



Termisk tröghet hos tunga väggar och dess inverkan på snabba U-värdesmätningar

Fredrik Svensk

Examensarbete
Distribuerade Energisystem
2017

EXAMENSARBETE	
Arcada	
Utbildningsprogram:	Distribuerade Energisystem
Identifikationsnummer:	16650
Författare:	Fredrik Svensk
Arbetets namn:	Termisk tröghet och dess inverkan på snabba U-värdesmätningar
Handledare (Arcada):	Kim Skön
Uppdragsgivare:	Mikael Paronen
<p>Sammandrag:</p> <p>Med de ökade kraven på minskade utsläpp av växthusgaser kommer även byggnadssektorn att påverkas med krav på miljöanpassade lösningar. För att undersöka en fastighets värmerelaterade energiförluster används U-värde. U-värde är ett mått på det värmefflöde som passerar genom väggen från det uppvärmda utrymmet. Brittiska Building Research Establishment har genomfört undersökningar som visar att beräknade U-värden som använder tabellvärden visar felaktiga resultat. På grund av detta finns det ett behov av nya metoder och mätare som kan mäta befintliga byggnader på plats. Arcadas U-värdesmätare mäter över en period av ca 60 min vilket gör de effektiva men känsliga för snabba temperaturförändringar. Det finns redan riktlinjer för tiden det tar för lättare väggkonstruktioner att uppnå termisk balans. Syftet med det här arbetet är att undersöka en byggnad med tung väggkonstruktion och den termiska tröghetens inverkan på mätresultaten. Byggnaden som undersöktes var Minervaskolan i Helsingfors, som har 550 mm tjocka murade tegelväggar. Undersökningen bestod av en förundersökning med IR-kamera och konstruktionsdetektor för att säkerställa att positionen var fri från anomalier. En mätposition per väderstreck valdes för att minska solens påverkan. U-värdena analyserades sedan med hänsyn till väderdata och den medeltemperatur som rått upp till 4 dygn innan mätningen. Analysen var av kvantitativ art och genomfördes för 4 olika mättillfällen då temperaturskillnaden skapade förändringar i U-värdet. Resultaten visade att hastigt förändrade temperaturer inte påverkade mätningen om skillnadernas integral var nära den temperatur som användes i U-värdesberäkningen (fördröjningen låg då mellan 24 och 48 timmar). En långsam men konstant temperaturförändring genererade istället felaktiga resultat (med en temperaturfördröjning på ca 84 timmar). Resultaten kan användas som riktlinjer vid energidiagnoser av byggnader med tunga väggkonstruktioner men fordrar fortsatta undersökningar för att få fastslagna riktlinjer.</p>	
Nyckelord:	U-värde, energi, termisk tröghet, tung väggkonstruktion
Sidantal:	51
Språk:	Svenska
Datum för godkännande:	

DEGREE THESIS	
Arcada	
Degree Programme:	Distribuerade Energisystem
Identification number:	16650
Author:	Fredrik Svensk
Title:	Thermal inertia and its effect on rapid u-value measurements
Supervisor (Arcada):	Kim Skön
Commissioned by:	Mikael Paronen
<p>Abstract:</p> <p>With the increased requirement for reduced greenhouse gas emissions, the building sector will also be affected by the demands for more environmentally friendly solutions. U-value is the measurement that is used as a measurement for the heat flux passing through the wall from the heated space. In order to define the heat-related energy losses of a building U-value is the most commonly used unit. The Building Research Establishment has conducted research showing that the U-value calculated from table values result in incorrect values and that there is a need for new methods and equipment that can measure existing buildings on site. Arcada's U-value meters measure over a period of approximately 60 minutes, making them time efficient but sensitive to rapid temperature changes. There are guidelines for the time a lighter wall needs to be in thermal balance. The purpose of this thesis is to study a building with a heavy wall structure and the impact of thermal inertia on the measured values. The surveyed building was Minervaskolan which has 550mm thick brick walls. The work consisted of a preliminary survey with an IR-camera and a construction detector to ensure that the measurement positions were free from anomalies. One measurement position per point of the compass was chosen to reduce the impact of the solar radiation on the final results. The U-values were analyzed with respect to weather data and the average temperature that stretched back 4 days (96h) before the actual measurement. The analysis was of a quantitative nature and was conducted for 4 different days when the temperature difference resulted in changing U-values. The results revealed that rapidly changing outdoor temperatures did not affect the measurement if the integral of the difference was close to the temperature used in the actual U-value measurement, the temperature delay was between 24 and 48 hours. A slow but consistent temperature change, however, generated results outside the margin of error of 10%, with a temperature delay of approximately 84 hours. The results can be used as new guidelines for energy diagnoses made with Arcada's U-value meters in regards to buildings with heavy wall structures. The findings, however, require further testing to become established guidelines because of the uncontrolled elements of the study.</p>	
Keywords:	U-value, energy, thermal inertia, heavy wall construction
Number of pages:	51
Language:	Swedish
Date of acceptance:	

INNEHÅLL

1	INLEDNING	7
1.1	Syfte och målsättning	8
1.2	Avgränsningar	8
2	BAKGRUND	9
2.1	Värmefflöde	10
2.1.1	<i>Tidskonstant</i>	14
2.2	Metod och material	15
2.3	Mätobjektet – Minervaskolans byggnad	16
2.4	Mätutrustning	17
2.4.1	<i>Arcadas U-värdesmätare</i>	18
2.4.2	<i>Termografi</i>	21
2.4.3	<i>Övrig mätutrustning</i>	21
3	METOD	23
3.1	IR-bilder	24
3.2	Mätarnas placeringar	24
3.3	Temperaturloggare	26
3.4	Väderdata	27
3.5	Dataanalys	28
4	RESULTAT	30
4.1	Uppmätta U-värden	30
4.2	Väderdata	31
4.3	Resultatanalys	32
4.3.1	<i>1 mars</i>	32
4.3.2	<i>6 mars</i>	35
4.3.3	<i>10 mars</i>	37
4.3.4	<i>6 april</i>	39
4.4	Tidskonstant	41
5	DISKUSSION	42
5.1	Förslag på fortsatt forskning	44
	Källor	45
	Bilagor	47

Figurer

Figur 1. Graf över hur uppmätta U-värden korrelerar med beräknade U-värden. [4]	9
Figur 2. Bild visande hur två media med olika temperatur skapar ett värmefflöde som resulterar i termisk jämvikt. [6]	10
Figur 3. Visar hur temperaturen sjunker för varje termiskt motstånd som värmefflödet passerar. [7]	11
Figur 4. Den gamla konstruktionen är identisk med den som ska renoveras då putsen byts ut mot motsvarande som var innan. [11].....	16
Figur 5. Attacheväska med standarduppsättning av mätinstrument. [12].....	17
Figur 6. Fram- respektive baksida av Arcadas U-värdesmätare.....	18
Figur 7. Monterad mätare med två bitar tejp som skydd mot drag.....	19
Figur 8. Mätarnas placeringar. Uppifrån: Korridor, Resursrum, Musikrum, Klassrum.	25
Figur 9. Illustration över den förväntade spridningen av U-värden.	29
Figur 10. U-värdets förändring i förhållande till medeltemperaturen, 25 feb - 1 mar....	33
Figur 12. Medeltemperaturens förändring över tiden, 25 feb – 1 mar.....	34
Figur 13. U-värdets förändring i förhållande till medeltemperatur, 2 mar - 6 mar.	35
Figur 15. Medeltemperaturens förändring över tiden, 2mar – 6 mar.	36
Figur 16. U-värdets förändring i förhållande till medeltemperatur, 6 mar - 10 mar.	37
Figur 18. Medeltemperaturens förändring över tiden, 6 mar – 10 mar.....	38
Figur 19. U-värdets förändring i förhållande till medeltemperatur, 2 apr - 6 apr.	39
Figur 21. Graf över temperaturens förändring över tiden, 2 apr – 6 apr.....	40
Figur 11. U-värdets förändring i förhållande till tidsperioden, 25 feb - 1 mar.	48
Figur 14. U-värdets förändring i förhållande till tidsperioden, 2 mar - 6 mar.	48
Figur 17. U-värdets förändring i förhållande till tidsperioden, 6 mar - 10 mar.	49
Figur 20. U-värdets förändring i förhållande till tidsperioden, 2 mar - 6 mar.	49

Tabeller

Tabell 1. Värden för vindhastighetskorrigering.	20
Tabell 2. Mätarnas nummer, placering och orientering.	26
Tabell 3. De samlade resultaten från U-värdesmätningarna avrundat till närmaste 10-tal och hela minuter.	30
Tabell 4. Medeltemperaturen i 12h-perioder från mättillfället.	31
Tabell 5. Data från 1 mars till 25 februari, mätare #44, Klassrum.	32
Tabell 6. Data från 6 mars till 2 mars, mätare #44, Klassrum.	35
Tabell 7. Data från 10 mars till 6 mars, mätare #44, Klassrum.	37
Tabell 8. Data från 6 april - 2 april, mätare #44, Klassrum.	39

FÖRORD

Det här arbetet är en del i Arcadas arbete med de egenutvecklade U-värdesmätarna och är efterfrågat av prefekt Mikael Paronen. Arbetet som sådant har haft ett genomgående holistiskt perspektiv, från teori till resultat och har givit mig en inblick i processen att testa och utveckla ny utrustning.

Jag vill tacka min handledare, Kim Skön, för de mycket givande diskussionerna om ekvationslösningar och resultatanalyser. De stunderna när jag inte kom framåt var de diskussionerna det som behövdes för att få processen på rätsida igen. Jag vill även tacka Rene Herman för sitt stöd gällande beräkningar av tidskonstanten.

Jag skulle också vilja ge ett tack till Harri Anukka och Jonny Karlsson för stödet gällande metoden att hämta väderdata från FMIs databaser. Samt personalen på Minervaskolan för deras hjälp och möjligheten att använda deras byggnad till det här arbetet.

Slutligen vill jag tacka Tony Jensen, vars insikt i akademiskt skrivande har hjälpt mig att få arbetet att bli presentabelt.

Helsingfors 31.4.2017

Fredrik Svensk

1 INLEDNING

Vi lever i en värld där vår livsstil riskerar att skapa en oåterkallelig klimatförändring om inga åtgärder tas. Enligt rapporten *Our Changing Climate* [1] skulle det krävas att alla, av människor orsakade, utsläpp av växthusgaser minskas med 75% fram tills år 2050 och att ett negativt nettoutsläpp är nått vid år 2100 om de nuvarande målen ska hållas (global temperaturökning som inte får överstiga 2°C) [2]. Europeiska Unionen har vid flera tillfällen arbetat fram handlingsplaner för att medlemsländerna ska kunna hålla dessa krav. Ett av dem är styrningar för hur byggnaders energiprestanda ska förbättras. Målsättningarna inom EU är att från och med år 2021 ska alla nya byggnader planeras till att de är näranollenergihus [3].

Även om nybyggnationer som är konstruerade som näranollenergihus finns det alltid byggnader som måste genomgå renoveringar. Dessa renovationer måste även de genomföras med en lägre energiförbrukning som målsättning. Dessa två situationer, nya byggnader och renoverade byggnader, förutsätter också att det finns teknik och metoder som möjliggör kvalitetssäkringar samt att de entreprenörer som genomför renoveringarna använder sig av faktiska och reella värden. Den mest vedertagna storheten för att mäta ett byggnadselements energiprestanda är U-värdet, som innebär värmeflöde som passerar per ytenhet och grad. Tidigare och nuvarande metoder för att uppskatta U-värdet har baserat sig på tabellvärden, oftast tagna från byggnadselementets tillverkares specifikationer. Det betyder att om U-värdet ska kunna beräknas på redan befintliga konstruktioner måste man veta konstruktionsmaterialet, samt att de av tillverkaren givna U-värdet är tillförlitligt. Med en U-värdesmätare som mäter på plats fås istället ett mer tillförlitligt värde då det är baserat på uppmätta termiska egenskaper.

På grund av behovet för nya tillförlitliga mätare har Arcada utvecklat en ny typ av U-värdesmätare. Mätaren har i tidigare tester visat sig ge tillförlitliga resultat vid mätningar på väggkonstruktioner med låg densitet och termisk kapacitet. Vid den typen av mätningar finns det rekommendationer för hur mycket temperaturen får förändras inom en viss tid innan mätningen. Det finns ett funktionsområde som det genomförts tester på men där den termiska trögheten inte har beaktats; tunga väggkonstruktioner.

1.1 Syfte och målsättning

Arcadas mätare mäter över en kort tidsperiod vilket gör att dessa mätare fordrar att mätobjektet är i termisk balans när mätningen påbörjas. Mätarna har testats i byggnader som har lätta och medeltunga väggar och har för de konstruktionstyperna riktlinjer för hur mycket utetemperaturen får förändras innan mätningen för att kunna få ett tillförlitligt mätvärde. För tunga konstruktioner finns än så länge inga motsvarande riktlinjer och det betyder att det finns ett behov av att undersöka mätarnas pålitlighet vid mätningar på tunga väggkonstruktioner. Från uppdragsgivaren finns även önskemål om att undersökningen även ska innefatta tidskonstanten. Begreppet tidskonstant är det som berättar hur snabbt en byggnad påverkas av en varierande utetemperatur. På vilket sätt tidskonstanten påverkar mätningarna. Alternativt om tidskonstanten går att härledas från mätresultaten från U-värdesmätningarna och aktuella väderdata. Denna aspekt undersöks också i samband med dataanalysen.

Målsättningen med studien är således att:

- Undersöka den termiska tröghetens inverkan på snabba U-värdesmätningar hos tunga väggkonstruktioner.
- Undersöka möjligheten att härleda byggnadens tidskonstant med hjälp av data från undersökningen.

1.2 Avgränsningar

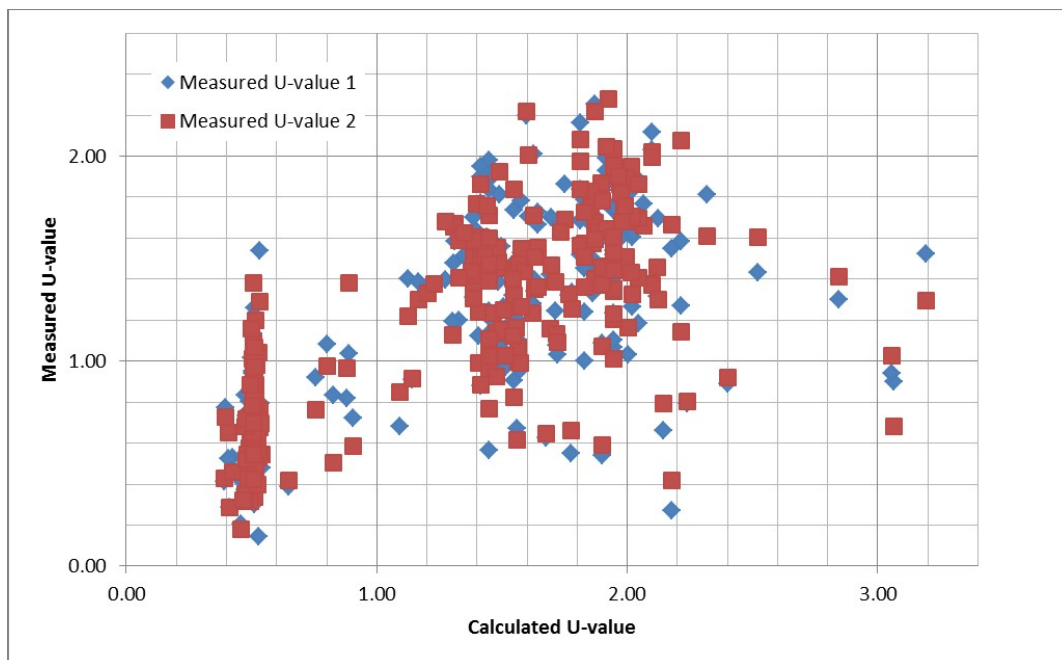
Arbetet omfattar inte en matematiskt uppbyggd modell för beräkningarna. På grund av tidsbegränsningen genomförs inte heller mätningar i kontrollerad (laboratorie-) miljö.

I undersökningen används väderdata, vädret är en dynamisk process som fordrar en dynamisk analys. Skapandet av en sådan dynamisk algoritm ryms inte inom den tidsram som finns tillgänglig för ett slutarbete, därför används istället medeltemperaturer för de beräkningar som genomförs.

Samtliga ekvationer är härledda för mätningar på icke-transparenta väggar, vid mätningar på fönster och andra transparenta byggnadselement måste även solstrålningen tas i beaktande.

2 BAKGRUND

I takt med att energiförbrukningen blir en allt mer aktuell fråga ökar även behovet av korrekta och trovärdiga diagnosmetoder och tillhörande utrustning. En undersökning genomförd av *Building Research Establishment* (BRE) visade att de beräknade U-värdena hade en låg korrelation gentemot de kontrollerade testerna av det faktiska U-värdet [4]. I figur 1 visar BRES undersökning korrelationen mellan de uppmätta värdena och de som är uträknade med hjälp av tabellvärden. Detta belyser behovet av tillförlitliga mätmetoder. Arcada utvecklade en ny prototyp av U-värdesmätare för att fylla det behovet med både tillförlitliga och ekonomiskt fördelaktiga mätare. Detta är ekonomiskt fördelaktigt då mätningarna går snabbare att genomföra, arbetstiden en konsult behöver lägga ner på mätningarna är därmed lägre, och fler mätningar kan genomföras med ett mindre antal mätare. Mätningarna som genomförs på plats, på en redan existerande konstruktion kallas för *in situ*-mätningar [5].

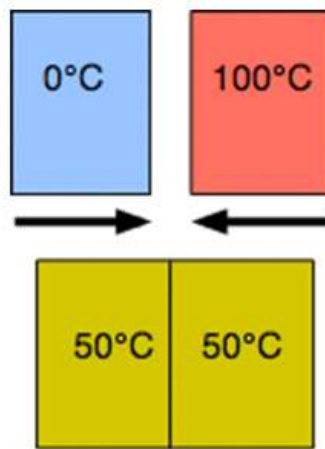


Figur 1. Graf över hur uppmätta U-värden korrelerar med beräknade U-värden. [4]

För att förstå sambandet hur in-situmätningar blir påverkade av ett omväxlande väder beskrivs mätutrustningens funktioner samt de fysikaliska formlerna för värmeflödet genom en vägg i detta kapitel.

2.1 Värmeflöde

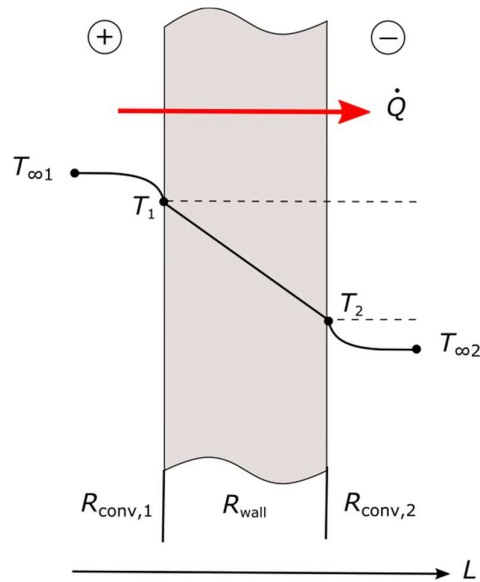
Värmeflöde är mängden energi som passerar genom en yta per tidsenhet. Värmeflödesdensitet är däremot energin per area. Värmeflödet betecknas med storheten \dot{Q} och SI-enheten är W. I ett naturligt system överförs alltid värmeenergi från den varmare källan till den kallare tills systemet har uppnått en *termisk jämvikt*. Vid ett jämviktstillstånd existerar inte längre något värmeflöde då de båda källorna har nått samma temperatur. Detta kan illustreras som i figur 1 med en abstraktion av två källor i ett system.



Figur 2. Bild visande hur två media med olika temperatur skapar ett värmeflöde som resulterar i termisk jämvikt. [6]

Detta skiljer sig däremot från begreppet *termisk balans*, som istället innebär att ett system har ett värmeflöde men där derivatan av temperaturförändringen är noll. Det vill säga, att förändringen i temperaturer (och således även värmeflödet) är lika med noll. Det innebär att det existerar ett värmeflöde som är lika stort genom hela väggen. I de följande härledningarna är en förutsättning att systemet är i termisk balans, det vill säga att värmeflödet i varje given punkt i systemet är lika stort. En vägg kan förenklat ses som en serie av termiska resistanser där (i likhet med likspänning) temperaturen faller i direkt proportion till motståndets storlek. Motstånden i figur 3 visar en serie med:

$$R_{conc,1} + R_{wall} + R_{conv,2}$$



Figur 3. Visar hur temperaturen sjunker för varje termiskt motstånd som värmeflödet passerar. [7]

Det termiska motståndet för $R_{\text{conv},1}$ och $R_{\text{conv},2}$ kan i byggnadstekniska situationer uppskattas enligt ISO 9869 [5] till $R_{\text{conv},1} = 0,13$ och $R_{\text{conv},2} = 0,04$. Konvektionen mellan väggens yttersida och utomhusluften är baserad på att vindhastigheten ligger mellan 4 och 5 [m/s]. Om vindhastigheten över- eller underskrider de värdena måste de kompenseras i de slutliga beräkningarna som beskrivs närmare i kapitel 2.4.1 *Arcadas U-värdesmätare*.

Det termiska motståndet för konduktans har två olika storheter. Den ena förklaras av Cengel [8] och den andra av Petersson [9]:

$$R_{\text{konduktans,Cengel}} = \frac{L}{k A} \quad (1)$$

L = väggens djup [m]

k = värmeledningsförmåga [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]

A = arean av den specifika ytan [m^2]

R = termiskt motstånd [$^\circ\text{C}/\text{W}$]

$$R_{konduktans, Petersson} = \frac{d}{\lambda} \quad (2)$$

d = väggens djup [m]

λ = värmeledningsförmåga [W/m°C]

R = termisk isolering [m²°C / W]

Skillnaden är viktig då R_{conv} används i följande härledningar för att räkna ut U-värdet.

Cengel definierar U-värde på följande sätt:

$$U = \frac{1}{A R_{tot}} \quad (3)$$

Medan Peterssons definition är:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (4)$$

Skillnaden är relevant om beräkningarna använder ledningsförmåga som en faktor. Om den termiska resistansen redan finns som ett färdigt beräknat värde fungerar båda uträkningarna. I det fallet måste sedan den totala arean för det studerade området läggas till som en faktor i den slutliga formeln för att få det totala värmeflödet för ytan. Värmeflödet i figur 3 visar även att det är ett endimensionellt värmeflöde. Det betyder att om systemet befinner sig i termisk balans gäller detta tillstånd:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{till\ väggen} = \dot{Q}_{genom\ väggen} = \dot{Q}_{från\ väggen}$$

Den generella funktionen för \dot{Q} är:

$$\dot{Q} = \frac{A \Delta T}{R} \quad (5)$$

Om den generella funktionen sätts in i det linjära förhållandet fås:

$$\dot{Q} = \frac{A (T_{\infty 1} - T_1)}{R_{conv,1}} = \frac{A (T_1 - T_2)}{R_{wall}} = \frac{A (T_2 - T_{\infty 2})}{R_{conv,2}} \quad (6)$$

Detta innebär att värmeflödet genom en vägg kan beräknas genom att enbart beräkna värmeflödet genom en del. Om exempelvis rumstemperaturen, innerväggstemperaturen och det inre överföringsmotståndet är känt kan \dot{Q} fås med ovanstående ekvation om den skrivs som följande:

$$\dot{Q} = \frac{A \Delta T_{1-\infty 2}}{R_{wall} + R_{conv,2}} \quad (7)$$

I ekvation (7) används temperaturskillnaden mellan innerväggens temperatur utomhusluftens temperatur och det är därför enbart de termiska motstånden för väggen och för konvektionen mellan uteluft och vägg används i nämnaren. I den formeln ingår inte arean, utan den måste läggas till i efterhand.

U-värdet är definierat som ett mått på hur mycket effekt som passerar genom ett material vid en given temperaturskillnad och area och det har enheten $[W/m^2K]$. Den generella formeln som används för att bestämma värmeflödet med hjälp av U-värdet ses i formel (8), och med dess respektive enheter.

$$\dot{Q} = U A \Delta T \quad (8)$$

$$\dot{Q} = \text{värmefflöde [W]}$$

$$U = \text{U-värde [W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C]}$$

$$A = \text{väggens specifika area [m}^2\text{]}$$

$$\Delta T = \text{temperaturskillnad [}^\circ\text{C]}$$

Med Peterssons definition fås att U är lika med inversen av det totala termiska motståndet. Arcadas mätare använder innerväggens yttemperatur som referens under mätningen. Det innebär att den mäter från T_1 i figur 3 till $T_{\infty 2}$. På grund av det måste $T_{\infty 1}$ och $R_{conv,1}$ negligeras i härledningen. Ekvation (9) till (12) härleds sambandet mellan de resultat som fås från U-värdemätarens och hur den används i den slutliga beräkningen av U-värdet. Med hänsyn till att mätaren använder väggytans temperatur måste härledningen således innefatta temperaturförändringen från T_1 till $T_{\infty 2}$ och den termiska resistans som finns mellan de två temperaturerna. Den termiska resistansen kan således härledas som i formel (9):

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{conv,1} + R_{wall} + R_{conv,2}} \quad (9)$$

Med hjälp av formel (7) kan R_{wall} brytas ut till följande form:

$$R_{wall} = \frac{A \Delta T_{1-\infty}}{\dot{Q}} - R_{conv,2} \quad (10)$$

Genom att ersätta R_{wall} i formel (9) får vi följande:

$$U = \frac{1}{R_{conv,1} + \left(\frac{A_{mätare} \Delta T_{1-\infty 2}}{\dot{Q}} - R_{conv,2} \right) + R_{conv,2}} \quad (11)$$

Det är tre steg att ta i beaktande nu innan ett korrekt U-värde kan beräknas. Det första är att $R_{conv,2}$ tar ut varandra i den här situationen. Det andra är att Arcadas mätare mäter \dot{Q} över en definierad yta, 10cm^2 ($0,01\text{m}^2$) [10]. Det tredje är att korrigera för vindhastigheten. Detta innebär att den slutliga formeln ser ut som följande:

$$U = \frac{1}{R_{conv,1} + \left(\frac{A_{mätare} \Delta T_{1-\infty 2}}{\dot{Q}} \right) + R_{korrigering,vind}} \quad (12)$$

Den ekvation som används för Arcadas mätare beskrivs i sin slutgiltiga form i kapitel 2.4.1 *Arcadas U-värdesmätare*.

2.1.1 Tidskonstant

Tidskonstanten är ett mått på hur snabbt en byggnad reagerar på utomhusluftens temperaturförändringar och anges i timmar med beteckningen τ . Tidskonstanten definieras som förhållandet mellan en konstruktions tillgängliga termiska massa och de samlade värmeförlusterna [9] vilket kan visas med formeln:

$$\tau = \frac{\sum c m}{\sum(U_i A_i) + Q_{ventilation}} * \frac{1}{3600} \quad (13)$$

c = den specifika värmekapaciteten [J/kgK]

m = massan (innanför isolering) [kg]

U_i = U-värdet för varje specifikt byggnadselement [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$]

A_i = Arean för varje specifikt byggnadselement [m^2]

Q = Summan av värmeförlusterna genom ventilationen [W]

Där m är massan [kg] och c är den specifika värmekapaciteten [J/kgK] för varje byggnadselement. Nämnaren består av summan av alla transmissionsförluster samt värmeeffekt-förlusterna orsakade av ventilationen. Svaret fås i sekunder och divideras således med 3600 för att få tidskonstanten i timmar.

2.2 Metod och material

Mätmetodiken innefattar i huvudsak 3 olika steg för att genomföra en fullständig mätning. Det första är en förundersökning av mätpunkterna. Det andra är U-värdesmätningarna och det sista steget är dataanalys. Innan något av detta kan påbörjas måste dock den teoretiska bakgrunden härledas för att mätarnas resultat ska kunna användas på ett korrekt sätt. Detta på grund av att mätarna inte mäter från inomhustemperaturen utan istället från innerväggens temperatur till utomhustemperaturen. Mätvärdena innefattar således de termiska motstånden genom väggen (värmeeledning) och ytterväggens konvektion mot uteluften medan konvektionen mellan inomhustemperatur och vägg måste korrigeras.

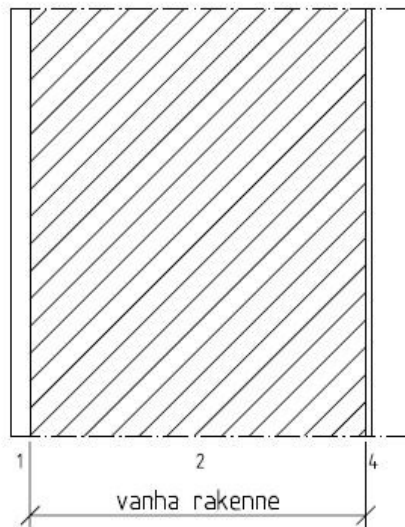
Det teoretiska materialet utgörs av härledda formler samt manualer och instruktioner för *in situ* mätningar av värmeflödet. Den tekniska utrustningen beskrivs noggrannare under kapitel 2.4 *Mätutrustning*.

Undersökningen genomförs i form av en kvantitativ analys där empirin är tagen från *in situ* mätningar. En kvantitativ analys hade krävt att fler mätningar skulle genomföras och under en längre tidsperiod; det vill säga, datagrupperna måste vara större för att kunna se korrelationer mellan de undersökta grupperna. Med hänsyn till den inneboende felmarginalen hos mätningarna kan därför inte några säkra resultat fås fram med en kvantitativ analys med den data som är rimlig att samla in för den här undersökningen. För att kunna analysera de mätningar som genomfördes används en metod som framarbetats av mig i samråd med min handledare och som beskrivs i kapitel 3.5 *Dataanalys*.

2.3 Mätobjektet – Minervaskolans byggnad

Minervaskolans byggnad uppfördes år 1927 och är beläget på Apollogatan 12, Helsingfors. Den består av 5 våningar och en källarvåning. Byggnaden har mekanisk ventilation som är begränsad till kökets till- och frånluft samt den översta våningen som renoverats tidigare. De resterande delarna av fastigheten använder självdragsventilation där överluft leds mellan klassrum. Trapphus och korridorer är sedan tidigare öppna för att underlätta ventilationen. I och med installationerna av brandceller blev öppningen mellan korridorerna och trapphusen begränsade till en dörr per ände som är utrustade med automatisk stängning vid händelse av brand. Skolbyggnaden ska genomgå en renovering med start under våren 2017 under insyn av Museiverket. Denna renovering har inte påverkat undersökningens mätningar.

Väggkonstruktionen är (inifrån och ut): Färg/puts + 550mm murad tegel + puts. Vilket resulterar i en total väggjocklek på ~560 mm. Figur 3 visar ritningen över den renoverade väggen och det av konsulteringsfirman givna U-värdet uppgår till 0,92[W/m²K].



Figur 4. Den gamla konstruktionen är identisk med den som ska renoveras då putsen byts ut mot motsvarande som var innan. [11]

Väggkonstruktionen i figur 3 är av samma typ för samtliga mätpunkter. Innehållet i väggen vid samtliga punkter går inte att kontrollera noggrannare än med IR-kamera och konstruktionsdetektor. Ytterväggarna kommer att renoveras för att motsvara den tidigare väggen och ritningarna för den renoverade väggen går därför också att använda som principskiss för den befintliga väggkonstruktionen. [11].

2.4 Mätutrustning

För att genomföra undersökningen fordrades flera typer av mätare. Mätutrustningen som använts för den här undersökningen är:

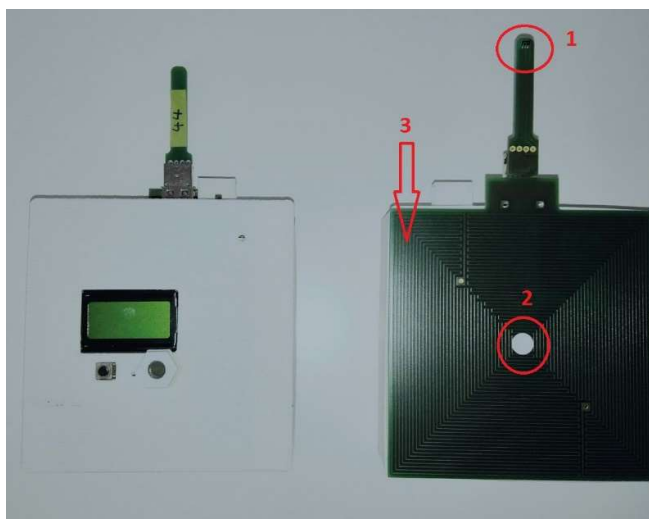
- 4 stycken U-värdesmätare (Arcada)
- IR-kamera (FLIR C2)
- Konstruktionsdetektor (Stanley S100)
- Avståndsmätare (Trotec BD20)
- Temperaturgivare (digital termometer)
- Temperaturloggare (Arcada)



Figur 5. Attacheväska med standarduppsättning av mätinstrument. [12]

Figur 5 visar standarduppsättningen av mätinstrument. De som saknas är temperaturloggare, värmekamera och digital termometer som även ingick i den här undersökningen. Portföljen som mätutrustningen förvaras i har en laddnings- och dataöverföringskrets. Dataöverföringen används då en i detalj behöver undersöka en specifik mätning, den används normalt för att snabbt få reda på vad som kan ha gått fel i en undersökning. Informationen laddas in i en Excel-tabell så att temperaturerna och den pålagda effekten synliggörs. I den här undersökningen var däremot samtliga värden intressanta även då de inte visade korrekta resultat. Detta på grund av att det här är en undersökning av mätarnas funktion i relation till förändrad utomhustemperatur. Därför genomfördes inga analyser av individuella mätningprocesser i detalj.

2.4.1 Arcadas U-värdesmätare



Figur 6. Fram- respektive baksida av Arcadas U-värdesmätare

U-värdesmätarnas konceptuella funktion är att de skapar en lokal isolering mellan inomhusluftens temperatur och innerväggens yttemperatur. Detta resulterar i att ytan på väggen blir kallare efter en kort tidsperiod (längden är beroende av mätarens inneboende temperatur när den sätts fast på mätpunkten). Mätaren har en referenstemperatur som fås från termometern på den perifera termometern (punkt 1, figur 6) och en annan termometer placerad i mitten på bottenplattan (punkt 2, figur 6). Referenstermometern visar den temperatur som innerväggen har när rumstemperaturen värmer den och är således känslig för drag och hastiga temperaturförändringar i rummet. När bottenplattans termometer visar en stadig, lägre temperatur än referenstemperaturen lägger mätaren på en effekt på en värmeslinga i bottenplattan (punkt 3, figur 6). Den effekten stegras sedan i steg tills att bottenplattans temperatur är lika med den för referenstermometern. Den effekt som mätaren lagt på är lika med det värmefflöde som krävs för att värma upp väggen. När mätningen är genomförd ger mätaren 3 resultat; mättid [minuter], bottenplattans slutliga effekt [mW] och temperaturen för innerväggen [$^{\circ}\text{C}$]. Bottenplattans yta är 100cm^2 , temperaturen för innerväggen är T_1 och används i vid beräkningen av U-värdet tillsammans med effekten och bottenplattans area. U-värdesmätarna levererar enligt dess specifikationer ett resultat med en felmarginal på $\pm 10\%$ och har en genomsnittlig mättid på 60 minuter. [10]

Innan U-värdesmätarna fästs på mätpositionen måste de termosteras genom att stå i rumstemperaturen en kort tid innan mätningen påbörjas. Tiden för termosteringen är beroende på hur stor temperaturskillnaden mellan instrumentet och mätpunkten är, det viktiga är att bottenplattan inte värmer upp väggytan som den täcker innan mätningen påbörjas. Därefter fästs mätaren på väggen genom att tejpas med hjälp av målartejp enligt figur 7. Kontakten mot väggen är viktig att kontrollera då det mellan bottenplattan och väggen kan skapas en luftficka som påverkar mätresultatet, även referensspinnen måste kontrolleras för kontakt mot ytan. Vid normala förhållanden (jämn väggtemperatur, ingen risk för drag) placeras referenstermometern åt endera sida. Vid risk för drag eller en temperaturförändring i sidled (exempelvis i närheten av fönster) placeras mätaren genom att referensspinnen pekar nedåt alternativt fästs två tejpbitar fast på vardera sida om referensspinnen för att skydda termometern mot draget (se figur 7). Referenstermometern får inte placeras uppåt då bottenplattans värmeslinga riskerar att värma upp referenstermometern och en för hög innerväggstemperatur fås som resultat. Efter en slutförd mätning måste mätaren återigen termosteras innan en ny mätning påbörjas.



Figur 7. Monterad mätare med två bitar tejp som skydd mot drag.

Innan en korrekt beräkning kan genomföras måste vindkorrigeringen för konvektionen mellan väggen och utomhusluften bestämmas. Enligt ISO 9869 [5] används korrigeringen enligt tabell 1. Tecknen har en omvänd relation, om vindhastigheten är högre än 4–5 [m/s] korrigeras den nedåt på grund av att mätningen genomfördes med utomhusluftens temperatur. Anledningen kan ses i ekvation (11), där $R_{conv,2}$ används som ett standardvärde. Om standardvärdet är lika med den rådande väderleken blir standardvärdet för $R_{conv,2}$

lika med den faktiska $R_{conv,2}$ (0,04) och tar således ut varandra. Om den faktiska $R_{conv,2}$ är högre än 0,04 måste det korrigeras enligt tabell 1.

Vindhastighet [m/s]	$R_{konvektion,vind}$	$R_{korrigering,vind}$
0	0,13	0,09
0,5	0,11	0,07
1	0,08	0,04
2	0,06	0,02
3	0,05	0,01
4	0,04	0
5	0,04	0
7	0,03	-0,01
10	0,02	-0,02

Tabell 1. Värden för vindhastighetskorrigering.

Den slutliga *generella* formeln för beräkningen av U-värdet för väggar ser därför ut som följande:

$$U = \frac{1}{R_{conv,1} + \left(\frac{A * \Delta T_{1-\infty 2}}{\dot{Q}} \right) + R_{korrigering,vind}} \quad (15)$$

Om sedan enheterna omvandlas till de som mätarna ger (\dot{Q} i mW och $A = 0,01\text{m}^2$) fås den följande ekvationen:

$$U = \frac{1}{R_{conv,1} + \left(\frac{10 * \Delta T_{1-\infty 2}}{\dot{Q} [mW]} \right) + R_{korrigering,vind}} \quad (16)$$

Vilket är den formel som kan användas direkt för beräkningar av U-värden för väggar.

2.4.2 Termografi

Termografi är ett teoretiskt verktyg för att *mäta* och *presentera* temperaturskillnader. All materia som har en temperatur över 0 K avger värmestrålning och har således infraröda (IR) profiler. När IR-strålningen ska mätas presenteras den grafiskt genom att bilden åskådliggör skillnader i IR-strålningen, bilden visar *temperaturskillnader*. IR-strålning ligger utanför det spektra som är synligt ljus för det mänskliga ögat men en IR-kamera presenterar bilden med synligt ljus för att en människa ska kunna se det. Detta kallas för att kameran använder *falska* eller *pseudo färger*, färger som inte är del av ett synligt spektrum men som representeras med synliga färger [13].

Utöver U-värdesmätare och temperaturloggare användes även en termisk infraröd kamera. Modellen är FLIR C2 och har en noggrannhet på +/- 2 °C eller alternativt 2% av totala temperaturskillnaden. Gällande felmarginal bestäms av det största värdet [14]. Det huvudsakliga användningsområdet för IR-kameran är att identifiera eventuella anomalier i väggarna, samt att undersöka temperaturförändringar i närheten av kalla och varma källor. Anomalier kan innebära, men är inte uteslutande, stigare för varmvatten och element, fuktiga väggar, bärande konstruktioner (exempelvis balkar) eller dålig isolering. Väggytor i närheten av fönster har en inneboende temperaturgradient där temperaturen sjunker desto närmare fönstret man mäter. Den temperaturgradienten är relevant att undersöka då Arcadas U-värdesmätare använder sig av en perifer referenstermometer. Om den referenstermometern placeras mot en yta som har en annan temperatur än den yta där bottenplattan placeras över kommer resultaten att bli missvisande (som beskrivs i kapitel 2.1 *Värmefflöde*).

2.4.3 Övrig mätutrustning

Arcada har även utvecklat en temperaturgivare som kan mäta ytemperatur samtidigt som den mäter lufttemperaturen. Termometern kommer i en enhet och har ett trådlöst nätverkskort inbyggt för kontinuerlig dataöverföring. Data från loggarna sparas på en server och tidsupplösningen är 1 mätning/2 minuter. Batteritiden är mellan 1 till 1,5 vecka med kontinuerliga mätningar, detta kan dock förkortas om signalen till routern är låg och det trådlösa nätverkskortet drar mer effekt. Det egentliga syftet är att använda termometern som ett instrument för att kontrollera att inomhustemperaturerna inte har förändrats innan

mätningarna genomförs. Mätarna skulle även ha kunnat användas för att mäta ytterfasadens temperatur samtidigt som de ger en korrekt utetemperatur.

Lasermätaren används för att bestämma en relativ position för mätarna. Mätaren som användes i den här undersökningen är av märket Trotec BD20 som har ett arbetsområde upp till 60 meter. Anledningen är för att mätningen alltid ska vara återskapningsbar. Positionerna bestäms genom att väggen som mätarna placeras på ses som ett x-y-koordinatsystem med origo nere i vänstra hörnet på väggen. Avstånden betecknas i allmänhet med [mm] men annan längdenhet kan användas om det i rapporten framgår vilken det är. I den här undersökningen används meter som enhet.

Konstruktionsdetektorer fungerar genom att de genererar ett elektriskt fält och när detektorns fält utsätts för en störning sänder den ut en ljudsignal, kombinerat med en ljusindikering från en lysdiod. Detektorn som användes var av märket Stanley S100 och kan upptäcka föremål in till två tum från ytan. [15]

3 METOD

Minervaskolan som mätobjekt valdes då den har en tung väggkonstruktion och som även var lättillgängligt under en längre period, vilket i sin tur ledde till en ökad möjlighet att genomföra mätningar vid relevanta temperaturförändringar. Syftet med undersökningen är att undersöka hur den termiska trögheten påverkar de uppmätta U-värdena och därför genomfördes även mätningar under icke ideala temperaturförhållanden. Förundersökningen bestod av att välja 4 stycken positioner, en mätare till varje väderstreck. Anledningen att mätarna placerades vid varje väderstreck är för att skapa redundans med hänsyn till solens varierande påverkan under dagen. För att sedan genomföra en undersökning av platserna medelst värmekamera både utvändigt och invändigt för att undvika några termiska anomalier. Avvikelse som mest påverkar mätningarna är drag (från fönsterkarmar, dörrar och ventilation) samt radiatorer och rördragning. Elementen är som regel placerade under fönster och påverkade inte mätningarna i den här undersökningen då de enbart utfördes på väggkonstruktioner. Värmsystemets stigare var däremot placerade i väggarna vilket skapade lokala temperaturförhöjningar som skulle ha bidragit till felaktiga resultat. Mätpunkter placerade bredvid fönster fordrar en noggrann undersökning av IR-bilderna då temperaturen i regel är lägre ju närmre fönstret mätaren placeras.

Undersökningen av IR-bilderna efterföljdes av konstruktionsdetektorn, vars främsta uppgift är att försäkra användaren om att det inte finns några dolda föremål i väggen. Dessa föremål kan vara byggnadselement (rör, spikar, skruvar och dylikt) men även onaturligt förekommande föremål (skräp som byggs in i väggen under konstruktionen). Även om IR-bilderna inte visar några anomalier kan enskilda föremål ändå påverka resultatet, till exempel referenstermometern placeras över en spik inne i väggen. I den här undersökningen upptäcktes inga anomalier vid de valda mätpositionerna. Därmed är de utförda U-värdesmätningarna beroende på varierande temperaturförhållanden.

Mättillfällena är valda med hänsyn till väderleksrapporter som visade på kommande temperaturförändringar. De dagar med höga temperaturskillnader premierades och mättillfällena valdes utifrån det.

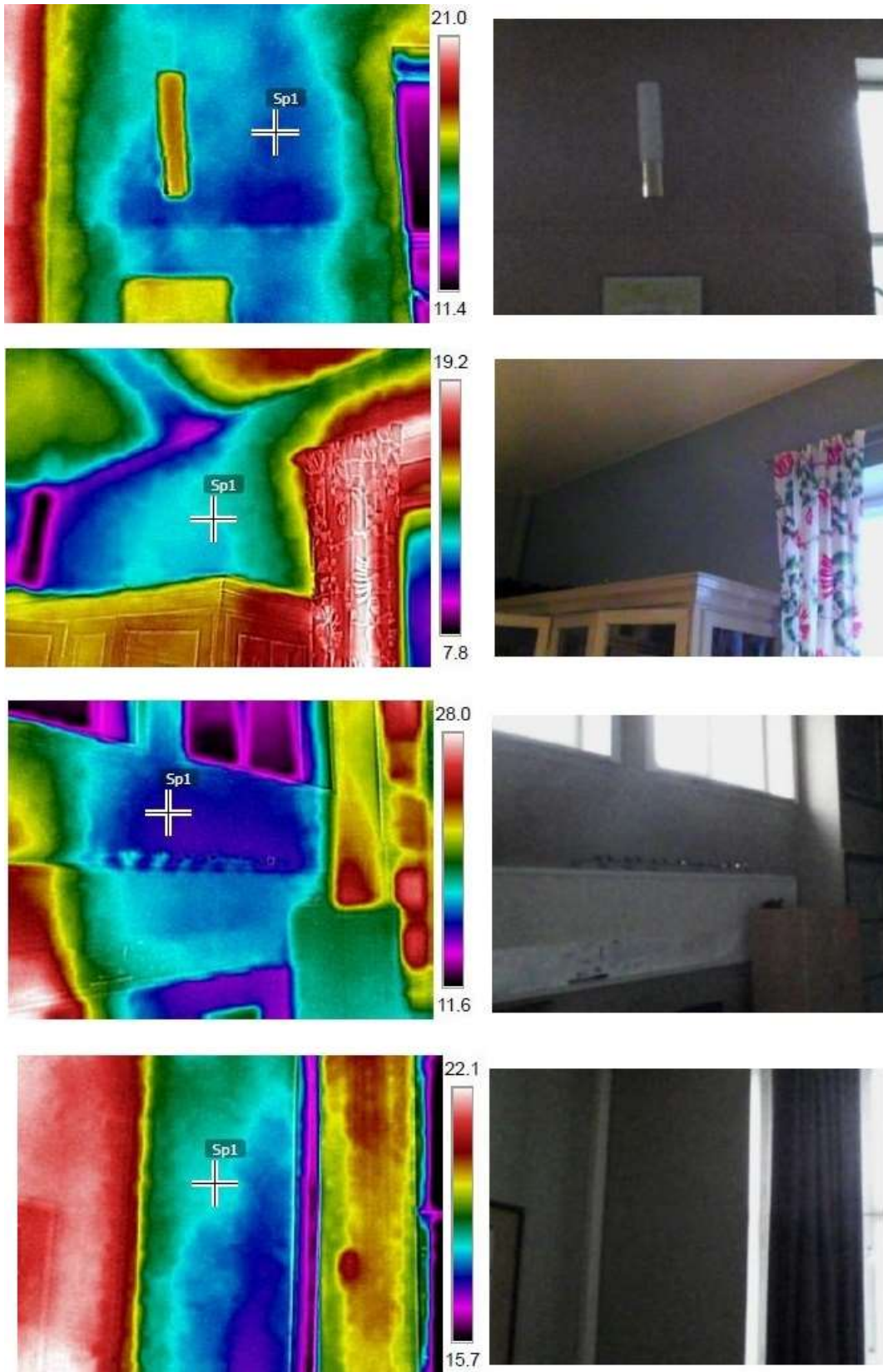
3.1 IR-bilder

Fotografering av objekt med hjälp av en IR-kamera är ett sätt att genomföra en termografisk undersökning. I en fullständig energidiagnos av en byggnad används termografin för flera olika undersökningar som innefattar bland annat undersökningar av luftläckage, anomalier i väggar (trasig eller fuktskadad isolering) och temperaturgradienter i närheten av kända köldbryggor. I den här undersökningen är termografin begränsad till att undersöka mätpositionernas lämplighet. Det som undersöktes var om huruvida väggen som mättes var homogen, det vill säga om den hade några anomalier som kunde påverka mätresultatet. Detta är svårt att undersöka utan att genomföra förstörande prov på väggen och då används termografin som ett fullgott alternativ. Varje främmande objekt påverkar väggens termiska egenskaper, oftast negativt, men om termografin visar att väggen är homogen är den lämplig för att genomföra en mätning på. Termografin ger däremot enbart en överblick över väggens tillstånd, felmarginalen från tillverkare är satt till +/- 2 °C och kamerans absoluta temperaturvärden kan därför inte användas för temperaturmätningar av exempelvis fasad och innervägg.

All fotografering skedde med en vinkel mot väggen som underskred 45° då bilden riskerar att visa reflektioner från föremål i närheten av ytan. En bild tagen rakt mot en vägg riskerar även att visa fotografens infraröda profil i IR-bilden.

3.2 Mätarnas placeringar

Mätpositionerna valdes till att de skulle vara oåtkomliga för lågstadieelever som studerar på skolan då mätningarna genomfördes delvis under pågående skoldag. Både för att skydda mätarna från eleverna men främst för att undvika drag och rörelse i närheten av mätarna som skulle påverka mätresultatet. Lektioner och övrig skolaktivitet bedöms inte ha någon påverkan på de mätresultat som fås i den här undersökningen. De följande IR-bilderna är tagna från insidan av väggarna där mätarna placerades. Punkterna markerade med Sp1 är positionen där mätarna sedan placerades. Notera att färgskalan normaliseras för varje enskild bild för att motsvara de temperaturförändringar som fotograferades. Samtliga IR-bilder (för in- och utsidan av mätpositionerna) finns i bilaga A.



Figur 8. Mätarnas placeringar. Uppifrån: Korridor, Resursrum, Musikrum, Klassrum.

Tabell 2. Mätarnas nummer, placering och orientering.

Mätare	Placering	Orientering
16	Korridor	Nord
18	Resursrum	Väst
23	Musikrum	Öst
44	Klassrum	Syd

Den första bilden i figur 8 visar positionen i korridoren (mätare #16), på vänster sida syns elementens stigare som en stark röd färg men temperaturgradienten är inte tillräckligt stor för att störa mätningen på höger sida av väggen. Den andra bilden visar positionen för mätare #18. I den tredje bilden i figur 5 är mätare #23 positionerad i närheten av undersidan av ett fönster och kan därför bli utsatt för det nedåtgående kalldraget från fönstret. Den fjärde bilden i figur 5 visar var mätare #44 monterades i ett klassrum, detta klassrum användes av klassen under vissa mätningar men den var placerad tillräckligt långt ifrån eleverna för att deras närvaro inte skulle påverka mätningarna. Mätarna placerades på 4:e våningen av skolbyggnaden på grund av att ju högre upp i byggnaden de placerades, desto färre elever riskerade att påverka mätningarna.

3.3 Temperaturloggare

En temperaturloggare sattes upp bredvid mätare #44 i klassrummet för att kontrollera temperaturförändringarna i klassrummet över en längre tidsperiod. En bit tejp användes under termometern mot väggen för att säkerställa att ingen luftspalt uppstod till följd av väggens ojämnheter. Mätningen pågick fram tills att batteriet tog slut, därefter laddades den och en ny mätning påbörjades.

För den här undersökningen fanns enbart en enhet tillgänglig och den tillkom senare under arbetet och dess inverkan på resultatet är således låg. För att få tillförlitliga värden fordrar det att temperaturloggarna är monterade vid varje mätutrymme. I den här undersökningen hade det således krävts 4 stycken enheter som skulle ha mätt temperaturför-

ändringarna över flera dygn innan U-värdesmätningarna påbörjades. Fler enheter har sedan dess färdigställts och kan i fortsatta undersökningar användas för att ytterligare säkerställa mätresultaten.

3.4 Väderdata

För att kontrollera väderförhållanden användes väderdata från Meteorologiska Institutets (FMI) öppna databaser [16]. För den här undersökningen användes data hämtat från en väderstation belägen vid Kajsaniemi. Avståndet mellan Minervaskolan och väderstationen är ca 1 km och bedöms vara tillräckligt noggrann för att användas vid mätningarna på Minervaskolan.

FMI:s öppna databas använder ett användargränssnitt för maskinspråk. Detta kräver att användaren måste skapa ett script för att hämta önskade data. I det här arbetet används istället en länk som hämtar data i XML-format, det kan sedan kopieras till en Excel tabell för fortsatt analys. Följande exempellänk hämtar väderdata från Kajsaniemis väderstation, med 60 minuters mellanrum och med start vid 02-03-2017 07:00 och tar slut vid 06-03-2017 07:00. Notera att tidsangivelsen är i zulu-tid (Z) vilket betyder att den skrivs i GMT +0. Exemplet nedan hämtar således data från klockan 7 på morgonen även då tiden är angiven som klockan 5.

```
http://data.fmi.fi/fmi-apikey/här-infogas-den-apinyckel-som-fås-från-  
FMI-s-registrering/wfs?request=getFeature&storedquery_id=fmi::obser-  
vations::weather::timevaluepair&place=kaisaniemi,helsinki&start-  
time=2017-03-02T05:00:00Z&endtime=2017-03-06T05:00:00Z&ti-  
mestep=60&parameters=temperature&crs=EPSG::3067
```

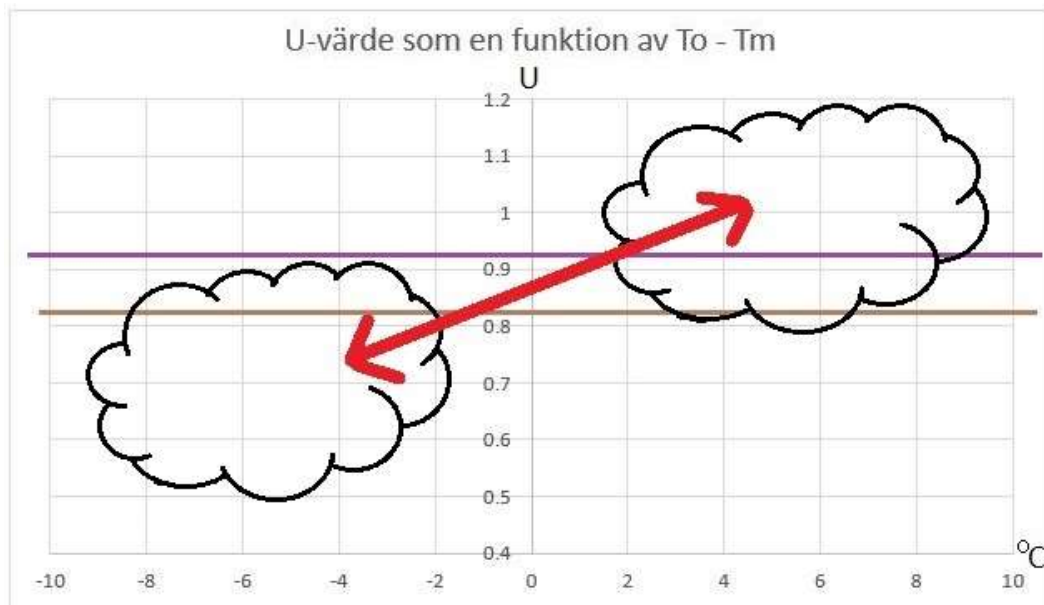
Genom att skriva in andra datum i länken fås även data från dessa datum. Väderstationen registrerar en mätning per 15 minuter, *timestep* kan därför anges i olika former. För den här undersökningen användes mätvärden för varje hel timme då medelvärdet var det viktiga.

3.5 Dataanalys

Dataanalysen är av kvantitativ men ingen statistisk undersökning genomförs då kvaliteten på insamlade data är tillräckligt pålitlig för att genomföra en mer djupgående analys. Den data som undersökningen genererat visar en stillbild av den dynamiska förändring som sker med det förändrade värmeflödet genom väggen. Med hjälp av de uppmätta U-värdena och den tillgängliga väderdata (tid och temperatur) som fås från FMIs öppna databaser kan man sedan undersöka huruvida det finns tendenser i förändringarna av U-värdet. Mätningarna genomfördes delvis under idealiska förutsättningar och delvis under sådana förutsättningar då utomhustemperaturen hade förändrats hastigt inom de närmsta dygnet innan mätningen. Då ritningen och mätningarna tyder på att väggarna är identiska hos varje mätposition kan medelvärdet för samtliga mätningar användas som det mest reella uppmätta U-värdet. Det U-värdet skapar en referens som de övriga analyserna baserar sig på. Slutligen under analysen används även det av konsulteringsfirman givna U-värdet 0,92.

Det första steget i dataanalysen går ut på att identifiera de mättillfällen där temperaturförändringarna under dagarna innan mätningen har varit tillräckligt hög för att påverka märesultatet. Väderdata för de 4 föregående dygnet används i 8 olika steg genom att utomhusluftstemperaturens medelvärde räknas ut för de senaste 12 timmarna innan mätningen, sedan de senaste 24 timmar, 36 timmar, och vidare upp till 96 timmar. Sedan räknas ett nytt U-värde ut, men med istället för den aktuella utetemperaturen används nu medeltemperaturen för varje tidsperiod för att räkna ut ett korrigerat U-värde. Resultaten presenteras i grafer där U-värde är en funktion av de beräknade medeltemperaturerna. Graferna är uppställda enligt figur 7 där den förmarkerade linjen är det U-värde som enligt den här undersökningen visade mest tillförlitligt resultat (brun-gula). Ekvationen för beräkningen av U-värdet för medeltemperaturerna (T_m) ställs upp som följande:

$$U_{T_m} = \frac{1}{R_{konvektion,1} + \left(\frac{A_{mätare} * (T_1 - T_m)}{\dot{Q}} \right) + R_{korrigering,vind}}$$



Figur 9. Illustration över den förväntade spridningen av U-värden.

Pilarna illustrerar de två områden där U-värdet borde röra sig mellan. Om uttemperaturen var högre vid mätpunkten jämfört med vad den tidigare medeltemperaturen var kommer temperaturskillnaderna att resultera i ett högre U-värde och således också en högre uppmätt termisk resistans (den faktiska resistansen hos väggen ändras inte, bara de uppmätta resultaten). U kommer därför vara högre än referensvärdena. I det omvända fallet, om temperaturen var lägre vid mätningen än tidigare medelvärden, kommer istället U-värdet att vara lägre än referensvärdet. De mätpunkter som används är beroende på vilken mätposition och mättag som hade den största temperaturskillnaden i medeltemperaturen. För varje analys presenteras två grafer, en som beskrivs enligt figur 7 och en som beskriver U-värdets förändring över den undersökta tidsperioden.

U-värdesberäkningarna sammanställdes i en Excel-tabell. Tabellen använder den slutliga formeln som är härledd i kapitel 2.4.1 *Arcadas U-värdesmätare* och standardavvikelsen är beräknad med Excel-funktionen *std.p* vilket gör att tabellen är återskapningsbar för framtida bruk. Samtliga grafer i dataanalysen är skapade med Excel. För de analyserade mätpunkterna ges också en beskrivning av deras relevans.

4 RESULTAT

De samlade resultaten från samtliga mätningar återfinns i bilaga C. Väderdata för mätningarna finns i tabell 4, där medeltemperaturen för olika tidsspänn presenteras. U-värdena är beräknade med den härledda formeln som tidigare presenterats i den teoretiska bakgrunden (den slutliga formeln från kapitel 2.4.1 Arcadas U-värdesmätare). I bilaga B återfinns grafer visande U-värde som en funktion av tiden för varje analyserat mättillfälle. Det totala antalet mätningar är 32 (8 stycken/mätposition). Efterkontroll av resultaten resulterade i 27 stycken godkända mätningar.

4.1 Uppmätta U-värden

I bilaga C redovisas samtliga mätningar genomförda under undersökningen.

Tabell 3. De samlade resultaten från U-värdesmätningarna avrundat till närmaste 10-tal och hela minuter.

	U-värde (medelvärde)	Genomsnittlig fel	Mättid
Resursrum	0,86	7%	70
Korridor	0,78	-3%	62
Klassrum	0,87	-2%	59
Musikrum	0,70	-13%	68
Medelvärde	0,80	-5%	65

Med anledning av att samtliga mätta väggar har samma konstruktionstyp kan medelvärdet för samtliga mätningar användas som ett mått för väggarnas reella U-värde. Med hjälp av IR-bilderna placerades mätarna långt ifrån anomalier (exempelvis närliggande fönster och stigare). Medelvärdet uppgår enligt tabell 3 till 0,80 jämfört med det av konsultfirman givna värdet 0,92. Skillnaden mellan det uppmätta U-värdet och konsultfirmans U-värde är:

$$\frac{0,80}{0,92} = 0,87 \rightarrow 1 - 0,87 = 13\%$$

I den följande resultatredovisningen används 0,80 som det uppmätta värdet.

Från tabell 3 kan också utläsas att Arcadas mätare har presterat över förväntan då de mätningarna i huvudsak genomfördes under icke idealiska förhållanden.

Klassrummet hade lägst felmarginal jämfört med de övriga mätpositionerna. Därför kommer resultatanalysen att bestå av data från mätningarna i klassrummet. Med referensvärdet $U = 0,80$ innebär det att Arcadas U-värdesmätare, enligt specifikationerna, ska kunna leverera ett resultat mellan 0,72 och 0,88.

Enligt tabellvärden taget från C4 i Finlands Byggbestämmelsesamling [17] anges tegel ha en konduktivitet på 0,50 [W/m K]. Med hänsyn till att det är en okänd väggkonstruktion med tegel och puts används här värden för tegel. Då standardvärden för R_{si} och R_{se} används samt för att den murade väggens djup är 550 mm fås:

$$U = \frac{1}{0,13 + \left(\frac{0,55}{0,5}\right) + 0,04} = 0,70$$

Enligt tabellvärdet har en 550 mm djup vägg med enbart tegel (samt utan R_{si} och R_{se}) ett U-värde på 0,91 vilket är nära det som konsultföretaget angav.

4.2 Väderdata

Väderdata från FMI sammanställdes för att räkna ut medeltemperaturen. I tabell 4 redovisas temperaturskillnaderna från -12 timmar från mättillfället till -96 timmar. I tabellen presenteras även den största temperaturskillnaden och den totala medeltemperaturen för de tidigare 4 dygnet. Det värdet användes för att identifiera de dagar som väderomslaget varit störst.

Tabell 4. Medeltemperaturen i 12h-perioder från mättillfället.

Datum/ T_m (h)	-12	-24	-36	-48	-60	-72	-84	-96	Största ΔT	$T_{m,tot}$
23 februari	0.4	-1.3	-2.9	-2.7	-2.5	-2.1	-1.5	-1.0	3.3	-1.6
24 februari	-4.3	-2.4	-1.6	-1.9	-2.8	-2.7	-2.5	-2.2	2.7	-2.6
1 mars	2.0	2.4	1.9	1.1	0.2	0.0	-0.4	-0.8	3.2	1.1
2 mars	1.2	1.6	1.7	2.0	1.8	1.2	0.6	0.4	1.6	1.3
6 mars	-5.4	-3.7	-4.3	-3.4	-2.8	-2.1	-1.6	-1.2	4.3	-2.3
10 mars	0.9	1.4	1.0	1.0	0.7	0.3	-0.3	-0.6	2.0	0.6
11 mars	1.1	1.8	1.5	1.6	1.3	1.3	1.0	0.7	1.2	1.3
6 april	7.0	4.0	4.0	4.0	4.1	3.7	3.6	3.6	3.3	4.1

För att undersöka väggarnas termiska tröghet analyserades mättillfällena vid 1, 6 och 10 mars samt 6 april då de har ett högt ΔT med varierande beräknade U-värden. Mätningarna från 10 mars analyserades även då resultaten visar på ett högt ΔT men låg total medeltemperatur analyserades. Resultaten redovisas under kapitel 4.3 *Termisk tröghet*.

4.3 Resultatanalys

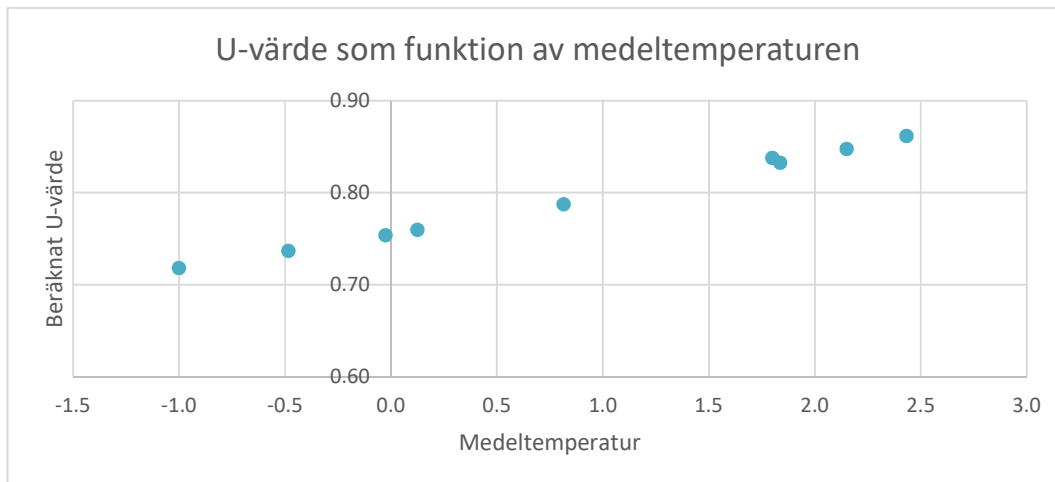
Korrelationen mellan förändringarna i utomhustemperaturen innan mätningarna och med den temperatur som mätningen hade vid mätningens genomförande analyseras enligt ekvationen given i kapitel 3.5 *Dataanalys*. Tabellerna som presenteras i början av dataanalysens underrubriker är de uppmätta U-värdena vid tiden 0 som sedan följs av de beräknade U-värdena för varje medeltemperatur (från -12 till -96). Graferna visar U-värdet som en funktion av förändrad medeltemperatur. Syftet är undersöka storleken på utetemperaturens påverkan därför är axlarna på graferna dimensionerade för att göra trenderna i förändringen lättåskådlig.

4.3.1 1 mars

Den största skillnaden i temperatur och U-värde mellan 25 februari och 1 mars uppgick till 3,2°C respektive 0,13 [W/m²°C] och de samlade värdena redovisas i tabell 5. Mätningen genomfördes på morgonen innan soluppgång.

Tabell 5. Data från 1 mars till 25 februari, mätare #44, Klassrum.

Tid [h]	0	-12	-24	-36	-48	-60	-72	-84	-96
T [°C]	1.8	2.2	2.4	1.8	0.8	0.1	0.0	-0.5	-1.0
U-värde	0.84	0.85	0.86	0.83	0.79	0.76	0.75	0.74	0.72

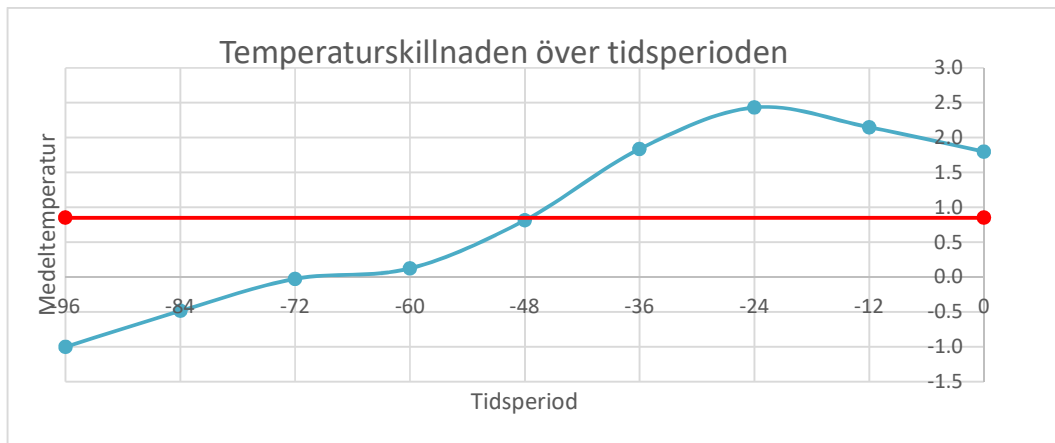


Figur 10. U-värdets förändring i förhållande till medeltemperaturen, 25 feb - 1 mar.

I tabell 5 skär U-värdet gränsen för 0,80 vid ca 1 grads utetemperatur. Det är en skillnad på $\sim 1,5^{\circ}\text{C}$ för att mätaren ska visa ett korrekt mätvärde. Figur 10 visar under vilken tidsperiod där referensvärdet för U-värdesmätaren inträffar.

Enligt tabell 5 skär kurvan då $U = 0,80$ strax innan 48 timmar bakåt i tiden. Det innebär att för den här mätningen motsvarar det egentliga värmeflödet den temperatur som var 48 timmar innan mätningen påbörjades.

Den faktiska mätningen gav ett U-värde på 0,84 vilket är innanför felmarginalen. För att undersöka trenderna i temperaturens förändring används temperaturen som en funktion av tiden i figur 12. Den raka linjen är en representation av den temperatur som resulterade i ett U-värde på 0,80.



Figur 11. Medeltemperaturens förändring över tiden, 25 feb – 1 mar.

Då temperaturen varit kall under en period och sedan snabbt ökar kommer mätarna även att få ett för högt U-värde. Det är tydligt i figur 10-12 där den snabba temperaturhöjningen resulterar i ett högre U-värde än det faktiska. Det finns en korrelation mellan den temperatur som för den undersökta perioden gav det uppmätta värdet. Även då det förekommit snabba temperaturförändringar är den totala förändringen i medeltemperatur relativt låg, den har förändrats från kallt till varmt och sedan från varmt till kallt. Integralen av medeltemperaturskurvan är därför i närheten av den temperatur som uppmättes när själva mätningen genomfördes. Det förklarar varför mätningen gav ett noggrant mätresultat även då det förekommit temperaturförändringar innan mätningen.

Det korrekta U-värdet beräknades med den medeltemperatur som låg 48 timmar innan mätningen påbörjades.

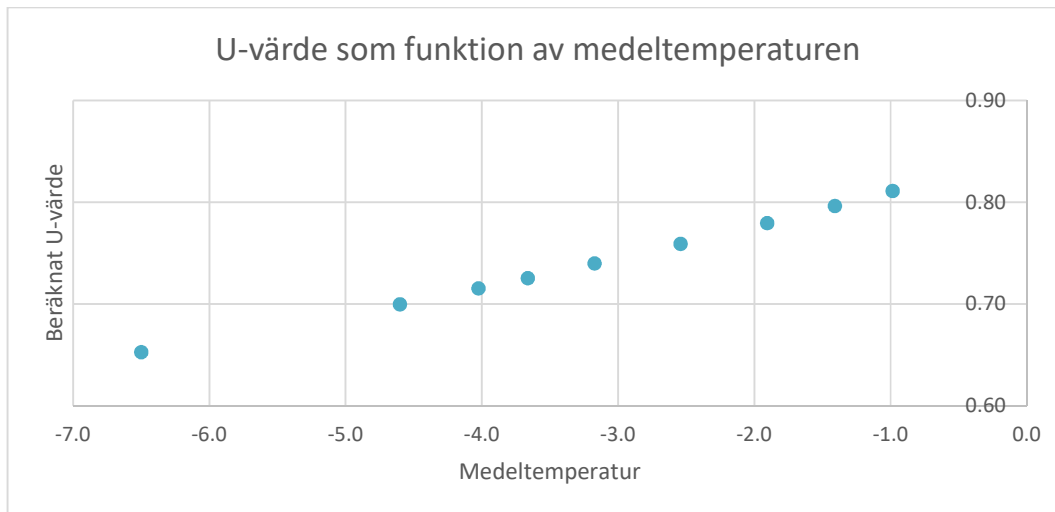
4.3.2 6 mars

Medeltemperaturen mellan 2 och 6 mars sjönk stadigt över hela 4-dygndsperioden. I tabell 6 finns medeltemperaturerna med respektive U-värde för varje tidsperiod. Den största temperaturskillnaden är $5,5^{\circ}\text{C}$ och för U-värdet 0,16. Mätningen genomfördes på morgonen.

Tabell 6. Data från 6 mars till 2 mars, mätare #44, Klassrum.

Tid [h]	0	-12	-24	-36	-48	-60	-72	-84	-96
T [$^{\circ}\text{C}$]	-6.5	-4.6	-3.7	-4.0	-3.2	-2.5	-1.9	-1.4	-1.0
U-värde	0.65	0.70	0.73	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.81

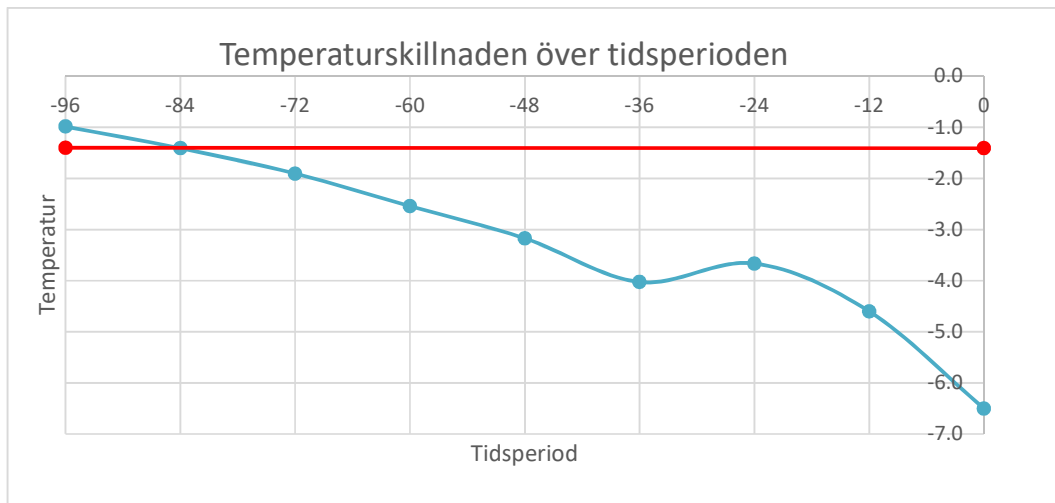
Det uppmätta U-värdet var 0,65 vilket är 18,75% från det egentliga värdet. Det är en överskridning av felmarginalen med 8,75 procentenheter. I figur 13-15 undersöks sambandet mellan den



Figur 12. U-värdets förändring i förhållande till medeltemperatur, 2 mar - 6 mar.

Grafen i figur 12 visar det samband mellan medeltemperaturen och de beräknade U-värdena. Från grafen kan det utläsas att vid $-1,4^{\circ}\text{C}$ är det beräknade U-värdet 0,80.

I figur 14 för tiden -24 syns det att temperaturen ökade något vilket resulterade i det högre U-värdet för -24 timmar.



Figur 13. Medeltemperaturens förändring över tiden, 2mar – 6 mar.

Den röda linjen representerar den temperatur då U-värdet blir korrekt. Till skillnad från 1 mars, temperaturskillnaden förändrades både till det högre och lägre, gick den här temperaturförändringen konstant nedåt. För lätta väggkonstruktioner är detta fenomen inte ett lika stort problem då väggen hinner balanseras tillräckligt för att ändå få ett fullgott resultat. Det innebär att när mätningen genomfördes var väggen fortfarande inne i processen att kylas ner. Om nedkylningen skulle ha fortsatt i oändlighet skulle U-värdesmätningen också visa ett för lågt U-värde vid varenda mätning. Detta på grund av att väggens termiska tröghet skulle ha skapat en förskjutning mellan uteluftstemperaturen och väggens temperaturgradient.

Korrekt U-värde beräknades med den temperatur som befann sig med 84 timmars fördröjning.

4.3.3 10 mars

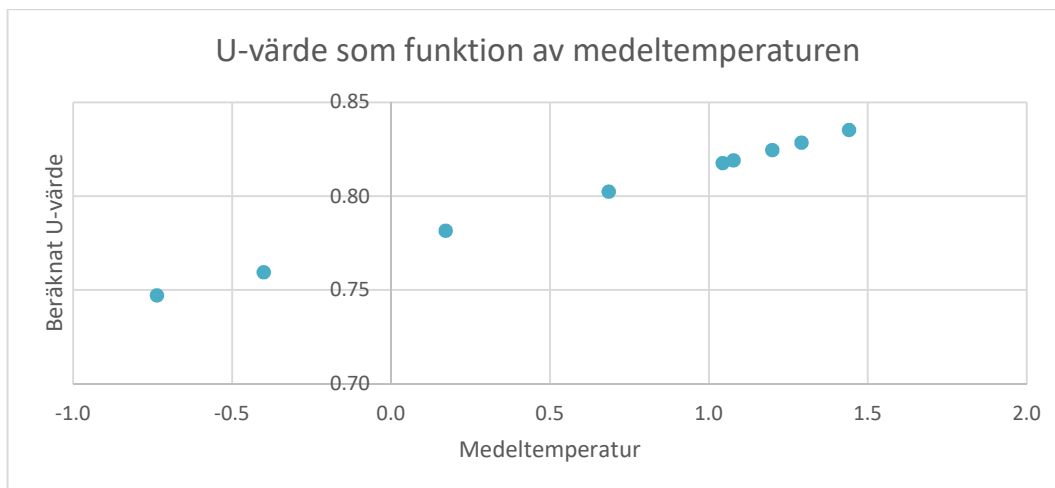
Mätningarna genomfördes på morgonen, utan solsken. Den största temperaturskillnaden var $2,1^{\circ}\text{C}$ och U-värdets största variation var $0,09$.

Tabell 7. Data från 10 mars till 6 mars, mätare #44, Klassrum.

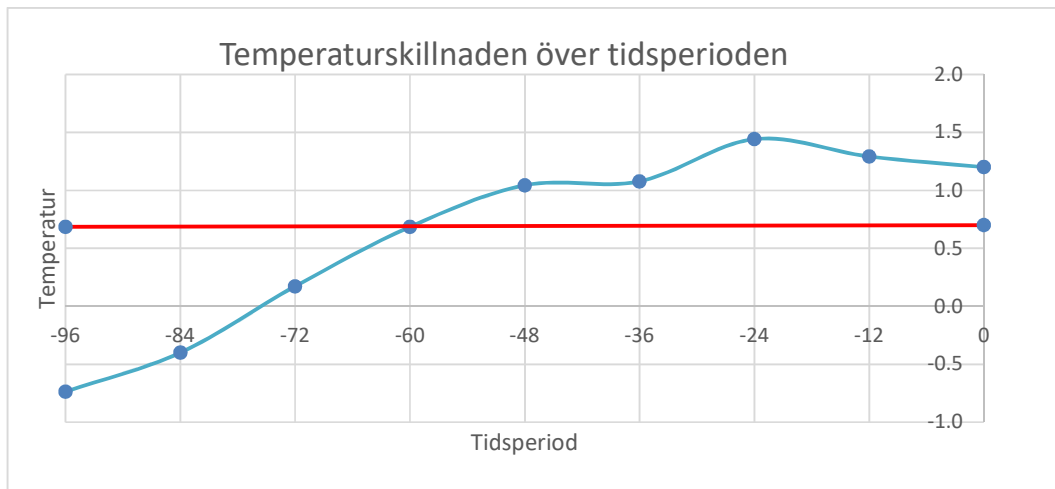
Tid [h]	0	-12	-24	-36	-48	-60	-72	-84	-96
T [C]	1.2	1.3	1.4	1.1	1.0	0.7	0.2	-0.4	-0.7
U-värde	0.82	0.83	0.84	0.82	0.82	0.80	0.78	0.76	0.75

Skillnaden mellan de största temperaturavvikelserna mellan 10 mars och 1 mars är $1,1^{\circ}\text{C}$ ($3,2^{\circ}\text{C}$ för 1 mars och $2,1^{\circ}\text{C}$ för 10 mars). Den samlade bilden med U-värden visar att

Samtliga beräknade U-värden ligger innanför felmarginalen. Det här visar på en idealisk mätsituation, där temperaturförändringen varit så pass låg att väggen tröghet inte spelar in så stor roll.



Figur 14. U-värdets förändring i förhållande till medeltemperatur, 6 mar - 10 mar.



Figur 15. Medeltemperatures förändring över tiden, 6 mar – 10 mar.

Medeltemperatures förändring är liknande den som för 1 mars. En kalla period som följs åt av en varmare vars integral ligger när den temperatur som användes för att genomföra U-värdesmätningen vid tiden 0. För att få U-värdet 0,80 används temperaturen för 60 timmar. Detta är däremot inte jämförbart med de övriga analyserna då U-värdets förändringar är för små för att dra några slutsatser. Det uppmätta U-värdet på 0,82 ligger så nära de faktiska U-värdet att det kan antas vara korrekt då U-värdesmätarnas noggrannhet är lägre än det uppmätta värdet.

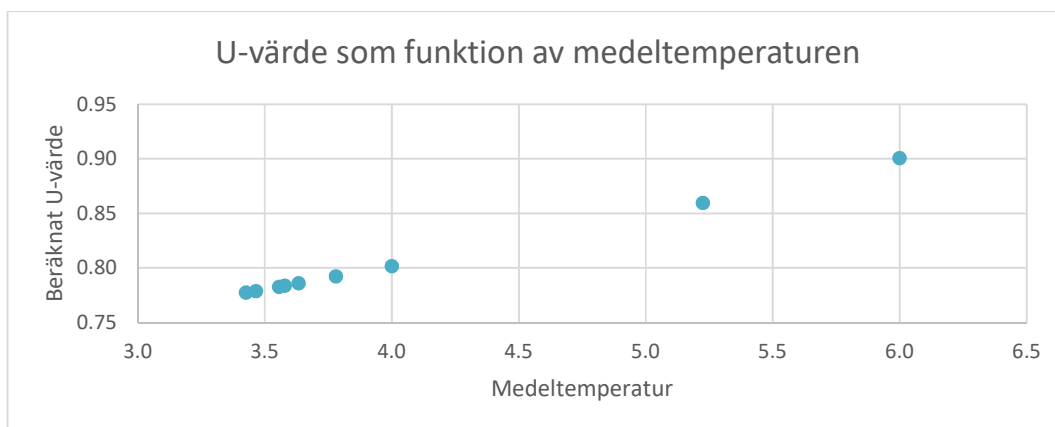
4.3.4 6 april

Den största temperaturskillnaden mellan 2 och 6 april uppgick till 2,6°C och den största skillnaden i U-värde var 0,12. Det som skiljer mätningarna genomförda 6 april mot de övriga mätningarna är att den är genomförd på kvällen, och det tidigare under dagen har varit en solig väderlek.

Tabell 8. Data från 6 april - 2 april, mätare #44, Klassrum.

Tid [h]	0	-12	-24	-36	-48	-60	-72	-84	-96
T [°C]	6.0	5.2	3.6	3.6	4.0	3.8	3.5	3.4	3.6
U-värde	0.90	0.86	0.78	0.79	0.80	0.79	0.78	0.78	0.78

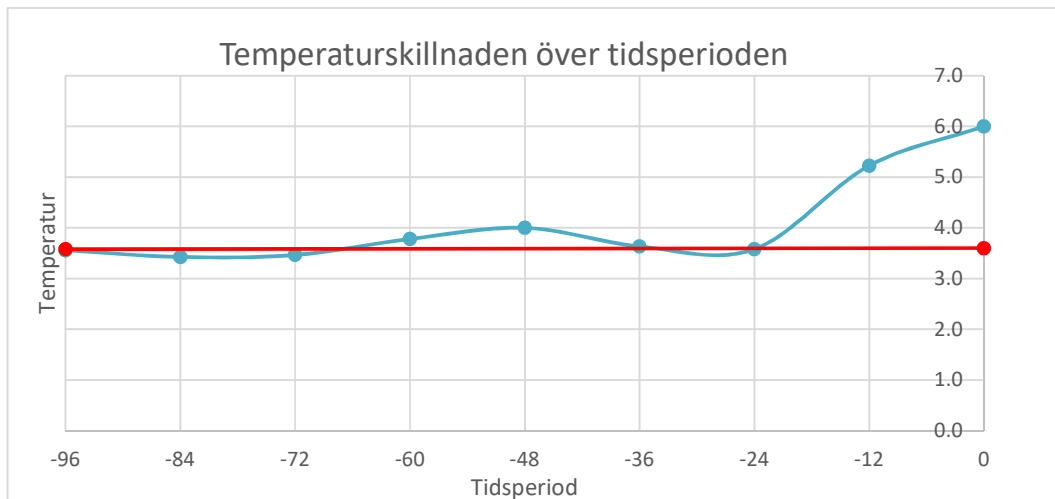
Det uppmätta U-värdet låg utanför felmarginalen men gick på kort tillbaka till att vara stabilt i närheten av det egentliga U-värdet. Det förtydligas i figur 19 där spridningen är stor för enbart två mätvärden men att resten av de beräknade U-värdena har en låg spridning.



Figur 16. U-värdets förändring i förhållande till medeltemperatur, 2 apr - 6 apr.

Spridningen för de punkter med högst U-värde är samlade till tidsperioden från 0 till 24 timmar bakåt i tiden. Då mätningen är genomförd på kvällen innefattar tiden 0 och -12 den medeltemperatur som beräknades under dagtid.

Efter 24 timmar har medeltemperaturen stabiliserat sig och förändringen i U-värdet är låg. Den höga medeltemperaturen mellan 0 och -12 timmar beror på ett soligt väder under dagen. Klassrummet har en sydlig orientering men solen går tidigt ner bakom närliggande byggnader, det var ändå tillräckligt för att värma upp rumstemperaturen.



Figur 17. Graf över temperaturens förändring över tiden, 2 apr – 6 apr.

Efter 24 timmar ligger U-värdet på 0,80. Enligt de tidigare analyserna bör mätningarna inte vara känsliga för hastiga väderomslag då väggens termiska tröghet gör att väggen inte hinner påverkas tillräckligt mycket. Anledningen till att den här mätningen har påverkats av en hastig temperaturförändring ligger i den förändrade rumstemperaturen. Den genomsnittliga rumstemperaturen för klassrummet under tidigare mätningar är 18,4 °C medan temperaturen vid den här mätningen var 20,3 °C.

Där finns sambandet i att en hastig temperaturförändring av rumstemperaturen värmer upp väggen, men inte tillräckligt djupt. När U-värdesmätaren monteras på väggen och sedan isolerar väggen mot det varma rummet kyls den delen av väggen ner snabbt. Detta resulterar i att mätaren lägger på en effekt som motsvarar väggens egentliga värmebalans.

Det korrekta U-värdet beräknades med den medeltemperatur som låg 24 timmar innan mättillfället.

4.4 Tidskonstant

För att kunna räkna ut tidskonstanten krävs att följande variabler:

- 1) Den termiska massan: Summan av konstruktionselementens specifika värmekapacitet multiplicerat med dess massa.
- 2) Summan av värmeförlusterna: U-värdet multiplicerat med arean och byggnadens värmeförlust från ventilation och luftläckage, Q .

Under den här undersökningen mättes U-värdet. Med det kan värmeförlusterna genom byggnadens mantelyta beräknas. Luftläckaget är möjligt att uppskatta med hjälp av konstanter från D3 [18], men på grund av att byggnaden har en kombinerad mekanisk och självdragsventilation skulle uppskattningarna bli relativt otillförlitliga.

För att slutföra beräkningen av tidskonstanten krävs även massan och den specifika värmekapaciteten. Massan beräknas i normala fall som den totala massan som byggnaden har innanför isoleringen, i fallet med murade byggnader räknas även hela fasadens massa med. Genom att räkna ut volymen för de olika väggarna kunde en räkna ut massan med hjälp av densiteten. Problemet uppstod då det inte finns någon tillförlitlig information om väggarnas konstruktion. De ursprungliga planerna visar att väggarna är murade, men inte med vilken typ av tegel eller förhållandet mellan mängden puts och tegel. Således är tidskonstanten inte möjlig att räkna ut för en så pass gammal byggnad när information om byggnadsmaterialet är så bristfällig.

Den andra metoden, att härleda tidskonstanten genom att undersöka tiden det tar för att en vägg ska uppnå termisk balans, går att använda med resultaten från den här undersökningen. Detta fordrar däremot att det går att veta vid vilken tidpunkt väggen är i balans, och att temperaturförändringen är konstant. Detta innebär att en uträkning med hjälp av mätvärden från in-situmätningar inte är tillräckligt pålitlig för att resultera i ett slutgiltigt resultat.

5 DISKUSSION

Den här undersökningen visar att snabba temperaturförändringar är mindre relevanta för snabba U-värdesmätningar på tunga väggkonstruktioner i jämförelse med lättare väggkonstruktioner. Om medeltemperaturen för 4 dygn innan mätningen har en integral som ligger i närheten av den temperatur som används för U-värdesmätningen kommer U-värdet att vara inom felmarginalen. Det som gäller generellt för U-värdesmätningar, att temperaturen bör vara jämn utan hastiga förändringar, ger istället felaktiga resultat i den här undersökningen. Undantaget är vid de situationer då vädret har påverkat rumstemperaturen. För mätningarna under 6 april tydliggjordes risken med att mäta när solen har värmt upp rumstemperaturen under en kort tid. Väggen var fortfarande kall men den yta som referenstermometern mätte på värmdes upp av rummet, medan bottenplattans termometer mätte den egentliga väggtemperaturen. Utöver den situationen visade de andra analyserna att en konstant temperaturförändring i en specifik riktning (konstant kallar alternativt konstant varmare) genererade felaktiga resultat. Den termiska trögheten är det som skapar den här förskjutningen i väggen och på grund av det är det den samlade temperaturförändringen över en viss tid som ger det mest korrekta resultatet.

Resultaten i den här undersökningen ger riktlinjer för just den undersökta byggnaden, Minervaskolan, vilket innebär att resultaten i sig inte är direkt generaliserbara med andra tunga konstruktioner. Detta på grund av att undersökningen har genomförts i en okontrollerad miljö (naturliga väderomslag). Dessa riktlinjer skiljer sig däremot jämfört med de som används för lättare konstruktioner. I standardproceduren för U-värdesmätningar undersöks temperaturförändringar innan själva mätningen genomförs. Det som är relevant att tänka på när det rör sig om väggar med en högre termisk tröghet är att det är den samlade bilden av temperaturförändringar som är viktig, inte enstaka höga/låga temperaturer. Genom att som i den här undersökningen använda förändringen av medeltemperatur kan en undersöka hur den totala temperaturförändringen har påverkat väggens termiska balans. Möjligheten att använda den här undersökningens approximationer finns för varje undersökt objekt i Finland då databasen för väderdata är öppen och kan hämtas från vilken av FMIs väderstation som helst i Finland.

En av utmaningarna med den här undersökningen var att den var beroende av väderleken. De mättillfällen som användes valdes för att kunna undersöka temperaturförändringarnas påverkan på byggnaden. Perioden februari till april under 2017 har haft en ovanligt jämn temperaturskillnad. Detta skapade en del problem då flertalet mätningar inte gick att använda när temperaturskillnaden inte påverkade U-värde nämnvärt. Om mätningarna hade kunnat genomföras under perioden november till januari hade funnits fler mättillfällen där temperaturskillnaderna varit högre. Då hade även ett mer systematiskt schema kunnat följas med fler tillförlitliga resultat. Solstrålningens inverkan på undersökningen har inte kunnat mätas på grund av bristen av utrustning. En möjlig felmarginal kan vara solens påverkan på rumstemperaturen.

Referenstermometerns riktning är viktig då det finns en temperaturgradient i väggen, vanligast förekommande i närheten av fönster och ytterdörrar. Mätare nummer 18, som var placerad i resursrummet, placerades tidigare med referenstermometern vänd bort från fönstret då IR-bilderna inte visade någon betydande temperaturgradient. Denna ändrades sedan då resultaten konsekvent påvisade ett avsevärt lägre U-värde än övriga mätare (0,45 jämfört med 0,75-0,85). Efter att mätaren vändes och referenstermometern placerades nedåt gav mätaren resultat i linje med de övriga mätarna. Detta hade kunnat undvikas tidigare om jag hade kunna fastställa det egentliga U-värdet i ett tidigare skede. Då hade de avvikande värdena visat sig tidigare och det hade gått att korrigera.

Temperaturloggarnas uppgift var att säkerställa att rumstemperaturen inte förändrades för mycket innan mätningen genomfördes. Dessa skulle ha monterats innan den undersökta tidsperioden påbörjades. Med hänsyn till att jag inte kunde veta vilken av de 4 mätpositionerna som skulle visa de mest tillförlitliga resultaten gick det inte heller att använda den på rätt sätt. De tillfällen då temperaturloggaren användes genomfördes inga U-värdesmätningar på grund av att förändringarna i utetemperaturen var för låga. Vid en undersökning på vintern med större temperaturomslag kan temperaturloggarna användas för att mäta inomhusväggens temperaturskillnad. Övrig utrustning som hade resulterat i noggrannare resultat är en vindhastighetsmätare, det fanns ingen tillgänglig under tiden då mätningarna genomfördes och därför användes väderleksrapportens vindhastighet. På grund av att mätningarna genomfördes på 4:e våningen kan vindhastigheterna variera beroende på vid vilken fasad mätningen av vindhastigheten genomförs.

5.1 Förslag på fortsatt forskning

Den här undersökningen är av en kvantitativ art och ger resultat för just den här byggnaden. För att kunna göra en mer generaliserbar slutledning fordras mer tillförlitliga data som möjliggör en mer kvantitativ metod. Alternativt en undersökning där en testvägg konstrueras i en kontrollerad miljö där temperaturerna på vardera sida av väggen kan bestämmas. Detta kräver även att det appliceras termometrar inuti i väggen för att kontrollera de faktiska temperaturerna och kontrollera processen för hur temperaturen förändras i väggen vid olika temperaturskillnader. En sådan undersökning är tidskrävande men skulle hypotetiskt kunna generera resultat som kunde användas för att skapa dynamiska beräkningar. En aspekt som inte tagits i beaktande under den här undersökningen är solstrålningens inverkan på väggtemperaturen. Solstrålningens effekt kan vara svårare att kontrollera för kortare perioder då den under korta perioder kan variera kraftigt. En undersökning över en längre tidsperiod skulle även generera mer tillförlitliga resultat.

Det går att räkna ut en tidskonstant med hjälp av den data som producerats under den här undersökningen. Men temperaturförändringarna är dock okontrollerade vilket skulle resultera i olika tidskonstanter beroende på vilken mätperiod som väljs. Om den termiska massan är känd går det att räkna ut tidskonstanten med hjälp av de totala energiförlusterna (som fås genom en energianalys medelst U-värdesmätare). För att genomföra det fordras det att hela konstruktionens material och tjocklekar är kända.

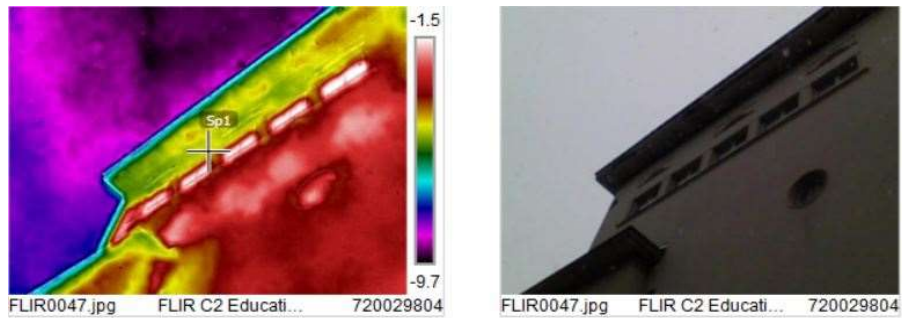
KÄLLOR

- [1] Future Climate Change (2017, Apr. 2). National Climate Assessment. U.S. Global Research Program. [Online]. Tillgänglig: <http://nca2014.global-change.gov/report/our-changing-climate/future-climate-change>
- [2] *Grönbok – En ram för klimat- och energipolitiken fram till 2030*, Europeiska Kommissionen, Bryssel, Belgien, COM(2013) 169 final, Mar. 2013.
- [3] *Om byggnaders energiprestanda*, Europaparlamentets och Rådets Direktiv, Bryssel, Belgien, 2010/31/EU, 19 Maj. 2010.
- [4] J. Hulme, S. Doran, "In-situ measurements of wall U-values in English housing," BRE, Watford, England, Rep. 290-102, 4 jul. 2014.
- [5] *Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance, Part 1: Heat flux meter method*, ISO 9869-1:2014, 2014.
- [6] D. Wood. (2017, Apr. 4). Thermal Equilibrium: Definition, Formula & Example. [Online]. Tillgänglig: <http://study.com/academy/lesson/thermal-equilibrium-definition-formula-example.html> Hämtad: 21 mars 2017.
- [7] Incropera et. al. *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6:e upplagan, Hoboken, NS: John Wiley & Sons inc., 2007.
- [8] Y. A. Cengel, M. A. Boles, *Thermodynamics, an engineering approach*, 7:e upplagan, McGraw-Hill, New York, 2011.
- [9] B. Petersson, *Tillämpad Byggnadsfysik*, 3:e upplagan, Lund, Sverige: Studentlitteratur, 2007.
- [10] *U-value meter manual*, Arcada UAS, Helsingfors, Finland, 2016.
- [11] M. Lotvonen, *Renovationsritningar – Minervaskolan*, Pontek Oy, Esbo, 2015.
- [12] What is a U-value. Arcada. [Online]. Tillgänglig: <http://rdi.arcada.fi/energy/en/> Hämtad 25 april 2017.
- [13] J. A. Richards, J. Xiuping, *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. 4:e upplagan. Springer-Verlag, Berlin, Tyskland. 2016.

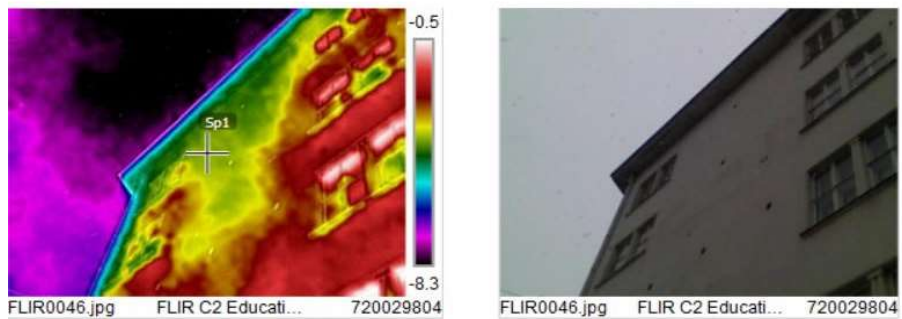
- [14] *User's manual – FLIR Cx series*, FLIR Systems, 2017.
- [15] *Stanley User Manual*, Stanley Tools, 2015.
- [16] Finska Metrologiska Institutet. Väderdata, datum-temperatur. [Online]. Tillgänglig: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/open-data> Hämtad: 23 april 2017.
- [17] *Miljöministeriets förordning om värmeisolering*, C4 Finlands Byggbestämmelsesamling, Finland, Helsingfors, 2003.
- [18] *Miljöministeriets förordning om byggnaders energiprestanda*, D3 Finlands Byggbestämmelsesamling, Finland, Helsingfors, 2012.

BILAGOR

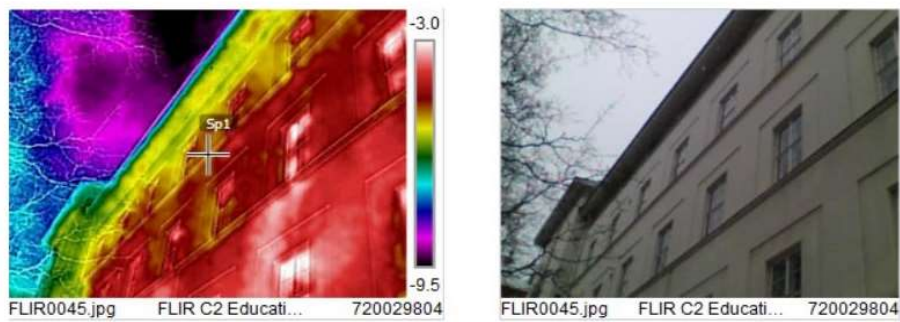
Bilaga A – Termografi för ytterväggar vid respektive mätposition



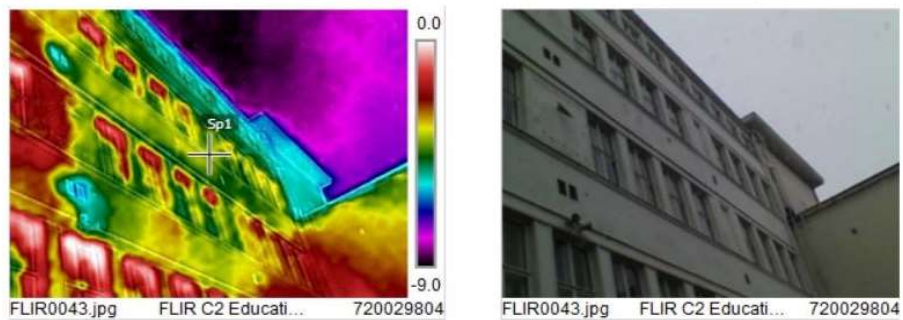
IR-fotografi för mätposition #23, musikrum.



IR-fotografi för mätposition #18, resursrum.

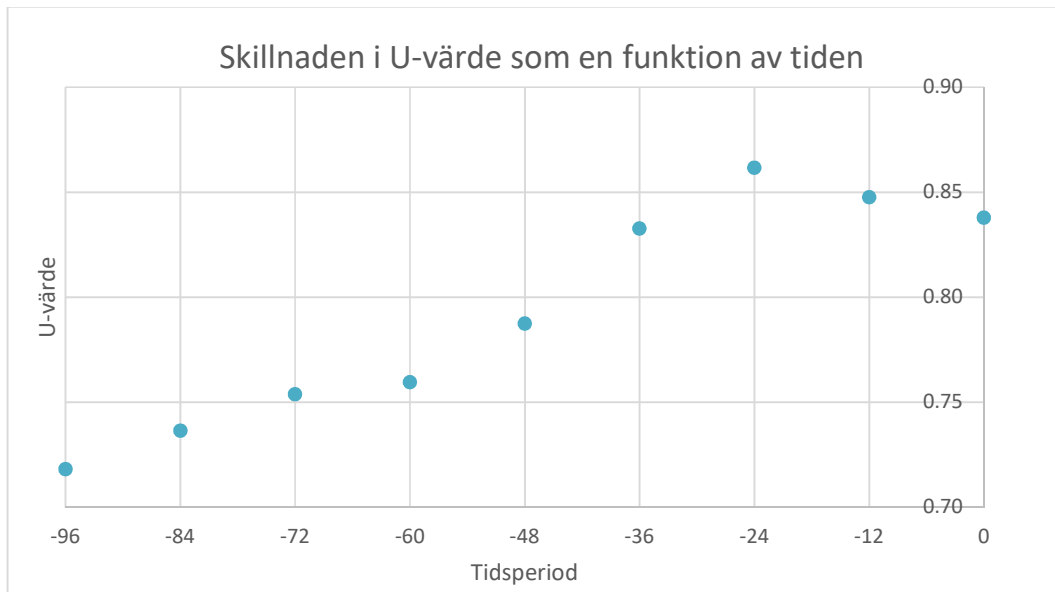


IR-fotografi för mätposition #18, korridor.

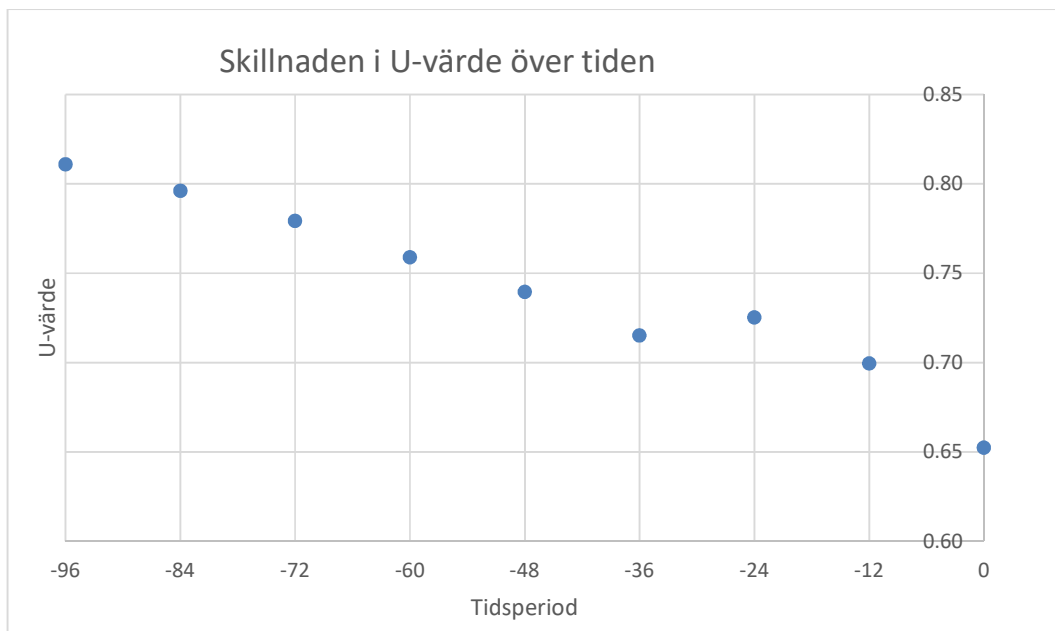


IR-fotografi för mätposition #44, klassrum.

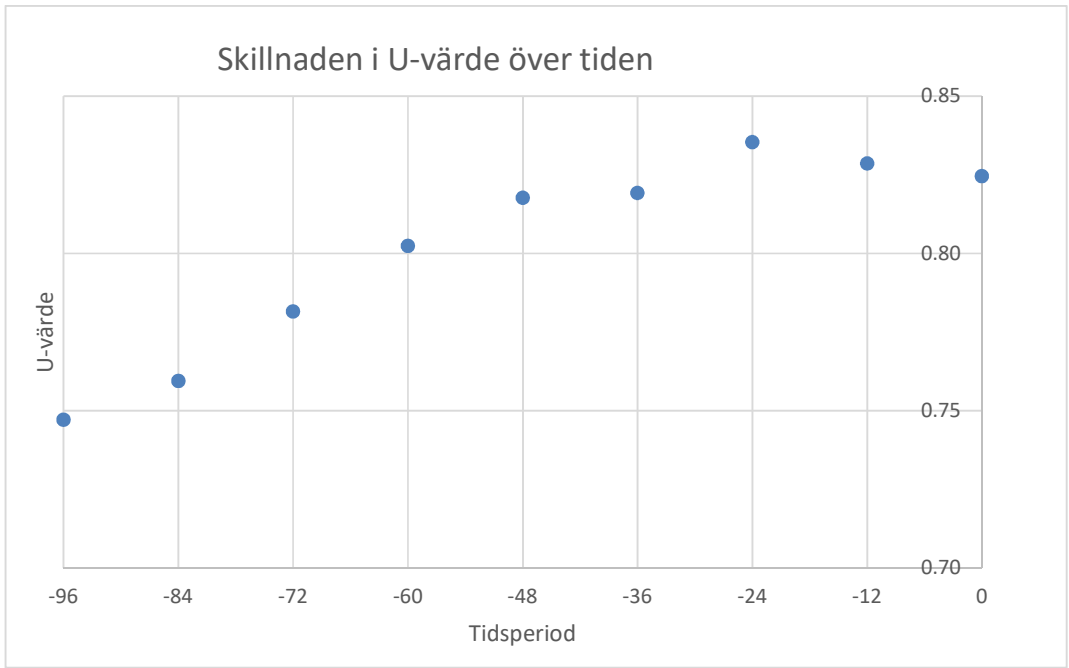
Bilaga B – Grafer för U-värdets förändring som funktion av tiden



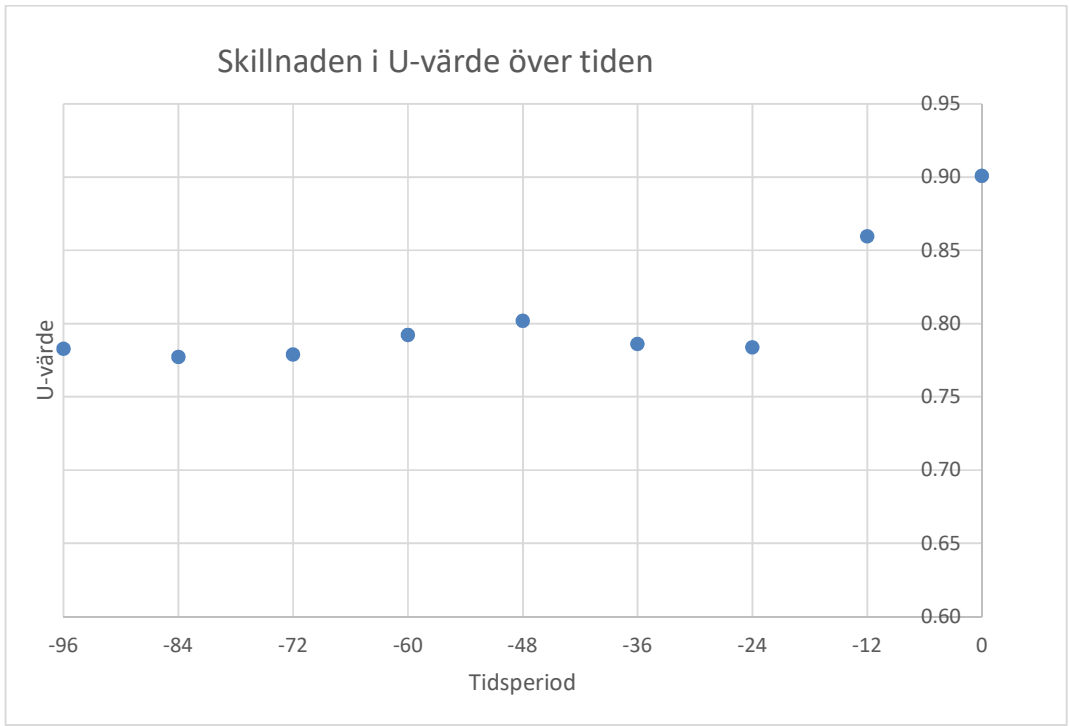
Figur 18. U-värdets förändring i förhållande till tidsperioden, 25 feb - 1 mar.



Figur 19. U-värdets förändring i förhållande till tidsperioden, 2 mar - 6 mar.



Figur 20. U-värdets förändring i förhållande till tidsperioden, 6 mar - 10 mar.



Figur 21. U-värdets förändring i förhållande till tidsperioden, 2 mar - 6 mar.

sdf

Bilaga C – Mätresultat

Datum	Position	X/Y [m]	Orientering	Mätare	Tidpunkt	Vindhast. [m/s]	T,ute [C]	Mättid [min]	P [mW]	T,vägg [C]	U-värde
23.02.2017	Korridor	10.9/2.4	N	16	9:00	4	0.5	65	138	15.75	0.81
	Korridor	10.9/2.5	N	16	10:30	4	0.5	55	157	15.75	0.91
	Musikrum	8.7/2.2	Ö	23	9:08	4	0.5	60	122	16.375	0.70
	Musikrum	8.7/2.2	Ö	23	10:45	4	0.5	70	141	16.25	0.80
24.02.2017	Korridor	10.9/2.4	N	16	8:30	5	-5	55	123	15.4375	0.56
	Musikrum	8.7/2.2	Ö	23	8:25	5	-5	65	152	16.625	0.64
01.03.2017	Korridor	10.9/2.4	N	16	7:34	7	1.8	70	123	16.125	0.78
	Klassrum	0.55/2.2	S	44	7:31	7	1.8	70	148	17.6875	0.84
	Musikrum	8.7/2.2	Ö	23	7:38	7	1.8	75	119	16.5	0.74
02.03.2017	Korridor	10.9/2.4	N	16	7:29	5	2.1	70	122	16.375	0.77
	Klassrum	0.55/2.2	S	44	7:32	5	2.1	50	133	17.8125	0.76
	Musikrum	8.7/2.2	Ö	23	7:36	5	2.1	70	118	16.9375	0.72
06.03.2017	Korridor	10.9/2.4	N	16	7:33	6	-6.5	50	133	15.6875	0.56
	Klassrum	0.55/2.2	S	44	7:37	6	-6.5	65	184	19.3125	0.65
	Musikrum	8.7/2.2	Ö	23	7:39	6	-6.5	70	157	17.1875	0.61
10.03.2017	Resursrum	2.4/2.7	V	18	7:30	5	1.2	70	115	15.1875	0.74
	Korridor	10.9/2.4	N	16	7:19	5	1.2	50	156	16.3125	0.91
	Klassrum	0.55/2.2	S	44	7:22	5	1.2	60	154	17.875	0.82
	Musikrum	8.7/2.2	Ö	23	7:26	5	1.2	50	111	16.375	0.67
11.03.2017	Resursrum	2.4/2.7	V	18	7:28	4	1.7	85	129	15.5625	0.83
	Korridor	10.9/2.4	N	16	7:18	4	1.7	70	130	16.5	0.79
	Klassrum	0.55/2.2	S	44	7:21	4	1.7	55	146	19.3125	0.75
	Musikrum	8.7/2.2	Ö	23	7:24	4	1.7	80	127	17.1875	0.74
06.04.2017	Resursrum	2.4/2.7	V	18	18:20	6	6	55	131	17.375	1.00
	Korridor	10.9/2.4	N	16	18:25	6	6	70	119	17.5625	0.91
	Klassrum	0.55/2.2	Ö	44	18:18	6	6	55	146	20.3125	0.90
	Musikrum	8.7/2.2	S	23	18:22	6	6	75	85	17.625	0.67