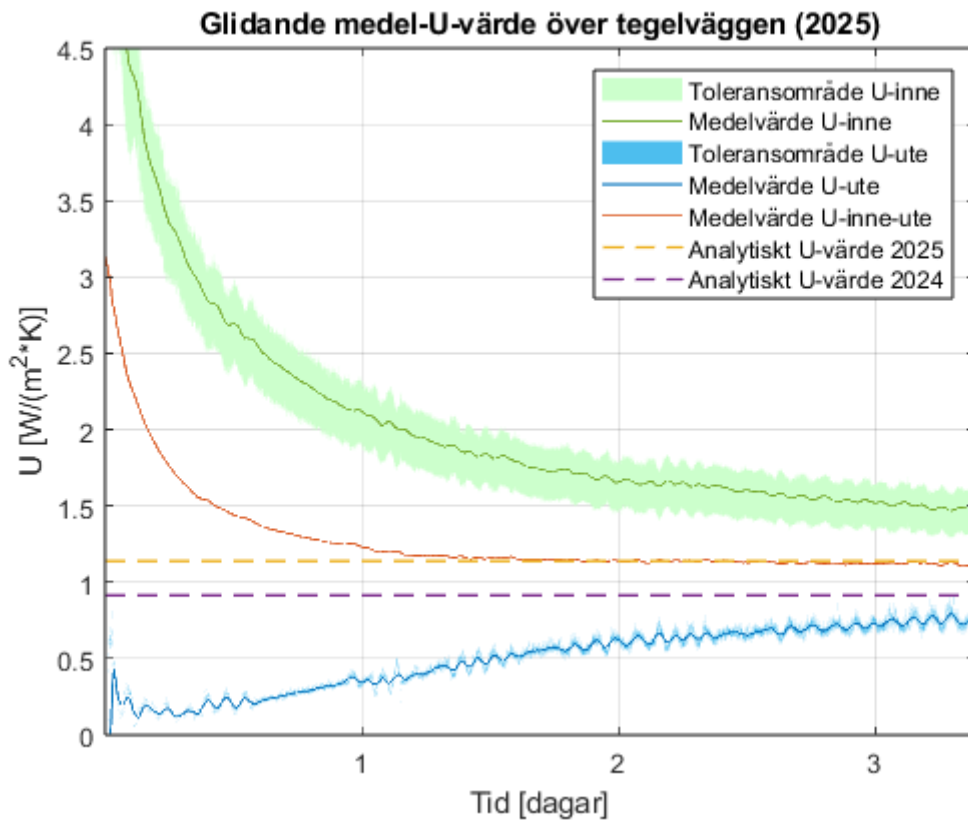
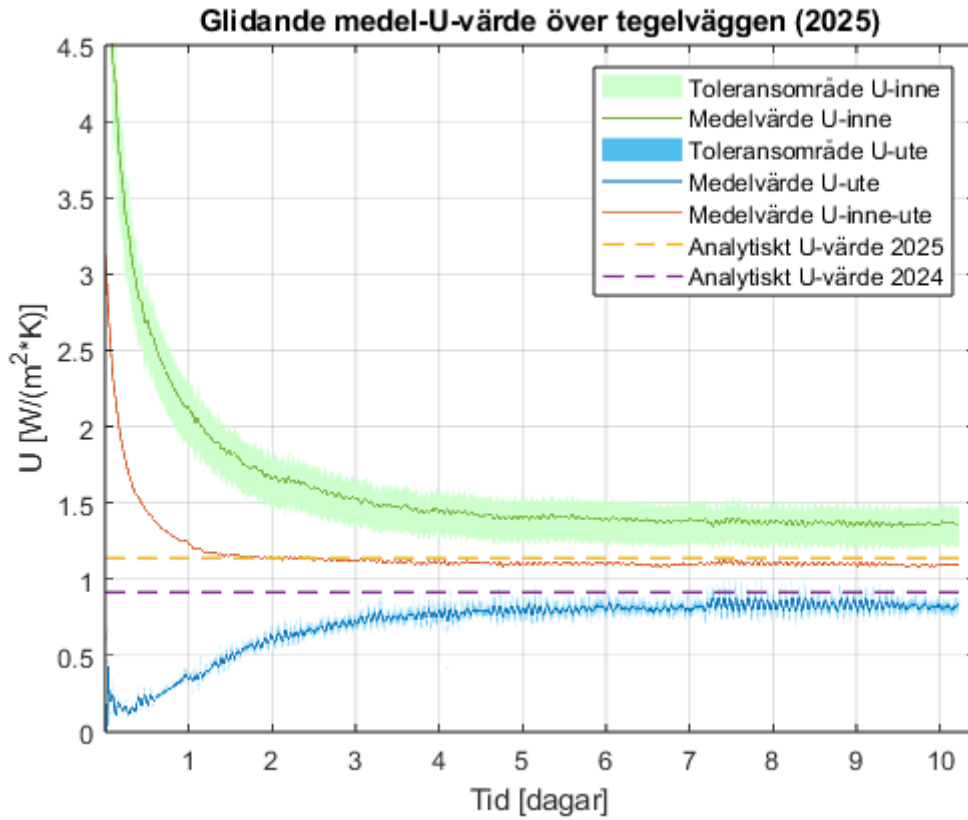
plot(U_hourly_mean(:,5),Color=[0.8500 0.3250 0.0980],LineWidth=0.7)

plot([1,length(tid_m)],U_varde_analytisk.*[1,1],Color=[0.9290 0.6940
0.1250],LineWidth=1,LineStyle="--")

plot([1,length(tid_m)],U2.*[1,1],Color=[0.4940 0.1840
0.5560],LineWidth=1,LineStyle="--")

grid on
ylim([0,4.5])
xticks(tid_d*(24*60))
xticklabels(tid_d)
xlim([0,tid_los])
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel("U [W/(m^2*K)]")
legend("Toleransområde U-inne","Medelvärde U-inne","Toleransområde U-
ute","Medelvärde U-ute","Medelvärde U-inne-ute","Analytiskt U-värde
2025","Analytiskt U-värde 2024")
title("Glidande medel-U-värde över tegelväggen (2025)")
hold off

```



### 8.3.2 Jämförelse figur, med data från 2024

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-04-19
clear, clc

load("mtdata2024.mat")
CHt=mtdata2024.Variables;

tid=CHt(1:10021,1); % [Minuter]
tid_m=(1:length(tid))';
tid_h=(1:(length(tid_m)/60))';
tid_d=(1:(length(tid_h)/24))';
CH=CHt(1:10021,(2:7)); % [V]
T=CHt(1:10021,(8:11)); % [C]

CH=[-CH(:,1:3),CH(:,4:6)];

% Sensitivitet
CH1sens=0.00006165;
CH2sens=0.00006259;
CH3sens=0.00006231;
CH4sens=0.00006221;
CH5sens=0.00006236;
CH6sens=0.00006402;

sens=[CH1sens,CH2sens,CH3sens,CH4sens,CH5sens,CH6sens]; % [V/(W/m^2)]

tid_los=4879; % Tidpunkt då första sensorn lossnade
tdyn=(1:tid_los); % Intervall när man kan beakta samtliga sensorer
tstat=(tid_los+1:length(tid_m)); % intervall där man bara kan beakta CH-4

% Värmefflöde
q=CH./sens; % värmeflöde [W/m^2]
dT=(T(:,3)-T(:,1)); % drivande temperatur skillnad
U=q./dT; % U-värde
Umedel=((U(:,1)+U(:,2)+U(:,3))/3)+[mean(U(tdyn,4:6),2);U(tstat,4)]/2; % Medel U-
värde
U=[U,Umedel];

U_hourly_mean = movmean(U,60,1); % Glidande medelvärde med 60 minuters intervall
U_hourly_mean_ute = mean(U_hourly_mean(:,1:3),2);
U_hourly_mean_inne = [mean(U_hourly_mean(tdyn,4:6),2);U_hourly_mean(tstat,4)];

U_medel_ute=((U(:,1)+U(:,2)+U(:,3))/3);
U_medel_inne=[mean(U(tstat,4:6),2),U(tstat,4)];

U_medel_inne_ute=mean(Umedel);

U_varde_analytisk=1.139396695583796; % analytiskt U-värde 2025
U2=0.914634146341463; % analytiskt U-värde 2024
```

### Toleransområde

```
tol1=1.85*10^-6; tol2=1.88*10^-6; tol3=1.87*10^-6; tol4=tol3; tol5=tol4;
tol6=1.92*10^-6; % tolerans för respektive sensor

tol=[tol1,tol2,tol3,tol4,tol5,tol6];
sens_korr_add=sens+tol;
sens_korr_sub=sens-tol;
```

```

U_korr_sens_sub=(CH./sens_korr_sub)./dT;
U_korr_sens_add=(CH./sens_korr_add)./dT;

tol_max_u=max([U_korr_sens_add(:,1:3), U_korr_sens_sub(:,1:3)],[],2); % Max värden
U-ute
tol_min_u=min([U_korr_sens_add(:,1:3), U_korr_sens_sub(:,1:3)],[],2); % Min värden
U-ute

xconf_u=[tid_m; tid_m(end:-1:1)];
yconf_u=[tol_min_u; tol_max_u(end:-1:1)];

tol_max_i=[max([U_korr_sens_add(tdyn,4:6),
U_korr_sens_sub(tdyn,4:6)],[],2);max([U_korr_sens_add(tstat,4),
U_korr_sens_sub(tstat,4)],[],2)]; % Max värden U-inne
tol_min_i=[min([U_korr_sens_add(tdyn,4:6),
U_korr_sens_sub(tdyn,4:6)],[],2);min([U_korr_sens_add(tstat,4),
U_korr_sens_sub(tstat,4)],[],2)]; % Min värden U-inne
xconf_i=[tid_m; tid_m(end:-1:1)];
yconf_i=[tol_min_i; tol_max_i(end:-1:1)];

```

## Graf

```

figure (16)

p=fill(xconf_i,yconf_i,[0.8 1 0.8],EdgeColor="none");
hold on
plot(U_hourly_mean_inne,Color=[0.4660 0.6740 0.1880],LineWidth=0.7)

p2=fill(xconf_u,yconf_u,[0.3010 0.7450 0.9330],EdgeColor="none");
plot(U_hourly_mean_ute,Color=[0 0.4470 0.7410],LineWidth=0.7)

plot(U_hourly_mean(:,7),Color=[0.8500 0.3250 0.0980],LineWidth=0.7)

plot([1,length(tid_m)],U_varde_analytisk.*[1,1],Color=[0.9290 0.6940
0.1250],LineWidth=1,LineStyle="--")

plot([1,length(tid_m)],U2.*[1,1],Color=[0.4940 0.1840
0.5560],LineWidth=1,LineStyle="--")

grid on
ylim([0,4.5])
xticks([tid_d;7]*(24*60))
xticklabels([tid_d;7])
xlim([0,10080])
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel('U [W/(m^2*K)]')
legend("Toleransområde U-inne","Medelvärde U-inne","Toleransområde U-
ute","Medelvärde U-ute","Medelvärde U-inne-ute","Analytiskt U-värde
2025","Analytiskt U-värde 2024")
title("Glidande medel-U-värde över tegelväggen (2024)")
hold off

% 3,5 dagar
figure (17)

p=fill(xconf_i,yconf_i,[0.8 1 0.8],EdgeColor="none");
hold on
plot(U_hourly_mean_inne,Color=[0.4660 0.6740 0.1880],LineWidth=0.7)

p2=fill(xconf_u,yconf_u,[0.3010 0.7450 0.9330],EdgeColor="none");
plot(U_hourly_mean_ute,Color=[0 0.4470 0.7410],LineWidth=0.7)

plot(U_hourly_mean(:,7),Color=[0.8500 0.3250 0.0980],LineWidth=0.7)

```

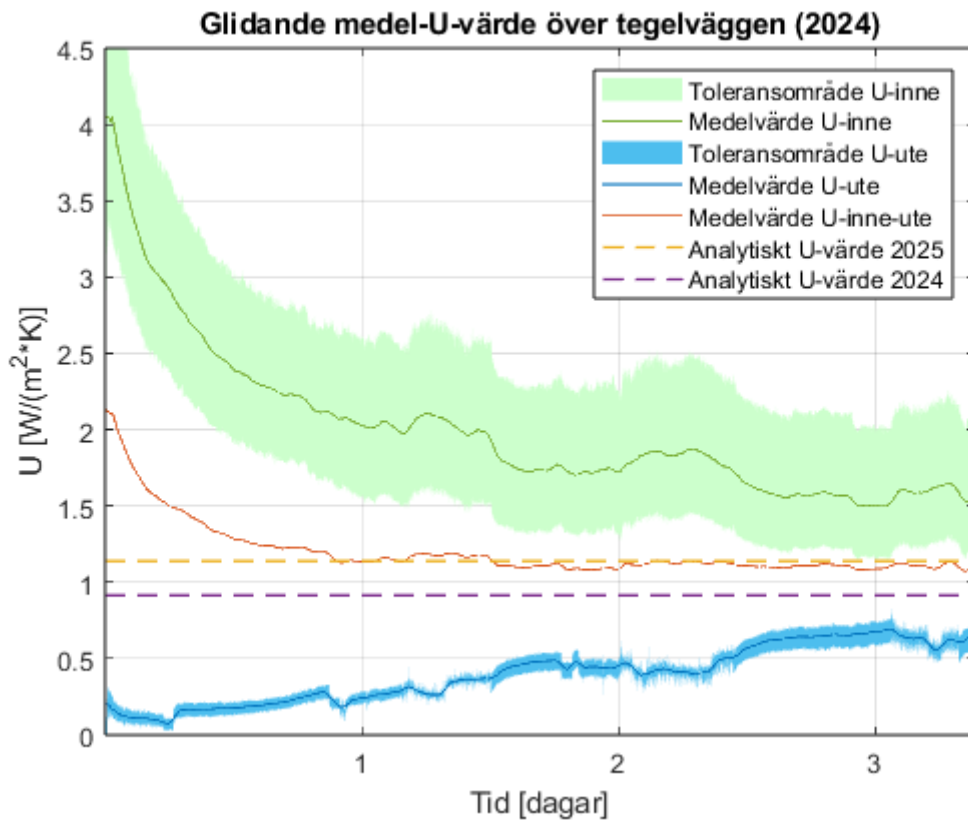
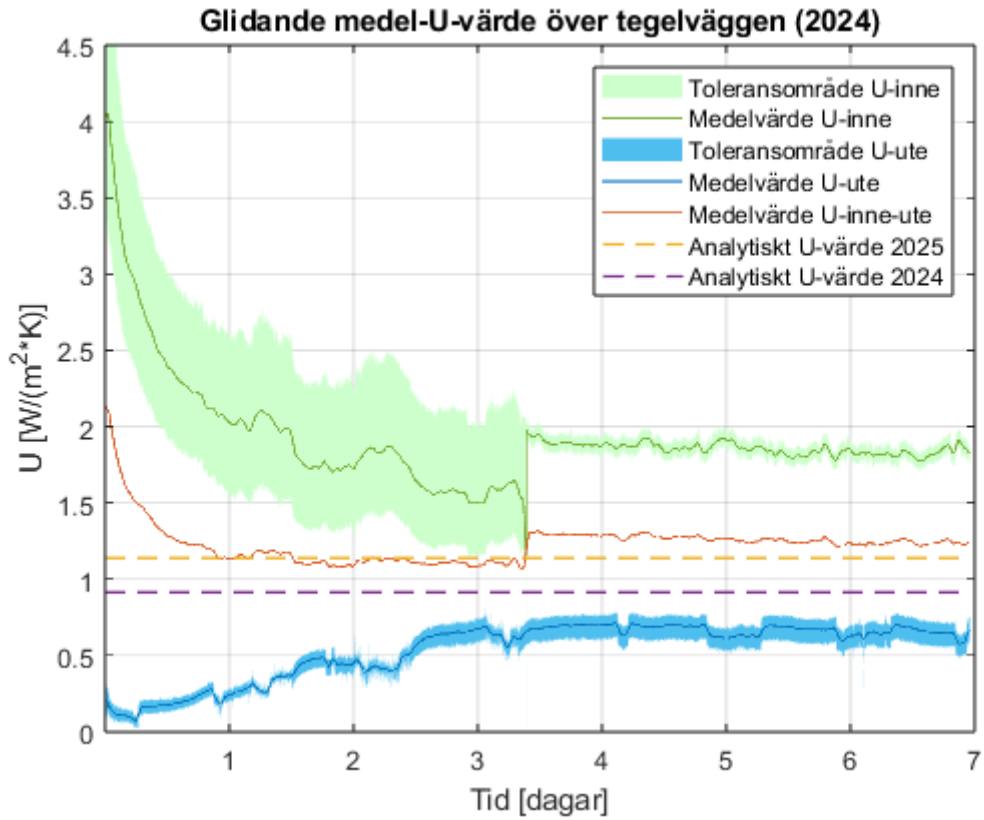
```

plot([1,length(tid_m)],U_varde_analytisk.*[1,1],Color=[0.9290 0.6940
0.1250],LineWidth=1,LineStyle="--")

plot([1,length(tid_m)],U2.*[1,1],Color=[0.4940 0.1840
0.5560],LineWidth=1,LineStyle="--")

grid on
ylim([0,4.5])
xticks([tid_d;7]*(24*60))
xticklabels([tid_d;7])
xlim([0,tid_los])
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel("U [W/(m^2*K)]")
legend("Toleransområde U-inne","Medelvärde U-inne","Toleransområde U-
ute","Medelvärde U-ute","Medelvärde U-inne-ute","Analytiskt U-värde
2025","Analytiskt U-värde 2024")
title("Glidande medel-U-värde över tegelväggen (2024)")
hold off

```



### 8.3.3 Tidsförskjutning tegelvägg

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-04-23
```

#### Indata

```
clear, clc

load("kandidat_data")
CHt=LCFRO23mtningtegel.Variables;

tid=CHt(1:14727,1); % [sekunder]
tid_m=(1:length(tid))';
tid_h=(1:(length(tid_m)/60))';
tid_d=(1:(length(tid_h)/24))';
CH=CHt(1:14727,(2:5)); % [V]
T=CHt(1:14727,(6:11)); % [C]

T_g=movmean(T,60,1);

load("mtdata2024.mat")
CHt1=mtdata2024.Variables;

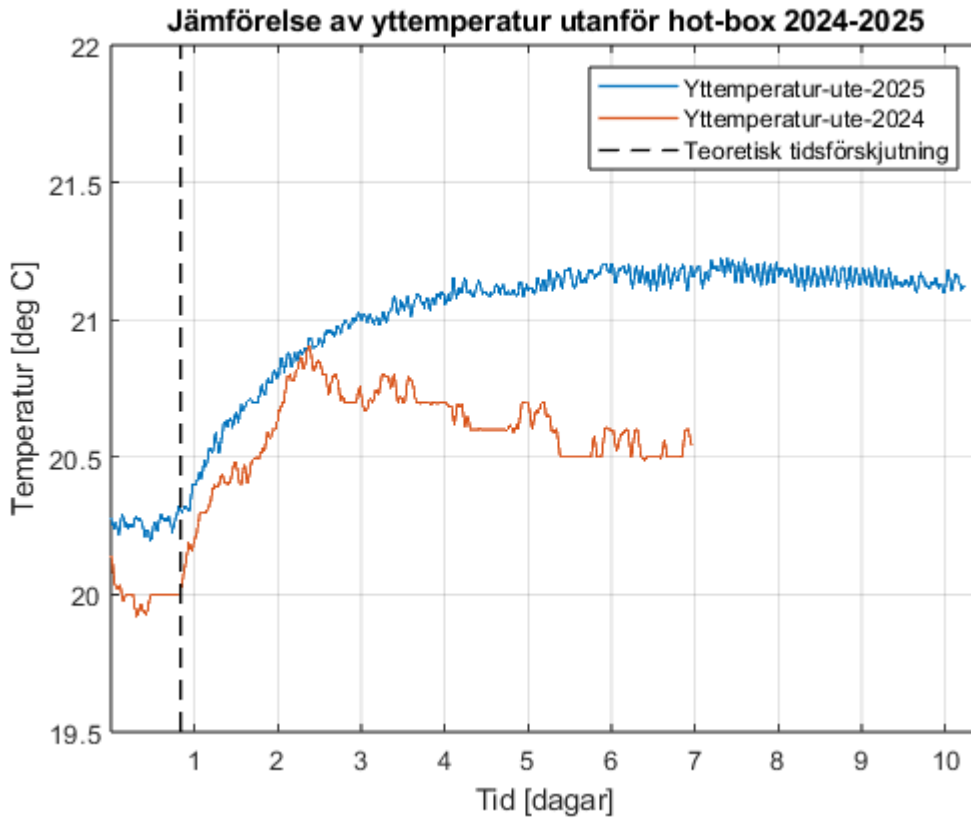
tid1=CHt1(1:10021,1); % [Minuter]
tid_m1=(1:length(tid1))';
tid_h1=(1:(length(tid_m1)/60))';
tid_d1=(1:(length(tid_h1)/24))';
CH1=CHt1(1:10021,(2:7)); % [V]
T1=CHt1(1:10021,(8:11)); % [C]

T_g1=movmean(T1,60,1);
```

#### Graf

```
figure (20)

grid on
plot(T_g(:,6),LineWidth=1)
grid on
hold on
plot(T_g1(:,2),LineWidth=1)
plot([20*60,20*60],[19.5,22],"black",LineWidth=1,LineStyle="--")
ylim([19.5,22])
xticks(tid_d*(24*60))
xticklabels(tid_d)
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel("Temperatur [deg C]")
legend("Yttemperatur-ute-2025","Yttemperatur-ute-2024","Teoretisk tidsförskjutning")
title("Jämförelse av yttemperatur utanför hot-box 2024-2025")
hold off
```



*Published with MATLAB® R2022b*

### 8.3.4 Jämförelse figur, med data från aerogelputs-mätning

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-04-28
clear, clc

load("mtdata_Aerogel_2025.mat")
CHT=mtdata_Aerogel_2025.Variables;

tid_s=CHT(1:length(CHT(:,1)),1); % [sekunder]
tid_m=2*(1:length(tid_s))';
tid_h=(1:(length(tid_m)/30))';
tid_d=(1:(length(tid_h)/24))';
CH=CHT(1:length(CHT(:,1)),(2:6)); % [V]
T=CHT(1:length(CHT(:,1)),(7:11)); % [C]
T=[T,20.*[ones(1,length(T))]]';

tid_lo=4879; % Tidpunkt då första sensorn lossnade 2024

% Sensitivitet
CH1sens=0.00006165;
CH2sens=0.00006259;
CH3sens=0.00006231;
CH4sens=0.00006236;
CH5sens=0.00006221;

sens=[CH1sens,CH2sens,CH3sens,CH4sens,CH5sens]; % [V/(W/m^2)]

% Värme flöde
```

```

q=CH./sens; % [W/m^2]
dT=(T(:,1)-T(:,6));
U=q./dT;
Umedel=((U(:,1)+U(:,2)+U(:,3))/3)+U(:,5))/2;
U=[U,Umedel];

U_hourly_mean = movmean(U,60,1); % Glidande medelvärde med 60 minuters intervall
U_hourly_mean_inne = mean(U_hourly_mean(:,1:3),2);

U_medel_inne=(U(:,1)+U(:,2)+U(:,3))/3;
U_medel_ute=U(:,5);

U_medel_inne_ute=mean(Umedel);

U_varde_analytisk=0.916940139739563; % analytiskt uvärde 2025
U2=0.477707006369427; % analytiskt U-värde 2024

```

## Toleransområde

```

tol1=1.85*10^-6; tol2=1.88*10^-6; tol3=1.87*10^-6; tol4=tol3; tol5=tol3; %
Sensorernas tolerans

tol=[tol1,tol2,tol3,tol4,tol5];
sens_korr_add=sens+tol;
sens_korr_sub=sens-tol;

U_korr_sens_sub=(CH./sens_korr_sub)./dT;
U_korr_sens_add=(CH./sens_korr_add)./dT;

tol_max_i=max([U_korr_sens_add(:,1:3), U_korr_sens_sub(:,1:3)],[],2); % Max värde
tol_min_i=min([U_korr_sens_add(:,1:3), U_korr_sens_sub(:,1:3)],[],2); % Min värde

xconf_i=[tid_m; tid_m(end:-1:1)];
yconf_i=[tol_min_i; tol_max_i(end:-1:1)];

tol_max_u=max([U_korr_sens_add(:,5), U_korr_sens_sub(:,5)],[],2); % Max värde
tol_min_u=min([U_korr_sens_add(:,5), U_korr_sens_sub(:,5)],[],2); % Min värde

xconf_u=[tid_m; tid_m(end:-1:1)];
yconf_u=[tol_min_u; tol_max_u(end:-1:1)];

```

## Graf

```

figure (14)

p=fill(xconf_i,yconf_i,[0.8 1 0.8],EdgeColor="none");
hold on
plot(tid_m,U_hourly_mean_inne,Color=[0.4660 0.6740 0.1880],LineWidth=0.7)

p2=fill(xconf_u,yconf_u,[0.3010 0.7450 0.9330],EdgeColor="none");
plot(tid_m,U_hourly_mean(:,5),Color=[0 0.4470 0.7410],LineWidth=0.7)

plot(tid_m,U_hourly_mean(:,6),Color=[0.8500 0.3250 0.0980],LineWidth=0.7)

plot([1,tid_m(end)],U_varde_analytisk.*[1,1],Color=[0.9290 0.6940
0.1250],LineWidth=1,LineStyle="--")

plot([1,tid_m(end)],U2.*[1,1],Color=[0.4940 0.1840 0.5560],LineWidth=1,LineStyle="--")

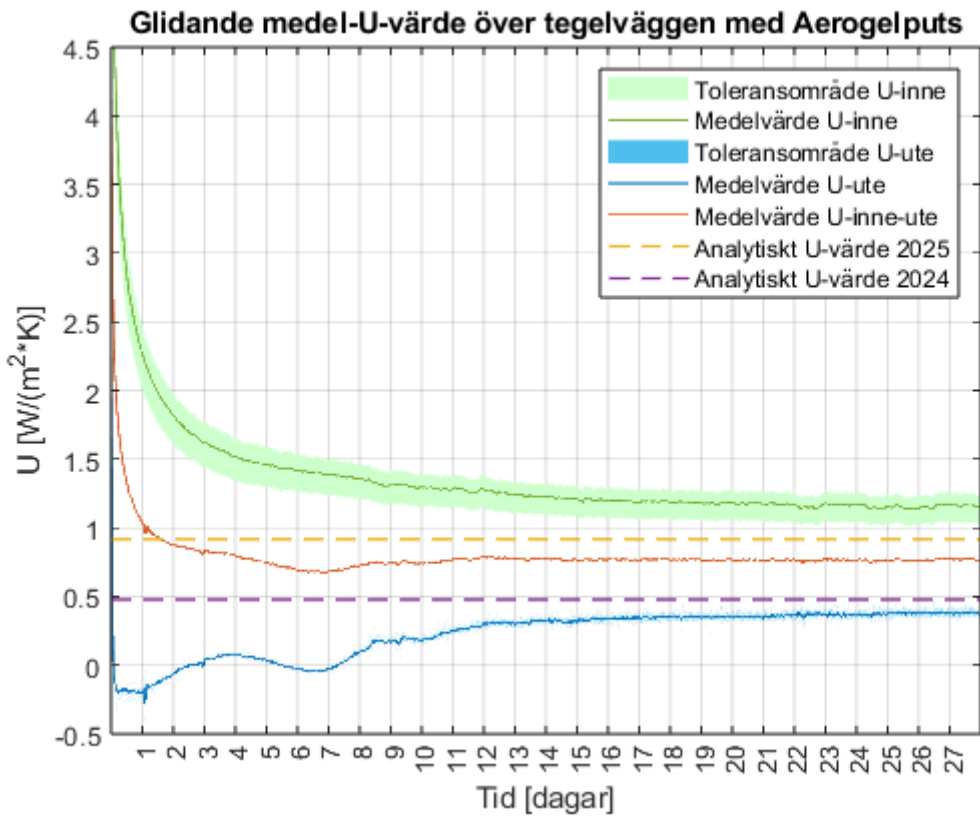
grid on
ylim([-0.5,4.5])
xlim([0,24*28*60])
xticks(tid_d*(24*60))

```

```

xticklabels(tid_d)
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel('U [W/(m^2*K)]')
legend("Toleransområde U-inne", "Medelvärde U-inne", "Toleransområde U-ute", "Medelvärde U-ute", "Medelvärde U-inne-ute", "Analytiskt U-värde 2025", "Analytiskt U-värde 2024")
title("Glidande medel-U-värde över tegelväggen med Aerogelputs")
hold off

```



Published with MATLAB® R2022b

### 8.3.5 Jämförelse av tidsförskjutning emellan tegelvägg med och utan aerogelputs

```

% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-04-30

```

#### Indata

```

clear, clc

load("mtdata_Aerogel_2025.mat")
CHt=mtdata_Aerogel_2025.Variables;

tid_s=CHt(1:length(CHt(:,1)),1); % [sekunder]
tid_m=2*(1:length(tid_s))';
tid_h=(1:(length(tid_m)/30))';
tid_d=(1:(length(tid_h)/24))';
CH=CHt(1:length(CHt(:,1)),(2:6)); % [V]
T=CHt(1:length(CHt(:,1)),(7:11)); % [C]

```

```

T=[T,20.*[ones(1,length(T))]];

T_g=movmean(T,60,1);

load("kandidat_data")
CHt1=LCFRO23mtningtegel.Variables;

tid1=CHt1(1:14727,1); % [sekunder]
tid_m1=(1:length(tid1))';
tid_h1=(1:(length(tid_m1)/60))';
tid_d1=(1:(length(tid_h1)/24))';
CH1=CHt1(1:14727,(2:5)); % [V]
T1=CHt1(1:14727,(6:11)); % [C]

T_g1=movmean(T1,60,1);

```

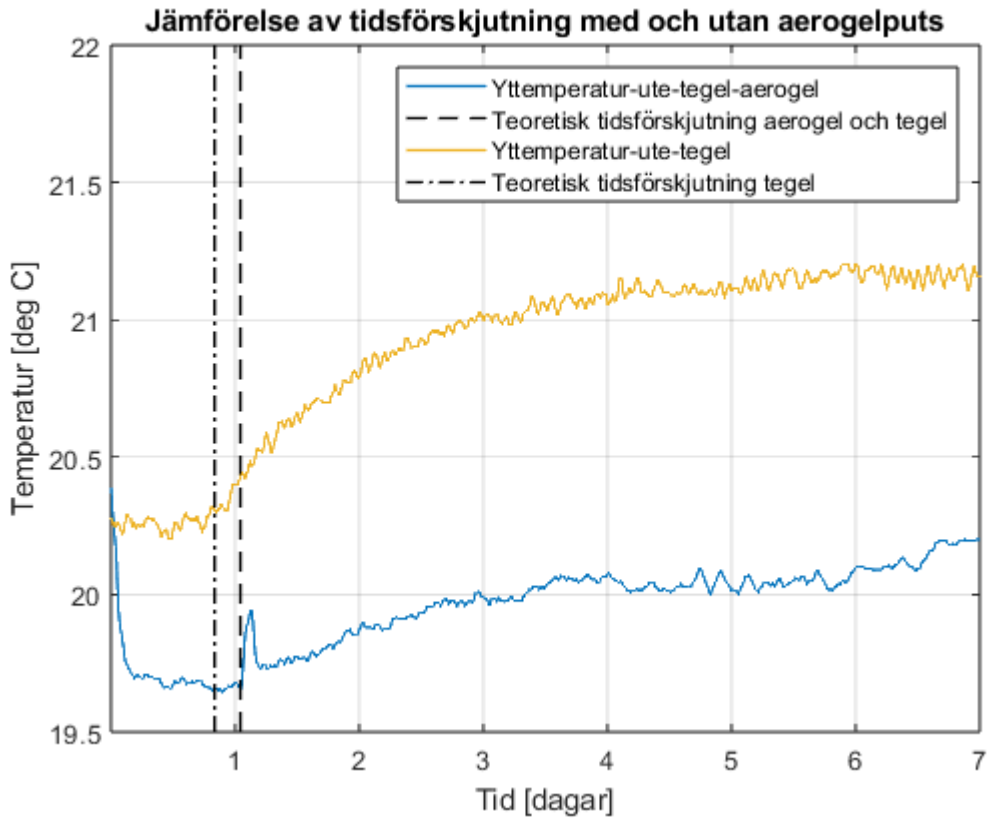
## Graf

figure (30)

```

grid on
plot(tid_m,T_g(:,5),LineWidth=1)
grid on
hold on
plot([25*60,25*60],[19.5,22],"black",LineWidth=1,LineStyle="--")
plot(T_g1(:,6),LineWidth=1)
plot([20*60,20*60],[19.5,22],"black",LineWidth=1,LineStyle="-.")
ylim([19.5,22])
xlim([0,7*24*60])
xticks(tid_d*(60*24))
xticklabels(tid_d)
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel("Temperatur [deg C]")
legend("Yttemperatur-ute-tegel-aerogel","Teoretisk tidsförskjutning aerogel och tegel","Yttemperatur-ute-tegel","Teoretisk tidsförskjutning tegel")
title("Jämförelse av tidsförskjutning med och utan aerogelputs")

```



*Published with MATLAB® R2022b*

### 8.3.6 Jämförelse av VFu1's variation

```
% Student: Emil Åkerman, 2003-09-21
% Kurs: Kandidatarbete
% Datum: 2025-05-08
```

#### data tegel

```
clear, clc

load("kandidat_data")
CHt=LCFRO23mtningtegel.Variables;

tid_s=CHt(1:14727,1); % [sekunder]
tid_m=(1:length(tid_s))';
tid_h=(1:(length(tid_m)/60))';
tid_d=(1:(length(tid_h)/24))';
CH=CHt(1:14727,(2:5)); % [V]
T=CHt(1:14727,(6:11)); % [C]

% Sensitivitet
CH1sens=0.00006165;
CH2sens=0.00006259;
CH3sens=0.00006231;
CH4sens=0.00006236;
```

```

sens=[CH1sens,CH2sens,CH3sens,CH4sens]; % [V/(W/m^2)]

% Värmefflöde

q=CH./sens; % [W/m^2]

plot(tid_m,q(:,4))
hold on

```

## data aerogel

```

clear, clc

load("mtdata_Aerogel_2025.mat")
CHT=mtdata_Aerogel_2025.Variables;

tid_s=CHT(1:length(CHT(:,1)),1); % [sekunder]
tid_m=2*(1:length(tid_s));
tid_h=(1:(length(tid_m)/30));
tid_d=(1:(length(tid_h)/24));
CH=CHT(1:length(CHT(:,1)),(2:6)); % [V]
T=CHT(1:length(CHT(:,1)),(7:11)); % [C]
T=[T,20.*[ones(1,length(T))]];

% Sensitivitet
CH1sens=0.00006165;
CH2sens=0.00006259;
CH3sens=0.00006231;
CH4sens=0.00006236;
CH5sens=0.00006221;

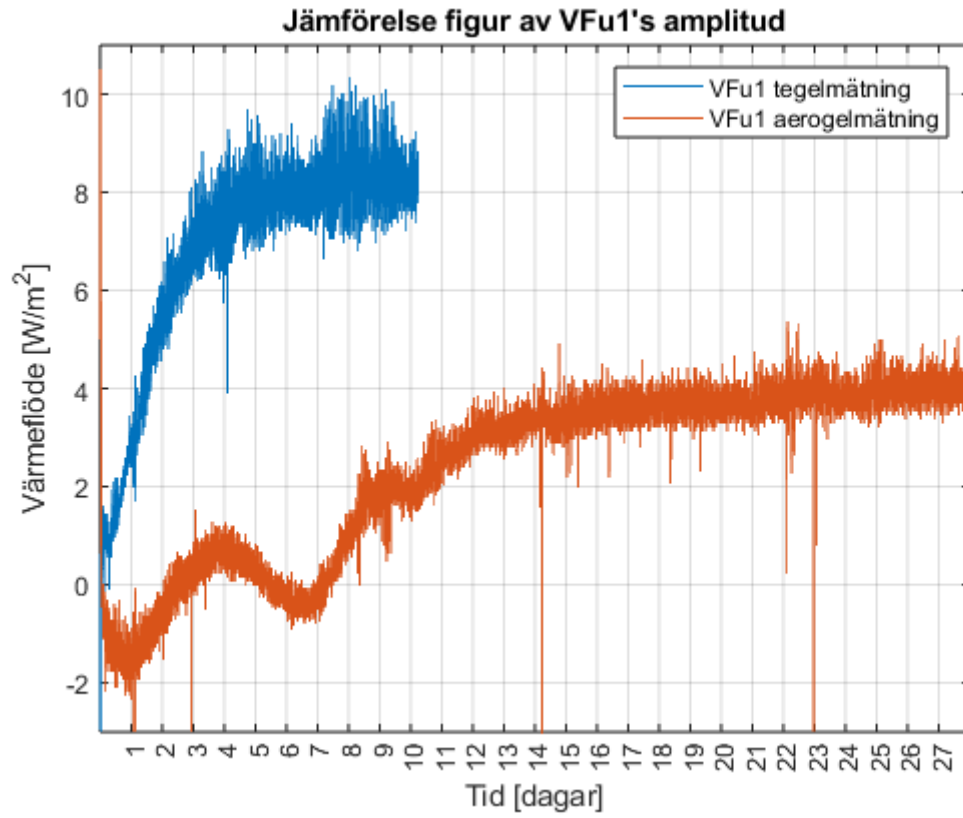
sens=[CH1sens,CH2sens,CH3sens,CH4sens,CH5sens]; % [V/(W/m^2)]

% Värmefflöde

q=CH./sens; % [W/m^2]

plot(tid_m,q(:,5))
ylim([-3,11])
xlim([0,24*60*28])
xticks(tid_d*(24*60))
xticklabels(tid_d)
xlabel('Tid [dagar]')
ylabel('Värmefflöde [W/m^2]')
grid on
legend("VFul tegelmätning","VFul aerogelmätning")
title("Jämförelse figur av VFul's amplitud")

```



*Published with MATLAB® R2022b*

**INSTITUTIONEN FÖR BYGGNADSTEKNOLOGI**

**ACEX11-VT25-12**

**CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2025

[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**