



CHALMERS



MÄTNING OCH SIMULERING AV VÄRMEFLÖDE OCH U-VÄRDE I TEGELBYGGNADER

Ghaith Alharami
Jesper Danielsson
Stina Durling
Anton Gustafsson
Victoria Jonasson
Samuel Mårtensson

INSTITUTIONEN FÖR BYGGNADSTEKNOLOGI
ACEX11 GRUPP 10

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

Sammandrag

Byggnader med ett kulturellt värde berättar om generationers utveckling och historia, därför måste de bevaras. Vidare skall hållbarhetsaspekter som restaurering, energihushållning samt komfortkraven beaktas efter dagens krävande samhälle. Arbetet undersökte U-värdet av en äldre tegelbyggnad i Forsåkerområdet i Mölndal. Undersökning utgick från tre olika metoder, nämligen en testvägg i laborationsmiljö, känslighetsanalys i dataprogrammet WUFI samt analys av mätdata från den fysiska byggnaden. En nybyggd testvägg i laborationsmiljö med hänsyn till randeffekter mäter ett U-värde mellan 0,6–0,77 W/m²K med hjälp av värmeflödessensorer. Relativa fuktigheten, solstrålning och väggens tjocklek studerades i känslighetsanalysens, där tjocklek och fukt har stor påverkan på U-värdet. Solstrålningen visade sig ha stor påverkan på beräkningarnas tillförlitlighet. Syftet var att visa divergens hos U-värdet när dessa parametrar varierades. Analys av mätdata från testbyggnaden resulterade i U-värden som varierar mellan 1,15–1,48 W/m²K. Att olika U-värden erhålls från analysen av mätdata i fält berodde bland annat på byggnadens termiska tröghet. Huruvida U-värdet bestäms ur mätdata utförts i fält är genom att dela mättningsperioderna i olika långa dygnmedelvärdesgrupper. Slutsatsen bygger på vilka parametrar som bör beaktas vid U-värdeberäkningar med avseende på tillförlitlighet samt innehåller rekommendationer för framtida studier.

Abstract

Buildings with cultural value tell the story of the development and history of generations, therefore they must be preserved. Furthermore, sustainability aspects such as restoration, energy management and comfort requirements must be considered in accordance with the demands of today's society. The study investigated the U-value of an older brick building in the Forsåker area of Mölndal. The investigation was based on three different methods: a test wall in a laboratory environment, a sensitivity analysis in the WUFI computer program, and an analysis of measurement data carried out on the physical building. A newly built test wall in a laboratory environment, taking into account boundary conditions, measures a U-value between 0.6-0.77 W/m²K using heat flow sensors. Relative humidity, solar radiation and wall thickness were studied in the sensitivity analysis, where thickness and moisture have a large impact on the U-value. Solar radiation was found to have a large impact on the reliability of the calculations. The aim was to show the divergence of the U-value when these parameters were varied. Analysis of measurement data from the test building resulted in U-values ranging from 1.15-1.48 W/m²K. The reason for the different U-values obtained from the analysis of measurement data in the field was, among other things, the thermal inertia of the building. Whether the U-value is determined from measurement data taken in the field is done by dividing the measurement periods into different day-average value groups. The conclusion of the report is based on which parameters should be considered in U-value calculations with regard to reliability and includes recommendations for future studies.

Innehållsförteckning

<i>Sammandrag</i>	<i>I</i>
<i>Abstract</i>	<i>II</i>
<i>Nomenklatur</i>	<i>1</i>
1. Inledning	2
1.1 Syfte.....	2
1.2 Problem och frågeställning	2
1.3 Avgränsningar.....	3
1.4 Metod	3
2. Faktainsamling	4
2.1 Forsåkerområdet	4
2.1.1 Historia om området	4
2.1.2 Referensbyggnad	4
2.1.3 Utveckling av Forsåkerområdet	5
2.2 Tegel som material.....	5
2.2.1 Tillverkning	5
2.2.2 Densitet	5
2.2.3 Porositet	6
2.3 Hur byggde man förr i tiden?	6
2.3.1 Konstruktion	6
2.3.2 Konstruktion av tegelväggar	6
2.4 U-värde	7
2.5 Värmefflöde och hur det mäts i teori samt fält	9
2.5.1 Värmefflöde och teoretiska beräkningar.....	9
2.5.2 Mätmetoder i praktiken	10
2.6 WUFI	10
2.6.1 WUFI beräkningar.....	10
2.6.2 Datainsamling av klimatdata	11
3. Laborationsförsök	12
3.1 Utförande av värmefflödeslaboration	12
3.2 Resultat av laboration	15
3.3 Diskussion av laborationens metod och resultat.....	18
4. Känslighetsanalys med hjälp av WUFI	19
4.1 Metod känslighetsanalys	19
4.1.1 Valda parametrar	19
4.1.2 Klimatdata	20
4.2 Resultat av känslighetshetsanalys	23
4.3 Diskussion av känslighetsanalys.....	26
5. Analys av mätdata från testbyggnad	27

5.1	Ingående data	27
5.2	Metod för analys av mätdata i fält	27
5.3	Resultat	28
5.3.1	Jämförelse av värmeflödestäthet	28
5.3.2	Temperaturvariationer innan väggens täckning	29
5.3.3	Preciserat dygnsmedelvärde	31
5.4	Diskussion av analys på mätdata i fält	33
6.	Diskussion	34
7.	Slutsats och framtida studier	35
8.	Litteraturförteckning	36
	<i>Bilaga A-Laboration</i>	<i>38</i>
	<i>Bilaga B-MATLAB-script för klimatdata</i>	<i>42</i>
	<i>Bilaga C- Övriga resultat från känslighetsanalys</i>	<i>44</i>
	<i>Bilaga D – Övriga resultat från analys av mätdata från Forsåker</i>	<i>50</i>

Nomenklatur

A_i – area för byggnadsdelens i yta mot uppvärmd inneluft [m^2].

A – betecknar konstruktionsdelens area [m^2].

d – materialets tjocklek [m].

H - Entalpi av byggnadsmaterial [J/m^3]

h_w - Avdunstningsentalpi av vatten [J/kg]

I_{sol} – kortvågig solstrålning mot en yta med en viss orientering [W/m^2].

i – antal materialskikt [-]

K – konduktansen för konstruktionsdelen [W/K].

l_k – längden av den linjära köldbryggan k mot uppvärmd inneluft [m].

p – Partialtryck [Pa].

R_{si} – 0,13 inre värmemotstånd för en väggkonstruktion [m^2K/W].

R_{se} – 0,04 yttre värmemotstånd för en väggkonstruktion [m^2K/W].

$\sum_{i=1}^N R - \frac{di}{\lambda_i}$ Värmemotstånd för materialen som bygger upp väggkonstruktionen [m^2K/W].

R_{tot} – konstruktionsdelens värmemotstånd inklusive ytövergångsmotstånd [m^2W/K].

T_e – utetemperaturen [$^{\circ}C$].

ΔT – temperaturskillnaden över konstruktionsdelen [$^{\circ}C$ eller K].

$U_{korr,i}$ – värmegenomgångskoefficient för byggnadsdelen i korrigerad för inverkan av fästansordningar, isolerings utförande och nederbörd och vind i isoleringsmaterialet [W/m^2K].

U – betecknar konstruktionsdelens U-värde [W/m^2K].

α_{sol} – absorptans för kortvågig solstrålning [-].

δ – Ånggenomsläpplighet [$kg/msPa$].

θ – Temperatur [$^{\circ}C$].

λ – betecknar ett materials värmeledningsförmåga [W/mK].

χ_j – värmegenomgångskoefficient för punktformiga köldbryggan j [W/K].

ψ_k – värmegenomgångskoefficient för linjära köldbryggan k [W/mK].

1. Inledning

Forsåkerområdet i Mölndal är ett område som sedan långt tillbaka i tiden har varit en plats för industriverksamhet, där huvudsakligen papper har framställts. Papperstillverkningen upphörde 2005 och efter det har området i princip varit utan verksamhet och stått öde. Mölndals kommun har nu stora planer för att utveckla området och vill skapa en stadsmiljö med bostäder, arbetsplatser och kulturverksamhet för att ge Forsåker nytt liv (Mölndals Stad, 2023). De befintliga byggnaderna ger området ett kulturellt värde och bevarandet av det estetiska uttrycket är av stor betydelse. För att kunna bevara de gamla industribyggnaderna och kunna anpassa dem till ny, annan typ av verksamhet krävs renovering och restaurering. Vid renovering av industrilokaler till ett annat förfogande är det nödvändigt att utvärdera materialegenskaperna, särskilt teglets, vilket byggnadens stomme till mestadels består av. Detta görs för att anpassa inomhusklimatet och optimera energiförbrukningen, vilket minskar kostnaderna för byggnaden i bruk och dess klimatavtryck (Šekularac, Ivanović-Šekularac, Petrovski, & Macut, 2020). Genom att ha mer kunskap om detta kan byggnadernas egenskaper utvärderas på ett snabbare och mer tillförlitligt vis. Detta är både av intresse för industrilokalerna i Forsåker och för andra liknande byggnader från samma tidsperiod.

Föreliggande studie fokuserar på att undersöka strategier för att härleda U-värdet (isoleringsvärdet) i fält för byggnader med höga tidskonstanter, som industrilokalerna i Forsåker. U-värdet beskriver den värmemängd, per tidsenhet, som passerar genom en ytenhet av byggnadsdelen då skillnaden i lufttemperatur är en grad på ömse sidor av konstruktionen (Petersson, 2018). U-värdet är ett mått på hur bra isoleringsförmåga en byggnadsdel har. Tidskonstanten är ett mått på hur byggnaden motstår temperaturförändringar, där en högre tidskonstant har en högre värmetröghet. Vid tidigare mätningar av isoleringsförmågan som utförts på en av industrilokalerna i Forsåkerområdet har det visat sig svårt att erhålla ett tillförlitligt U-värde (Johansson, Wahlgren, & Eriksson, 2019). För att beräkna isoleringsförmåga behövs stationära förhållanden. Detta innebär att det behöver vara konstant temperatur, både ute och inne, under en längre period, vilket är svårt att få i fält eftersom vädret varierar. Byggnader med en stor termisk tröghet lagrar också stora mängder energi i form av värme inuti sig. Det gör att mätningarna behöver sträcka sig under en längre period. Under denna period kan förhållandena skilja sig, väggen kan utsättas för solsken, vind och regn.

1.1 Syfte

Syftet med denna studie är att analysera de olika faktorer som påverkar U-värdet hos en åldrad tegelbyggnad i Forsåkerområdet. Genom en undersökning av klimatförhållanden strävar studien efter att öka förståelsen för vad som utgör väsentliga faktorer att beakta vid dimensionering av U-värden för liknande tegelbyggnader. Vidare avser studien att jämföra beräknade U-värden med empiriskt uppmätta värden under stationära förhållanden. Denna jämförelse syftar till att öka förståelsen för potentiella skillnader mellan stationärt uppmätta värden och verkliga U-värden.

1.2 Problem och frågeställning

Många äldre tegelbyggnader är i behov av omfattande renovering samtidigt som stor vikt läggs på att kulturvärdet skyddas. Dessa typer av byggnader är tunga med en hög tidskonstant (Boverket, 2024). Vid uppmätning av U-värdet i fält måste mätningen utföras under en längre tidsperiod. För dessa fall är det inte möjligt att uppnå stationära förhållanden under hela

mättiden, vilket medför svårigheter att mäta ett tillförlitligt U-värde. Detta blir särskilt problematiskt när byggnaden skall energieffektiviseras genom exempelvis tilläggsisolering. För att optimera energieffektiviseringen krävs en metod för att avgöra U-värdet på tunga tegelväggar i fält. Ett ytterligare problem som uppstår för äldre tegelbyggnader är att det finns lite data om inbyggda material, vilket också skapar en osäkerhet vid framtagning av U-värdet. Med ovan som bakgrund ska följande frågeställningar undersökas.

- Vilka parametrar har störst påverkan vid uppmätning av U-värdet i fält?
- Hur kan man fastställa ett tillförlitligt U-värde för äldre tegelbyggnader?

1.3 Avgränsningar

Rapporten kommer inte att behandla fuktflödet genom konstruktionen utan i stället fokusera på värmefflöde och värmekapacitet. Den typ av väggkonstruktion som kommer analyseras är en oisolerad, tung tegelvägg.

De parametrar som kommer utvärderas är fukthalt, solstrålning på fasaden, vind samt väggens tjocklek. Rapporten bortser från huruvida saltutfällningar och kemikalier har påverkat materialegenskaperna.

1.4 Metod

Arbetet utgår från en faktainsamling där relevant litteratur studeras för att lägga en bred grund för arbetet och göra det möjligt att precisera frågeställningen. Därefter kommer arbetet fortgå med en laboration där mätutrustning, från tidigare studie, testas på ett nybyggt väggelement. Den byggda väggen kommer att isoleras med hänsyn till randeffekter för att sedan utsätts för en konstant värmekälla för att nå ett stationärt tillstånd. Parallellt kommer en känslighetsanalys i datorprogrammet WUFI att utföras för att ta fram vilka faktorer som har störst inverkan på U-värdet. Efter detta kommer mätdata tagen från testbyggnaden i Forsåker analyseras för att se möjligheten att ta fram ett trovärdigt U-värde. Mätdata från laborationen och testbyggnaden samt resultat från känslighetsanalysen i WUFI kommer därefter att jämföras för att ge en uppfattning om vad som påverkar U-värdet och varför det är svårt att mäta exakt.

2. Faktainsamling

Följande kapitel innehåller information om Forsåkerområdet, tegel som material, hur man byggde förr i tiden, U-värde, mätmetoder för värmefflöde och datorprogrammet WUFI som använts för beräkningar. Detta för att ge en djupare förståelse för bakgrunden till arbetet.

2.1 Forsåkerområdet

För arbetet används mätdata från en industribyggnad i forsåkerområdet i Mölndal. Mätdata har tidigare använts av andra projekt på Chalmers. Följande delar behandlar områdets historia, referensbyggnadens utformning samt hur området planeras att utvecklas.

2.1.1 Historia om området

Mölndal har sedan medeltiden varit en industribygd då forsen som rinner genom området kunnat nyttjas för att driva sädeskvarnar och mindre manufakturer (Lindholm Restaurering AB, 2015). Från början var det främst mjöl och ulltyg som producerades, men i samband med att Göteborg började växa fram under 1600-talet ökade efterfrågan på varor. Där med utökades produktionen av papper, linolja och socker med tiden.

Pappersproduktionen i Forsåker tog fart 1653 då bokbindaren Thomas Khun grundade den första pappersfabriken (Lindholm Restaurering AB, 2015). Detta var starten för flera hundra år av pappersproduktion i Forsåkerområdet. Under 1700-talet grundades två pappersbruk, först ett av Esbjörn Schiller som kom att kallas Mölndals Gamla Pappersbruk och sedan Korndals pappersbruk av Johan Georg Lange. I slutet av 1700-talet blev dessa uppköpta av boktryckaren Samuel Norberg som kallade de sammanslagna pappersbruken för Korndals pappersbruk.

Under 1800-talet fortsatte pappersproduktionen att växa och industrialiseras, verksamheten övergick till en alltmer maskinell produktion. Korndals pappersbruk blev under 1850-talet uppköpt av David Otto Francke (Lindholm Restaurering AB, 2015). Pappersbruket blev då en del av Rosendahls Fabriker AB som också bestod av textilfabriker och sockerbruk. Rosendahls Fabriker AB gick i konkurs 1879, men Francke lyckades behålla pappersbruket i sin ägo genom ett nystartat företag, Korndals AB. Korndals AB gick emellertid också i konkurs i samband med Franckes död 1892 och finansmannen Marcus Wallenberg köpte därefter upp fabriksfastigheterna och grundade Aktiebolaget Papyrus 1895.

Aktiebolaget Papyrus styrde under stora delar av 1900-talet produktionen av papper i Mölndal och var under sin storhetstid en av de största arbetsgivarna i Mölndal (Lindholm Restaurering AB, 2015). Under slutet av 1900-talet genomgick sedan pappersbruket flera ägarbyten och det slutade med att Aktiebolaget Papyrus blev Stora Enso Mölndal AB. Företaget köptes 2002 av Klippan AB och pappersbruket gick under namnet Klippan AB Mölndals bruk fram till konkursen 2005. Forsåkerområdet ägs sedan 2006 av Mölndals stad.

2.1.2 Referensbyggnad

Den mätdata som undersökts under projektet kommer från den industrilokal som benämns byggnad 10 i historiska dokument, se Figur 1. Byggnad 10 var en av de första byggnaderna som uppfördes i samband med Aktiebolaget Papyrus grundande (Lindholm Restaurering AB, 2015). Det var en pappersmaskinhall som uppfördes 1896. Med tiden har lokalen sedan byggts ut och byggts om. Den har exempelvis förlängts med det som benämns som byggnad 4 och sedan också byggnad 2.



Figur 1: a) Byggnad 10, år 1918 b) Byggnad 10, år 2020 (foto Pär Johansson)

Byggnad 10 är den största byggnadsdelen och består av en långsmal tvåvåningsbyggnad (Lindholm Restaurering AB, 2015). Den har naturstensgrund, betongstomme, en fasad i tegel som är murad i kryssförband och plant tak. Både byggnad 4 och 2 är uppbyggda på liknande sätt.

2.1.3 Utveckling av Forsåkerområdet

Forsåkerområdet står nu inför en ombyggnation där målet är att omvandla det tidigare industriområdet till en levande stadsmiljö med bostäder, arbetsplatser, kulturverksamhet, vård, skola och annan service (Mölnads Stad, 2023). Forsen och de gamla industrilokalerna kommer att bevaras och blir därmed identitetsbärande delar som ger området karaktär och historia. Målsättningen är att Forsåker ska bli ett betydande besöksmål som genom sin placering kan länka samman östra och västra Mölnadal och skapa en sammanhållen stadskärna.

2.2 Tegel som material

Tegel tillhör keramiska byggnadsmaterial och är till största delen sammansatt av lera (Lindgren & Moeschlin, 1985). De slutgiltiga egenskaperna hos teglet beror av många faktorer, lerans sammansättning och vid vilken temperatur som leran bränns vid. Viktiga materialegenskaper inkluderar densitet och porositet som i sin tur påverkar materialets värmeledningsförmåga.

2.2.1 Tillverkning

Lerans sammansättning har stor betydelse för smältpunkten som avgör lerans förbränningsgrad (Burström, 2021). Lera bränns oftast i temperaturer mellan 300 – 1300 °C och går igenom tre olika stadier under bränningsprocessen. Sintringen är det sista stadiet och är det viktigaste för materialets slutliga egenskaper, det inträffar vid temperaturintervallet 900 – 1300 °C och bestämmer teglets densitet och porositet.

2.2.2 Densitet

Efter det sista steget i bränningsprocessen har densiteten fastställts, materialegenskapen har en direkt påverkan på värmeflödet genom materialet (Burström, 2021). Densiteten diktar hur mycket massa som existerar per volymenhet vilket ökar energins strömningshastighet genom materialet. På grund av detta ökar värmeledningsförmågan i ett material med dess densitet.

Densiteten har en direkt relation till materialets värmeledningsförmåga (Burström, 2021). Förhållandet mellan teglets densitet och värmeledningsförmåga är mestadels linjärt, dock förekommer viss osäkerhet och materialparametrarna kan inte bestämmas i direkt linjär relation till varandra.

2.2.3 Porositet

Porositeten har en indirekt påverkan på värmeflödet genom materialet (Burström, 2021). En högre öppen porositet medför att en högre mängd vatten kan absorberas in i materialet. Som resultat av detta ökar vattenhalten vilket bidrar till en högre fuktkvot. Tegel har generellt en porositet på 36% vilket teoretiskt betyder att materialet kan hålla 36 liter vatten per kubikmeter.

Vid tidigare tester som utfördes på det tegel som byggnad 10 i Forsåker är byggt av fastställdes en öppen porositet på 29% (Johansson, Josefsson, & Rajha, 2018). Detta gjordes genom att sänka ned en tegelsten i vatten tills att porerna mättades vilket speglar en relativ fuktighet upp mot 100% i materialet. Testförsöket bevisar att en byggnadsvägg av samma tegel når en vattenhalt på 290 liter per kvadratmeter vid 100% relativ fuktighet. Då fuktig luft leder värme mer effektivt än torr luft kan värmeflödet i tegelväggen påverkas då den utsätts för stora mängder vatten (Burström, 2021). Med ökad porositet och porradie ökar värmeflödet i materialet på grund av att fuktkvoten kommer att öka mer då byggnadsdelen utsetts för fukt, detta beror på att vatten har en högre värmeledningsförmåga än teglet. Byggnadsdelen kan utsättas för fukt genom slagregn som får en allt större effekt på byggnadens fuktkvot vid ökad porradie då adsorption sker i allt större utsträckning.

2.3 Hur byggde man förr i tiden?

För att ta fram ett grundläggande teoretiskt U-värde krävs det att materialet som väggen är uppbyggd av är känt, samt hur väggen är uppbyggd (Petersson, 2018). Uppbyggnaden av ytterväggar i tegel från denna tidsperiod skiljer sig åt, vilket detta kapitel kommer att belysa.

2.3.1 Konstruktion

Användningsområdet för byggnader har stor betydelse för hur konstruktionen är uppbyggd. Byggnader med hög internvärme som fabriker och skolor behöver inte beakta värmeförluster på samma sätt då de har ett värmeöverskott (Cajdert, Eriksson, Hervall, Sjöstrand, & Sahlin, 1997). I en utredning av Forsåkerområdet framgår det att referensbyggnadens ytterväggar, byggnad 10, består utav massivt tegel, murade i ett kryssförband (Lindholm Restaurering AB, 2015). Byggnaden har genomgått ett antal renoveringar och ombyggnationer genom åren. Trots nya byggmetoder kunde det estetiska uttrycket bevaras, vilket kan ha påverkat värmeflödet. Detta medför att U-värden för ytterväggarna kan variera och detta är viktigt att undersöka för att kunna effektivisera byggnadens energiprestanda.

2.3.2 Konstruktion av tegelväggar

Tegelhus från sent 1800-tal till tidigt 1900-tal byggdes på ett avsmalnande vis med en sockel av natursten (Björk, Kallstenius, & Reppen, 2003). Bottenvåningen, som tar upp den största lasten, anpassades efter byggnadens storlek och last, och vars tjocklek är tre stenar i längd. Våningar ovanför avsmalnande successivt men blev aldrig smalare än 1 ½-sten. På detta sätt minskade materialåtgången med lasten som skulle bäras. Detta innebär att man får olika värmeflöden på olika våningar på grund av den varierande tjockleken på väggarna.

Bärande tegelväggars tvärsnitt utformades främst på tre olika sätt, massivt, hålmur eller kanalmur. Massiva ytterväggar är den vanligaste typen för äldre tegelhus. De kan dock inte

ställas höga krav för dess isoleringsförmåga (Cajdert, Eriksson, Hervall, Sjöstrand, & Sahlin, 1997). De är genomgående tegel och murverk i väggen vilket gör den lätt att konstruera, långlivad och enkel att utföra olika typer av detaljgrepp på. Vissa specialfall finns där man har använt ett förbländertegel i det yttre skiktet mot utsidan, det är ett finare och hårdare bränt tegel vilket gör det mer motståndskraftigt mot klimatförhållanden, men ändrar dess materialparametrar och väggens sammanlagda värmeflödesegenskaper (Björk, Kallstenius, & Reppen, 2003).

Tegelväggar med ett skorstens liknande hålrum inuti sig kallas hålmurar eller diafragmamurar (Cajdert, Eriksson, Hervall, Sjöstrand, & Sahlin, 1997). Konstruktionen är utformad av två murar med ett mellanrum vilket binds ihop med tegelstenar. Det finns ett flertal olika sätt att konstruera dessa väggar med olika stora håligheter, detta ger väggen en bättre isoleringsförmåga än massiv muren.

Kanalmuren konstrueras på samma sätt som hålmuren bortsett från att det inte är tegelstenar som binder ihop de två skilda väggarna (Cajdert, Eriksson, Hervall, Sjöstrand, & Sahlin, 1997). Detta görs i stället av kramlor eller stegjärnsarmering, vilket skapar en sammanhängande luftspalt. Till följd av hårdare isoleringskrav har luftspaltens storlek ökat och fyllts med isolering.

Vilken tegelväggstyp som användes har en stor betydelse för de antaganden som görs i beräkning av det teoretiska U-värdet som till exempel väggens faktiska tjocklek och kontinuitet (Petersson, 2018). Detta medför i sin tur rimligare värden som sedan kan sättas i jämförelse med fältundersökningsvärden.

2.4 U-värde

Värmeöverföringskoefficienten, U [$\text{W}/\text{m}^2\text{k}$], definieras som den värmemängd som per tidsenhet passerar genom en yta då skillnaden är en grad kelvin (Hagentoft & Sandin, 2017). Den talar om isoleringsförmågan hos ett byggnadselement där lägre värden stimulerar mer isothermiska element eftersom värme som försvinner ut via elementet blir mindre. U-värdet beräknas genom att veta vilka material som ingår i konstruktionselementet för att sedan beräkna resistansen. Resistansen i sin tur beror på materialet tjocklek, d [m], och dess värmeledningsförmågan, λ [W/mK]. Följande ekvationer används vid beräkning av U-värdet (Petersson, 2018):

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \text{K}] \quad (1)$$

$$R_{tot} = R_{s1} + \sum R_i + R_{s2} = R_{s1} + \sum \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{s2} \quad \left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right] \quad (2)$$

R_{tot} – konstruktionsdelens värmemotstånd inklusive ytövergångsmotstånd [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

i – antal materialskikt [-].

R_{s1} och R_{s2} är ytövergångsmotstånd som påverkas av vindhastighet och strålning (Petersson, 2018). För insidan av en väggkonstruktion används vanligtvis $R_{si} = 0,13$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] där i :et indicerar interior och för utsidan används $R_{se} = 0,04$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] där e :et indicerar exterior.

U-värdet är en avgörande faktor vid bestämning av byggnadens termiska tröghet i form av en tidskonstant samt för byggnadens totala beständighet (Boverket, 2024). Detta är bland annat anledningen utöver hälsorisker och komfortkraven i vistelsezonen till varför U-värden fastställs i BBR och som även förstärks av PBL (BFS 2020:4). I Tabell 1 fastställer Boverket kraven på U-värdet. Boverket godkänner även andra U-värden om skäl för bland annat bevaring av kulturvärden kartläggs, precis som fallet för byggnaden i Forsåkerområdet.

Tabell 1: U-värden som skall eftersträvas för enskilda byggnadsdelar [W/m²K] (BFS 2020:4).

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

Vid planering av byggnader är det nödvändigt att med beräkningar kontrollera om kravet på värmeisolering av byggnadens klimatskydd BBR § 9 Energihushållning är uppfyllt. Kraven ställs på högsta acceptabla medelvärmeförningskoefficient U_M , vars enhet är W/m²K. BBR har tabeller som listar de tillåtna värden på U_M ((BFS 2020:4). De beror på om det är ett bostadshus eller en lokal.

BBR värmeisoleringskrav (U_M värdekrav) beskriver den maximala mängd värme som kan passera genom klimatskärmen (BFS 2020:4). Detta kan sedan räknas om till hur mycket värmeisolering av huset som behöver göras. Detta är det vägda genomsnittliga U-värdet för tak, väggar, golv, fönster, dörrar och köldbryggor. Det betyder att U-värdet måste beräknas för varje enskild del av byggnaden och sedan beräkna medelvärdet av alla delar tillsammans (BFS 2020:4). U_M -värdet för en byggnad beräknas enligt nedanstående formel (Petersson, 2018):

$$U_M = \frac{\sum U_{korr,i} \cdot A_i + \sum \psi_k \cdot l_k + \sum \chi_j}{A_{om}} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (3)$$

$U_{korr,i}$ – värmegenomgångskoefficient för byggnadsdelen i korrigerad för inverkan av fästnanordningar, isolerings utförande och nederbörd och vind i isoleringsmaterialet [W/m²K]

A_i – area för byggnadsdelens i yta mot uppvärmd inneluft [m²]

ψ_k – värmegenomgångskoefficient för linjära köldbryggan k [W/mK]

l_k – längden av den linjära köldbryggan k mot uppvärmd inneluft [m]

χ_j – värmegenomgångskoefficient för punktformiga köldbryggan j [W/K]

i – antal materialskikt [-].

Köldbryggor avser delar av klimatskärmen som har högre värmeledningsförmåga än angränsande delar, dessa värmeförluster påverkar byggnadens isoleringsförmåga (BFS 2020:4). Vidare kommer anslutningar mellan väggar, tak och golv att spela en avgörande roll för köldbryggornas storlek eftersom övergången mellan dessa konstruktionsdelar ofta innebär ändring i tjockleken.

2.5 Värmefföde och hur det mäts i teori samt fält

Värmefföde i konstruktioner kan delas upp i tre olika delar, ledning, strålning och konvektion. Värmefföde genom ledning sker med temperaturdifferens som drivkraft där värme i ett homogent material leds från en högre till en lägre temperatur (Petersson, 2018). Strålning har också temperaturdifferens som drivkraft där värme strålar från en varmare yta till en kallare. Värmefföde genom konvektion sker i stället med lufttryckskillnad som drivkraft där lufttryckskillnaden ger upphov till luftrörelser.

2.5.1 Värmefföde och teoretiska beräkningar

Ett teoretiskt värde av värmeffödet genom en konstruktionsdel kan beräknas genom att anta ett stationärt tillstånd. Detta innebär att värmeffödestätheten, q [W/m^2], genom konstruktionsdelen antas vara konstant över alla skikt (Petersson, 2018). Det totala värmeffödet, Q [W], kan beräknas enligt följande formel:

$$Q = \frac{A}{R_{tot}} \cdot \Delta T = U \cdot A \cdot \Delta T = K \cdot \Delta T \quad [W] \quad (4)$$

$$R_{tot} = R_{s1} + \sum R_i + R_{s2} = R_{s1} + \sum \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{s2} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (5)$$

λ – betecknar ett materials värmeledningsförmåga [W/mK]

d – materialets tjocklek [m]

A – betecknar konstruktionsdelens area [m^2]

R_{tot} – konstruktionsdelens värmemotstånd inklusive ytövergångsmotstånd [m^2K/W]

U – betecknar konstruktionsdelens U-värde [W/m^2K]

K – konduktansen för konstruktionsdelen [W/K]

ΔT – temperaturskillnaden över konstruktionsdelen [$^{\circ}C$ eller K]

i – antal materialskikt [-].

Det stationära tillståndet med konstant värmeffödestäthet ger att ΔT för ett visst skikt blir proportionerlig mot skiktets värmemotstånd, R_i .

Anpassning av den teoretiska modellen för praktiska tillämpningar kan göras med varierande utförlighet. En enklare modell för solens inverkan är att använda ekvivalent temperatur, vilket är en fiktiv temperatur och beräknas enligt (Petersson, 2018):

$$T_{ekv} = T_e + \frac{I_{sol} \alpha_{sol}}{\frac{1}{R_{se}}} \quad [^{\circ}C] \quad (6)$$

T_e – utetemperaturen [$^{\circ}C$]

I_{sol} – kortvågig solstrålning mot en yta med en viss orientering [W/m^2]

α_{sol} – absorptans för kortvågig solstrålning [-].

2.5.2 Mätmetoder i praktiken

Mätningar av värmeflöde i fält kan ske genom olika metoder, bland annat genom värmeflödesmätare (heat flux meter, HFM) och infraröd termografi (infrared thermography, IRT), även kallat värmekamera (Kim, o.a., 2023). HFM-metoden involverar värmeflödesmätare som genom ledning mäter hur mycket värme som flödar genom konstruktionsdelen. Infraröd termografi utnyttjar strålning i stället för ledning och hur mycket värme som en konstruktionsdel tar upp genom strålning från omgivningen.

I den tidigare studien användes värmeflödesmätare av typen Hukseflux:s mätare HFP01 vilket är en termostapel som mäter temperaturdifferensen över dess två sidor i volt (Johansson, Wahlgren, & Eriksson, 2019). Omvandling till värmeflödestäthet, q [W/m^2], erhålls genom att dividera mätvärdet med en specifik sensitivitet för varje enskild mätare (Hukseflux, u.å.). Sensitivitet skiljer sig för olika mätare och fås genom kalibreringscertifikatet för den specifika mätaren.

2.6 WUFI

“Wärme- und Feuchtetransport instationär”, vilket förkortas till WUFI, är ett datorprogram som simulerar värme- och fukttransport i byggnadsdelar eller konstruktioner (WUFI, 2024). Genom att ta hänsyn till materialegenskaper, gränsvillkor och väderförhållanden kan WUFI ge ett sanningsenligt och utförligt resultat. År 1995 i Tyskland skapade Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP) första versionen av WUFI. Simuleringsverktyget har sedan dess kommit att bli ledande inom sitt område och används idag världen över inom byggbranschen. Det finns många olika användningsområdena för WUFI, som exempelvis inom tillverkning och utveckling av byggnadsmaterial. Mjukvaran kan även nyttjas i projekteringsfasen av både konstruktörer och konsulter för att utforma energieffektiva byggnader som har låg risk för fuktskador.

2.6.1 WUFI beräkningar

När det gäller värmetransportberäkningar tar WUFI hänsyn till termisk konduktivitet, entalpi genom fuktrörelser med fasövergångar, kortvågig solstrålning samt långvågig strålning (WUFI wiki a, 2008). Den beräkningsmodell WUFI använder sig av för att utföra värmetransportberäkningar, då ickestationära förhållanden råder, utgörs av följande differentialekvation (Künzel, 1994):

$$\frac{\partial H}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + h_w \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (7)$$

H - Entalpi av byggnadsmaterial [J/m^3]

θ - Temperatur [$^{\circ}C$]

λ - Värmeledningsförmåga [W/mK]

h_w - Avdunstningsentalpi av vatten [J/kg]

δ - Ånggenomsläpplighet [$kg/msPa$]

p – Partialtryck vattenånga [Pa].

Nedan listas de beräkningssteg WUFI använder och en närmare förklaring av vad de innebär:

1. Geometry: Byggnadsdelarnas dimensioner och placering definieras.
2. Grid: Delar upp elementen i mindre delar i ett beräkningsnät, vilket specificerar i vilka beräkningspunkter balansekvationerna ska utföras, det vill säga hur detaljerad resultatets upplösning blir.
3. Materials: Definierar materialegenskaperna för varje element. Antingen väljs ett material från WUFI:s databas eller skapas ett helt nytt material med egna materialegenskaper.
4. Initial conditions: I detta steg ansätts temperatur- och ånghalt för varje element.
5. Surface/Climate: Här definieras randvillkor för varje yta. Uteklimat och inneklimat ansätts. För att avgränsa systemet kan ytor definieras som "som adiabatic border", vilket innebär att det inte är något värmefflöde genom dessa gränser. Utöver värmeövergångsmotstånd kan även faktorer för sol, vind och regn justeras i detta beräkningssteg.
6. Computational parameters: Beskriver för vilken period som simuleringen ska utföras, samt vilka resultat som ska visas.

2.6.2 Datainsamling av klimatdata

WUFI utvärderar fukt och värmefflöde genom en uppsättning randvärden knutna till den specifika byggnadsdelen. Randvärdena specificeras för både in- och utsidan av byggnadsdelen och består av sex olika parametrar: in- och utetemperatur, relativ fuktighet inomhus och utomhus, solstrålning och nederbörd (WUFI, 2012).

Randvärdena kan matas in i WUFI på olika sätt (WUFI, 2012). En förinställd geografisk plats kan väljas där parametrarna följer årsmedelvärden för den specifika regionen, denna metod ger endast ett genomsnitt för ett normalår och bör inte användas för specifika tidsperioder. I stället kan egna väderdata sammanställas i en ASCII-fil för att sedan matas in i WUFI. Randvärdena i väder-filen specificeras fritt och således uppnås en högre precision med avseende på den tidsperiod som undersöks.

För att den data som samlats in ska kunna matas in i WUFI behöver den sorteras i rader och kolumner i specifik ordning utefter de olika parametrarna (WUFI, 2012). Därefter behöver ASCII-filen konverteras till ett kli-format för att vara kompatibel med WUFI:s funktion för filinmatning.

3. Laborationsförsök

Följande kapitel redogör genomförandet och resultaten av värmeflödeslaborationen. Syftet med laborationen var att öka förståelsen av mätutrustningen som den tidigare studien använt sig av och att vara en referens till övriga delar av arbetet.

3.1 Utförande av värmeflödeslaboration

Klimatförhållandena i laboratoriet är närmare stationära förhållanden då sol, vind, regn och varierande temperatur inte påverkar resultaten, till skillnad från referensväggen i fält. Laborationsväggen bestod av sju rader i höjded och fyra rader i djupled utav moderna tegelstenar och modernt murbruk. Väggens dimensioner var 0,5 x 0,5 x 0,5 (bredd x höjd x djup) meter, med 0,1 meter tjocka isoleringsskivor (EPS) runt om, med undantag för framsidan, vilken lämnades fri. Bakom väggen lämnades e

n lika stor volym som väggen tom, detta tomrum värmdes sedan upp med en värmekälla i form av en lågenergilampa, se Figur 2 för uppställningen. Uppvärmningen av tomrummet ger upphov till en temperaturdifferens mellan utsida och insida som resulterar i ett värmeflöde, som mäts av värmeflödessensorer och registreras av en datalogger.



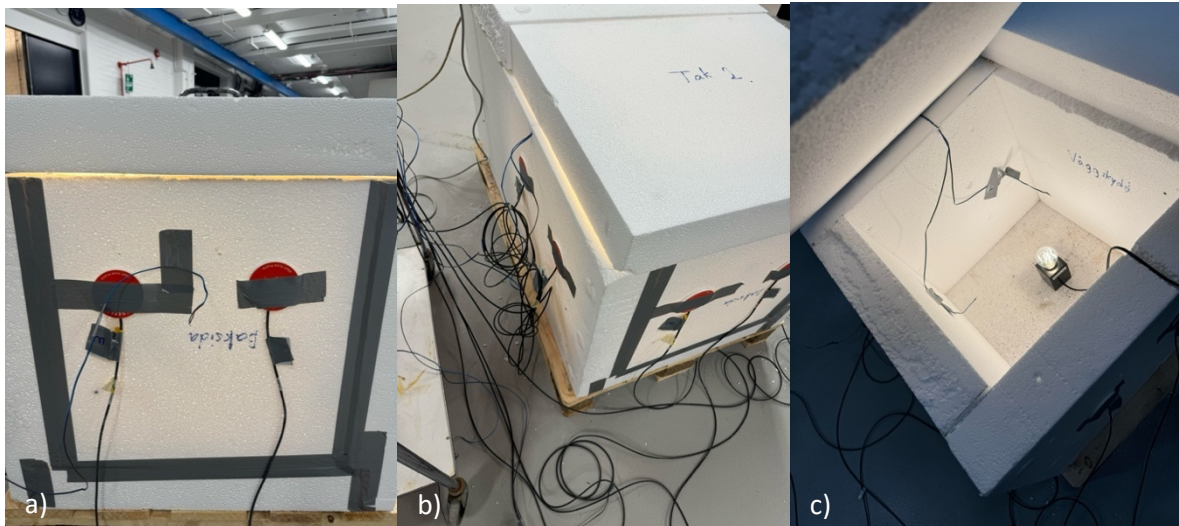
Figur 2: a) Laborationens uppställning sedd framifrån. 1 visar datalogger, 2 visar yt- och lufttemperaturmätare, 3 visar värmeflödessensorer. b) Det uppvärmda tomrummet bakom tegelväggen. 2 och 3 visar samma som för framsidan och 4 visar den interna värmekällan i form av en lågenergilampa.

För att beräkna vilken effekt lågenergilampen behöver för att uppnå olika temperaturdifferenser gjordes en kretsanalys och beräkningar enligt Bilaga A.1. Beräkningarna gav att den valda lågenergilampen på 10 W skulle ge en teoretisk temperaturdifferens på 14 °C.

Ett teoretiskt U-värde för laborationsväggen beräknades enligt ekvation (1) och (2) till $U_{lab.vägg} \approx 0,915 \text{ W/m}^2\text{K}$ där ett antagande att ytövergångsmotståndet, R_{si} finns på båda sidorna av väggen, detta då väggen är placerad inomhus. Antagandet ger ett U-värde som är ca 0,08 $\text{W/m}^2\text{K}$ mindre än om R_{se} används på en av sidorna. Teglets värmeledningsförmåga antogs till standardvärdet 0,6 W/mK för en densitet på 1700 kg/m^3 (Hagentoft & Sandin, 2017).

Värmeflödet mättes med Hukseflux:s HFP01 mätare, temperaturmätare i form av termoelement och HIOKI:s datalogger LR8431-20. Innan mtning av tegelväggen påbörjades kontrollerades värmeflödesmätarnas sensitivitet från certifikatet genom att mäta värmeflödet

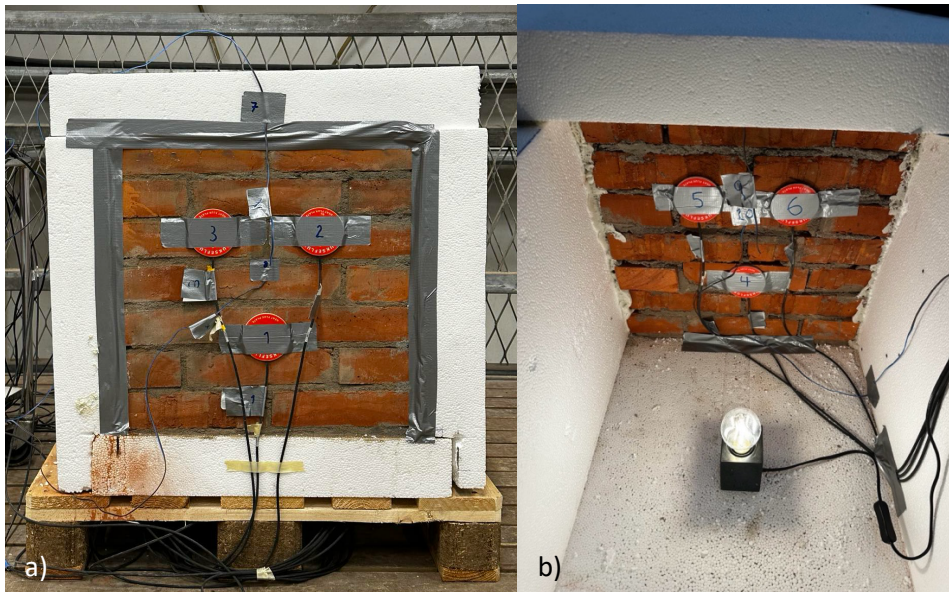
över isoleringen. U-värdet beräknades enligt omskrivning av ekvation (4) och jämfördes med ett teoretiskt U-värde för isoleringen beräknat till $U_{iso,teoretiskt} \approx 0,287 \text{ W/m}^2\text{K}$ enligt ekvation (1) och (2). Sensor 1 och 2 sattes upp på vänstersida sett bakifrån, 3 och 4 på baksidan samt 5 och 6 på högersidan av tomrummet. Två lufttemperaturmätare sattes upp på vardera sida av isoleringen och för att skydda tegelväggen mot värmen sattes ett skydd av isolering upp. Uppställningen för kontrollen kan ses i Figur 3.



Figur 3: Uppställning av sensortest över isolering där a) visar baksidan, b) vänster sida sett bakifrån och c) insidan av tomrummet med värmekällan i form av en lågenergilampa.

Mätningarna pågick i cirka 17 timmar och beräkningarna för ett stabilt intervall med original sensitivitet gav U-värden skilda från det teoretiska. Detta innebar att en ny korrigerad sensitivitet togs fram för vardera värmeflödessensor och kan ses i Bilaga A.2.

Efter att sensorerna testats flyttades sensorerna till tegelväggen där sensor 1–3 sattes på framsidan (utsidan) och sensor 4–6 sattes på baksidan (insidan). Sensor 1 och 4 har samma läge på väggen men på vardera sida. Likadant för sensor 2 och 5 respektive 3 och 6. På framsidan mäts lufttemperaturen med mätare 7 och yttemperaturen med mätare 8. På baksidan mäts lufttemperaturen med mätare 9 och yttemperaturen med mätare 10. Uppsättningen av sensorer kan ses i Figur 4. Inkopplingen av sensorer och temperaturmätare till dataloggaren matchades med rätt kanalnumrering, det vill säga kanal 1 (CH-1), kanal 2 (CH-2) och så vidare.



Figur 4: Uppställning av värmeflödessensorer samt temperaturmätare för test av tegelvägg där a) visar framsidan och b) tomrummet på insidan med en lågenergilampa som intern värmekälla.

Laborationen pågick under 7 dygn och sensorerna på insidan visade högre värmeflöde än sensorerna på utsidan trots att ett stationärt tillstånd uppnåts. På grund av detta gjordes ett nytt test av isoleringen för att kontrollera om insidan återigen visade högre mätvärden. Uppställningen gjordes på vardera sida av en isoleringsskiva likt tegelväggen, se Figur 5 för uppställning. Det väggskydd som användes tidigare under sensorkontrollen sattes upp framför tegelväggen även här.

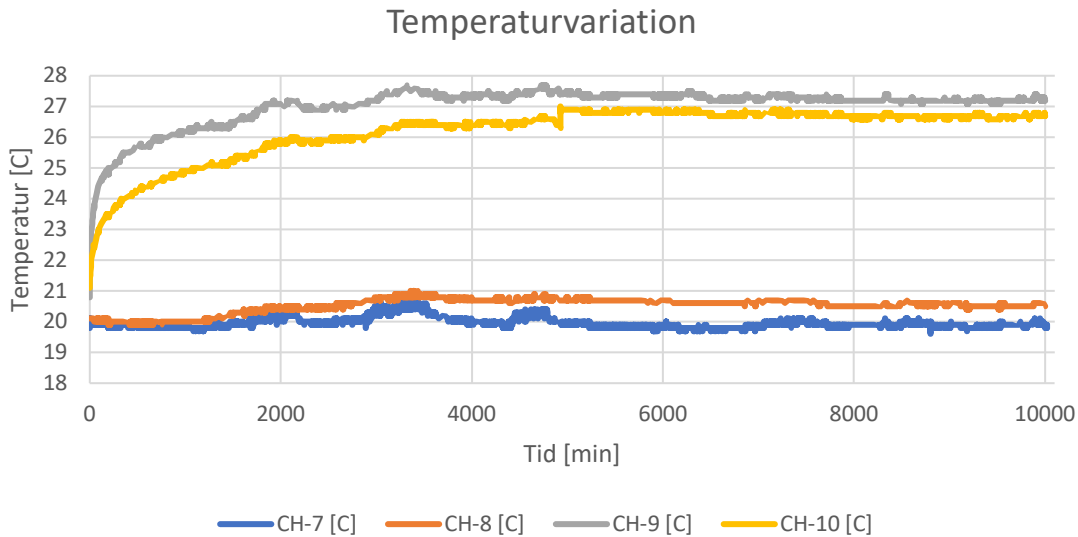


Figur 5: Uppställning av isoleringslaboration där a) visar baksidan med värmeflödesmätare och temperaturmätare. b) visar insidan med värmeflödes-, temperaturmätare och värmekälla.

Isoleringslaborationen pågick i cirka fyra dygn och visade likt tidigare högre värmeflöde på insidan än utsidan även under stationärt tillstånd.

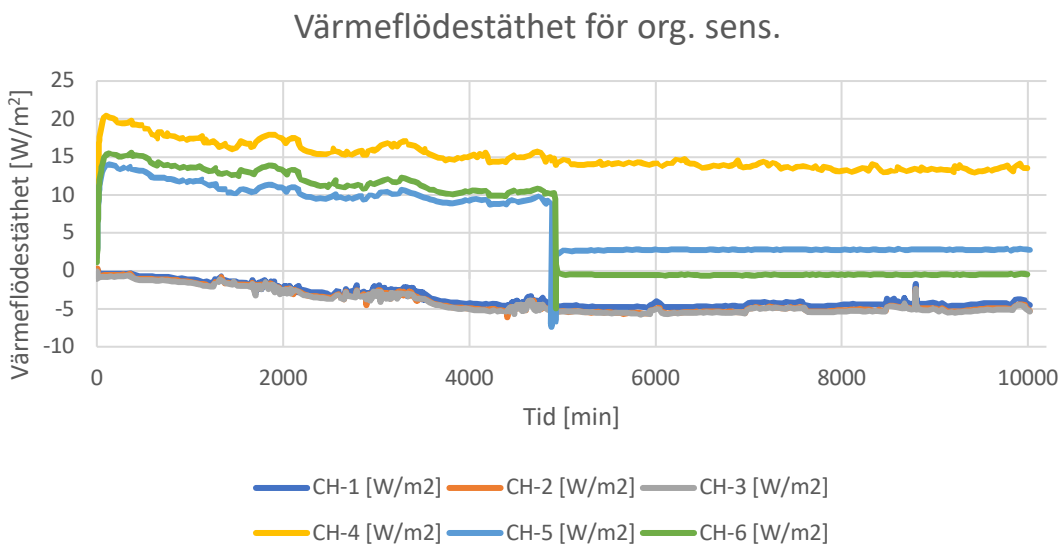
3.2 Resultat av laboration

Mätvärdena för tegelväggen sträcker sig över cirka sju dygn och i Figur 6 kan variationen av temperaturen ses. Figur 7 visar hur värmeflödestätheten varierade i W/m^2 över tid med original sensitivitet givet från certifikatet.



Figur 6: Temperaturvariation under laborationen, där CH-7 visar lufttemperatur på utsidan, CH-8 visar ytemperatur på utsidan, CH-9 visar lufttemperatur på insidan och CH-10 visar ytemperatur på insidan.

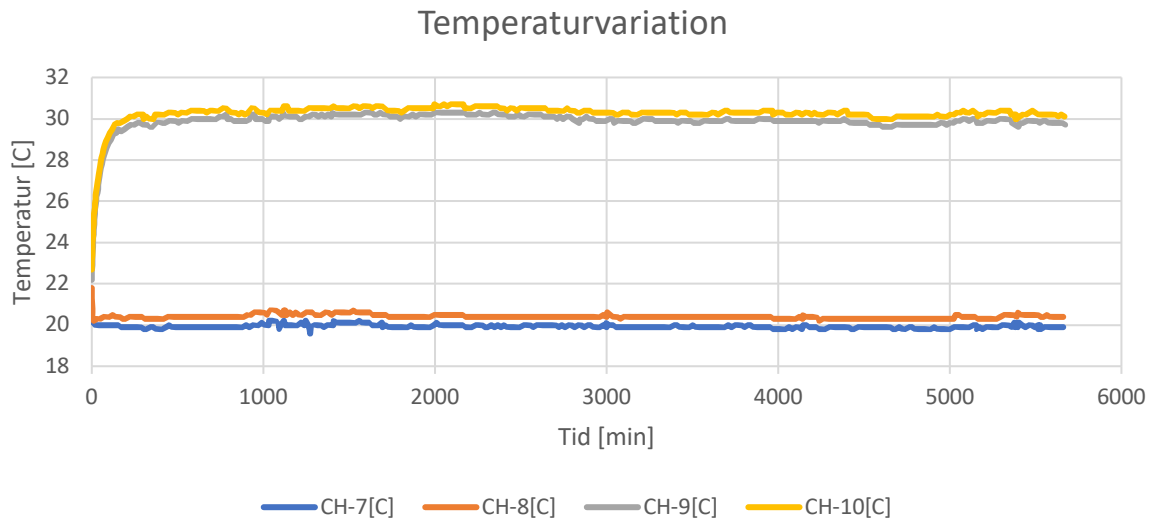
Figur 6 visar hur temperaturen stabiliserar sig i takt med att stationärt tillstånd uppnås. Hoppet i mätdata för CH-10 vid cirka 5000 minuter visar den tidpunkt då mätaren lossnade från ytan. På grund av det bortses mätvärden från denna mätare efter denna tidpunkt. Likt Figur 6 går det även i Figur 7 att avläsa när två av värmeflödessensorerna på insidan lossnade från väggen vid samma tidpunkt.



Figur 7: Värmeflödestäthet i W/m^2 för original sensitivitet, där CH-1 till CH-3 visar utsidan och CH-4 till CH-6 visar insidan.

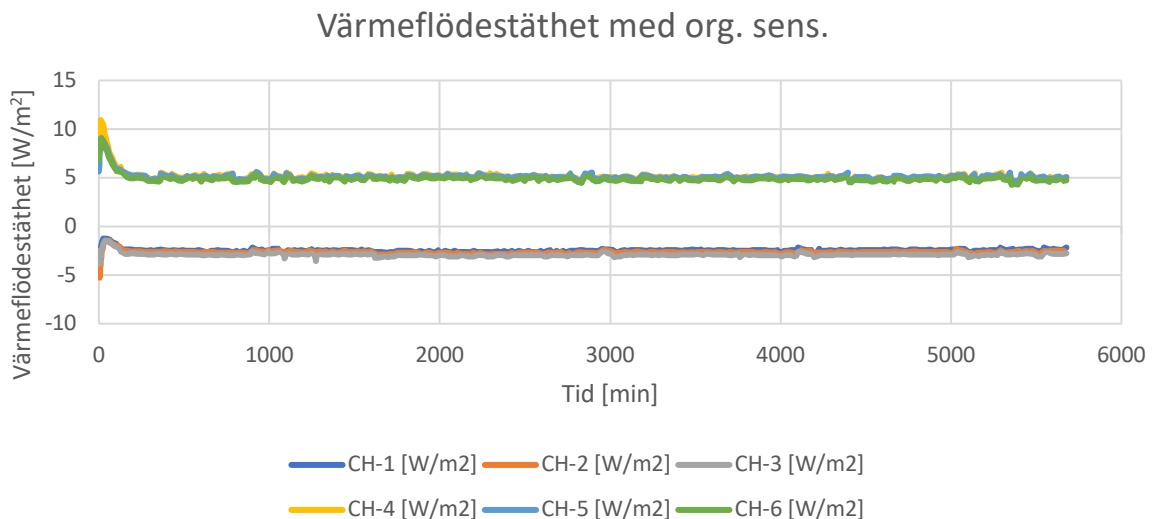
Genom att jämföra Figur 6 och 7 kan tidsförskjutningen, från det att temperaturen stabiliseras till det att värmeflödet stabiliseras vid, läsas av. Temperaturen stabiliseras vid cirka 4000 minuter och värmeflödestätheten vid cirka 5000 minuter. Detta resulterar i en förskjutning på cirka 16–17 timmar. Grafer för värmeflöde med korrigerad sensitivitet och en sammanställd graf för tegelväggen kan ses i Bilaga A.3.

Resultatet av isoleringslaborationen redovisas i Figur 8 och 9, där temperatur respektive värmeflödestätheten för original sensitivitet visas. Graf för korrigerad sensitivitet och en sammanställd graf för isoleringslaborationen kan ses i Bilaga A.4.



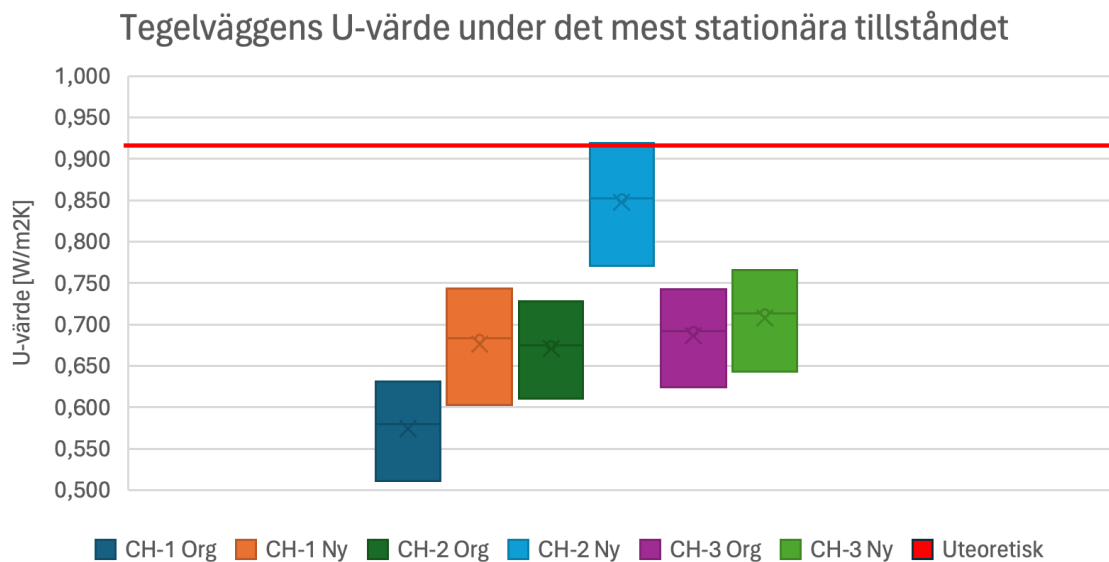
Figur 8: Temperaturvariation för isoleringslaborationen, där CH-7 visar lufttemperatur på utsidan, CH-8 visar ytttemperatur på utsidan, CH-9 visar lufttemperatur på insidan och CH-10 visar ytttemperatur på insidan.

Figur 8 visar att en maximal temperaturdifferensen på cirka 10 °C uppnås mellan utsida och insida under laborationens fyra dygn där ett tydligt stationärt tillstånd uppnås.



Figur 9: Graf över värmefflödestätheten i W/m^2 för original sensitivitet där CH-1 till CH-3 visar utsidan och CH-4 till CH-6 visar insidan.

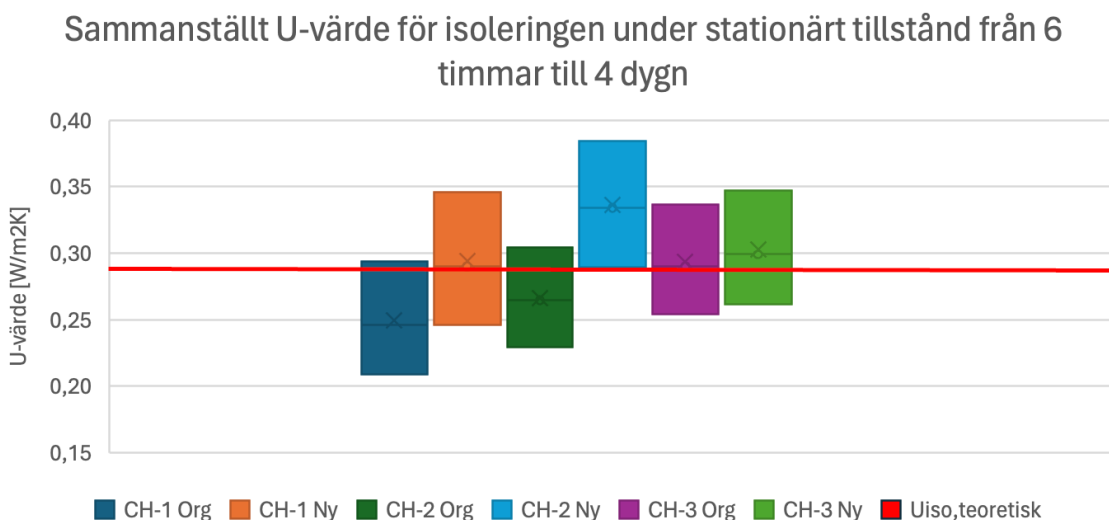
Figur 9 visar liksom Figur 7 hur värmeväxlingen mellan utsida och insida inte stämmer överens trots att det är stationärt tillstånd. Resultatet gör att insidans sensorer bortses från då de förmodligen inte visar rätt värden, en anledning till detta kan vara icke antagna effekter från värmekällan. Tegelväggs U-värdesberäkningar görs för det stationära tillståndet på åtta timmar under femte dygnet och redovisas i Figur 10.



Figur 10: U-värde för tegelväggen enligt utsidans sensorer beräknat med original och ny korrigerad sensitivitet.

Figur 10 visar tydligt på att majoriteten av de beräknade U-värdena baserat på mätvärdena inte når det teoretiska U-värdet på cirka 0,915 W/m²K. Enbart sensor nummer två med korrigerad sensitivitet, vars maximala U-värde på 0,919 W/m²K, når det teoretiska U-värdet.

Isoleringen uppnådde ett stationärt tillstånd tidigare och U-värdet beräknades över det stationära tillståndet från sex timmar och framåt och kan ses i Figur 11.



Figur 11: U-värdesberäkning för värmeflödessensor 1–3 på isoleringens utsida med original och ny korrigerad sensitivitet.

Figur 11 visar på ett samlat resultat av de beräknade U-värdena där alla sensorers intervall innehåller det teoretiska U-värdet för isoleringen på cirka 0,287 W/m²K.

3.3 Diskussion av laborationens metod och resultat

Resultaten av laborationen visar tydligt på komplexiteten med mätningar av U-värdet på byggnader med höga tidskonstanter, vilket kan exemplifieras i skillnaden mellan resultaten för tegelväggen och isoleringen. Värmefflödesmätningarna av tegelväggen gav, enligt Figur 10, lägre U-värden på majoriteten av beräkningarna än det teoretiska för tegelväggen. Däremot visar Figur 11 att beräkningarna av isoleringens U-värden resulterar i ett intervall kring det teoretiska.

Eftersom förutsättningarna för de två laborationerna, bortsett från geometrin, var lika tyder det på att tegelväggen var utsatt för fler randeffekter och felkällor än vad som tidigare antagits. Några möjliga felkällor kan till exempel vara att isoleringen runtomkring inte tätades tillräckligt eller att tegelväggen inte murades korrekt. Det finns även en möjlighet i att väggen inte var helt torkad efter murningen, vilket kan ge en viss osäkerhet i resultaten. Skillnaden i geometri kan även vara en faktor då tegelväggen har 0,5 meters tjocklek jämfört med 0,1 meter för isoleringen. Det finns en möjlighet att under laborationen av tegelväggen uppstod en spridning av värmefflödet ut genom den täckande isoleringen, vilket kan givit lägre mätvärden gentemot det teoretiska U-värdet. Spridningen av värmefflöde skulle kunna innebära att värmefflödet rakt genom väggen minskat då värme i stället spridit sig åt olika håll. Denna minskning leder därför till lägre uppmätta värden av värmefflödet på utsidan för en viss temperaturskillnad.

Vid fortsatta studier och mätningar kan ett alternativ vara att öka tjockleken av isoleringen för att undersöka om ett högre U-värde för tegelväggen kan nås. Mätarnas placering och hur dem fästs kan även påverkat resultatet vilket tydligt kan ses då flera mätare lossnade under laborationens gång. Hur mätarna fästs och vilken yta som väljs bör därför prioriteras vid fortsatta laborationer för att uppnå högre precision i resultaten.

Ytterligare uppmärksammade laborationen skillnaden i värmefflöde mellan den belastade insidan och den obelastade utsidan. Insidan som belastades direkt med en värmekälla i form av en lågenergilampa gav högre värmefflöde än utsidan, även då ett stationärt tillstånd hade uppstått. Detta innebär en förmodlig svaghet hos de använda värmefflödessensorerna vilka därför enbart bör användas på en obelastad sida. En potentiell förklaring till denna svaghet är sensorernas känslighet gentemot strålning. Vid testning av sensorerna uppmärksammades att om något täckte en sensor påverkades resultatet, förmodligen genom ökad eller minskad strålning. Detta kan vara anledningen till lägre mätvärden för utsidan och högre för insidan och kan i sin tur förklara skillnaden i värmefflödestäthet. Genom att byta isolering till en mörkare färg eller klä in sensorerna med något som skyddar från strålningen är möjliga lösningar till problemet. Detta i samband med att en annan typ av värmekälla används, exempelvis värmeslingor för att undersöka felkällan ytterligare. En annan möjlig testmetod är att använda IRT-metoden som tidigare nämnts i kapitel 2.5.2, vilket skulle kunna ske i stället eller i kombination med dem använda värmefflödessensorer i denna laboration.

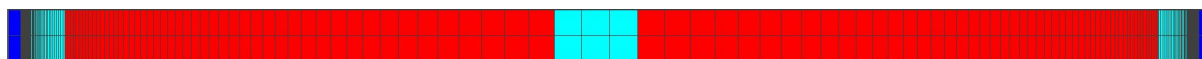
Skillnader mellan det moderna teglet och murbrukets egenskaper, kontra det från testbyggnaden i Forsåker, gör att en direkt jämförelse mellan testbyggnaden och laborationen inte är möjlig. Laborationen kan enbart verka som en uppskattning till ett intervall runt både testbyggnadens teoretiska och praktiska U-värde samt värmetröghet.

4. Känslighetsanalys med hjälp av WUFI

Syftet med att använda WUFI i detta arbete är att uppskatta värmeflödet genom en tung tegelvägg, under en längre tid, då icke-stationära förhållanden råder. För att se vad som ger störst effekt på U-värdet kommer olika parametrar att ändras under olika simuleringar. Exempelvis kommer solstrålning, fukthalt, värmeövergångsmotstånd och tjocklek att ändras mellan de olika försöken. Genom att justera de ingående parametrarna erhålls U-värdets känslighet för variation av just dessa. Resultatet från känslighetsanalysen kan appliceras på referensbyggnaden i Forsåker och mätdata från den.

4.1 Metod känslighetsanalys

För känslighetsanalysen kördes de olika simuleringarna i WUFI med de valda parametrar och den väderfil som redovisas i kapitel 4.1.1 respektive 4.1.2. Resultaten för de olika simuleringarna sparades som textfiler och importerades till Microsoft Excel där de jämfördes med varandra. Den data som valdes att exportera från WUFI var temperaturen för väggen vid utsidan, insidan och i mitten samt värmeflödestätheten mitt i väggen, dessa mätpunkter är markerade i ljusblått i Figur 12. I Excel kunde sedan denna data användas för att räkna ut ett ungefärligt U-värde för väggen vid de olika fallen. U-värdet beräknas som värmeflödestätheten dividerad med temperaturskillnaden mellan ut- och insidan, en omskrivning av ekvation (4). För att få ett mer precist resultat beräknades U-värdet som ett medelvärde över 7 dagar.



Figur 12: Valda mätpunkter i beräkningsnätet för analys av temperaturvariationer i WUFI. Utsida, mitten och insida.

4.1.1 Valda parametrar

Värmeflödesanalysen utfördes för 6 olika fall samt för en referensmodell som användes i jämförande syfte. Referensväggen bör efterlikna Forsåkerbyggnadens vägg för att få ett sanningsenligt och applicerbart resultat. Väggtjockleken på byggnaden i Forsåker uppmättes till ca 470 mm (Johansson, Wahlgren, & Eriksson, 2019). Därmed ansattes även referenstjockleken i WUFI till 470 mm. Eftersom det endast är det endimensionella värmeflödet genom väggen som analyseras kommer inte elementets höjd påverka resultatet. För att köra simuleringen behövs en höjd, vilken ansattes till 20 mm. Elementets beräkningsnät (grid) ansattes till 200 delar i x-led och två delar i y-led, vilket kan ses i Figur 12.

I och med att murbruket och teglets materialegenskaper är lika bortses bruket ifrån och väggen analyseras som en homogen tegelvägg. Teglets materialegenskaper beräknades i ett tidigare kandidatarbete (Johansson, Josefsson, & Rajha, 2018). Där beräknades teglets densitet till 1821kg/m³, porositet är 0,29 m³/m³, specifik värmekapacitet är 726 J/kgK och värmeledningsförmåga är 0,61 W/mK. Elementets initiala förhållanden sätts till 20 °C och en relativ fuktighet på 80%.

Klimatet för väggens utsida utgjordes av en väderfil som är en sammanställning av Göteborgs och Mölndals klimat under 2019. Detta år valdes då mätdata från referensväggen också fanns tillgänglig för samma tidsperiod. Kapitel 4.1.2 går djupare in på hur denna väderfil togs fram. Inneklimatet konstaterades i WUFI:s egna inställningar där innetemperaturen sattes till konstant 23 grader och 50% relativ fuktighet för att efterlikna inneklimatet i referensbyggnaden (Johansson, Wahlgren, & Eriksson, 2019). I denna analys är vänster sida definierad som utsida

medan höger sida är definierad som insida. I detta beräkningssteg ansätts även insidans värmeövergångskoefficient, α_i , till 8 och utsidans värmeövergångskoefficient α_e , till 25. Det är också möjligt att justera mängden absorberad solstrålning. Som utgångspunkt sattes faktorn till 0 för både långvågig och kortvågig strålning samt markreflektion som simulerar att väggen inte utsätts för solstrålning. Simuleringen körs över ett års tid och resultatfilen ska innehålla temperatur och värmeflödestäthet.

När analysen för referensväggen är färdig så ändras vissa ingående parametrar för att utvärdera hur värmeflödestätheten och därmed U-värdet varierar. De parametrar som justerades var relativ fuktighet, tjocklek, värmeövergångsmotstånd och solstrålning. Syftet med att justera övergångsmotståndet på utsidan var att simulera extrem vind. Ökningen av relativ fuktighet skulle simulera ihållande regn, alternativt en läcka som gör väggen blöt. Genom att minska och öka väggens tjocklek ser vi i vilken utsträckning en varierande tjocklek påverkar väggens U-värde, detta är framför allt relevant i en äldre byggnad där det kan finnas större variationer i konstruktionen. Solstrålningen är också en viktig parameter att analysera. Denna analys gjordes som tidigare nämnts med faktorn för långvågig och kortvågig strålning samt reflektion från marken. De tre olika faktorerna valdes till WUFI:s fördefinierade värde för rött tegel och standardvärdet för markreflektion. På så sätt efterliknas en solexponerad tegelfasad. Alla 6 fall samt referensmodellen redovisas i Tabell 2.

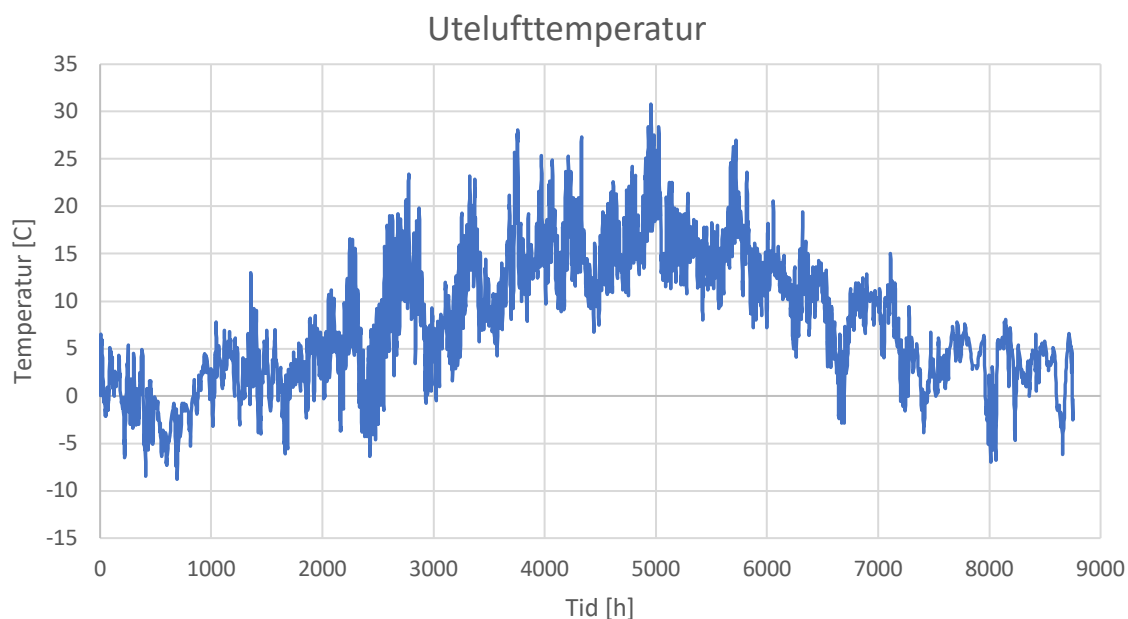
Tabell 2: De olika fall som simulerades i WUFI och de olika parametrarna som ändrats mellan varje fall.

	Referens	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6
Tjocklek [mm]	470	470	470	+20% 564	-20% 376	470	470
Värmeövergångskoefficient [W/m ² K]	$\alpha_e=25$ $\alpha_i=8$	$\alpha_e=25$ $\alpha_i=8$	$\alpha_e=25$ $\alpha_i=8$	$\alpha_e=25$ $\alpha_i=8$	$\alpha_e=25$ $\alpha_i=8$	$\alpha_e=1000$ $\alpha_i=8$	$\alpha_e=25$ $\alpha_i=8$
Relativ fuktighet [%]	80	0	100	80	80	80	80
Kortvågig strålning [-]	-	-	-	-	-	-	0,68
Långvågig strålning [-]	-	-	-	-	-	-	0,9
Kortvågig markreflektion [-]	-	-	-	-	-	-	0,2

4.1.2 Klimatdata

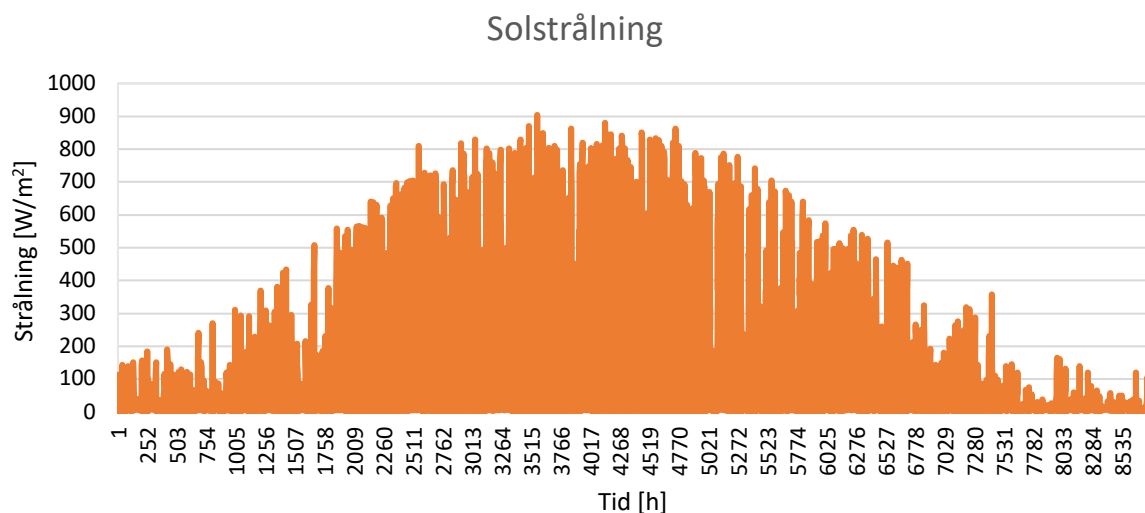
För att få en så hög precision som möjligt med avseende på den valda tidsperioden har en egen ASCII-fil skapats enligt kapitel 2.6.2. Den väderdata som använts för fallet är taget från SMHI:s väderstationer i Göteborg (SMHI, 2024). SMHI använder sig av tre olika väderstationer för datainsamling inom Göteborgsregionen: Göteborg centrum, Mölndal och Landvetter flygplats. Majoriteten av data har hämtats från mätstationen i Mölndal. Nederbörd och relativ fuktighet fanns inte tillgänglig vid denna mätstation och har i stället hämtats från Landvetter flygplats respektive Svebys mätstation i Mölndal (Sveby, 2022).

SMHI har sammanställt utelufttemperaturens variation per timme fram till och med tre månader från dagsläget (SMHI, 2024). Från denna data har temperaturens timvariation under året 2019 plockats ut och redovisas i Figur 13.



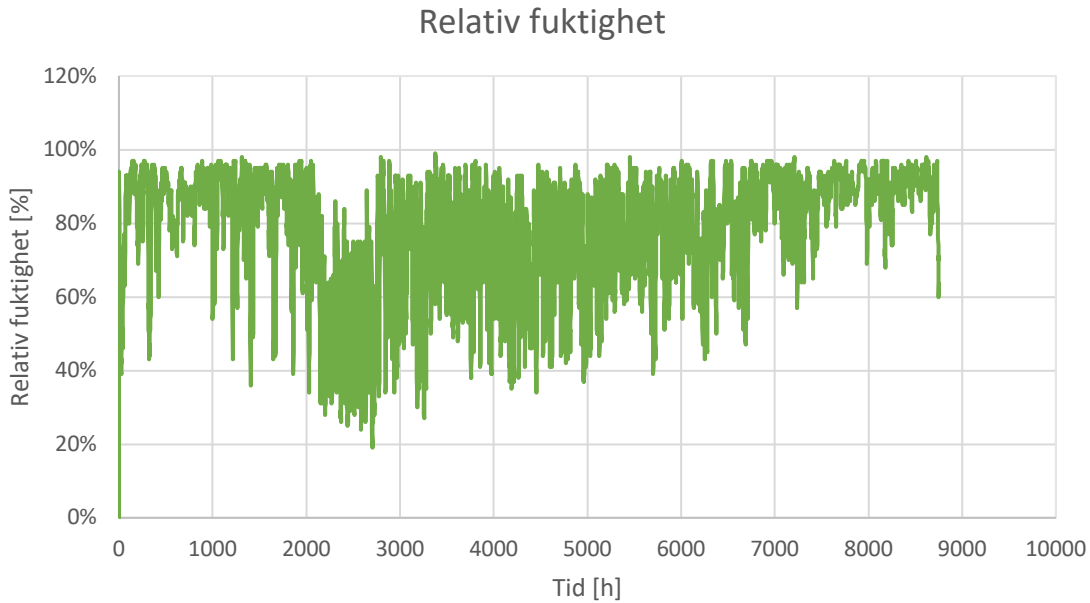
Figur 13: Varierande utelufttemperatur från mätstationen i Mölndal varje timme under 2019 (SMHI, 2024).

Likt uteluftstemperaturen finns solstrålning uppmätt under varje timme fram till tre månader från dagens datum (SMHI, 2024). Även här har data för året 2019 plockats ut och redovisas i Figur 14.



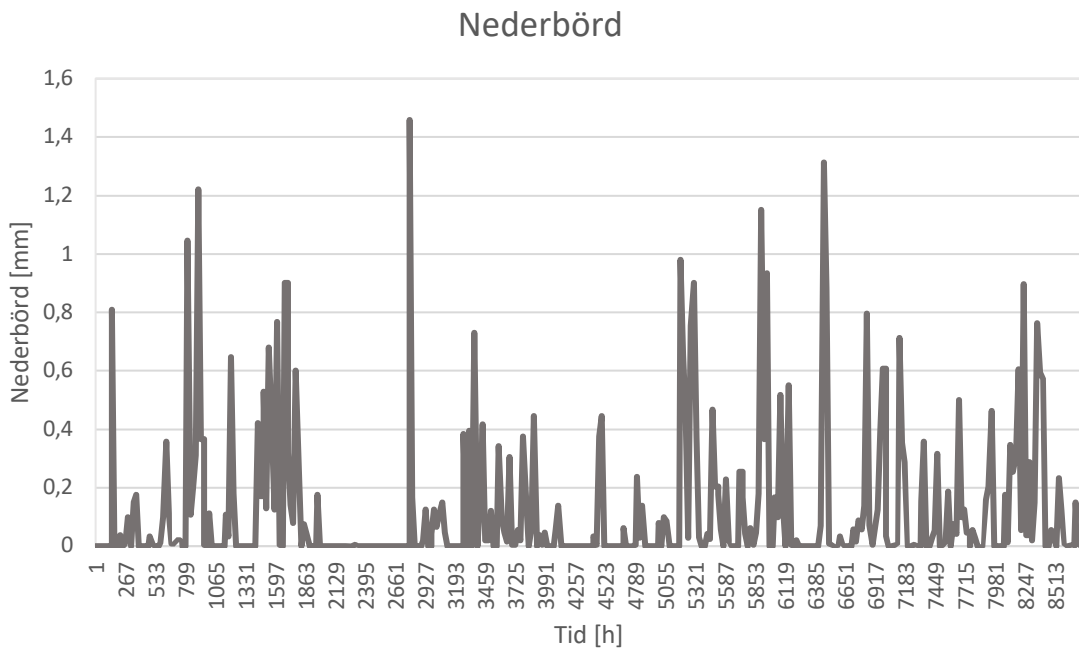
Figur 14: Den uppmätta solstrålningen från mätstationen i Mölndal varje timme under 2019 (SMHI, 2024).

Den relativa fuktigheten utomhus redovisades på samma vis med timvariationen under året 2019 från Svebys mätstation och redovisas i Figur 15 (Sveby, 2022).



Figur 15: Uppmätt relativ fuktighet varje timme under året 2019 (Sveby, 2022).

Nederbörd är den andra parameter som inte fanns tillgänglig vid Mölndals mätstation och har i stället hämtats från Landvetter flygplats (SMHI, 2024). Data redovisades i värden om total dygnsnederbörd och har därför fördelats jämnt över dygnets timmar för att erhålla timvärden som de andra parametrarna. På grund av detta finns en felmarginal på timnivå medan den ackumulerade dygnsnivån representerar verkligt fall. Nederbörden redovisas i Figur 16.

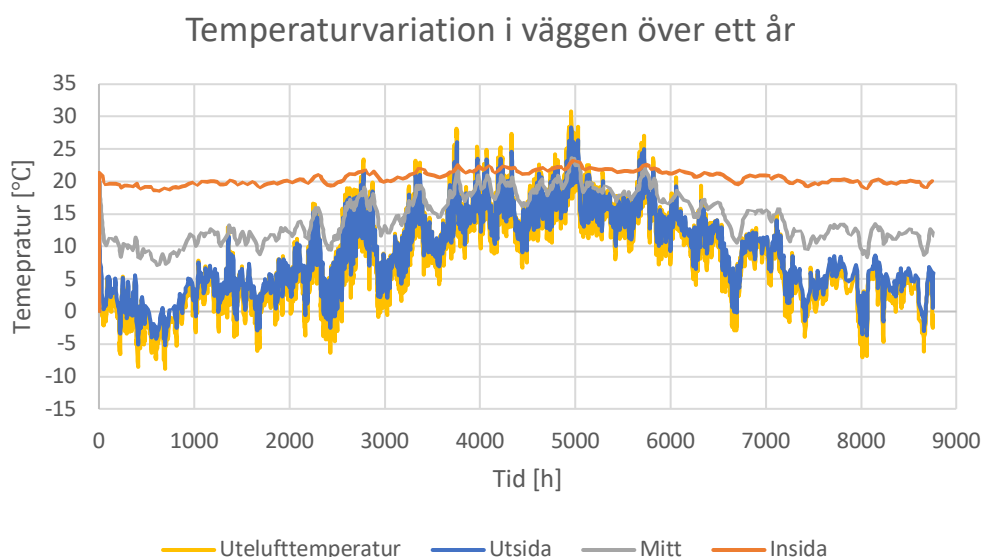


Figur 16: Total dygnsnederbörd fördelad över dygnstimmar under året 2019 (SMHI, 2024).

Insamlingen, sorteringen och filkonverteringen av den data som tagits från SMHI och Sveby har utförts genom MATLAB och script redovisas i bilaga B.

4.2 Resultat av känslighetsanalys

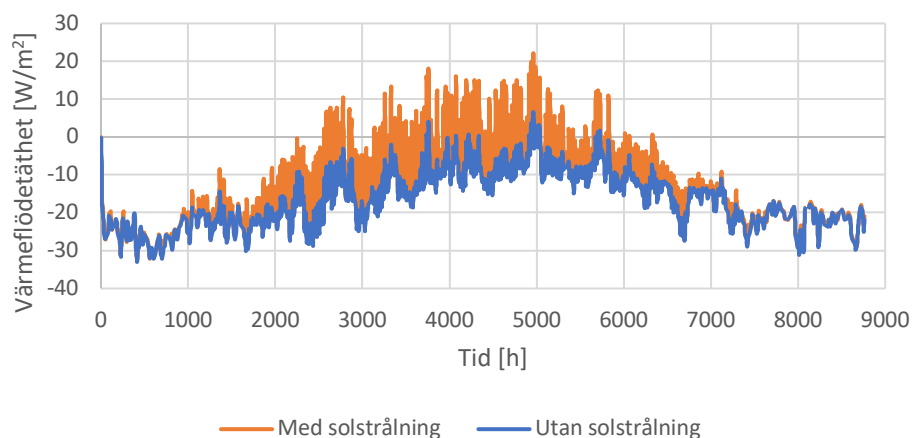
Resultatet sammanställdes i grafer för de olika fallen, där exempelvis temperaturvariationerna över ett år redovisas. Temperaturvariationen för referensväggen redovisas nedan i Figur 17. För att se temperaturvariationer för övriga fall, se Figur 33, 34, 37 och 39 i Bilaga C.



Figur 17: Temperaturvariationer för referensväggen över ett år.

Skillnaden mellan de olika fallen och referensväggen kombinerades också i olika grafer för att det skulle bli lätt att se skillnaderna. Exempelvis är det lätt att se skillnaderna i värmeledningstätheten vid det fall där väggen utsätts för solstrålning jämfört med referensväggen. Figur 18 visar hur värmeledningen varierar över året med och utan solstrålning. På grund av hur väggen är definierad i WUFI innebär en negativ värmeledningstäthet att flödet går från insidan till utsidan. När värmeledningen går från utsidan till insida är värmeledningstätheten positivt.

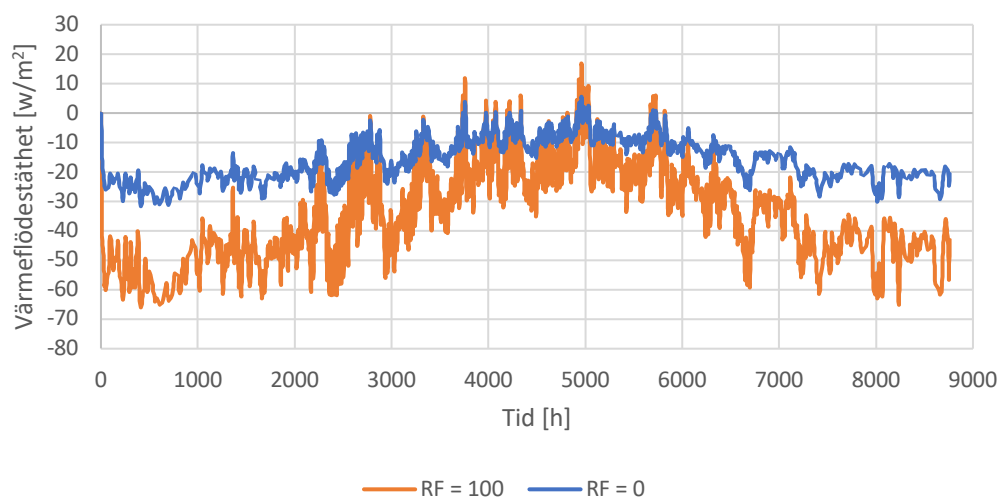
Solstrålningens påverkan på värmeflödestätheten över ett år



Figur 18: Solstrålningens påverkan på värmeflödestätheten över ett år (fall 6 och referensväggen).

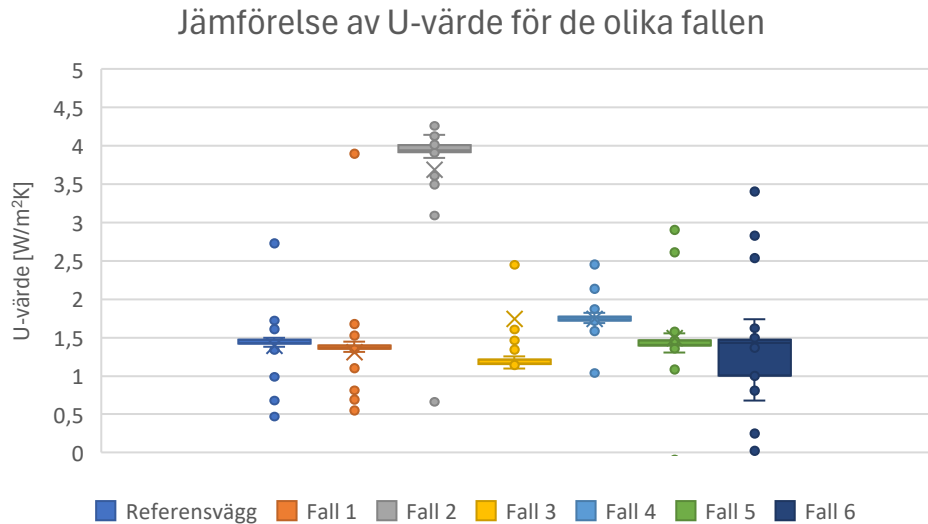
Värmeflödet påverkas också av ändring av fukthalt i väggen, vilket kan ses i Figur 19. En större fukthalt ger ett större flöde än om väggen skulle vara helt torr då värmeledningsförmågan i väggen ökar när porerna fylls med vatten, visas i figur 43 i Bilaga C. Fallen med varierad bredd, fall 3 och 4, visar också en skillnad i värmeflödestäthet. Minskat övergångsmotstånd, fall 5, gav däremot inte någon avsevärd skillnad. Grafer för dessa fall visas i Figur 36 respektive 38 i Bilaga C.

Värmeflödestäthet över ett år vid olika RF i väggen



Figur 19: Värmeflödestäthetens variation över ett år vid fall 1 (RF=0) och fall 2 (RF=100).

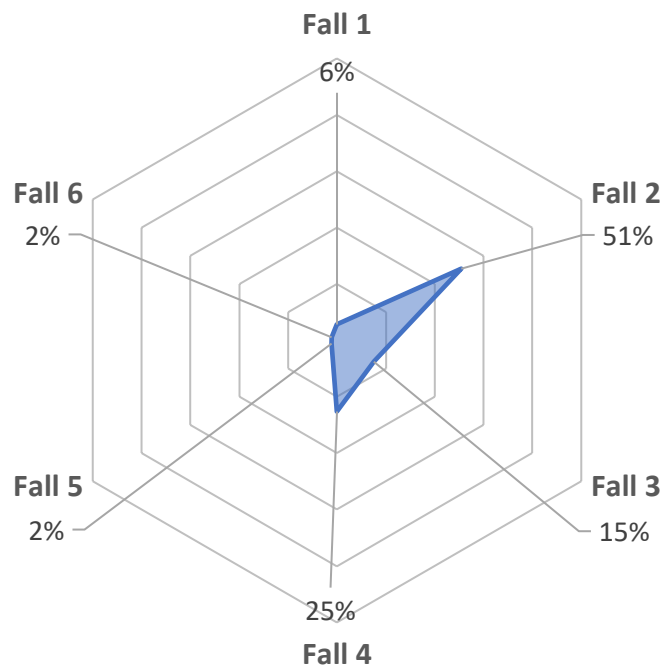
Baserat på temperaturvariationerna och värmeflödestätheten kan U-värdet beräknas för varje fall samt referensväggen. De olika parametrarnas påverkan på U-värdet kan sedan bestämmas genom att jämföra resultaten från de olika fallen med referensväggen, se Figur 20.



Figur 20: Låddiagram som visar U-värdet för referensväggen och de olika fallen.

De olika parametrarna som undersökts i känslighetsanalysen påverkar U-värdesberäkningarna på olika sätt och i olika stor utsträckning. Effekterna har en stor variation under året och har därför delats in i medelpåverkan. Resultatet redovisas i Figur 21.

Parameters påverkan på U-värdeberäkning



Figur 21: Radardiagram som visar de yttre parametrarnas medelpåverkan på U-värdeberäkningar under 2019.

4.3 Diskussion av känslighetsanalys

Den relativa fuktighetens påverkan, som undersöktes i fall 2, visar att en hög fuktighet ökar U-värdet för väggen markant, se Figur 20. Den relativa fuktigheten i väggen ökar exponentiellt och effekten blir som störst när den relativa fuktigheten nått en bit över 99%. Den höga fuktigheten skulle exempelvis kunna inträffa då en läcka uppstår, väggen utsätts då för stora mängder vatten utan att det hinner avdunsta. Det vanligaste tillfället då väggen utsätts för fukt är vid regn, dock kan det inte ge en lika hög fukthalt i väggen eftersom det endast träffar ytskiktet och sedan avdunstar. Därav bör inte regnet resultera i en tillräckligt hög fukthalt i väggen för att ge någon större effekt på U-värdet.

Fall 6 behandlar solstrålning som till skillnad från de andra fallen är en parameter extern från materialet och har därför en försumbar inverkan på U-värdeberäkningarna under majoriteten av året. Under enskilda veckor på sommaren kan solstrålningen bidra till en stor variation av temperaturen på väggens ytskikt under kort tid. På grund av väggens termiska tröghet kommer dessa frekventa fluktuationer inte återspeglas på insidan av väggen, därmed blir temperaturskillnaden mellan utsida och insida periodvis mycket liten. Resultaten av detta blir att förhållandet mellan värmefflöde och temperaturskillnad avviker, därmed störs U-värdeberäkningarna under dessa mätperioder och det beräknade U-värdet får större spridning, vilket kan ses i Figur 20.

Tjockleken på väggen har en tydlig påverkan på U-värdet. Man kan se i Figur 20 att en tunnare vägg ger ett högre U-värde, fall 4, än en tjockare vägg som ger ett lägre U-värde, fall 3, än referensväggen. Skillnaden i U-värde är rimlig då tjockleken påverkar värmemotståndet, vilket ekvation (5) visar. En större tjocklek, d , ger ett större värmemotstånd, R , vilket ger ett mindre värmefflöde enligt ekvation (4). Därför är det viktigt att mäta tjockleken på väggen noga och beakta eventuella ojämnheter på byggnaden som medför varierande tjocklek på väggen.

Vad gäller fall 5 där värmeövergångskoefficienten ändras för att efterlikna vind visar Figur 20 att det inte ger någon större påverkan på U-värdet utan att U-värdet blir i princip samma som för referensväggen. Att ändringen inte ger någon större effekt kan antas vara rimligt med tanke på att skillnaden i övergångsmotstånd blir liten. R_{se} går från 0,04 till 0,001 och därför kan man argumentera för att vind inte har någon större påverkan på U-värdet.

5. Analys av mätdata från testbyggnad

Mätdata är hämtad från den tidigare studie som utförts på byggnad 10 (Johansson, Wahlgren, & Eriksson, 2019). Studien fokuserade på hur superisolerande material (SIM) kunde förbättra U-värdet på en byggnad. Det framkom att ett tillförlitligt U-värde på tegelväggen var komplicerat att ta fram.

5.1 Ingående data

Mätdata från byggnaden hämtades med hjälp av värmeflödesmätare som tejpades upp på insidan av väggen, två referensmätare och två på vardera SIM, vilka hade fästs på väggen (Johansson, Wahlgren, & Eriksson, 2019). Där mätarna sattes upp byggdes ett invändigt rum med måtten 2,1 x 2,6 x 4 m. Rummet höll en konstant temperatur på 23 °C respektive ventilation på 0,5 h⁻¹ luftomsättning. Tidsperioden som data inhämtades från är mellan åren 2019–2021. Mätningar gjordes varannan minut under längre perioder för att kunna se värmeflödets förändring. Perioderna är utav olika längder och utspridda över olika delar av åren.

Under november 2019 började byggnaden, och därmed den vägg där mätningarna skedde, att kläs in i ett väderskydd (P. Johansson, personlig kommunikation, 3 maj, 2024). Väggen där sensorerna satt på kläddes in först och sedan resterande delar av byggnaden vilket färdigställdes i april 2020. Under denna process gick utrustningen som samlade väderdata som hade fästs på byggnaden sönder vilket ger att den lokala temperaturdata enbart sträcker sig fram till 8 januari 2020. Den temperaturdata som samlades in var troligen påverkad av solstrålning. Väggen har en riktning mot sydost.

5.2 Metod för analys av mätdata i fält

Till skillnad från laborationsförsöket, används mätarnas original sensitivitet i analysen av U-värdet enligt Tabell 3. Mätarna registrerar ett värmeflöde i [mV] och måste korrigeras med hänsyn till sensitivitet för att erhålla en värmeflödestäthet i SI-enheten [W/m²]. Värmeflödet kommer i sin tur att divideras med temperaturskillnaden som råder vid det specifika tidsintervallet. Ett U-värde erhålls genom en omskrivning av ekvation (4). För utetemperatur används data som mätts på platsen fram till den 8 januari 2020. Samt temperaturdata och solstrålningsdata hämtat från Svebys klimatfiler för området Mölndal (Sveby, 2022).

Tabell 3: Sensitivitet för sensor 5 och 6, uppsatta på byggnad 10 i Forsåker.

Sensor	Sensitivitet från certifikat [$\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2\text{K})$]
5	62,31
6	61,65

Den momentana temperaturändringens inverkan på U-värdet kommer inte att redovisas då detta inte säger något om isoleringsförmågan utan endast svarar på väggens respons till olika klimatförhållanden. Ett mer tillförlitligt U-värde fås genom att analysera medelvärden för olika tidsintervall för utetemperaturer och värmeflödet. Framräknandet av U-värdet görs med hjälp av ekvation (4) och den mätdata som finns att tillgå. Värmeflödet och den utvändiga temperaturens medelvärde som tas fram är inom samma intervall och framtaget under samma klockslag. För att precisionen i svaret skall vara uppfylld, krävs att den inte avviker mer än $\pm 10\%$ (P. Johansson, personlig kommunikation, 3 maj, 2024).

För den period innan byggnaden täcktes av väderskyddet testas vilken påverkan på precisionen olika parametrar för temperaturen som har framkommit under laborationen och känslighetsanalysen har. Dessa innefattar en tidsförskjutning på 16 timmar innan väggens insida reagerar på temperaturförändringar, vilket framkom under laborationen. Även T-ekv tas hänsyn till genom ekvation (6) för den påverkan solstrålning har på värmeflödet genom väggen vilket även har visats i känslighetsanalysen. För ekvationen sätts absorptansen av rött tegel till 0,7 (Petersson, 2018). På grund av väggens riktning görs ett antagande att väggen inte påverkas av någon solstrålning efter klockan 12 på dagen.

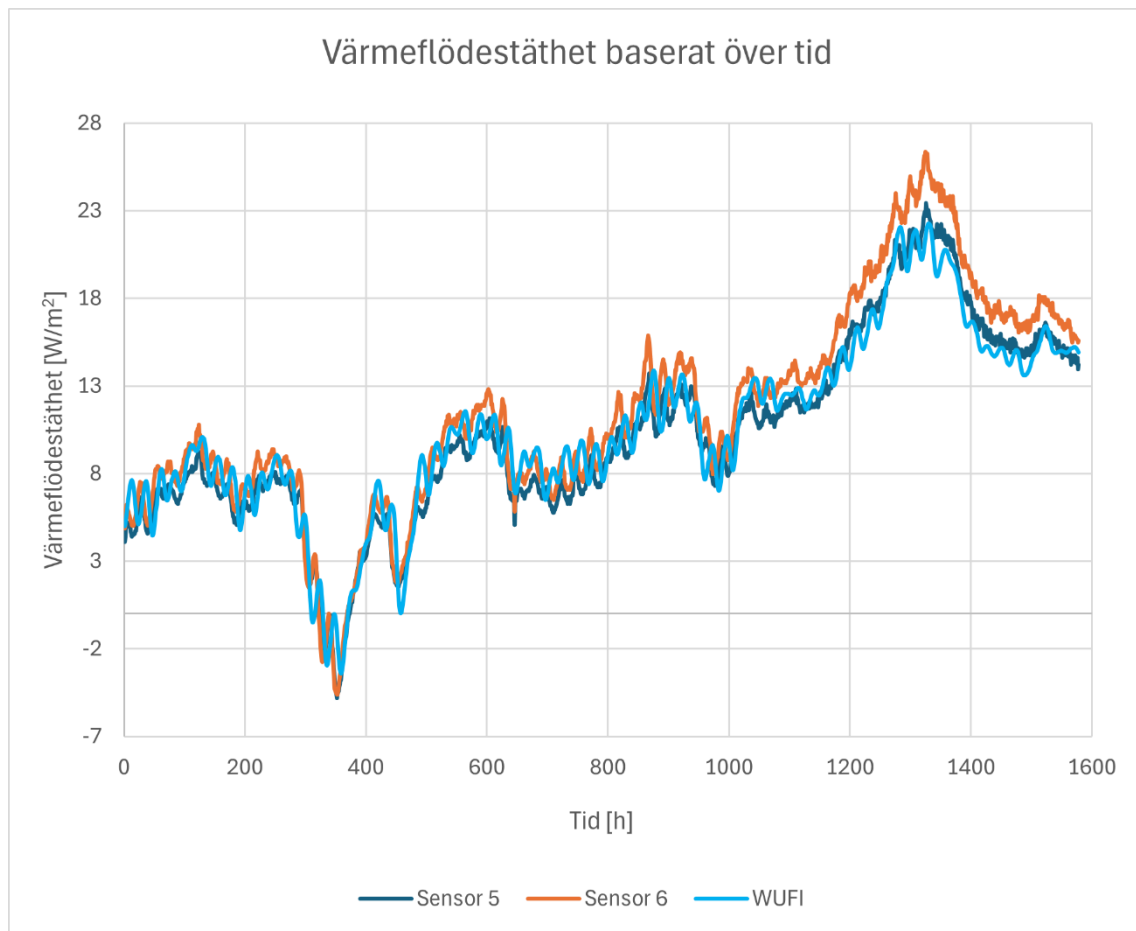
5.3 Resultat

Följande avsnitt behandlar de resultat som fås från analys av mätdata från byggnad 10. Den uppmätta värmeflödestätheten kommer jämföras med värmeflödestäthet simulerad i WUFI. Vidare redogörs för hur väl metoden fungerar i avseende på manipulation av temperaturen samt vilket dygnsmedelvärde som behövs för att få fram ett precist U-värde.

5.3.1 Jämförelse av värmeflödestäthet

Jämförelsen mellan den värmeflödestäthet som sensor 5 och 6 uppmätte under perioden 13 augusti 2019 till den 8 oktober 2019 illustreras i Figur 22 tillsammans med värmeflödestätheten från WUFI där solstrålning tagits i beaktning. Resultaten tyder på att det uppmätta värmeflödet i fält och det simulerade från WUFI redovisar liknande beteenden. Detta indikerar att de valda

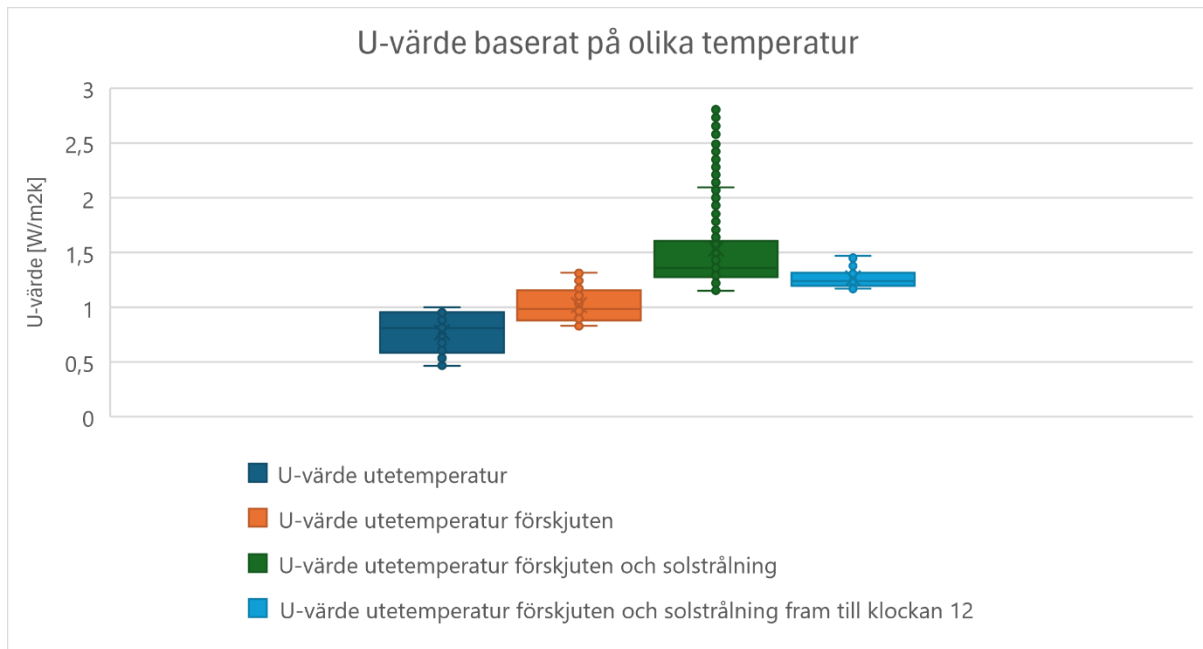
parametrarna i metoden har varit korrekt anpassade för den uttemperaturen som driver värmeflödet.



Figur 22: Värmeledningstäthet baserat över tid under perioden 13 augusti 2019 till den 8 oktober 2019 för sensor 5 och 6 samt den framtagen från WUFI.

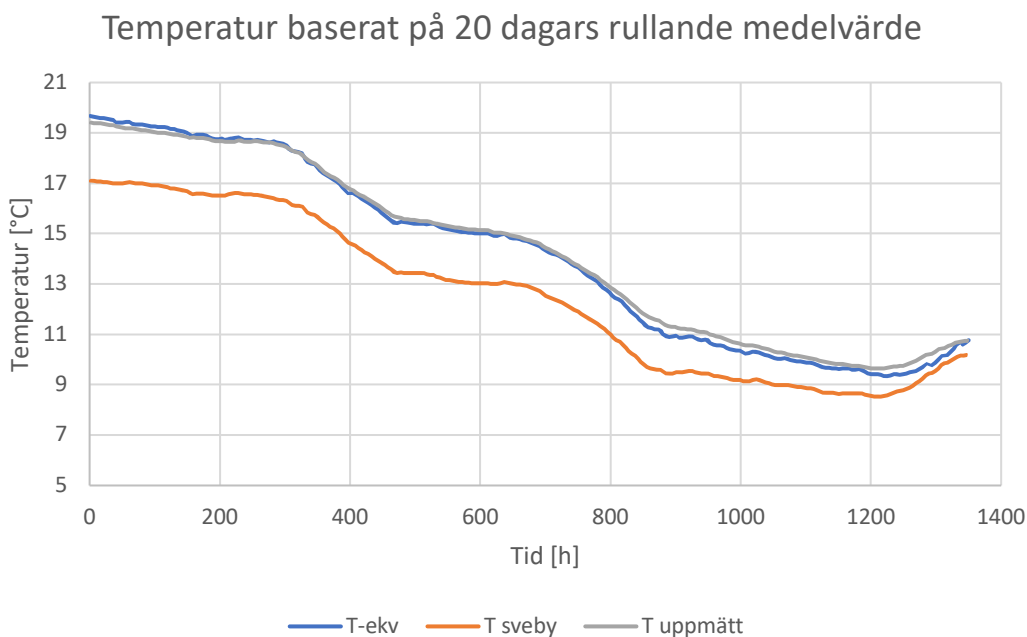
5.3.2 Temperaturvariationer innan väggens täckning

Analysen av dem olika temperaturvariationerna under en mätperiod innan väderskyddet sattes upp, 13 augusti 2019 till den 8 oktober 2019, visar att precisionen blir bättre desto fler parametrar som är med bortsett från full solstrålning vilket kan ses i Figur 23.



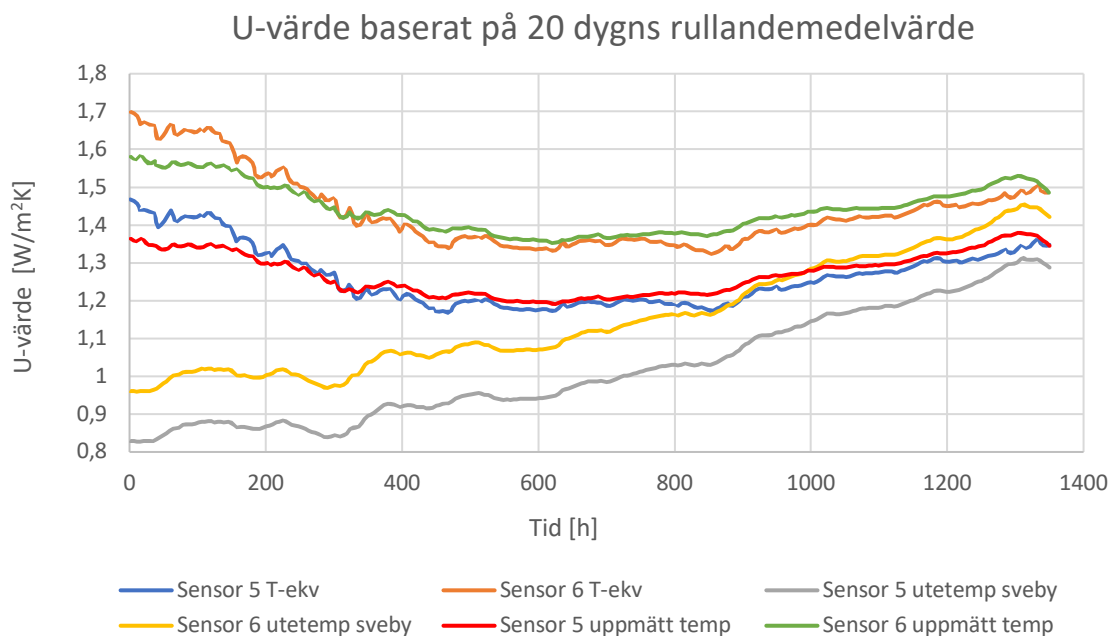
Figur 23: U-värdespridning baserat på olika temperaturvariationer under perioden 13 augusti 2019 till den 8 oktober 2019 baserat på ett rullande 20-dygnsmedelvärde för sensor 5.

U-värdet beräknat med en förskjuten temperatur med solstrålning fram till klockan 12 redovisar minst spridning, dock hamnar U-värdet inte inom ett $\pm 10\%$ intervall runt medianen. Ett jämförande mellan utetemperaturen från Sveby, utetemperaturen som mättes på plats och den temperaturen som har anpassats med hjälp av solstrålning fram till klockan 12 syns i Figur 24. Anpassning som har gjorts för utetemperaturen med hänsyn till solstrålning har visats följa den uppmätta temperaturen på den solutsatta temperaturmätaren.



Figur 24: Utetemperaturen baserat på ett 20 dygns rullande medelvärde under perioden 13 augusti 2019 till den 8 oktober 2019

Ytterligare jämförande mellan framräknade U-värden baserat på de olika temperaturerna från Figur 24 för de båda sensorerna kan ses i Figur 25. En liknande trend och värden syns mellan den temperatur som är uppmätt och den temperatur som har anpassats med solstrålning för de båda sensorerna.



Figur 25: U-värde baserat på olika temperaturer under perioden 13 augusti 2019 till den 8 oktober 2019 baserat på ett rullande 20-dagarsmedelvärde för sensor 5 och sensor 6

Resultatet pekar på att den anpassning som har gjorts av den mätdata från Sveby är ett godtyckligt sätt för att ta fram en korrekt utetemperatur.

5.3.3 Preciserat dygnsmedelvärde

För helårsanalysen används temperaturen mätt på plats därefter enbart utetempraturen, då byggnaden hade täckts in och därmed ej var utsatt av solstrålning. Resultatet för värmeflödet delas upp i grupper om 2-, 10-, 20-, 30- och 40-dygnsmedelvärde. Anledning till denna uppdelning är byggnadens termiska tröghet och resultatet sammanställs i Tabell 4.

Tabell 4: U-värde fluktuation baserat på olika dygnsmedelvärderna för sensor 5 under tidsperioden 9 september 2019 till den 29 oktober 2020. Grön markering visar värden inom +/- 10%.

Dygnsmedelvärde	Högsta U-värde [W/m ² K]	Lägsta U-värde [W/m ² K]	Median U-värde [W/m ² K]	Övre avvikelse	Undre avvikelse
2-dygnsmedelvärde	252,77	-27,87	1,23	20 522%	-104%
10-dygnsmedelvärde	1,90	1,04	1,23	54%	18%
20-dygnsmedelvärde	1,61	1,14	1,23	31%	8%
30-dygnsmedelvärde	1,45	1,15	1,23	18%	7%
40-dygnsmedelvärde	1,34	1,15	1,23	9%	7%

För sensor 5 håller sig medianvärdet konstant under hela perioden oberoende av dygnsmedelvärdet, se Tabell 4. Däremot har 40-dygnsmedelvärdet minst avvikelse ifrån

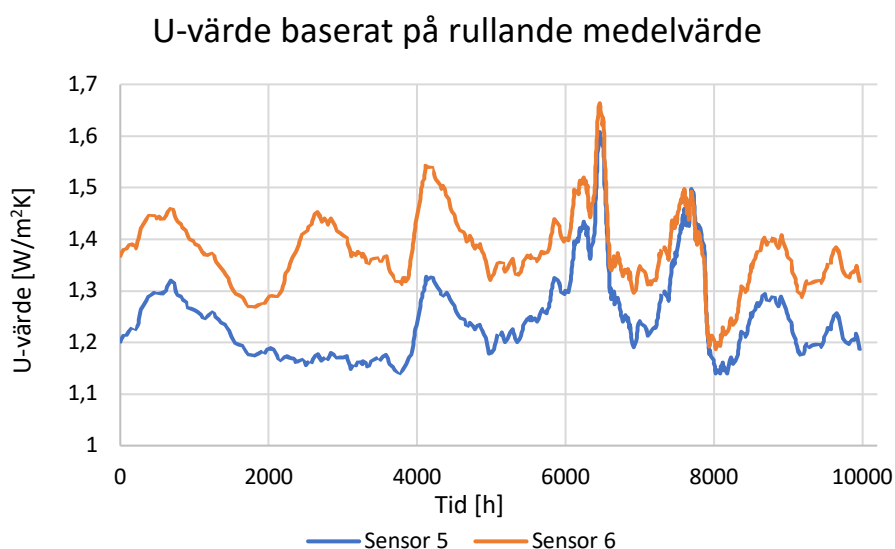
medianen under hela perioden samt att den når en godtagbar avvikelse, vilket inte är större än $\pm 10\%$.

Mätdata från sensor 6 under samma period, med samma temperaturdata, ger ett liknande resultat gällande avvikelsen. Den skiljande parametern mellan de två sensorerna är medianvärdet som visar ett högre värde för sensor 6, men fortsatt konstant enligt Tabell 5. Detta kan bero på ett flertal olika anledningar, exempelvis sensorernas placering på väggen eller att sensitiviteten är inkorrekt.

Tabell 5: U-värde fluktuation baserat på olika dygnsmedelvärden för sensor 6 under tidsperioden 9 september 2019 till den 29 oktober 2020. Grön markering visar värden inom $\pm 10\%$.

Dygnsmedelvärde	Högsta U-värde [W/m ² K]	Lägsta U-värde [W/m ² K]	Median U-värde [W/m ² K]	Övre avvikelse	Undre avvikelse
2-dygnsmedelvärde	559,61	-334,35	1,38	40 551%	-24 287%
10-dygnsmedelvärde	1,96	1,14	1,38	42%	21%
20-dygnsmedelvärde	1,67	1,18	1,39	20%	17%
30-dygnsmedelvärde	1,53	1,21	1,39	15%	10%
40-dygnsmedelvärde	1,48	1,26	1,38	7%	10%

I Figur 26 framgår hur det framräknade U-värdet förändras över tid då ett 20-dygnsmedelvärde gäller. Under perioden 6000–8000 timmar sker de största avvikelserna, vilket är från 16 maj 2020 fram till 7 augusti 2020. Höga U-värden erhålls under sommarperioden vilket uppstår oavsett medelvärdesintervall som studeras.



Figur 26: U-värde baserat på rullande 20-dygnsmedelvärde för sensor 5 och sensor 6 under perioden 9 september 2019 till 29 oktober 2020.

Vid bortseende ifrån värden under försommar till sensommar, i detta fall perioden efter 16 maj 2020, hamnar 20 dagarsmedelvärdet inom avvikelspannet som söks för sensor 5 ($\pm 10\%$) och nästan för sensor 6 vilket visas i Tabell 6.

Tabell 6: U-värde baserat på 20-dygnsmedelvärde för sensor 5 och 6 under vinterhalvåret. Grön markering visar värden inom +/- 10%, gul markering visar värden nära +/- 10%.

Dygnsmedelvärde	Högsta U-värde [W/m ² K]	Lägsta U-värde [W/m ² K]	Median U-värde [W/m ² K]	Övre avvikelse	Undre avvikelse
20-dygnsmedelvärde sensor 5	1,33	1,14	1,23	8%	8%
20-dygnsmedelvärde sensor 6	1,55	1,26	1,39	12%	9%

Med ovanstående resultat erhålls att ett preciserat U-värde kan tas fram med hjälp av ett 20-dagarsmedelvärde om mätningarna sker under vinterhalvåret. Detta är ett effektivare sätt att få fram ett U-värde ur mätningarna i fält än att beakta sommarhalvåret, dock måste hela mätperioden, inklusive sommaren, analyseras för att säkerställa rätt avvikelse.

5.4 Diskussion av analys på mätdata i fält

Analysen har visat att det är möjligt att få fram ett intervall med rimliga U-värden, däremot bör de framtagna U-värdenas tillförlitlighet ifrågasättas. Framst beror det på att mätarna uppvisar två olika värden. Om intervallet däremot är tillförlitligt eller inte bedöms av analysmetoden. Vidare kan en bedömning beträffande om intervallet är det rätta intervallet inte göras. Detta beror på att analysmetoden i sig kan tolkas som en datasammanställning med hjälp av olika långa dygnsmedelvärden. Anledningen till att längden på dygnsmedelvärden varierar i metoden är för att dämpa variationer orsakade av momentana förändringar som byggnaden kan motstå på grund av sin termiska tröghet. Dock baserades dygnsmedelvärdenas intervall på att minska avvikelsen, det vill säga är iterativt framtagna med hänsyn till precisionen. Därför anses metoden ur denna synpunkt vara ogynnsam med hänsyn till tillförlitlighet.

Byggnaden som data inhämtades från genomgick renoveringar under mätperioden, vilket kan påverka resultatet. Bland annat byggdes ett provisoriskt tak över delar av byggnaden på grund av läckage. Detta medför att en uttorkning av väggens vatteninnehåll kan ha skett och därav sänkt U-värdet av väggen. För analysen av olika temperaturer kunde enbart två månader användas innan byggnaden kläddes in, vilket inte talar för om metoden är precis under hela året. Därav kunde inte denna analys undersöka vilken effekt en minskande solstrålning haft på vintern eller ökad effekt på sommaren.

Små temperaturskillnader kan ha en stor påverkan på U-värdet då dessa resulterar i avvikelser vid framtagning av ett precist värde. Temperaturavvikelser mellan uppmätt temperatur och T-ekv kan ses i Figur 24, det resulterade U-värdet och dess ökade avvikelser kan ses i Figur 25. Detta ger upphov till stora osäkerheter vid dygnsmedelvärdes analysen på grund av resterande data har behövts använda sig av en närliggande temperaturstations data. Detta kan medföra att dygnsmedelvärdet sänks om en mer korrekt data används. Ytterligare har inga slutsatser kunnat tas om någon värme fångats in mellan väderskyddet och väggen eller om det släppt igenom någon solstrålning. Detta medför en större osäkerhet för beräkningarna.

6. Diskussion

Att fastställa ett U-värde genom fältmätningar kräver beaktning av en mängd olika variabler som påverkar beräkningarna på olika sätt och i olika utsträckning. Från den mätdata som ligger till grund för detta arbete finns fortfarande flera variabler vars effekt endast kan uppskattas i dagsläget. Till exempel var det känt att referensväggen i Forsåker innehöll mycket fukt under vissa perioder, genom dokumentation av vattenhalten hade dess påverkan på värmeflödet kunna beräknas mer exakt.

Vid mätningarna i fält som utfördes på referensbyggnaden fanns det förmodligen många faktorer som spelade in men som det inte finns exakt data på. Till exempel var det känt att väggen innehöll mycket fukt under vissa perioder, genom dokumentation av vattenhalten hade dess påverkan på värmeflödet kunna beräknas mer exakt.

För både känslighetsanalysen i WUFI och analysen av mätdata från Forsåker går det att se att värmeflödet blir mer stabilt under vinterhalvåret då temperaturen har mindre variation. När temperaturskillnaden är konstant nås ett mer stationärt läge för väggen och därför blir det lättare att beräkna ett tillförlitligt U-värde. Väderförhållandena liknar då mer det stationära förhållandet som undersöktes under laborationen. U-värdet blir alltså mer tillförlitligt om mätningen sker under vinterhalvåret eftersom solstrålningen tidigare har konstaterats öka felmarginalerna i U-värdeberäkningarna under sommaren.

När det gäller värmeflödet har det observerats att en nära överensstämmelse har kunnat uppnås mellan den beräknade värmeflödestätheten med hjälp av WUFI och den som har mätts upp på plats. Detta tyder på att den drivkraft som styr värmeflödet, i form av temperaturskillnader, har beaktats någorlunda korrekt. Vilket ökar tillförlitligheten i beräkningarna där samma parametrar tas i beaktning.

Laborationen visade på en fördröjning mellan det att temperaturen och värmeflödet uppnådde stationärt tillstånd, på cirka 16–17 timmar för tegelväggen. Fördröjningen visar på en tydlig tröghet i konstruktionen och när analysen i kapitel 5 implementerade denna uppnåddes U-värden närmare det teoretiska U-värdet. För isoleringen sammanföll det stationära tillståndet för temperatur och värmeflöde vilket visar på betydelsen av konstruktionens uppbyggnad och värmelagring med avseende på dess värmetröghet. Resultaten från laborationen, tillsammans med analysen av mätdata i fält illustrerade avvikelserna mellan U-värdet från olika sensorer. Denna avvikelse understryker betydelsen av att använda flera sensorer för att möjliggöra jämförelser och säkerställa tillförlitliga mätningar.

Resultaten från kapitel 4 och 5 visar en jämförbarhet mellan de beräknade U-värdena med WUFI och analyserade mätdata från Forsåker. För fall 6 i WUFI observerades ett U-värdesintervall på 1–1,5 W/m²K. Fältanalysen av mätdata från sensor 5 och 6 med 40-dygnsmedelvärde visade ett intervall på 1,15–1,48 W/m²K. Dessa värden är något högre än det teoretiskt beräknade U-värdet för Forsåkerväggen på cirka 1 W/m²K, vilket bland annat kan bero på felkällor i klimatdata eller andra antaganden. Däremot resulterade laborationen i U-värden som låg inom intervallet 0,6–0,77 W/m²K, dessa ligger under det teoretiska U-värdet specifikt för laborationen på ca 0,915 W/m²K. Intervallet bortser här från sensor 1 med original sensitivitet och sensor 2 med korrigerad sensitivitet vilka anses vara avvikande. Detta beror på likt tidigare nämnda felkällor i kapitel 3 likt tätningar och värmespridning genom väggen.

7. Slutsats och framtida studier

Baserat på frågeställningen angående vilka parametrar som har störst inverkan på uppmätning av U-värde kan en mängd slutsatser dras. Känslighetsanalysen visar att solstrålningen är en betydande parameter vid beräkning av U-värdet. Solstrålningen försvårar mätningen då temperaturskillnaderna under framför allt sommarperioden blir väldigt små. Däremot visar det sig att höga mängder fukt och väggens tjocklek hade störst påverkan på U-värdet. Både väggens fukthalt och tjocklek påverkar värmeledningsförmågan. Dessa parametrar bör alltså tas hänsyn till även då U-värdet ska mätas i fält. Parametrarna i fall 1–6 bidrar till effekter som blir svåra att kartlägga genom analys av datainsamling och simuleringsförsök vilket fastställer att vidare empiriskt data behövs. Rapporten tar upp flera parametrar som påverkar beräkningarna av U-värdet. Effekterna av dessa bör beaktas vid fältmätning genom dokumentation och datainsamling. På så sätt skapas de förutsättningar som behövs för att kunna beräkna ett precist värde på väggens isoleringsförmåga.

För att kunna fastställa ett tillförlitligt U-värde för äldre tegelbyggnader kan det konstateras att det är av stor vikt att vid fältmätningar dokumentera intensiteten av parametrarna för att mer precist kunna utvärdera den inverkansgrad de bidrar till. För fältundersökningar bör tre eller fler sensorer, placerade i ett samlat område, användas för att underlätta identifiering av felaktiga och avvikande mätvärden. Undersökningen bör sträcka sig över minst 40 dygn och inkludera temperaturmätare på utsidan av byggnaden. Mätningen skall helst ske på vintern för att ta ut tillförlitligare U-värden.

Nedan listas rekommendationer för framtida studier,

- För laborationer:
 - Utför en laboration för att undersöka testväggens tidsförskjutning
 - Använd fler än två värmeflödessensorer på obelastad sida
 - Öka tjocklek på omgivande isolering och förbättra köldbryggors täthet för att undvika värmespridning genom väggen
 - Använda annan typ av värmekälla, likt värmeslinga.

- Vid mätningar i fält:
 - Likt ovan, använd fler än två mätare för all data
 - Mät lokal temperatur, solstrålning och regnintensitet
 - Kontrollera väggens förhållanden i avseende tjocklek och fukt.

8. Litteraturförteckning

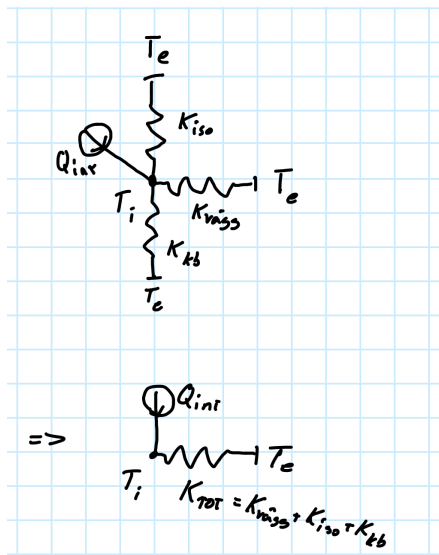
- BFS 2020:4. *Boverkets författningssamling*. Boverket. Hämtat från <https://rinfo.boverket.se/BFS2011-6/pdf/BFS2020-4.pdf>
- Björk, C., Kallstenius, P., & Reppen, L. (2003). *Så byggdes husen 1880 - 2000: arkitektur, konstruktion och material i våra flerbostadshus under 120 år*. Formas.
- Boverket. (den 07 Februari 2024). Hämtat från Boverket.se: <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/termiskt-klimat/>
- Boverket. (den 7 Februari 2024). *Termiskt Klimat*. Hämtat från <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/termiskt-klimat/>
- Burström, P. G. (2021). *Byggnadsmaterial - Tillverkning, egenskaper oh användning*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Cajdert, A., Eriksson, A., Hervall, A., Sjöstrand, O., & Sahlin, S. (1997). *Bärande tegelmurverk: en konstruktionshandbok för beräkning av bärande tegelmurverk*. Stockholm: Mur och puts information (MPI).
- Hagentoft, C.-E., & Sandin, K. (2017). *Byggnadsfysik-så fungerar hus*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Hukseflux. (u.å.). *HFP01 [Produktblad]*. Hämtat från https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/HFP01_v2316.pdf
- Johansson, P., Josefsson, G., & Rajha, M. D. (2018). Energieffektivisering av tegelfasad med kulturhistoriskt värde. Chalmers Tekniska Högskola. Hämtat från <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/eb008973-f97c-48ac-a447-566e2d874b85/content>
- Johansson, P., Wahlgren, P., & Eriksson, P. (2019). Field testing of interior super insulation materials on a brick wall in an industrial building. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).
- Künzel, H. M. (1994). *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung*. Stuttgart Universitet. Fraunhofer IBP. Hämtat från <https://wufi.de/literatur/K%c3%bcnzel%201994%20-%20Verfahren%20zur%20ein-%20und%20zweidimensionalen.pdf>
- Kim, S.-I., Choi, J.-S., Jo, J.-H., Joe, J., Cho, Y.-H., & Kim, E.-J. (2023). Simulation-based comparative analysis of U-value of field measurement methods. *Case Studies in Thermal Engineering*.
- Lindgren, J., & Moeschlin, J. (1985). *Tegel - Tillverkning, konstruktion och gestaltning*. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst.
- Lindholm Restaurering AB. (2015). *FORSÅKEROMRÅDET-Kulturhistorisk beskrivning och byggnadshistorisk inventering*. Göteborg. Hämtat från <https://www.molndal.se/download/18.71b9248f187eaf366ce1be62/1683639634974/Kulturhistorisk%20beskrivning,%20151124.pdf>
- Mölndals Stad. (2023). *Planbeskrivning*. Hämtat från <https://www.molndal.se/download/18.71b9248f187eaf366ce1bd83/1683639445534/Planbeskrivning%20Fors%C3%A5ker%20N%C3%96%20del,%20230502.pdf>
- Petersson, B.-Å. (2018). *Tillämpad byggnadsfysik*. Lund: Studentlitteratur.

- SMHI. (den 4 april 2024). *Ladda ner meteorologiska observationer*. Hämtat från SMHI:
<https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer#param=airtemperatureInstant,stations=core,stationid=72420>
- Sveby. (den 12 Januari 2022). *Klimatdatafiler*. Hämtat från Sveby:
<https://www.sveby.org/okategoriserad/klimatdatafiler-for-2021/>
- WUFI. (den 26 Mars 2012). *Climate data*. Hämtat från wufi-wiki: <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php?title=Details:Climate>
- WUFI. (den 18 Mars 2024). *What is WUFI?* Hämtat från <https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/#content>
- WUFI wiki a. (den 30 Oktober 2008). *WUFI 2D*. Hämtat från https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php?title=2D:Wufi_2D
- Šekularac, N., Ivanović-Šekularac, J., Petrovski, A., & Macut, N. (2020). Restoration of a historic building in order to improve energy efficiency and energy saving-Case study-The dining room within the Žiča monastery property. *Sustainability*, *12*, 6271.
doi:<https://doi.org/10.3390/su12156271>

Bilaga A-Laboration

A.1 Effektbehov

Beräkningar för effektbehovet eller den maximala temperaturdifferensen gjordes enligt följande kretsanalys och ekvation 4, se Figur 27.



Figur 27: Kretsanalys för beräkning av effektbehov, Q_{int} [W]. K [W/K] betecknar konduktansen för isolering, vägg och köldbryggor. T_e och T_i betecknar ytter- och innetemperatur i °C.

Antaganden som gjordes var att luften i tomrummets värmekapacitet försumrades och värmeförluster via köldbryggor antogs till $\psi_{kb} = 0,03$ W/mK. Tegelstenens värmeledningsförmåga antogs till $\lambda_{tegel} = 0,6$ W/mK. Isoleringens värmeledningsförmåga var given enligt produktbeskrivning till $\lambda_{iso} = 0,031$ W/mK. Resultatet av beräkningarna samt vad olika typer av lampor ger för temperaturdifferens kan ses i Tabell 7.

Tabell 7:3 Effektbehov för given temperaturskillnad samt temperaturskillnad vid given lampeffekt.

T_e [°C]	Givet ΔT [°C]	Given effekt [W]	Effektbehov [W]	T_{tomrum} [°C]	ΔT [°C]
20	10	-	7	30	-
20	20	-	14	40	-
20	30	-	21	50	-
20	-	Glödlampa, 60 W	-	105	85
20	-	Halogenlampa, 46 W	-	85	65
20	-	Lågenergilampa, 10 W	-	34	14

A.2 Kontroll av värmeflödessensorer

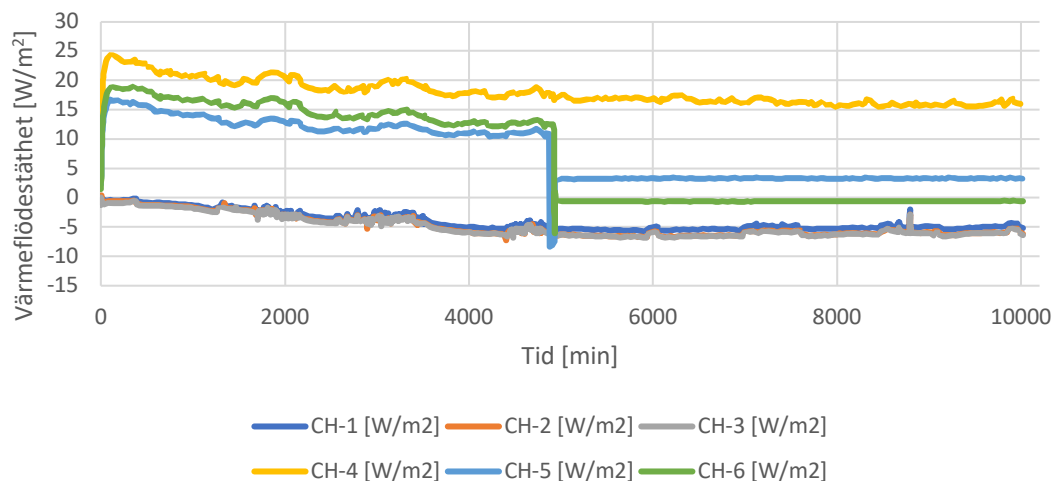
Tabell 8:4 Resultat för kontroll av värmeflödessensorernas sensitivitet och vilken sensitivitet som krävs för att nå det teoretiska U-värdet av isoleringen.

Sensor	Sensitivitet från certifikat [$\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2\text{K})$]	Genomsnittlig spänning [mV]	Värmeflödestäthet, q [W/m^2]	U-värde [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	Sensitivitet för att uppnå $U_{iso,teoretiskt}$ [$\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2\text{K})$]
1	61,65	-0,135	-2,19	0,243	52,29
2	62,59	-0,128	-2,05	0,227	49,58
3	62,31	-0,156	-2,50	0,278	60,42
4	62,21	-0,144	-2,31	0,257	55,77
5	62,36	-0,124	-1,99	0,221	48,03
6	64,02	-0,134	-2,09	0,233	51,90

Den negativa spänningen beror på sensorernas placering gentemot temperaturskillnaden. Det vill säga om värmeflödet går över sensors positiva eller negativa sida. Något vilket korrigeras med korrekt tecken på temperaturskillnaden, ΔT [$^{\circ}\text{C}$].

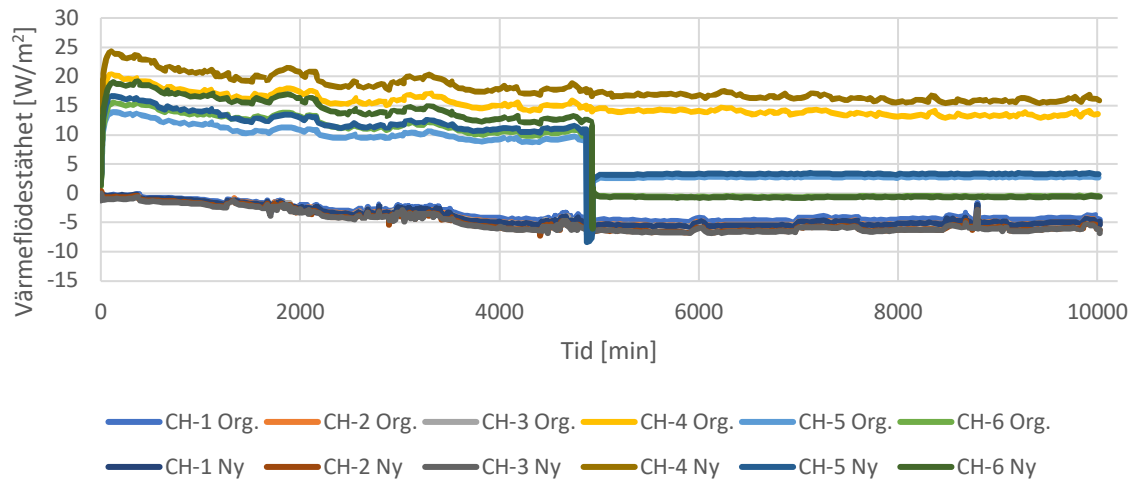
A.3 Resultat tegelvägg

Värmeflödestäthet för ny sens.



Figur 28: Värmeflöde i W/m^2 för korrigerad sensitivitet, där CH-1 till CH-3 visar utsidan och CH-4 till CH-6 visar insidan.

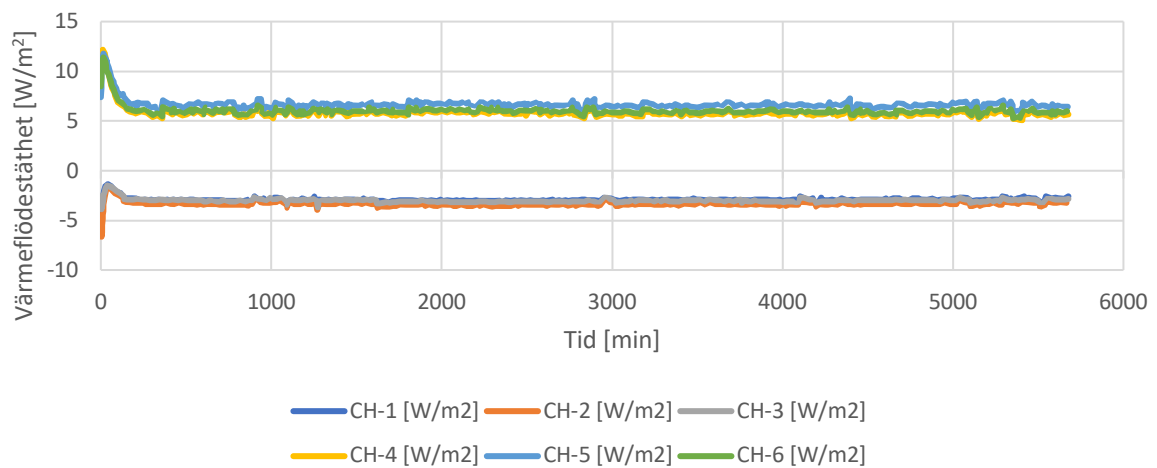
Sammanställd värmeflödestäthet för org. och ny sens



Figur 29: Sammanställd graf för värmeflödet i W/m^2 med både original och ny korrigerad sensitivitet.

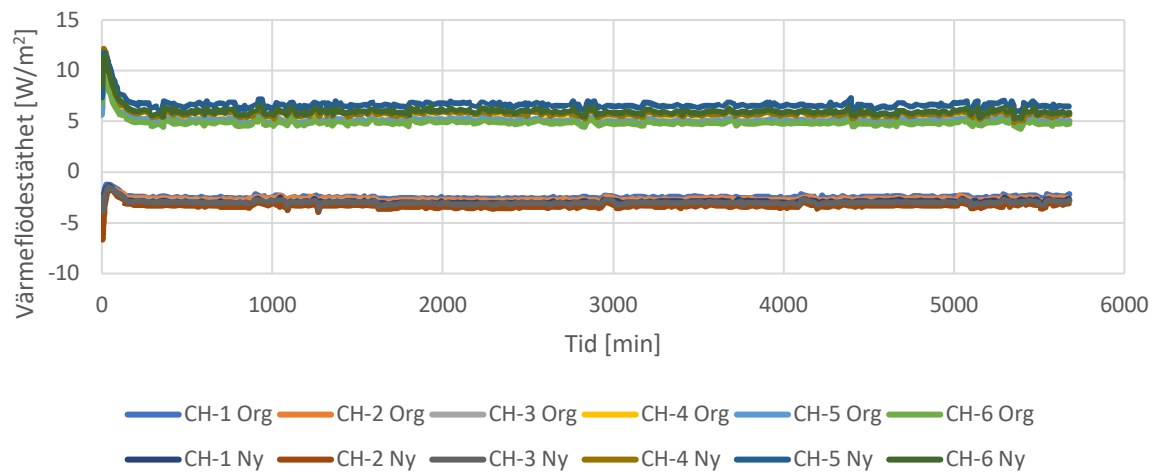
A.4 Resultat isolering

Värmeflödestäthet med ny sens.



Figur 30: Värmeflöde $[W/m^2]$ för ny korrigerad sensitivitet under isoleringslaborationen. CH1-CH-3 visar utsidan och CH-4-CH-6 visar insidan.

Sammanställt värmeflödestäthet för org. och ny sensitivitet



Figur 31: Sammanställt värmeflöde [W/m^2] för både original och ny korrigerad sensitivitet med CH-1-CH-3 på utsidan och CH-4-CH-6 på insidan.

Bilaga B-MATLAB-script för klimatdata

%% Beskrivning

```
% Matlabfilen behandlar datainsamling av väderdata från SMHI och  
% konvertering till en kli-fil för simulering i programmet WUFI-2D
```

%% Uppsättning

```
clc  
close all  
clear all  
warning('off','all')
```

%% Ladda upp datafiler -----

% Temperatur

```
goteborg_temp = readtable('goteborg_temp.csv'); % väderfil, matlab-matris  
save goteborg_temp.mat goteborg_temp           % Spara matris
```

```
filename = 'goteborg_temp.mat'; % Namnge matris  
load(filename) % Ladda in matris
```

% Solstrålning

```
goteborg_sol = readtable('goteborg_sol.csv'); % väderfil matlab-matris  
save goteborg_sol.mat goteborg_sol % Spara matris i matlab-folder
```

```
filename2 = 'goteborg_sol.mat'; % Namnge matris  
load(filename2) % Ladda in matris i workspace
```

% Nederbörd

```
goteborg_regn = readtable('goteborg_regn.csv');  
save goteborg_regn.mat goteborg_regn
```

```
filename3 = 'goteborg_regn.mat';  
load(filename3)
```

% Relativ fuktighet

```
goteborg_fukt = readtable('MoIndal_MoIndal_102242_2019.csv');  
save goteborg_fukt.mat goteborg_fukt
```

```
filename4 = 'goteborg_fukt.mat';  
load(filename4)
```

%% Parametrar, inneklimat -----

```
ampin=0.5;           % Innetemperaturens amplitud  
meanin=23;          % Innemedeltemperaturen
```

%% Parametrar, tid

```
timmar = 1:8751;      % Antal timmar med registrerad data 2019  
t = length(timmar);  % Skapar en tidsvektor  
timestep = linspace(1,t,t)'; % Vektor tidssteg i simuleringen
```

```

nr_week=length(t)/(24*7);          % Antal veckor för simulering

%% Parametrar, uteklimat -----

% Temperatur
T = goteborg_temp(:,3);            % Kolumn med väderdata i fil
t_temp = 230982:239732;           % Intervall för 2019
T_ute = table2array(T(t_temp,1));  % Omvandlar matris till vektor
T_inne = meanin + ampin*...
        sin(2*pi*timestep/24 + 2*pi*18/24); % periodisk innetemperatur

% Solstrålning
P = goteborg_sol(:,3);            % kolumn med väderdata i fil
t_sol = 315578:324337-9;         % Intervall för 2019
P_sol = table2array(P(t_sol,1));  % Omvandlar matris till vektor

% Nederbörd
R = goteborg_regn(:,4);          % Kolumn, väderdata i fil
t_regn = 13851:14215;           % Intervall för 2019
n_regn = table2array(R(t_regn,1)); % matris till vektor
n_regn_ny = zeros(length(t_regn)*24,1); % nederbördsvektor

for i = 1:length(n_regn)
    n_regn_ny(abs(max(i,((i-1)*24))+1):i*24) = n_regn(i)/24; % nederbördsvektor
end

regn = n_regn_ny(1:t).*10;       % Slutgiltig nederbördsvektor

% Relativ fuktighet ute
F = goteborg_fukt(:,8);          % Kolumn med väderdata i fil
t_fukt = 1:8751;                 % Intervall för 2019
RH_ute = table2array(F(t_fukt,1)).*0.01; % Vektor, relativ fuktighet

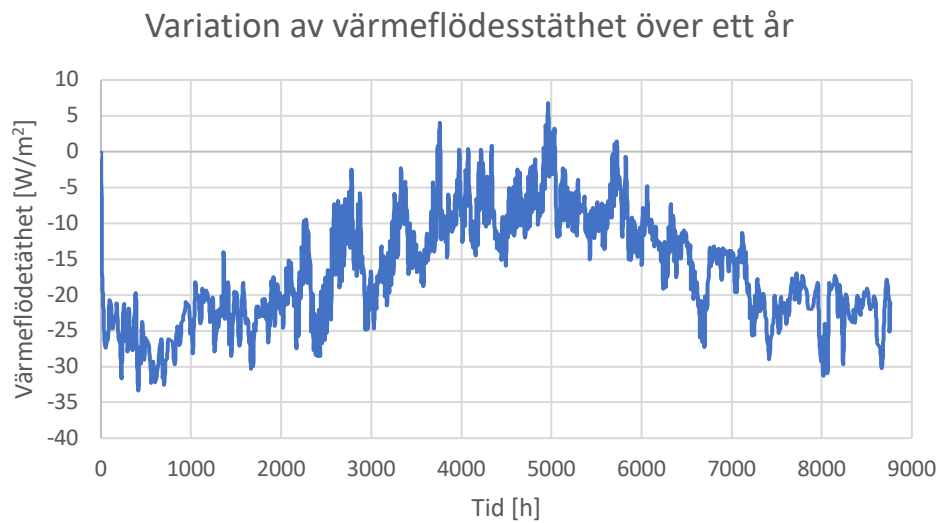
% Relativ fuktighet inne
RH_inne = 0.5*ones(1,t)';       % Konstant relativ fuktighet inne på 5%

%% Skapa kli-fil -----

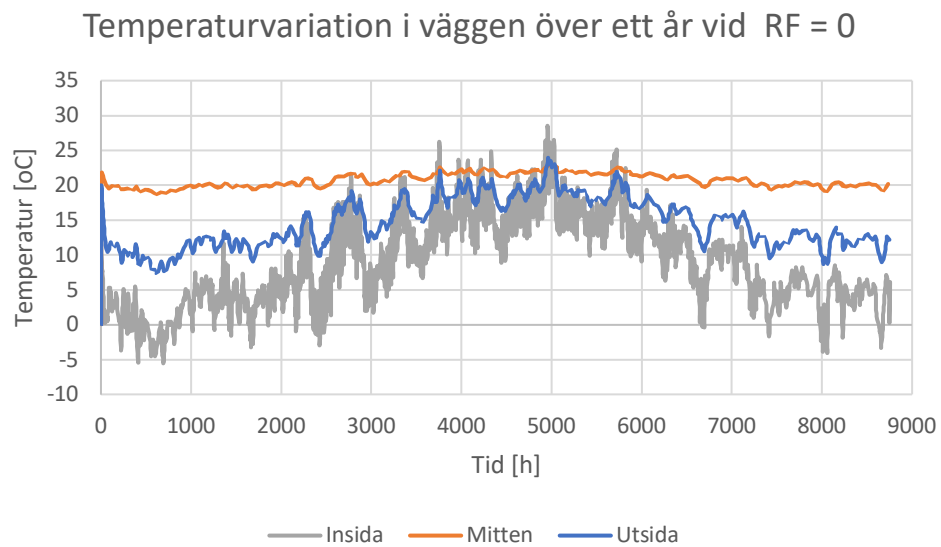
Array = [timestep regn P_sol T_ute RH_ute T_inne RH_inne]; % kolumnvektorer
save('temp_underlag2.csv','Array','-ascii')              % kli-fil

```

Bilaga C- Övriga resultat från känslighetsanalys

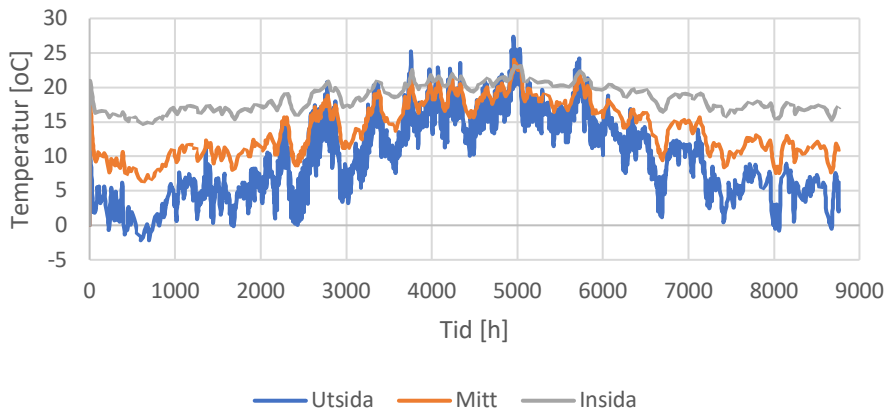


Figur 32: Variation av värmeflödestäthet för referensväggen över ett år.



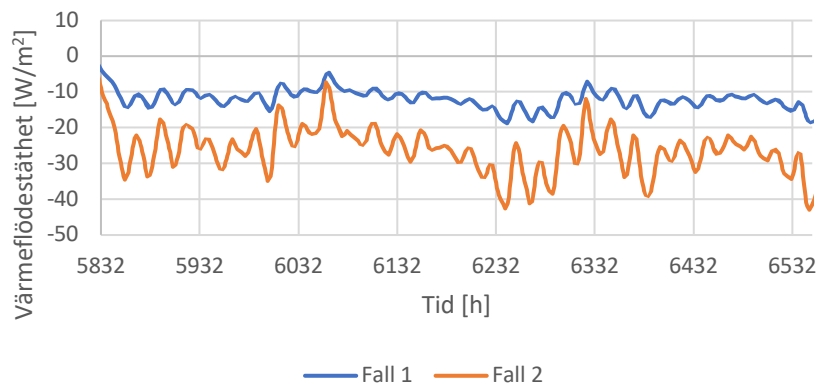
Figur 33: Temperaturvariation i väggen över ett år vid fall 1, då väggen är helt torr (RF=0).

Temperaturvariation i väggen över ett år vid RF=100



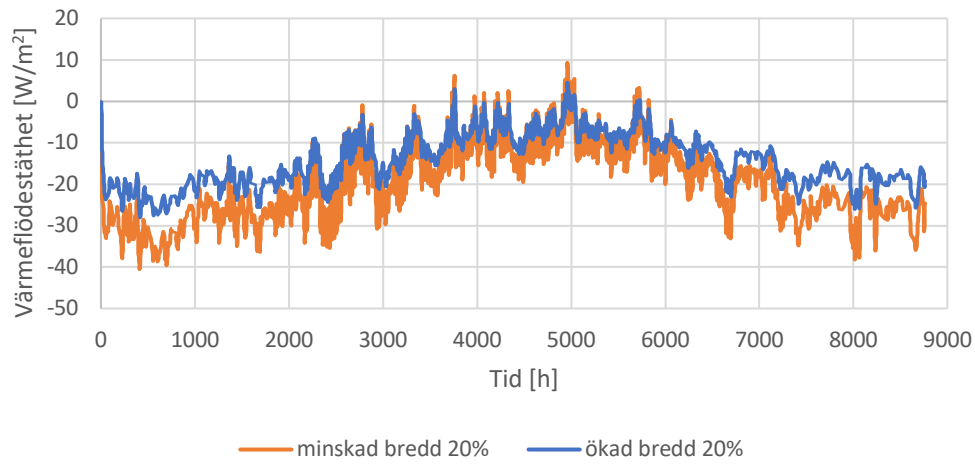
Figur 34: Temperaturvariation i väggen över ett år för fall 2, då väggen är helt blöt (RF=100).

Värmeflödestäthet i september vid olika RF i väggen under september



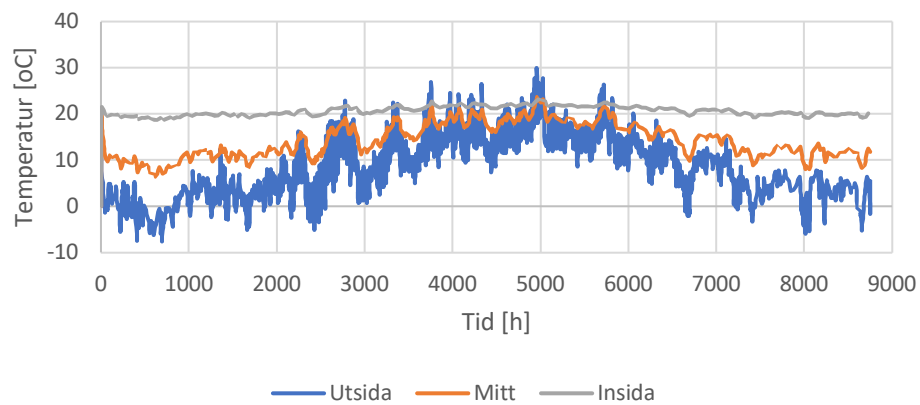
Figur 35: Skillnaden i värmeflödestäthet för fall 1 och 2 (redovisas i tabell 2) under september.

Variation av värmeflödestäthet över ett år vid olika tjocklek



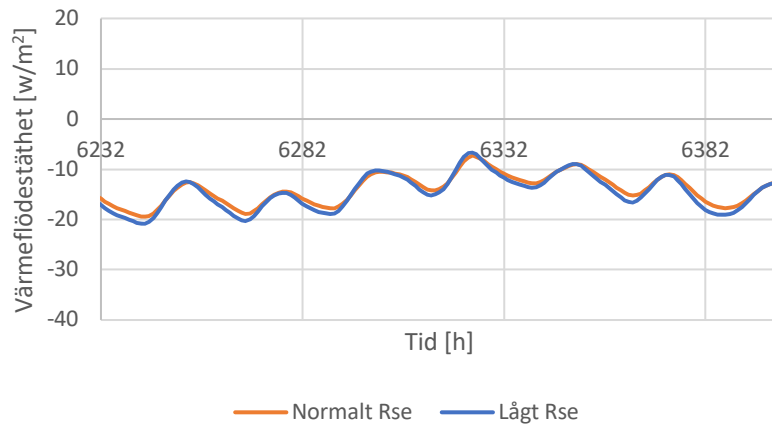
Figur 36: Variation av värmeflödestäthet över ett år vid olika tjocklek (fall 3 och 4 i tabell 2).

Temperaturvariationer över ett år vid lågt värmeövergångsmotstånd



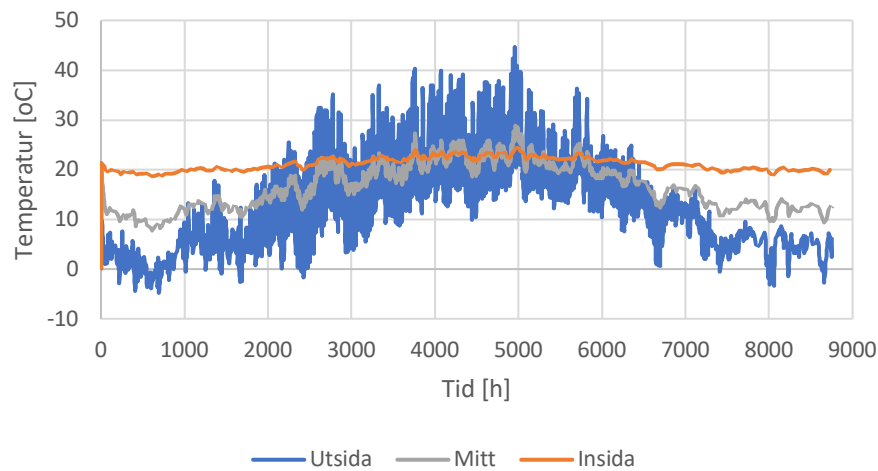
Figur 37: Temperaturvariation över ett år för fall 5, då värmeövergångsmotståndet, R_{se} , är lågt.

Värmeflödestäthet under en vecka i september

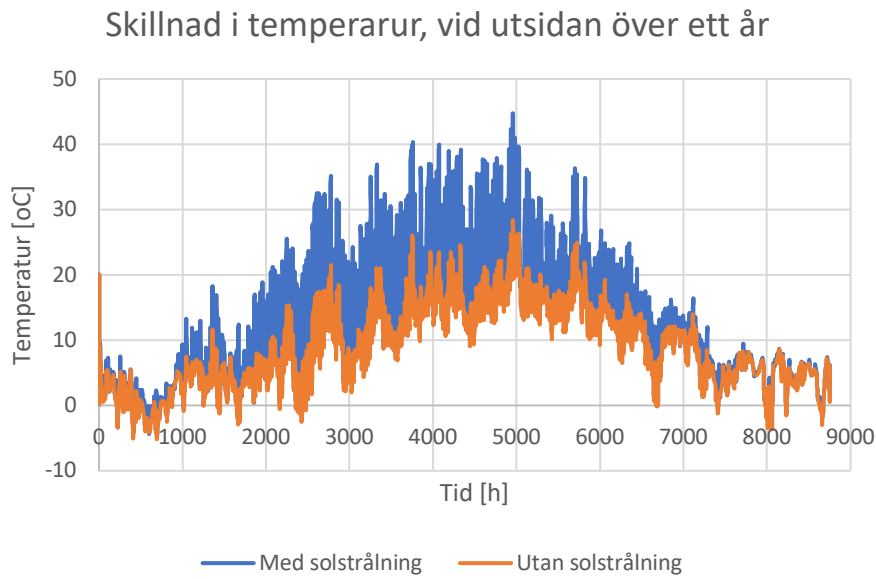


Figur 38: Skillnad i värmeflöde mellan referensväggen och fall 5 (redovisas i tabell 2) under en vecka i september.

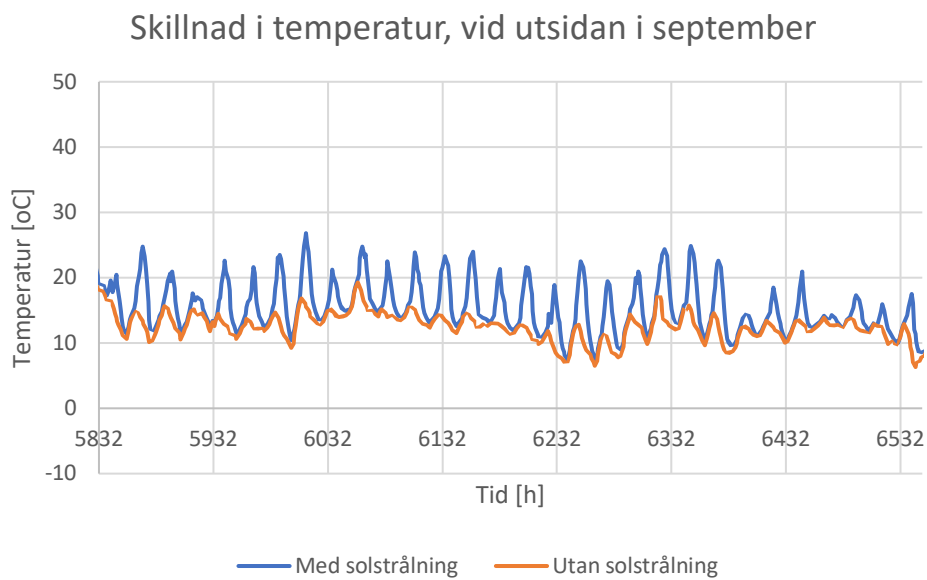
Temperaturvariation i väggen över ett år (med solstrålning)



Figur 39: Temperaturvariationer i väggen över ett år för fall 6, det vill säga då solstrålning beaktas.

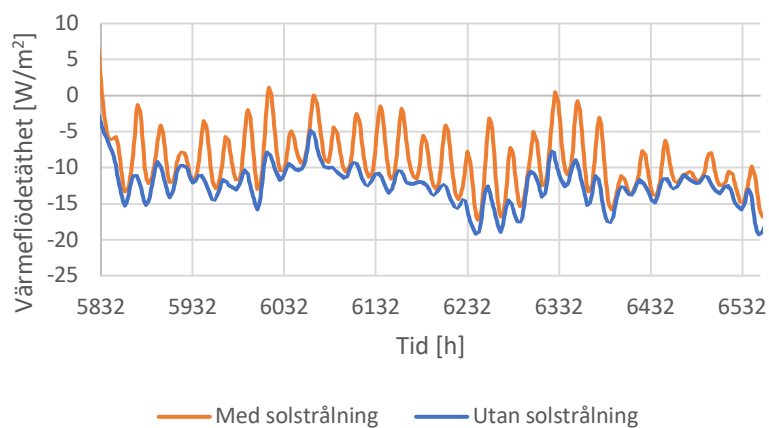


Figur 40: Skillnad i temperaturer vid utsidan av väggen över ett år för referensväggen och fall 6, då solstrålning beaktas.

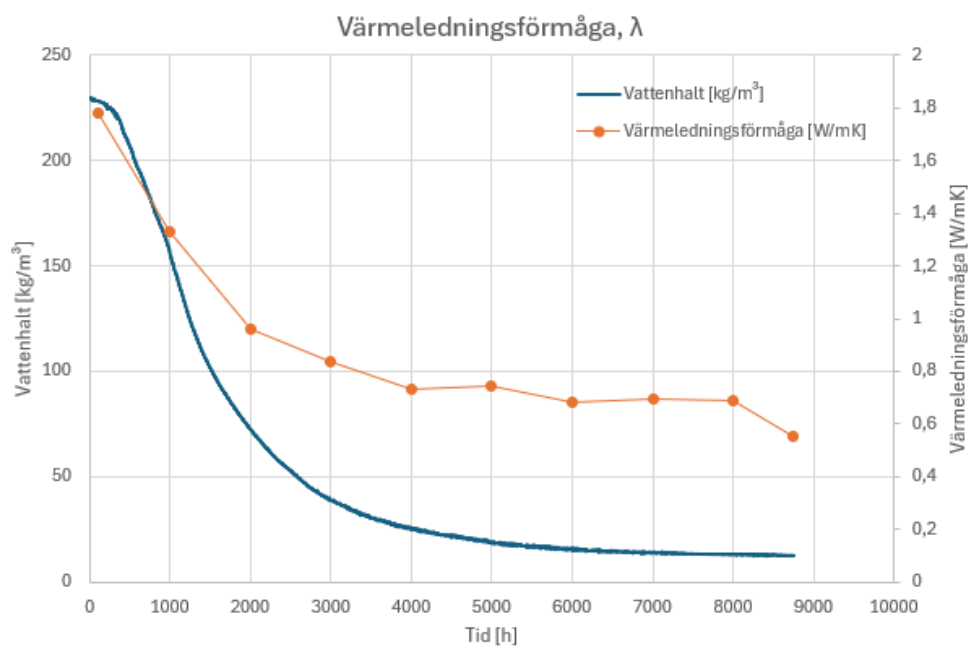


Figur 41: Skillnad i temperaturer vid utsidan i september för referensväggen och fall 6, då solstrålning beaktas.

Solstrålningens påverkan på värmeflödestätheten under september

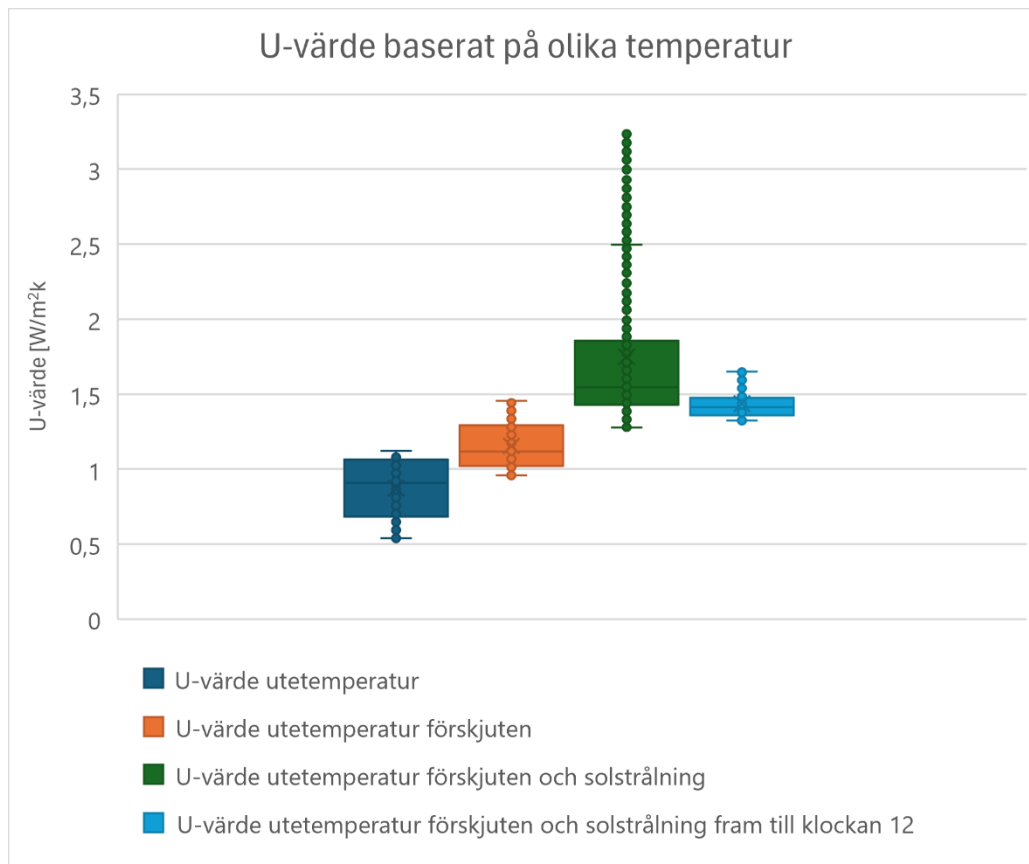


Figur 42: Skillnaden i värmeflödestäthet mellan referensväggen (solstrålning beaktas inte) och fall 6 (solstrålning beaktas) under september.



Figur 43: Sorptionskurva och värmeledningsförmåga för tegelväggen i Forsåker. Sambandet visar hur värmeledningsförmågan förändras med vattenhalten i väggen.

Bilaga D – Övriga resultat från analys av mätdata från Forsåker



Figur 44: U-värdespridning baserat på olika temperaturvariationer under perioden 13 augusti 2019 till den 8 oktober 2019 baserat på ett rullande 20-dygnsmedelvärde för sensor 6.



CHALMERS