

Ydeevne af eksisterende bygningsdele

Notat om afprøvede metoder

GI GRUNDEJERNES
INVESTERINGSFOND



Titel

Ydeevne af eksisterende bygningsdele
Notat om afprøvede metoder

Forfattere

Lars Thomsen Nielsen, Seniorspecialist
Lies Vanhoutteghem, Konsulent
Center for Glas og Vinduer, Teknologisk institut

Dato

2018

Notat om afprøvede metoder

Dette notat er udarbejdet i forbindelse med projektet ”Ydeevne af eksisterende bygningsdele”, som er finansieret af InnoBYG og Grundejernes Investeringsfond. Formålet med projektet var, at udvikle og teste en ny metode, som kan være med til at bestemme ydeevnen af eksisterende ydervægge og vinduer.

Der blev i projektet undersøgt forskellige metoder til dokumentation af ydeevne af eksisterende bygningsdele til udvikling af en ny metode. Metoden er baseret på anvendelse af en accelereret temperaturpåvirkning, ved brug af en varmemefolie, for en hurtig bestemmelse af U-værdien. Her har målsætningen været at bestemme en konstruktions U-værdi ud fra et opvarmningsforløb for konstruktionen. Der har i projektføreløbet vist sig udfordringer med brug af metoden på ydervægskonstruktionen. Især varmekapaciteten i tunge ydervægge, har haft større betydning end forventet, specielt for varigheden af varmepåvirkningen. Derfor blev der sideløbende arbejdet med at korrelere målinger med simuleringer for at kunne udvide anvendelsesområde for forskellige konstruktioner. Dette har vist sig nyttigt og vil være noget der kunne arbejdes videre med. Metoden er eftervist og kan med visse forbehold anvendes på tunge ydervægskonstruktioner. Dette notat indeholder desuden information om supplerende målemetoder, der er blevet afprøvet, samt en gennemgang af deres resultater og usikkerheder ved anvendelse.

Der er i dette notat beskrevet fire forskellige metoder, hvoraf flere er kendte metoder. Disse er medtaget for at vise fordele og ulemper med deres anvendelse. Metode 2 omhandler den nye metode, modificeret fra andre lignende metoder, og det er den der er behandlet mest dybdegående i dette notat.

Indholdsfortegnelse

Notat om afprøvede metoder	3
Indholdsfortegnelse	4
1. Metode 1 – Temperaturforskelle og isolans	5
2. Metode 2 – Accelereret opvarmningsforløb	8
1.1. Håndvarmer	9
1.2. Gulvvarmeslanger.....	12
1.3. Varmefolie.....	13
1.4. Samkøring af data.....	17
1.5. Hot-Box test.....	20
1.6. Simuleringer	23
1.6.1. Ruder	23
1.6.2. Samkøring af data.....	25
1.6.3. Variationer i udetemperatur.....	26
1.6.4. Ydervægge.....	28
1.7. Onsite målinger på isoleret hulmurskonstruktion.....	33
1.7.1. Prøveopstilling.....	34
1.7.2. Usikkerhed.....	35
1.7.3. Termografi.....	36
1.7.4. Måleresultater	39
3. Metode 3 – Georadar	40
4. Metode 4 – Termografering.....	43
5. Energimærkning	44
6. Sammenfatning.....	46

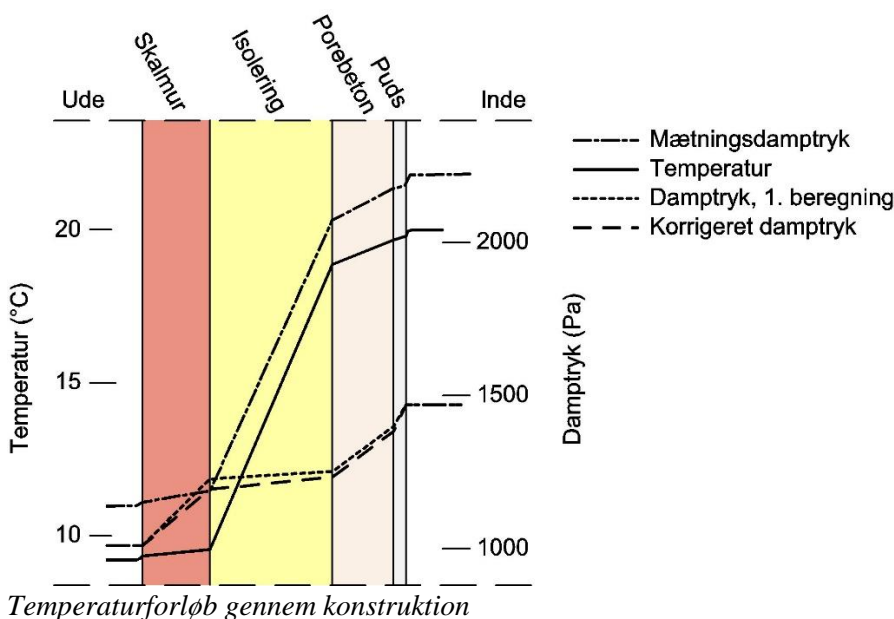
1. Metode 1 – Temperaturforskelle og isolans

Denne metode omhandler metoden beskrevet i SBI-anvisning 224 - Fugt i bygninger. Fra afsnit 6.2 fremgår følgende:

Bestemmelse af temperaturen igennem konstruktionen sker ved forholdstalsregning. Temperaturfaldet over et materialelag afhænger af det pågældende lags isolans. Det forhold, temperaturfaldet over et lag udgør af det samlede temperaturfald over konstruktionen, er derfor det samme som lagets isolans, R_m , i forhold til konstruktionens samlede isolans, ΣR .

Temperaturfaldet, ΔT_m , over lag "m" kan derfor beregnes som:

$$\Delta T_m = \left(\frac{R_m}{\Sigma R} \right) * (\Delta T_i - \Delta T_u)$$



Ved overgang til fra indetemperatur til indvendig overfladetemperatur sættes temperaturforskellen derfor i forhold til tilsvarende forskel i isolans.

$$\frac{T_i - T_{i0}}{T_i - T_u} = \left(\frac{R_i}{\Sigma R} \right)$$

hvor

$$\Sigma R = R_i + R_m + R_u$$

Ud fra dette kan R_m isoleres og bestemmes ud fra følgende udtryk:

$$R_m = \frac{R_i}{\frac{T_i - T_{i0}}{T_i - T_u}} - R_i - R_u$$

hvor

$R_i = 0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (indvendig overgangsisolans)

$R_u = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (udvendig overgangsisolans)

T_i = Indetemperatur

T_{io} = Indvendig overfladetemperatur

T_u = Udetemperatur

Afslutningsvis kan konstruktionens U-værdi bestemmes:

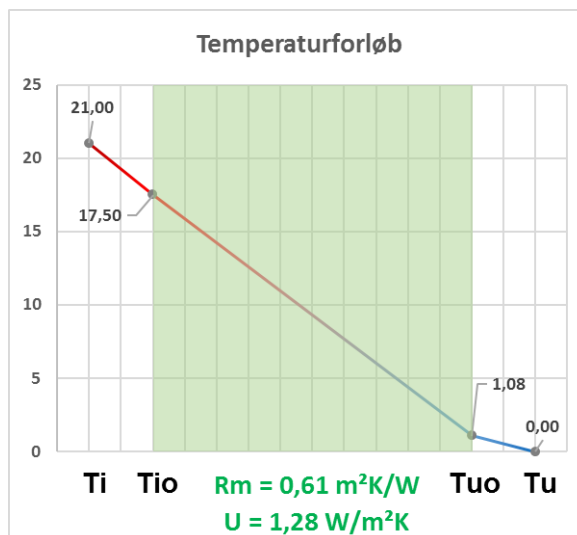
$$U = \frac{1}{R_i + R_m + R_u}$$

Eksempel

$T_i = 21^\circ\text{C}$

$T_{io} = 17,5^\circ\text{C}$

$T_u = 0^\circ\text{C}$



Figur 1: Principielt temperaturforløb gennem konstruktion

Bestemmelse af R_m :

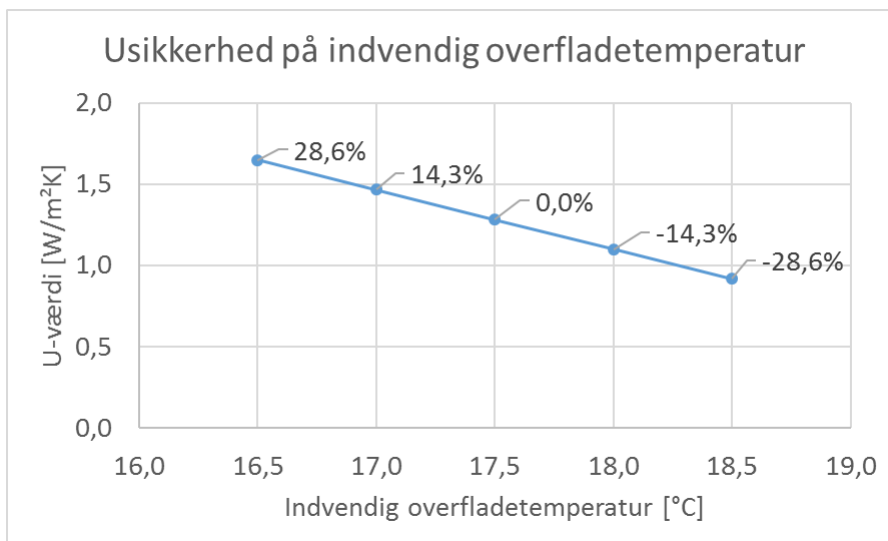
$$R_m = \frac{0,13}{\frac{21 - 17,5}{21 - 0}} - 0,13 - 0,04 = 0,61 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

Bestemmelse af U:

$$U = \frac{1}{0,13 + 0,61 + 0,04} = 1,28 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$$

Usikkerhed

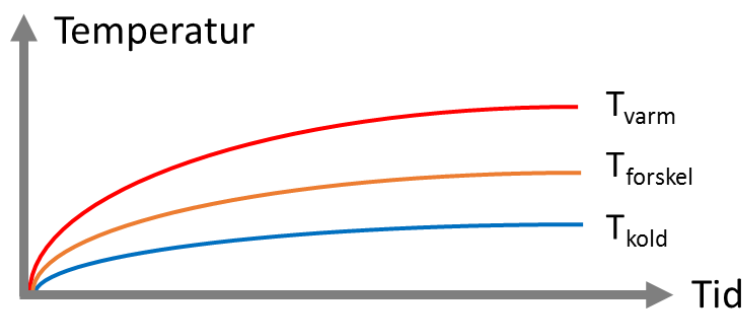
Der er usikkerhed på metoden, som primært relaterer sig til målingen af den indvendige overfladetemperatur. Ved en typisk målesituation vil en afvigelse af overfladetemperaturen på $0,5^\circ\text{C}$ give en forskel på 10-20% afhængigt af udetemperatur og konstruktionens opbygning. Metoden relaterer sig til faste tal for den indvendige og udvendige overgangsisolans, hvilket reelt ikke er helt korrekt, da disse ofte varierer noget. Endvidere kan en indvendig overfladetemperatur give misvisende temperaturer, hvis eksempelvis solen inden måling har påvirket konstruktionen og dermed har lagret energi, der så afspejler sig i en højere overfladetemperatur. Ligeledes vil en måling ud for en skjult kuldebro, fx fast murbinder, give anledning til temperaturer, der ikke er repræsentative for konstruktionen. Nedenstående graf viser betydningen af den målte indvendige overfladetemperatur.



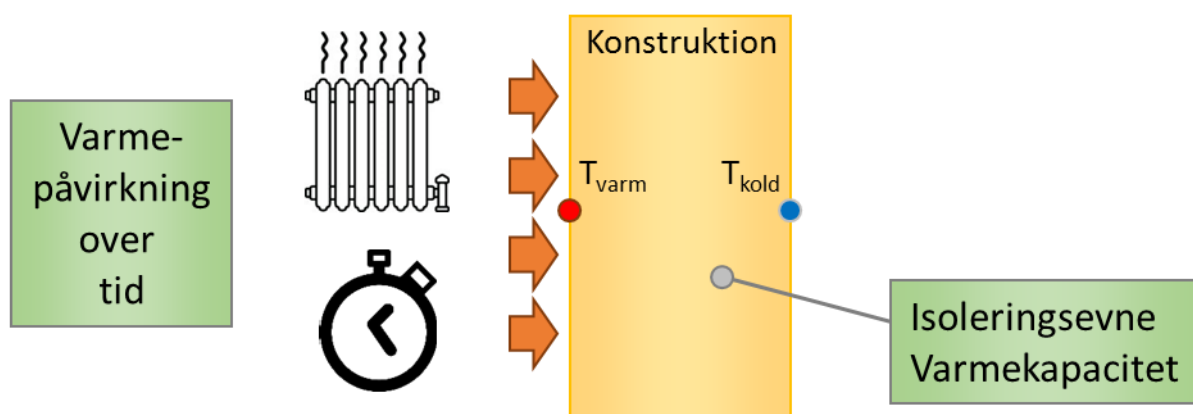
Figur 2: Usikkerhed for U-værdien afhængigt af målt overfladetemperatur

2. Metode 2 – Accelereret opvarmningsforløb

Denne metode er en nyudviklet metode, der er udsprunget af nye idéer kombineret med eksisterende metoder. De kendte metoder er beskrevet i særskilt ”Notat om målemetoder”. Den nye metode går på at opvarme den ene side af en konstruktion og registrere opvarmningsforløbet på begge sider af konstruktionen. Ud fra temperaturforskellen over tid under varmepåvirkning er målet at kunne bestemme en U-værdi.



Figur 3: Forventet temperaturforløb af accelereret opvarmningsforløb

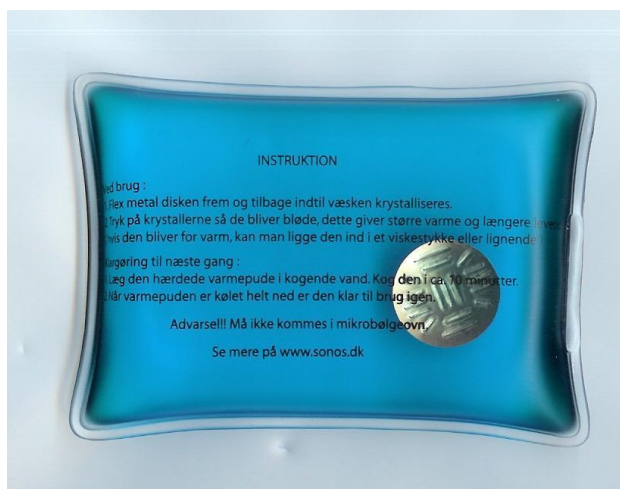


Figur 4: Principiel opstilling af accelereret opvarmningsforløb

Der er prøvet forskellige opvarmningsmetoder af konstruktionen, som behandles i det følgende.

1.1. Håndvarmer

Der findes forskellige mobile håndvarmere, der er nemme at anvende og som inden for kort tid (under 1 minut) opnår en relativ høj og konstant temperatur (typisk omkring 50°C).



Figur 5: Håndvarmer



Figur 6: Håndvarmer udløses ved knæk

Håndvarmerne har en række fordele, men også flere ulemper, som nævnt her:

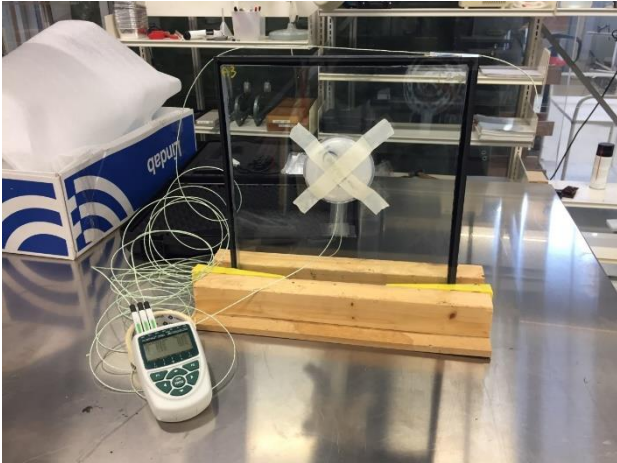
Fordele

- Nem at have med rundt
- Billig
- Kræver ikke strøm (ledninger)
- Kan ”genoplades”

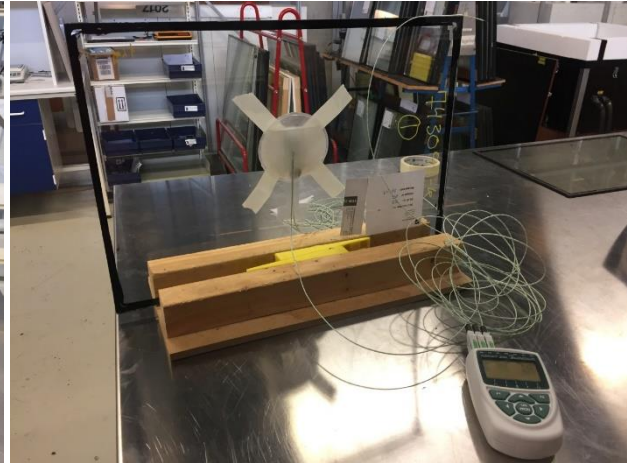
Ulemper

- Begrænset varmemængde i håndvarmer
- Holder ikke helt konstant temperatur på varm side
- Fylder ikke stort nok areal (varmefordeling i hulrummet i rude er uhensigtsmæssigt)
- Lidt bøvelat at ”genoplade” håndvarmere

Nedenstående billede viser opstillingen til accelereret opvarmningsforløb med håndvarmer anvendt på en lille energirude.

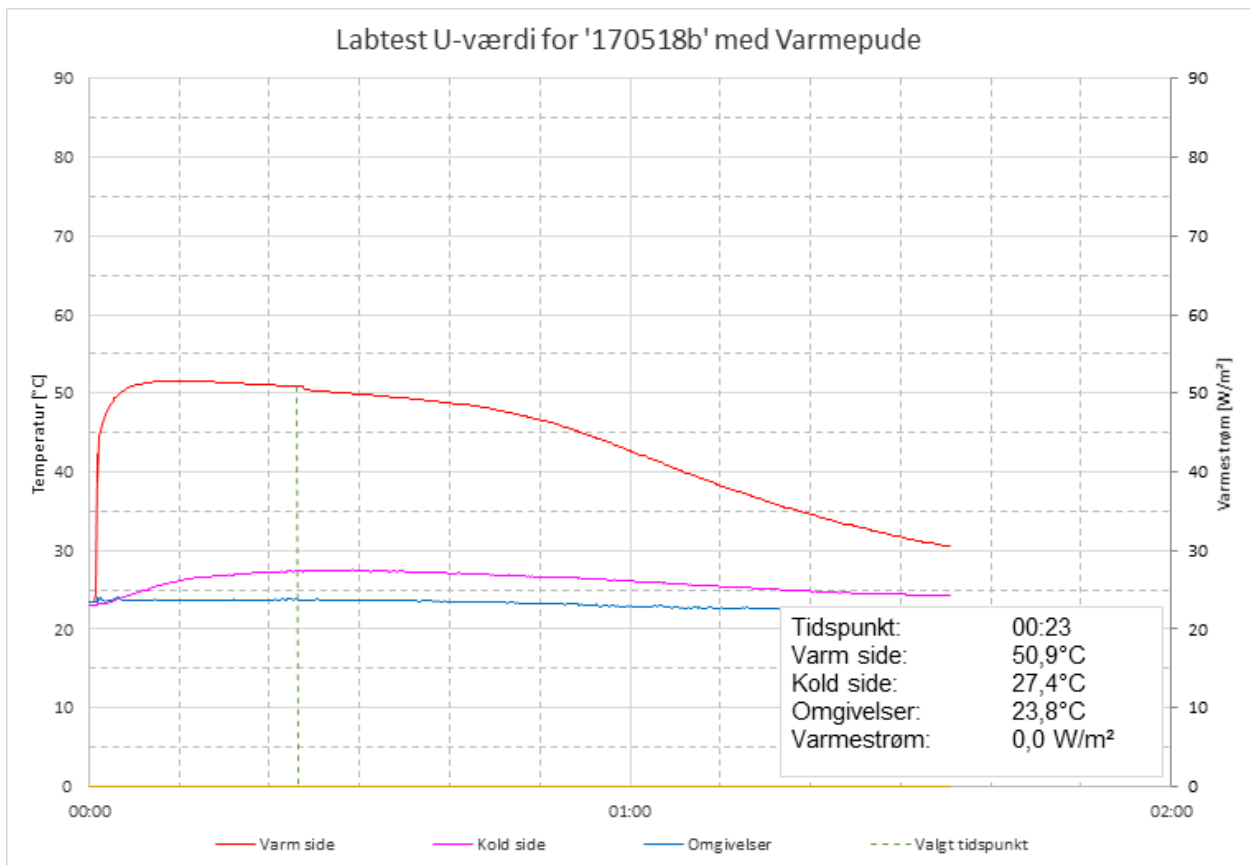


Figur 7: Opstilling set fra "varm" side



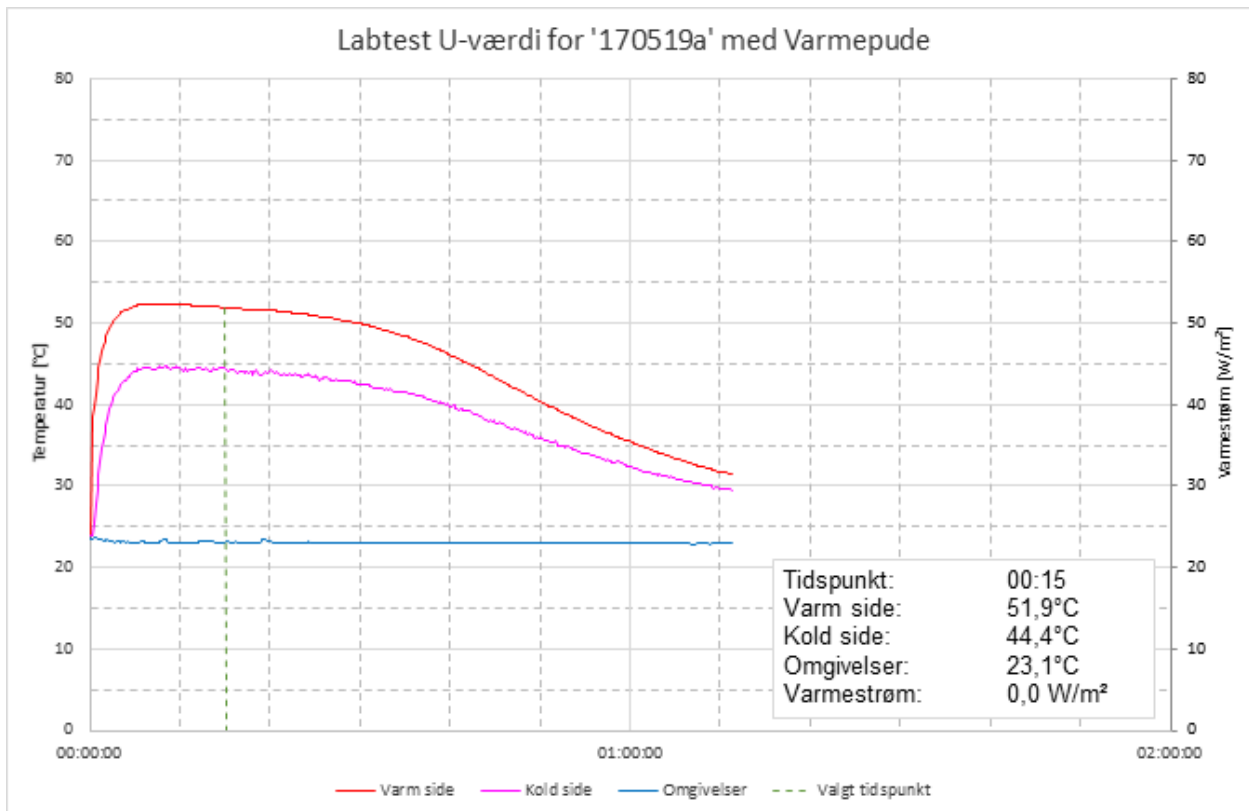
Figur 8: Opstilling set fra "kold" side

Følgende graf viser temperaturforløbet af opvarmningsforsøget for energiruden.



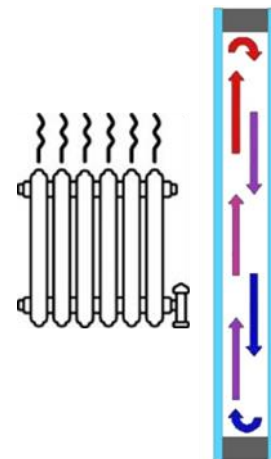
Figur 9: Graf med opvarmning af energirude med varmepude

Følgende graf viser temperaturforløbet af opvarmningsforsøget for et et-lags glas.



Figur 10: Graf med opvarmning af et-lags glas med varmepude

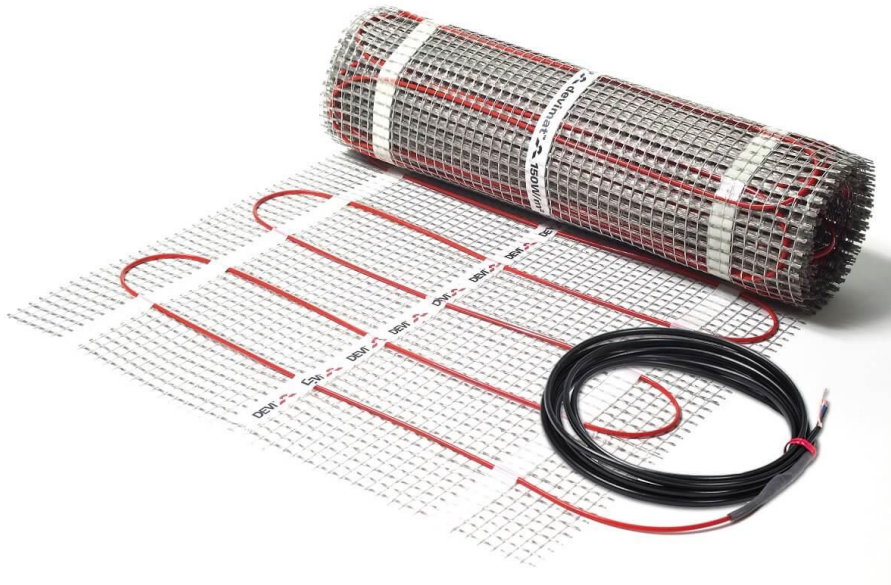
Det er værd at bemærke at temperaturen på varm side ikke kan holdes helt konstant. Opvarmningsmetoden vurderes ikke god nok til at måle på konstruktioner med hulrum, da der vil skabes cirkulation i hulrummet og dermed ikke stationære forhold.



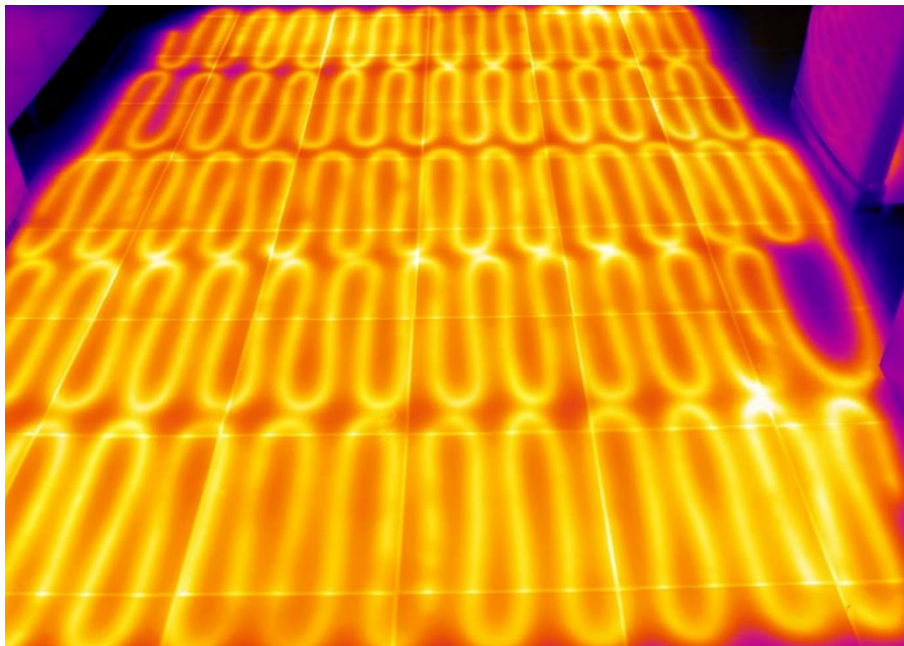
Figur 11: Cirkulation i hulrum

1.2. Gulvvarmeslanger

En billig opvarmning af større arealer findes i elektriske gulvvarmemåtter, som vist nedenfor. Denne løsning er dog ikke anvendt i projektet, da de ikke vurderes at have jævn nok varmfordeling.



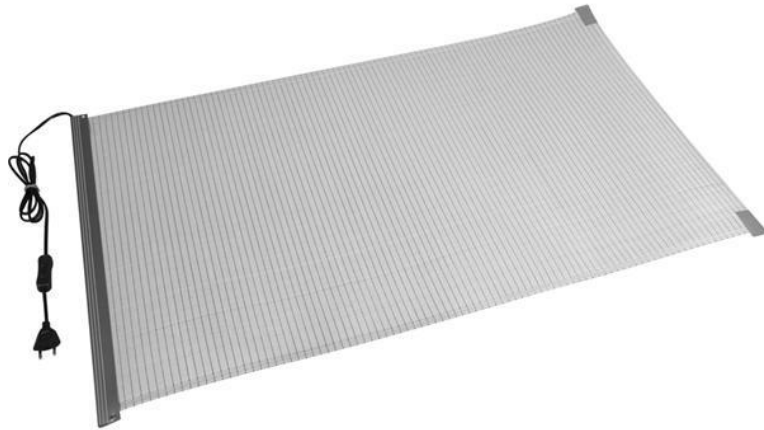
Figur 12: Elektrisk gulvvarmematte



Figur 13: Termografi af gulv med gulvvarme med "ujævn" varmfordeling

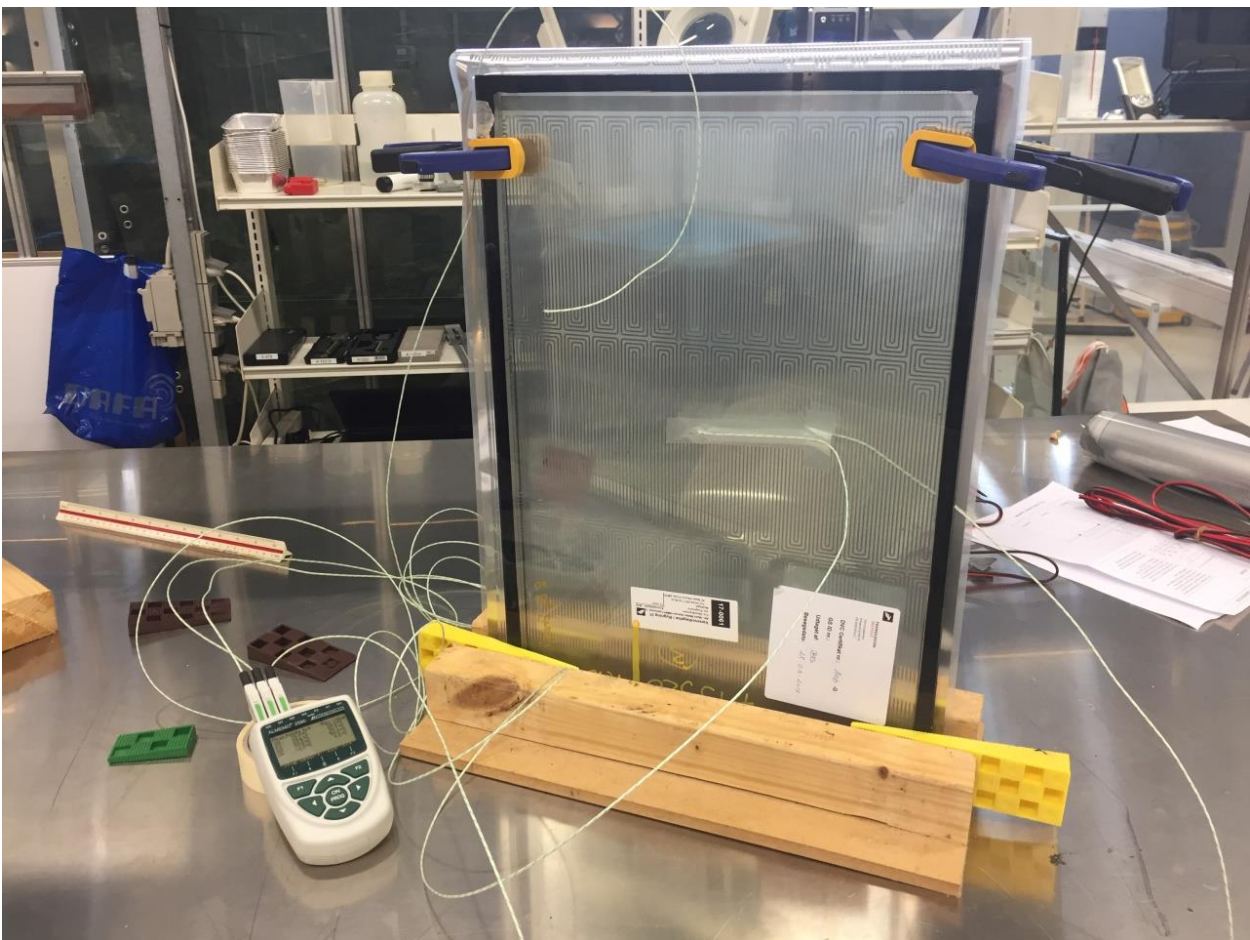
1.3. Varmefolie

Jævn varmepåvirkning over stort område kan opnås ved hjælp af varmemefolie, der normalt anvendes til gulvvarme, fx i campingvogne.



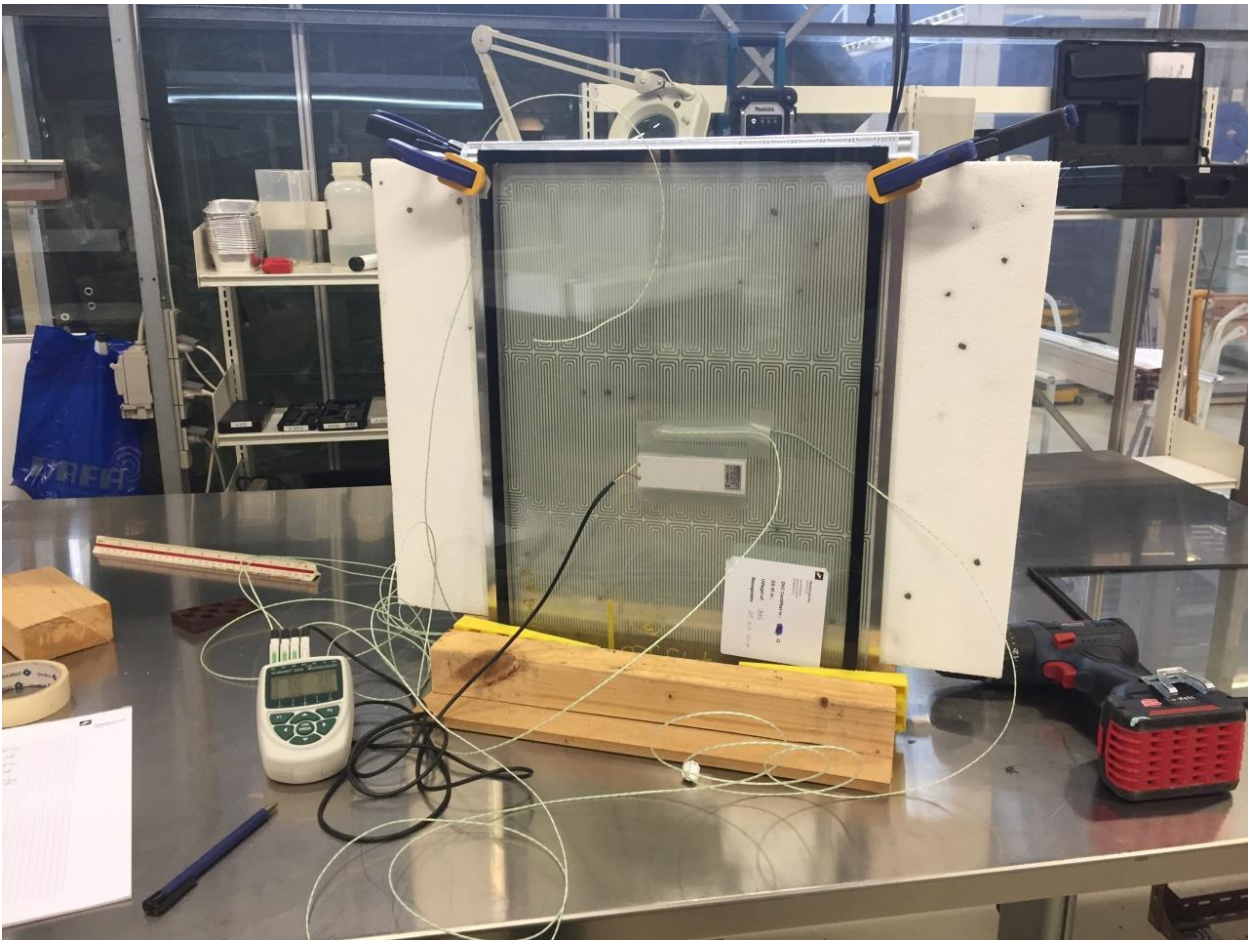
Figur 14: Gulvvarmemefolie med jævn varmefordeling

Folien kan afhængigt af tilført spænding give en effekt på mellem 70 og 80 W pr m². Opstilling for opvarmningsforsøg er vist nedenfor.



Figur 15: Gulvvarmemefolie opsat på energirude

Opstillingen viste at folien er ikke i stand til at hæve overfladetemperaturen på varm side ret meget, da en stor del af varmetabet sker direkte til omgivelserne. Derfor er opstillingen tilpasset med et stykke isolerende EPS op ad varmemefolien, der samtidigt sikrer direkte kontakt af folien til glasset.

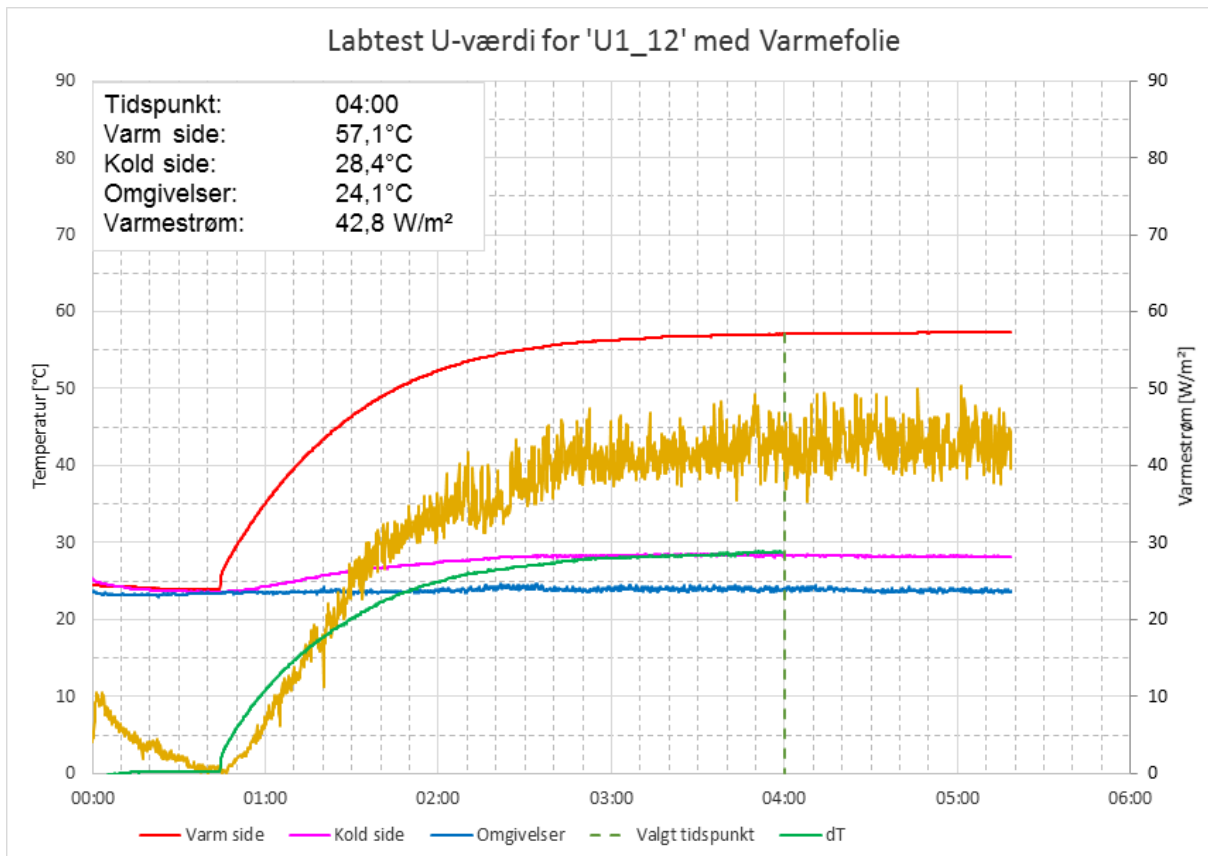


Figur 16: Gulvvarmefolie opsat på energirude med isolerende EPS på bagsiden

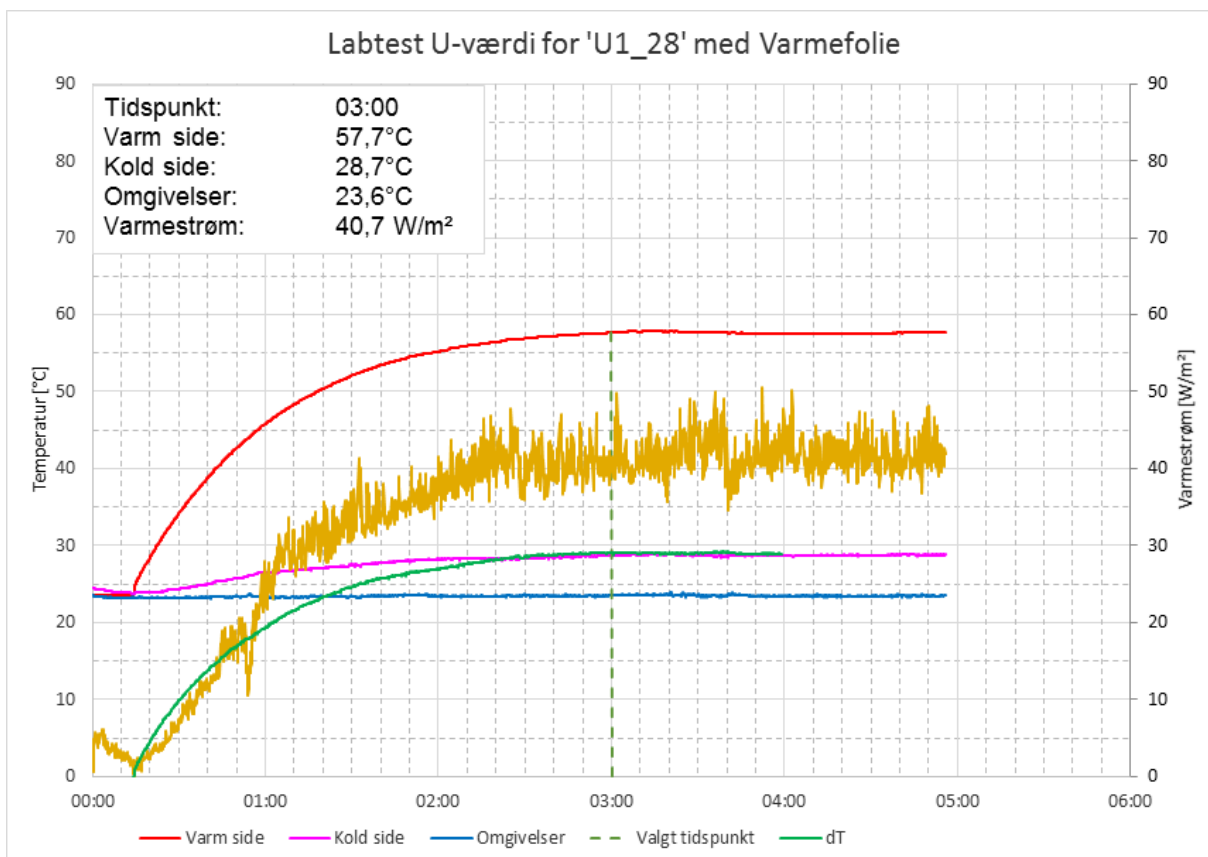
Der er lavet en del forsøg med forskellige rudetyper og i det følgende er fem forsøg valgt ud:

- To-lagsrude med forventet U-værdi på $1,12 \text{ W/m}^2\text{K}$
- To-lagsrude med forventet U-værdi på $1,28 \text{ W/m}^2\text{K}$
- To-lagsrude med forventet U-værdi på $2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Et-lags glas med forventet U-værdi på $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- To lag glas med 36 mm EPS i "hulrummet" med forventet U-værdi på $0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$

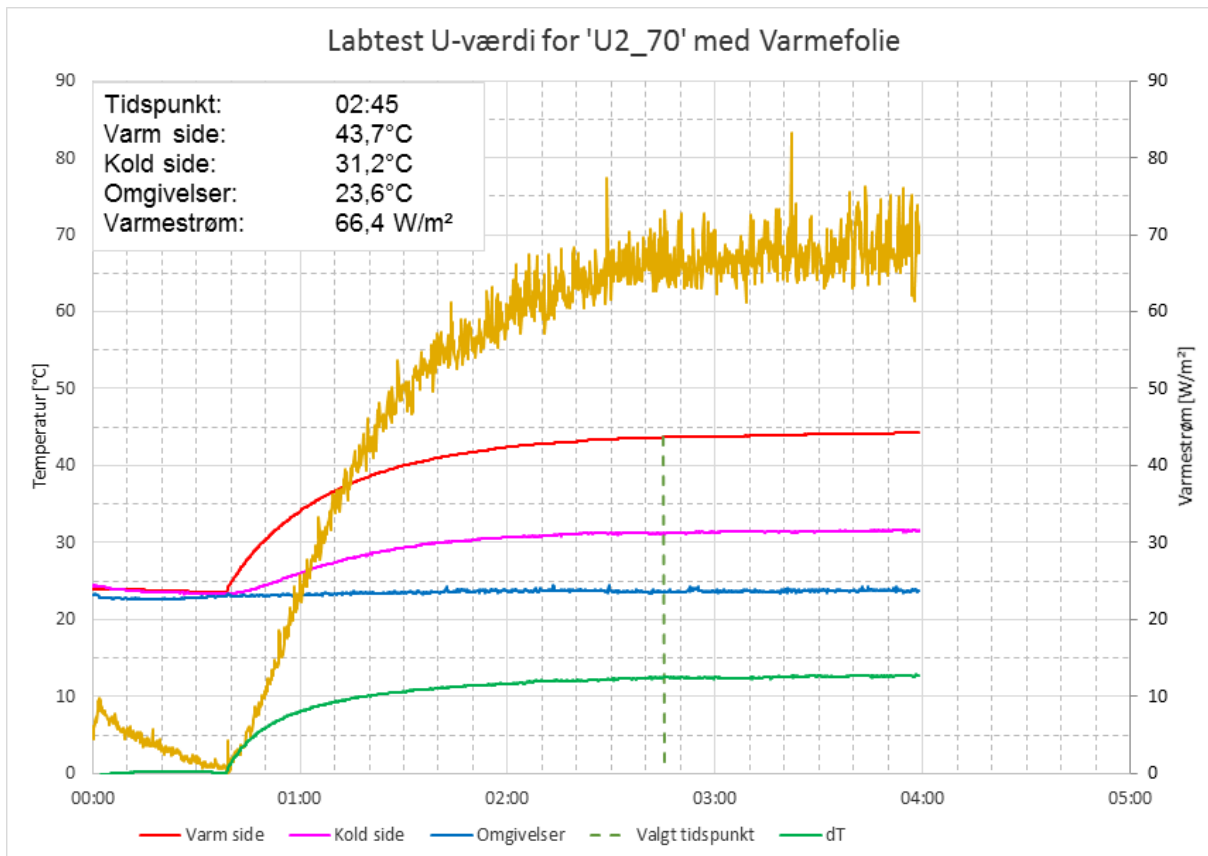
I det følgende er opvarmningsforløbet for de fem konstruktioner vist. Den grønne stiplede lodrette streg på graferne indikerer det tidspunkt hvor der er rimeligt konstante temperaturer på henholdsvis varm og kold side. Beregning af U-værdier ud fra disse temperaturer giver udemærkede overensstemmelser mellem teori og praksis.



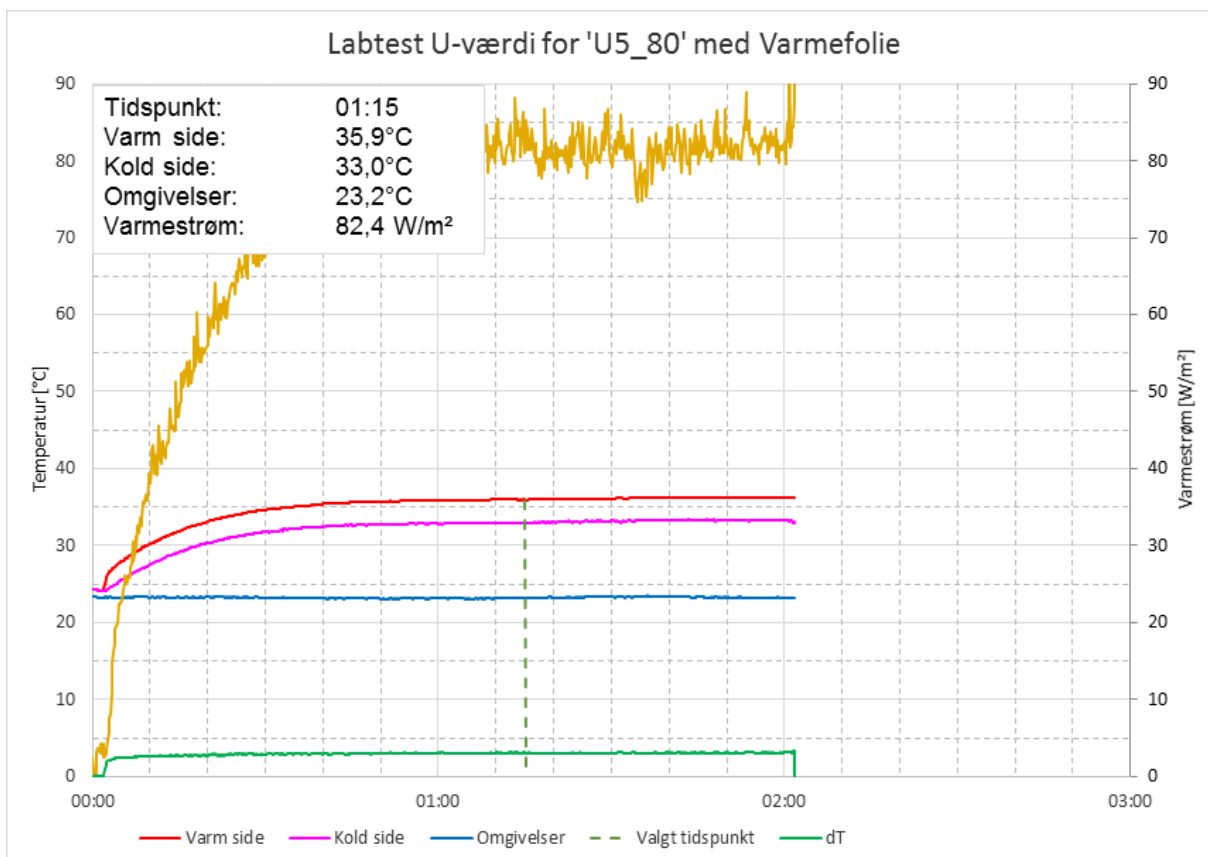
Figur 17: Test på to-lagsrude med forventet U-værdi på 1,12 W/m²K



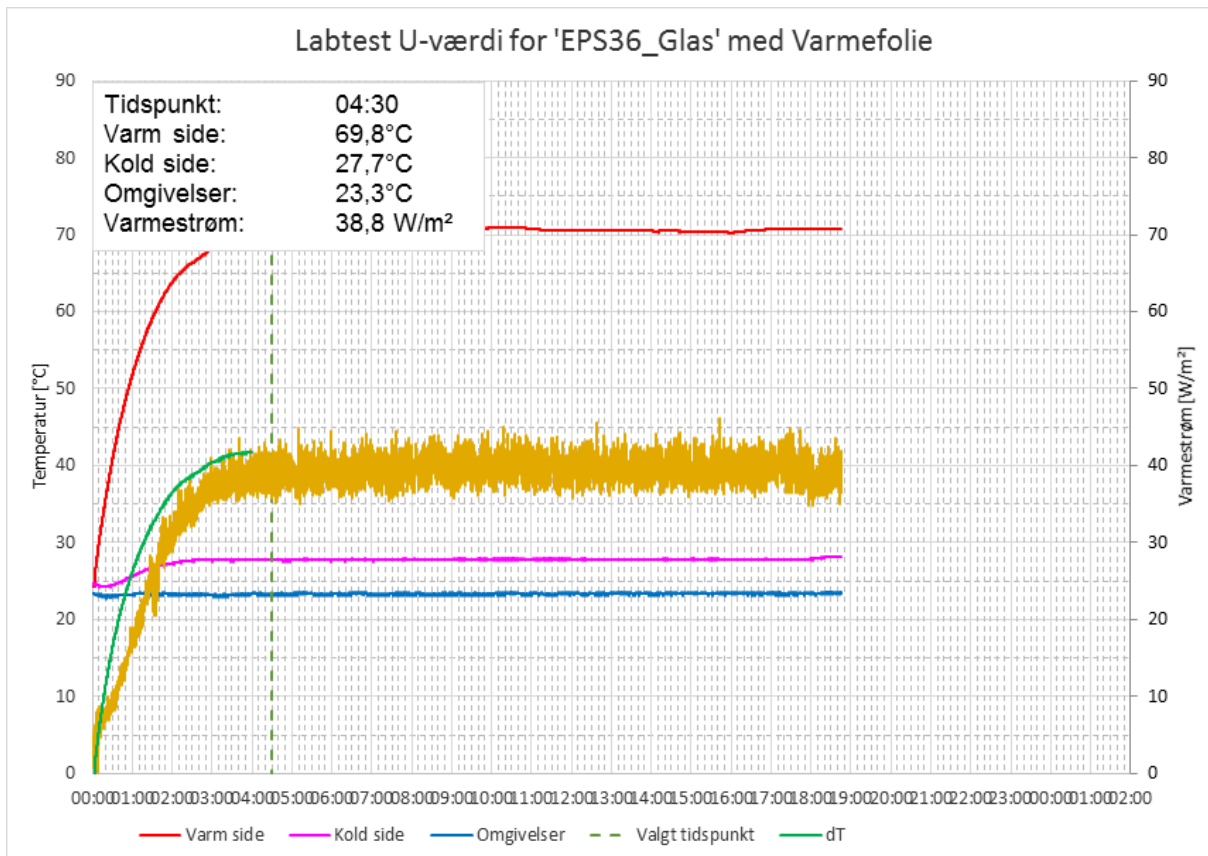
Figur 18: Test på to-lagsrude med forventet U-værdi på 1,28 W/m²K



Figur 19: Test på to-lagsrude med forventet U-værdi på 2,7 W/m²K



Figur 20: Test på et-lags glas med forventet U-værdi på 5,8 W/m²K



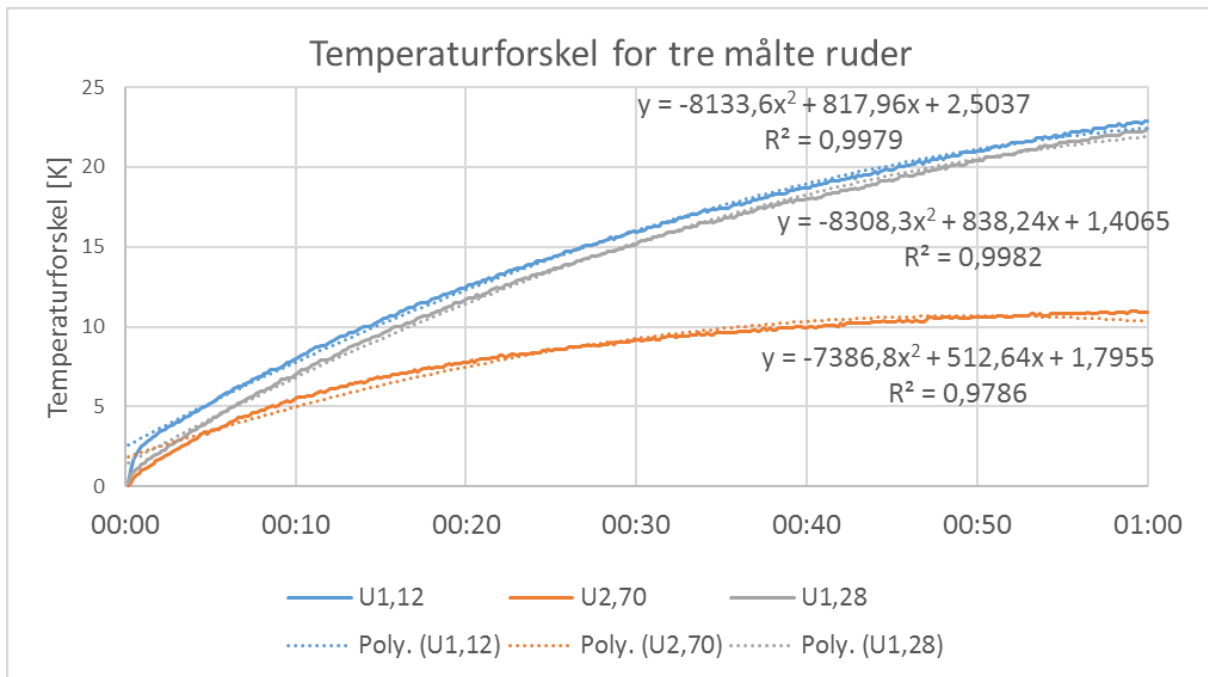
Figur 21: Test på to glas med 36 mm EPS i "hulrummet" med forventet U-værdi på 0,77 W/m²K

1.4. Samkøring af data

For at undersøge om det er muligt at bestemme en konstruktions U-værdi før der opnås steady-state (ligevægt), så er lavet analyser på selve opvarmningsforløbet når der påføres en konstant varmepåvirkning. I det følgende er der kun medtaget det forløb hvor selve opvarmningen sker, dvs. til tid 0 er temperaturforskellen 0,0 K. De tre viste ruder, der er medtaget har følgende forventede U-værdier:

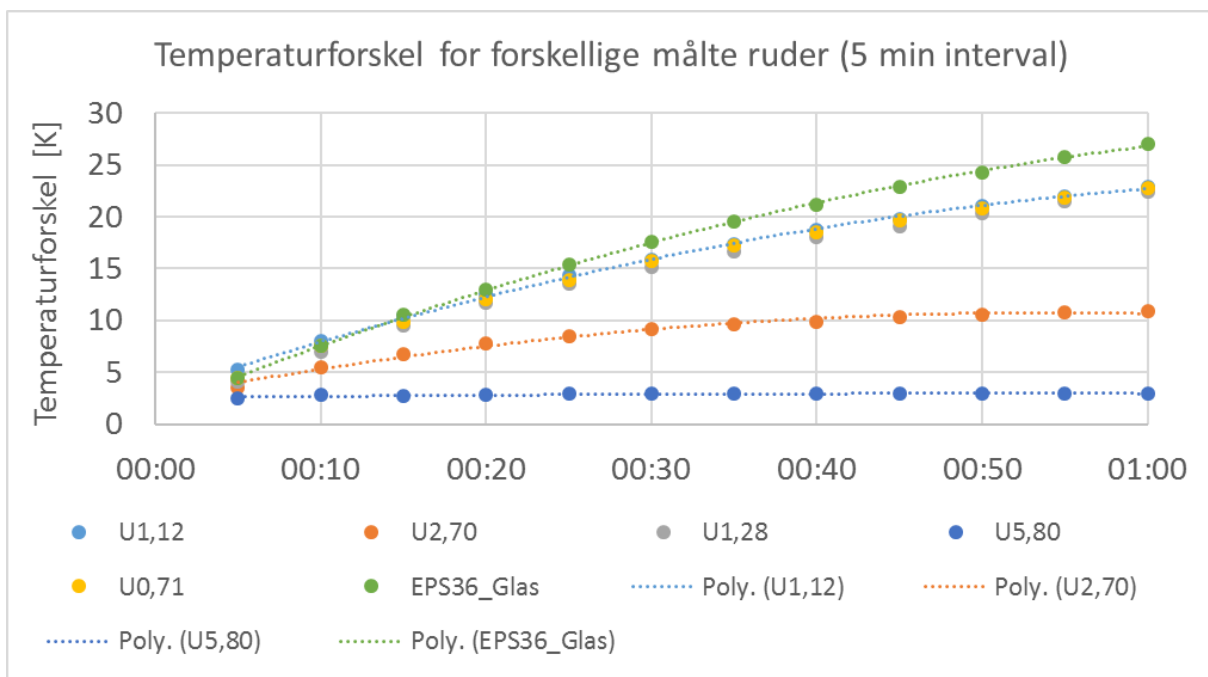
- To-lags rude med forventet $U = 1,12 \text{ W/m}^2\text{K}$
- To-lags rude med forventet $U = 1,28 \text{ W/m}^2\text{K}$
- To-lags rude med forventet $U = 2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$

Nedenstående graf viser opvarmningsforløbet for det tre ruder. Det fremgår at grå og blå kurve følger hinanden ret præcist, dog en anelse parallelforskuet. Samhørende målinger med heat flux meter viser sig at ruderne har samme U-værdi, så data skrevet på den ene rude har været forkerte. Det er altså muligt at bruge metoden til at sammenligne forskellige ruder.



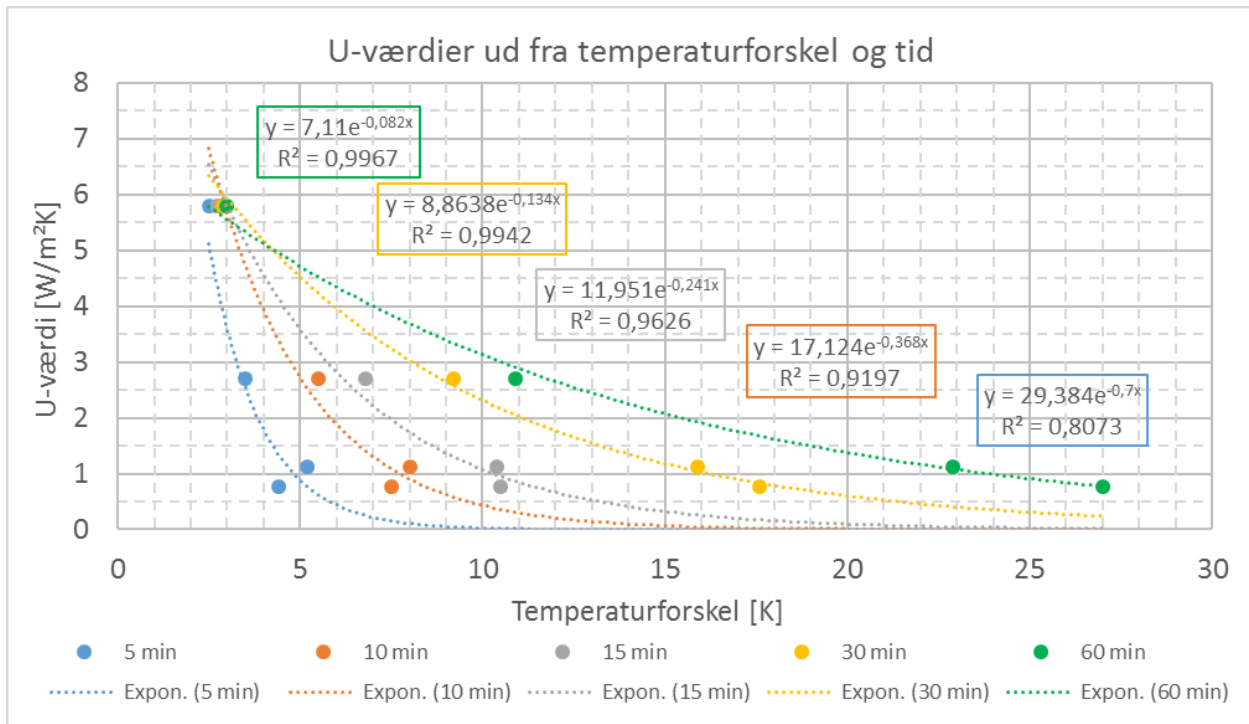
Figur 22: Opvarmningsforløbet for tre ruder

Følgende graf viser fem forskellige målte ruder opdelt i fem minutters intervaller. Det ses af grafen at der er tre datasæt, der ligger mere eller mindre oven i hinanden (U1,12, U1,28, U0,71). Samhørende målinger med heat flux meter viser sig at ruderne har samme U-værdi.



Figur 23: Test på fem forskellige målte ruder opdelt i fem minutters intervaller

Databehandling på ovenstående figur gør det muligt at danne ”tidsbestemte formler”, som man kan bestemme U-værdien ud fra, fx i et regneark. Grafmæssigt kan det visualiseres som vist på nedenstående graf, hvor de tilhørende ”tidsbestemte formler” også er vist.



Figur 24: U-værdibestemmelse ud fra temperaturforskel og tid

Eksempel

Måler man over en konstruktion en temperaturforskel på 10 grader efter 15 minutter, så viser grafen (grå kurve) at U-værdien er ca. 1,1 W/m²K.

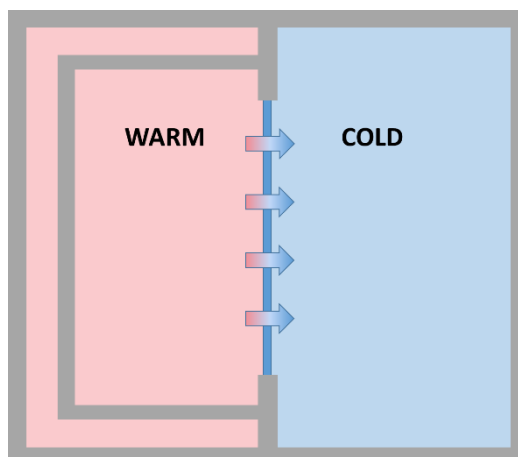
Beregning af U-værdi ud fra ”grå” formel: $U = 11,951 * e^{-0,241 * 10} = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$

1.5. Hot-Box test

Til korrekt bestemmelse af U-værdier for konstruktioner har der været anvendt Hot-boxen hos Teknologisk Institut. Hot-boxen med principiel opbygning er vist nedenfor.



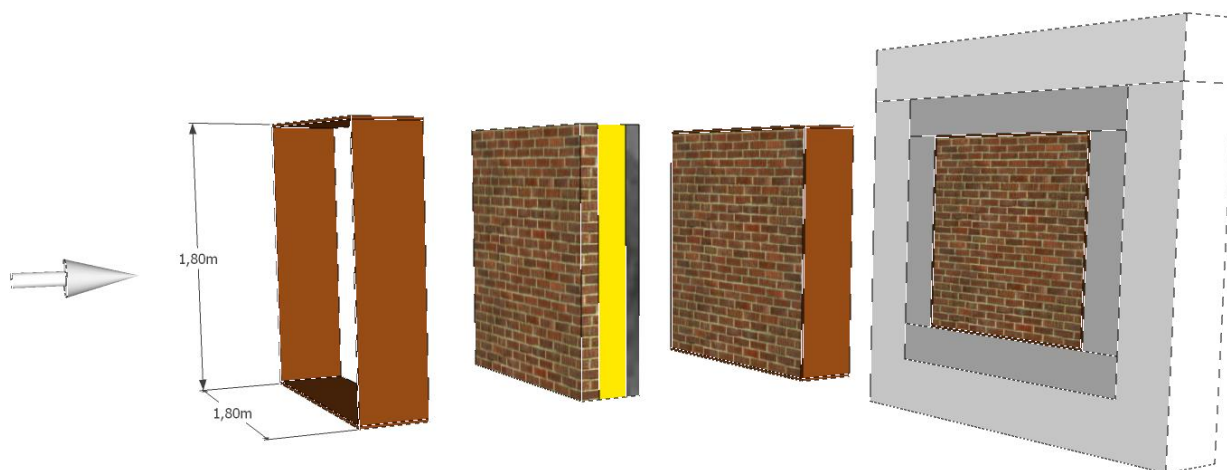
Figur 25: Hot-box hos Teknologisk Institut i Aarhus



Figur 26: Principielt opbygning af Hot-box

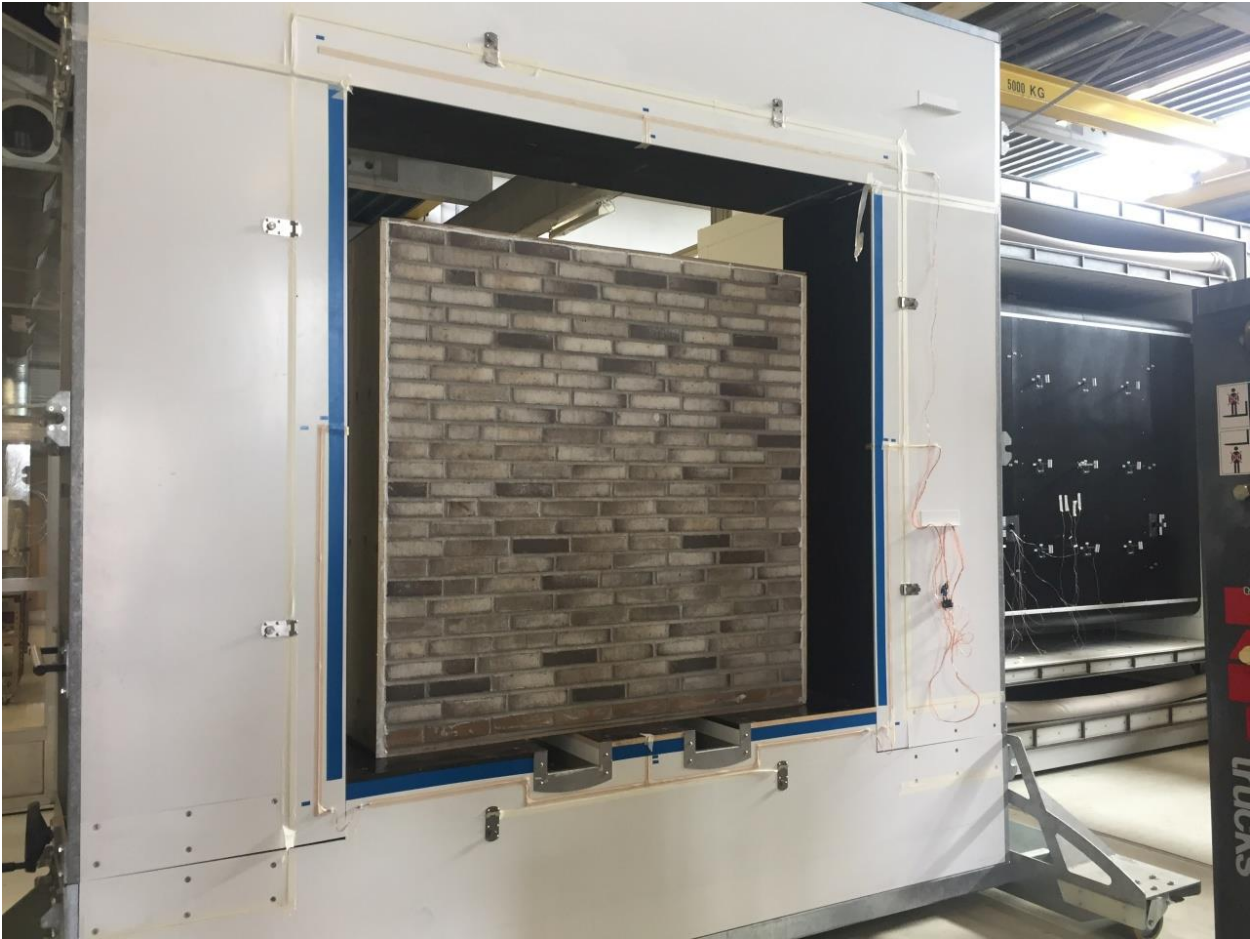
Der er foretaget en test på en tung konstruktion i Hot-Box. Konstruktionen med en samlet tykkelse på 390 mm er opbygget på følgende måde:

- 110 mm tegl
- 190 mm isolering
- 100 mm letbeton

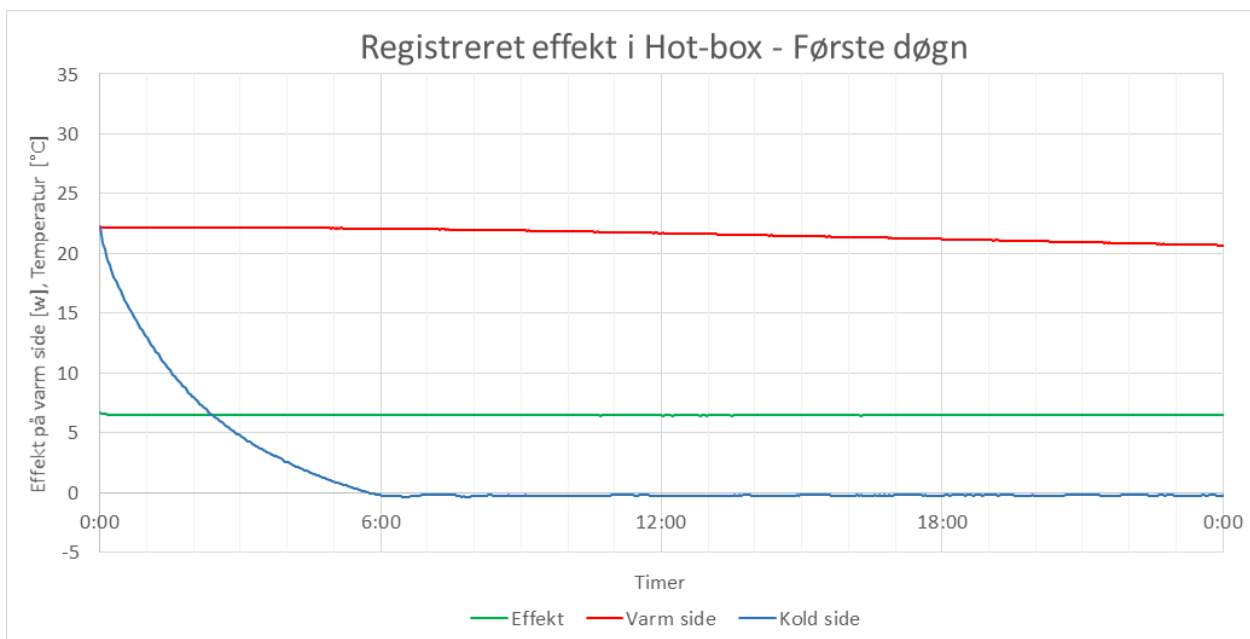


Figur 27: Opbygning i Hotbox inkl. træramme og randisolering

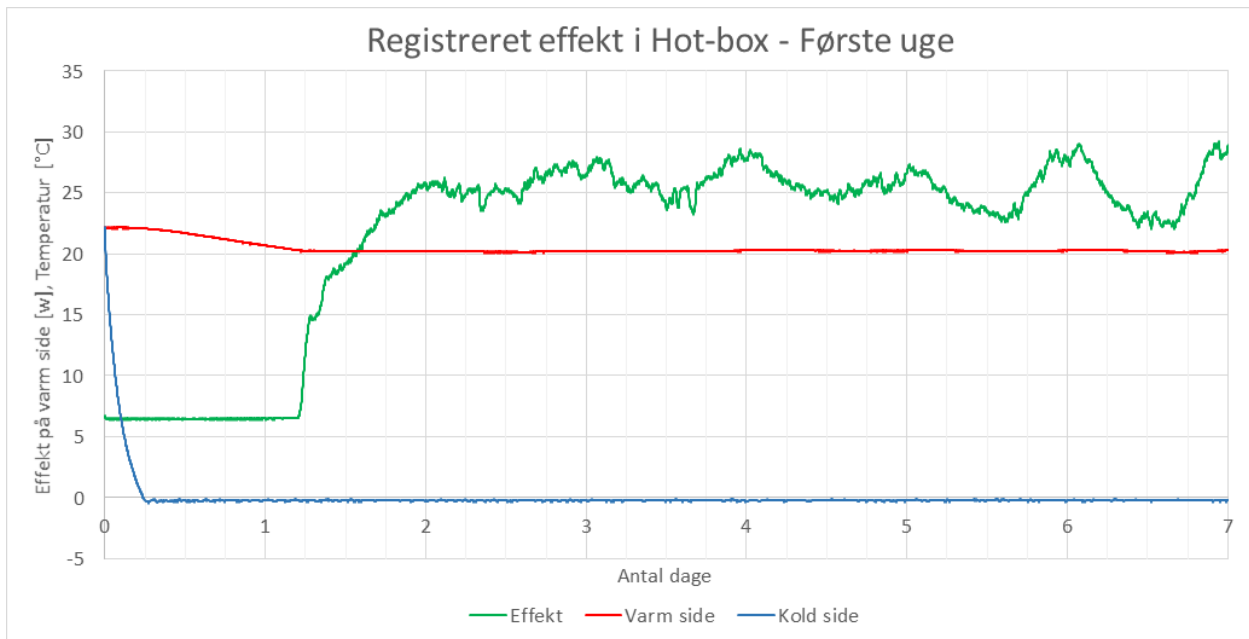
Nedenstående foto viser indbygningen af murkonstruktionen i Hot-Boxen.



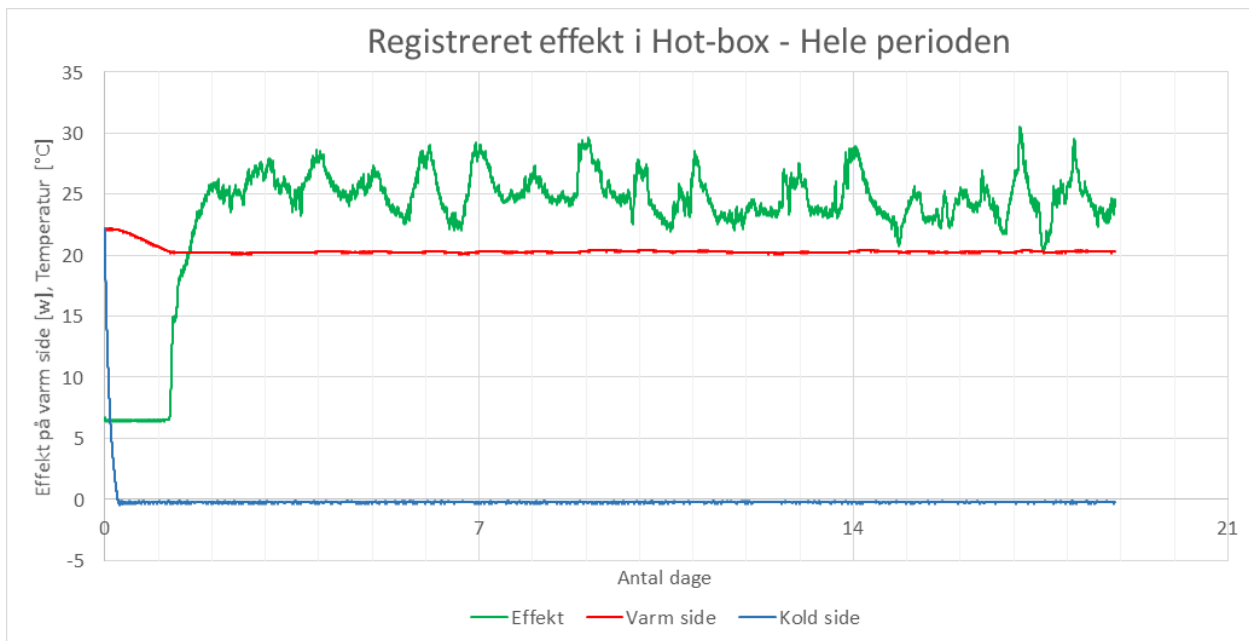
Figur 28: Indsætning af murfelt i Hot-Box



Figur 29: Målinger i Hot-Box – første døgn



Figur 30: Målinger i Hot-Box – første uge



Figur 31: Målinger i Hot-Box – Hele måleperioden

Som det ses af Hot-Box testen har varmekapaciteten samt isoleringsevnen stor betydning for det tilførte effekt på Hot-Boxens varme side. Forsøget strakte sig over næsten 3 uger og viste at selv under meget kontrollerede forhold er det svært at skabe en ligevægt for tunge velkonstruerede konstruktioner. Den tilførte energi er meget lav, kun ca. 25 W fordelt over hele konstruktionen.

Det er især varmekapaciteten i tunge ydervægge, der har betydning for varigheden af varmepåvirkningen og anvendelse af metode med accelereret opvarmning. Det samme er også afspejlet i simuleringresultaterne.

1.6. Simuleringer

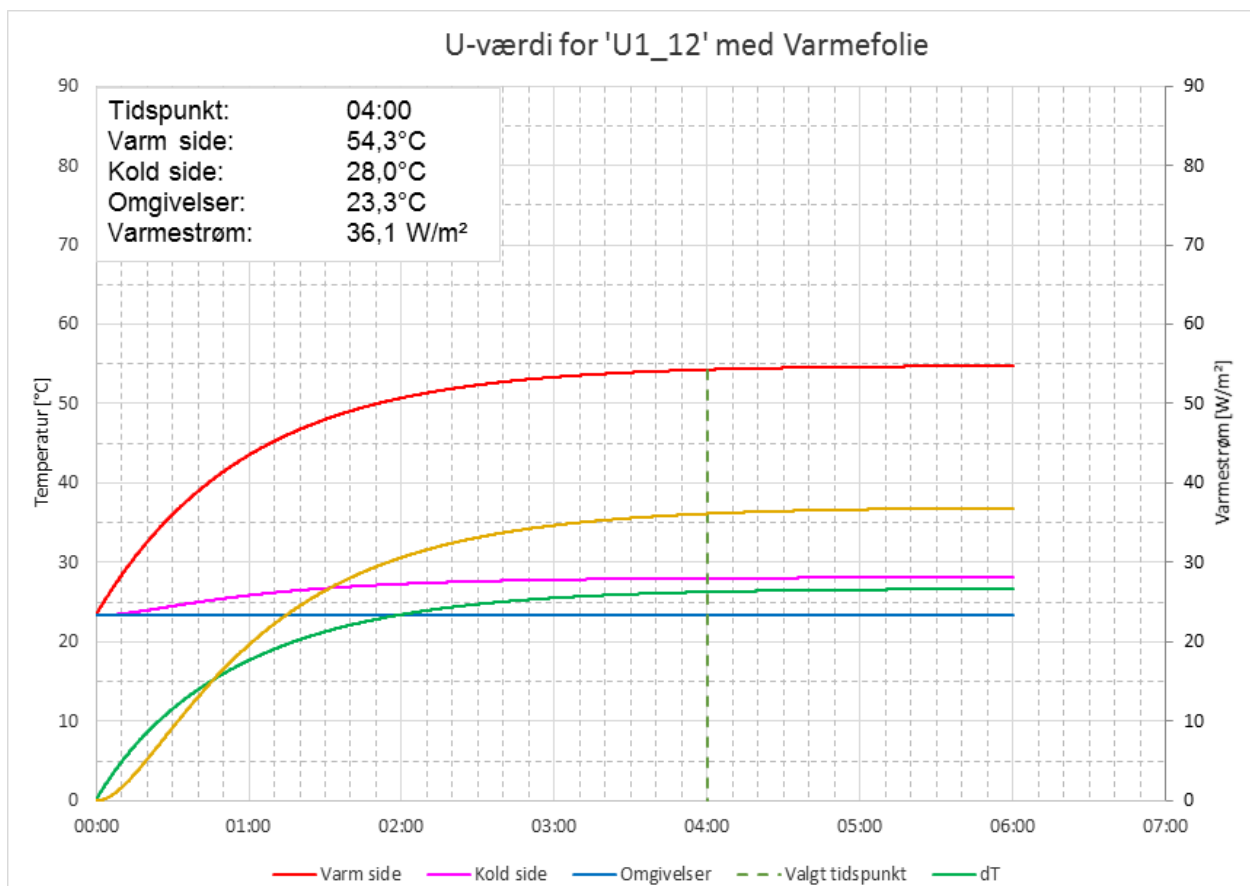
Da målemetoden har vist sig langsom for godt isolerede konstruktioner, er der lavet simuleringer for undersøge om man kan sammenholde målinger og simuleringer og derved få en mulig sammenkobling mellem teori og praksis. Anvendelsesmulighederne for metoden baseret på et accelereret opvarmningsforløb blev eftervist på baggrund af simuleringer i programmet HEAT2, både for ruder og ydervægskonstruktioner.

1.6.1. Ruder

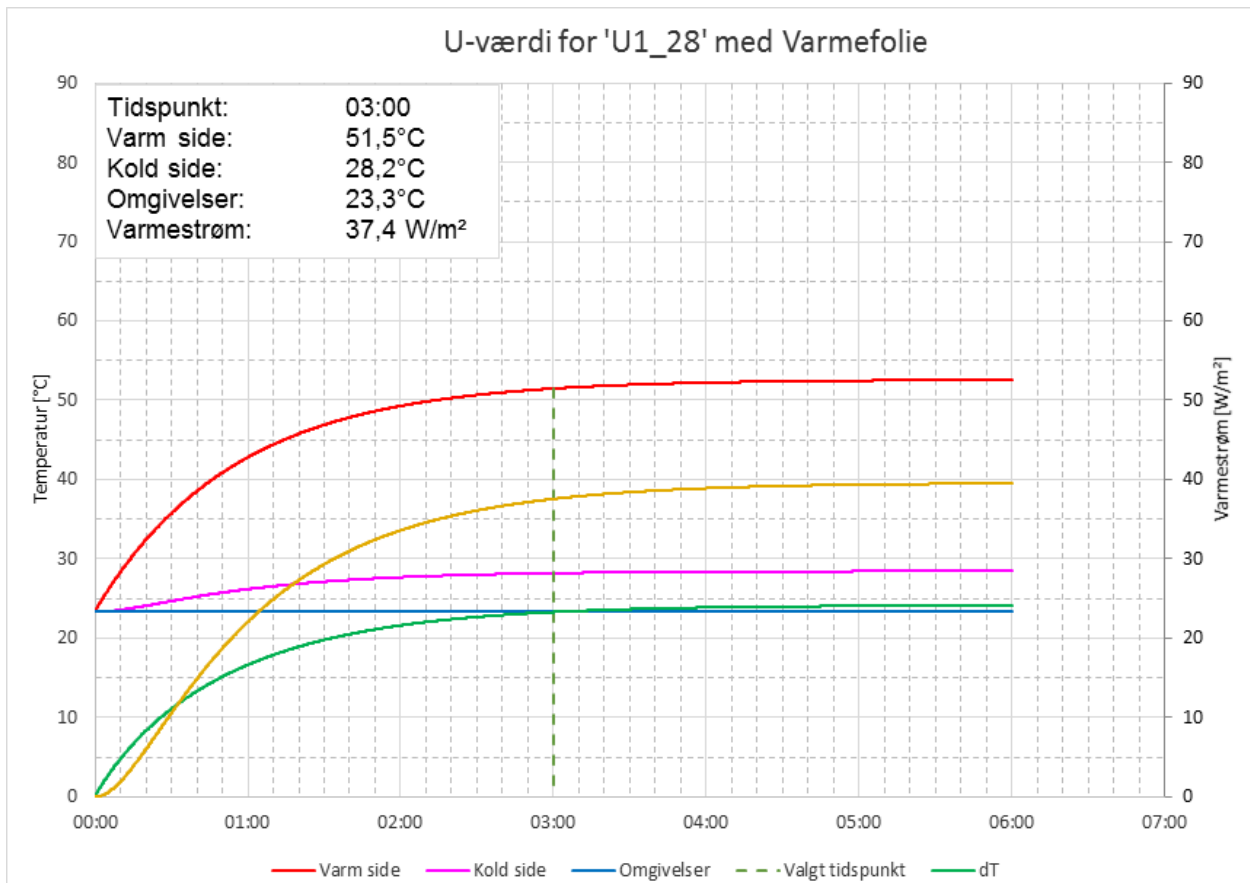
Simuleringerne af det accelereret opvarmningsforløb blev initialt udført med netop samme varmeeffekt (75 W/m^2), randbetingelser for temperatur ($T_{\text{inde}} = T_{\text{ude}} = 23^\circ\text{C}$) og opbygning af ruderne, for en direkte sammenligning af anvendelse af metoden.

Nedenstående grafer viser resultater for følgende udvalgte ruder:

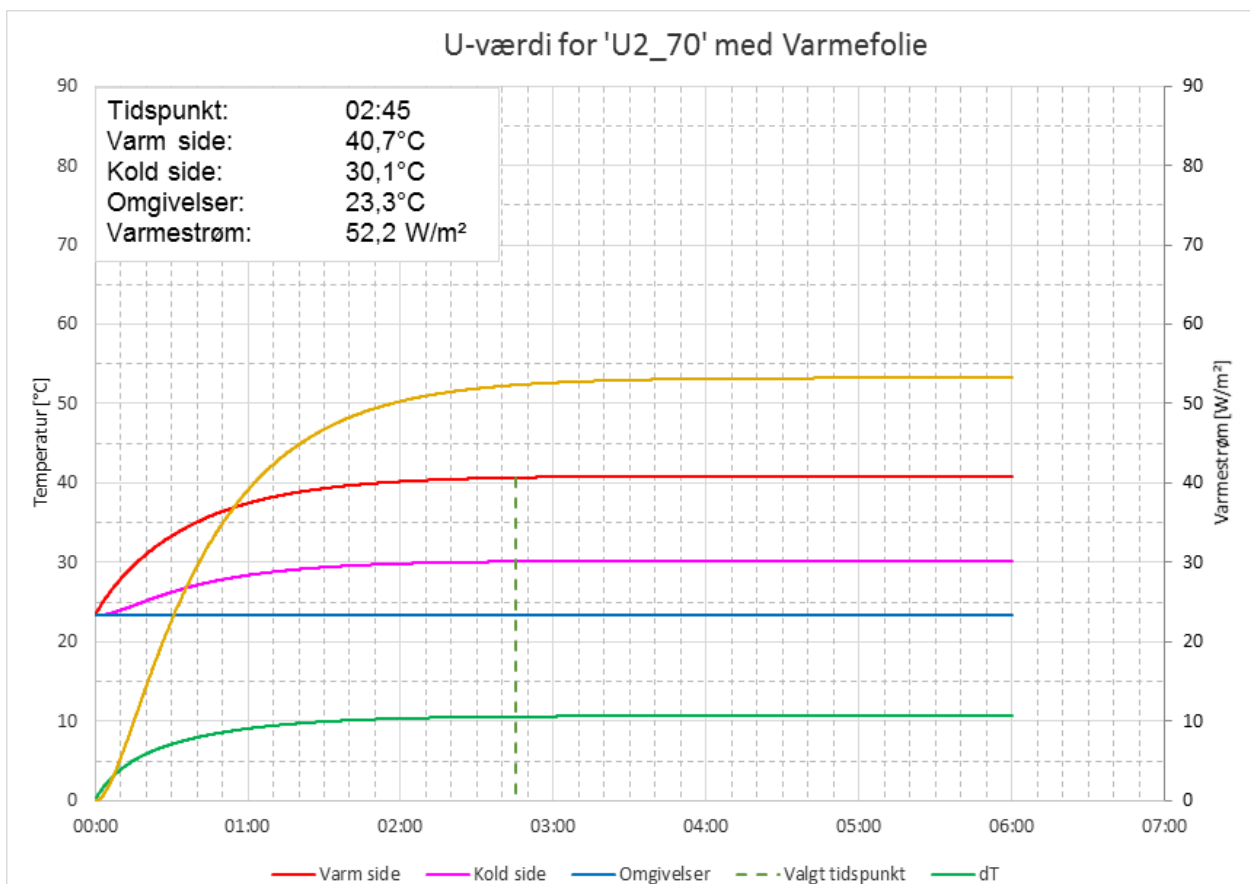
- To-lags rude med forventet $U = 1,12 \text{ W/m}^2\text{K}$
- To-lags rude med forventet $U = 1,28 \text{ W/m}^2\text{K}$
- To-lags rude med forventet $U = 2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$



Figur 32: Simulering på to-lagsrude med forventet U-værdi på $1,12 \text{ W/m}^2\text{K}$



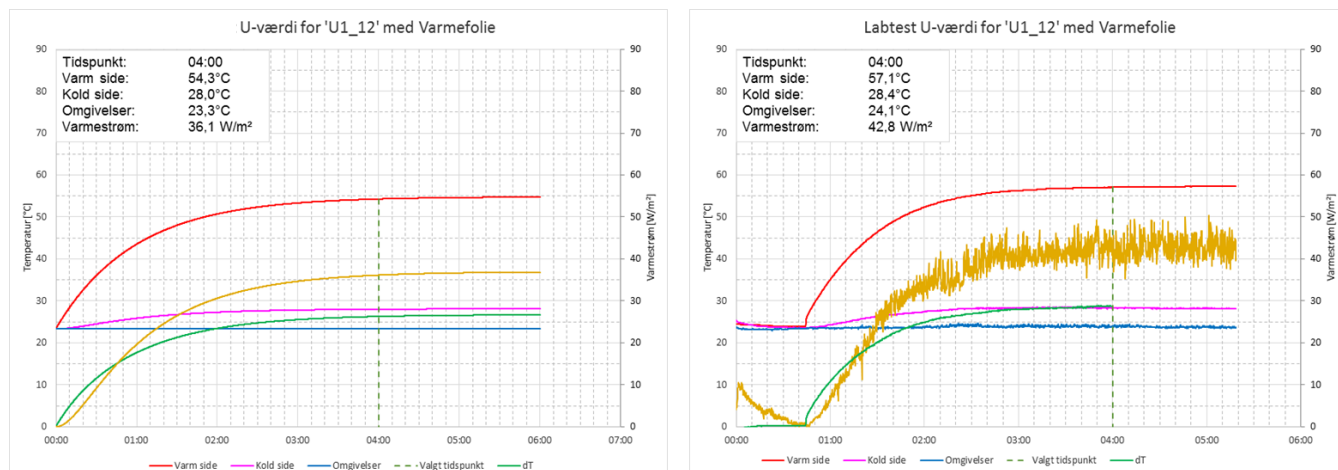
Figur 33: Simulering på to-lagsrude med forventet U-værdi på 1,28 W/m²K



Figur 34: Simulering på to-lagsrude med forventet U-værdi på 2,70 W/m²K

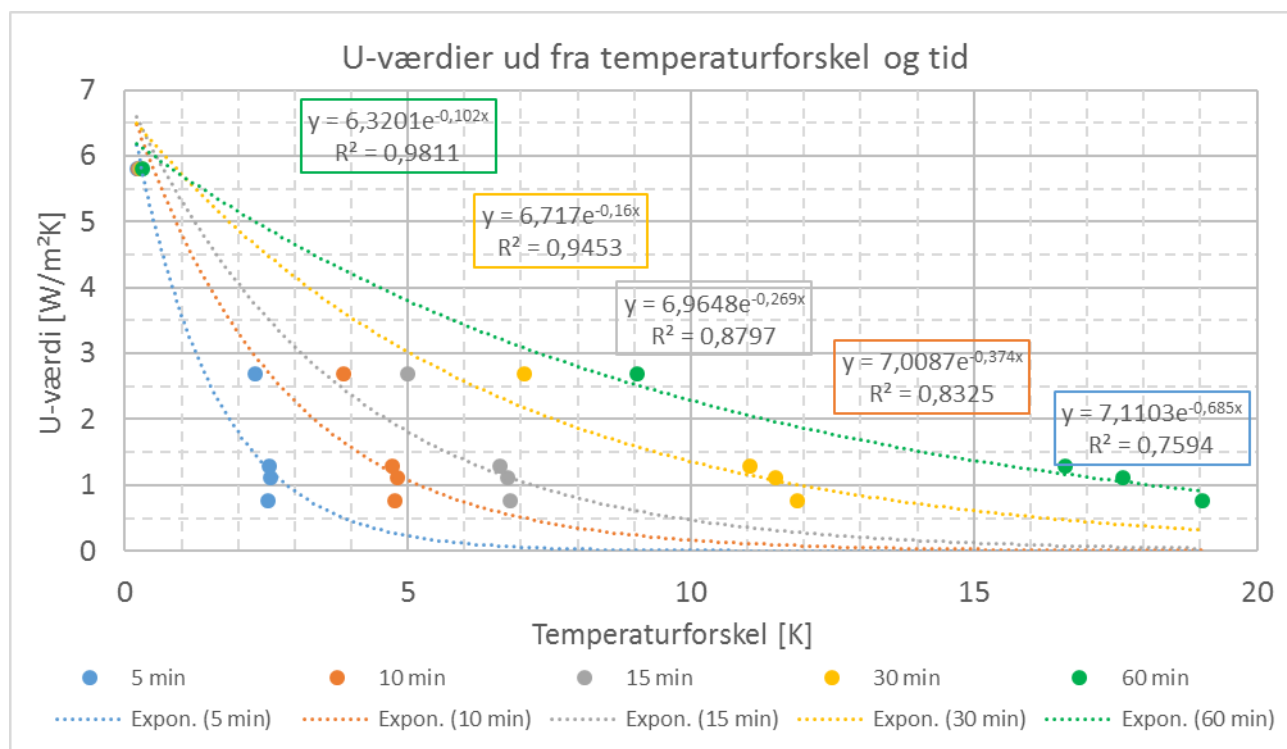
1.6.2. Samkøring af data

Graferne fra forsøgene og simuleringer for de 5 ruder viser et ens opvarmningsforløb. Se også nedenstående figur.



Figur 35: Sammenligning af opvarmningsforløb mellem simulering og labtest på to-lagsrude med forventet U-værdi på 1,12 W/m²K

Behandling og samkøring af data i nedenstående graf viser at en afvigelse i temperatursforskellen mellem målte og simulerede resultater kan have stor betydning vedr. bestemmelse af U-værdien ud fra temperatursforskel og tid. For at kunne udvide anvendelsesområde, er der derfor udført flere simuleringer med variation i randbetingelser.



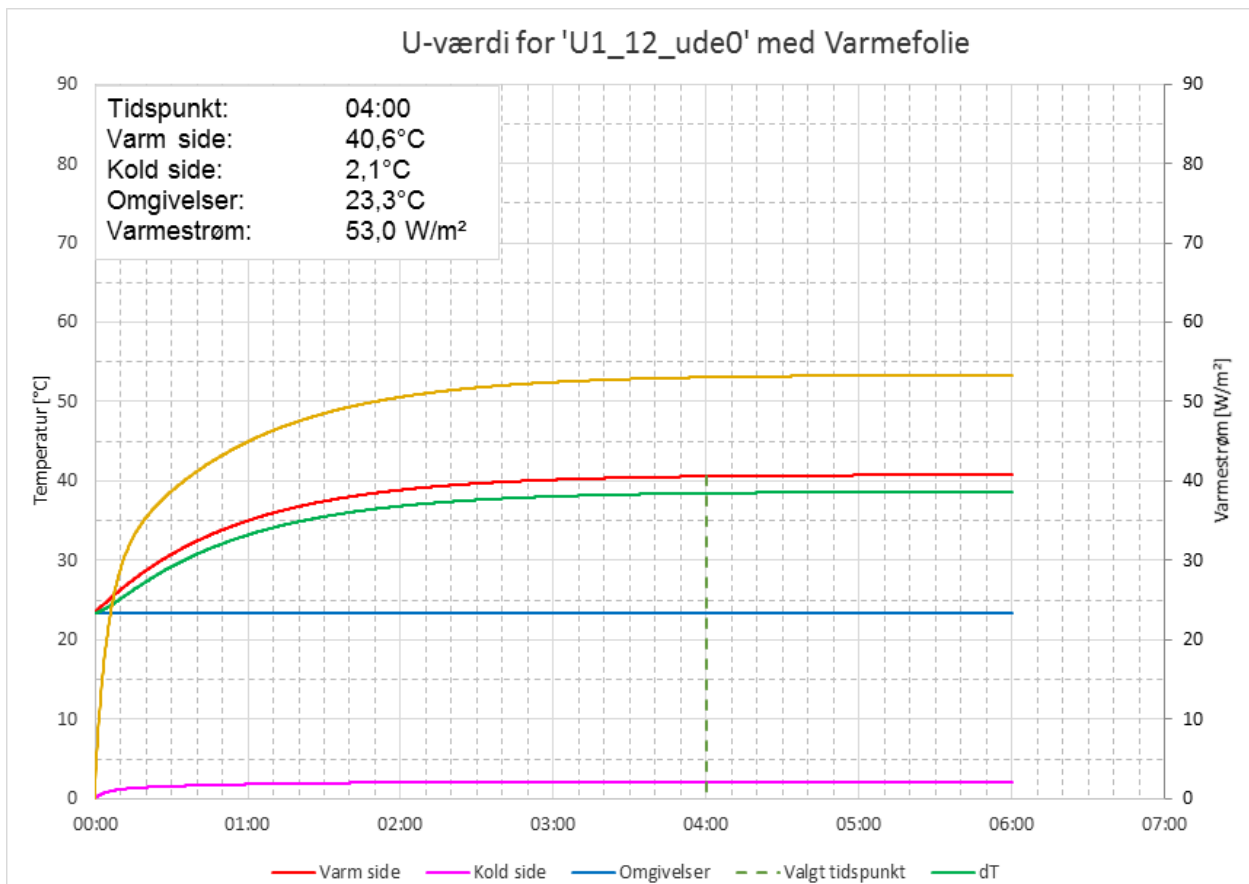
Figur 36: U-værdibestemmelse ud fra temperatursforskel og tid, baseret på simuleringer.

1.6.3. Variationer i udetemperatur

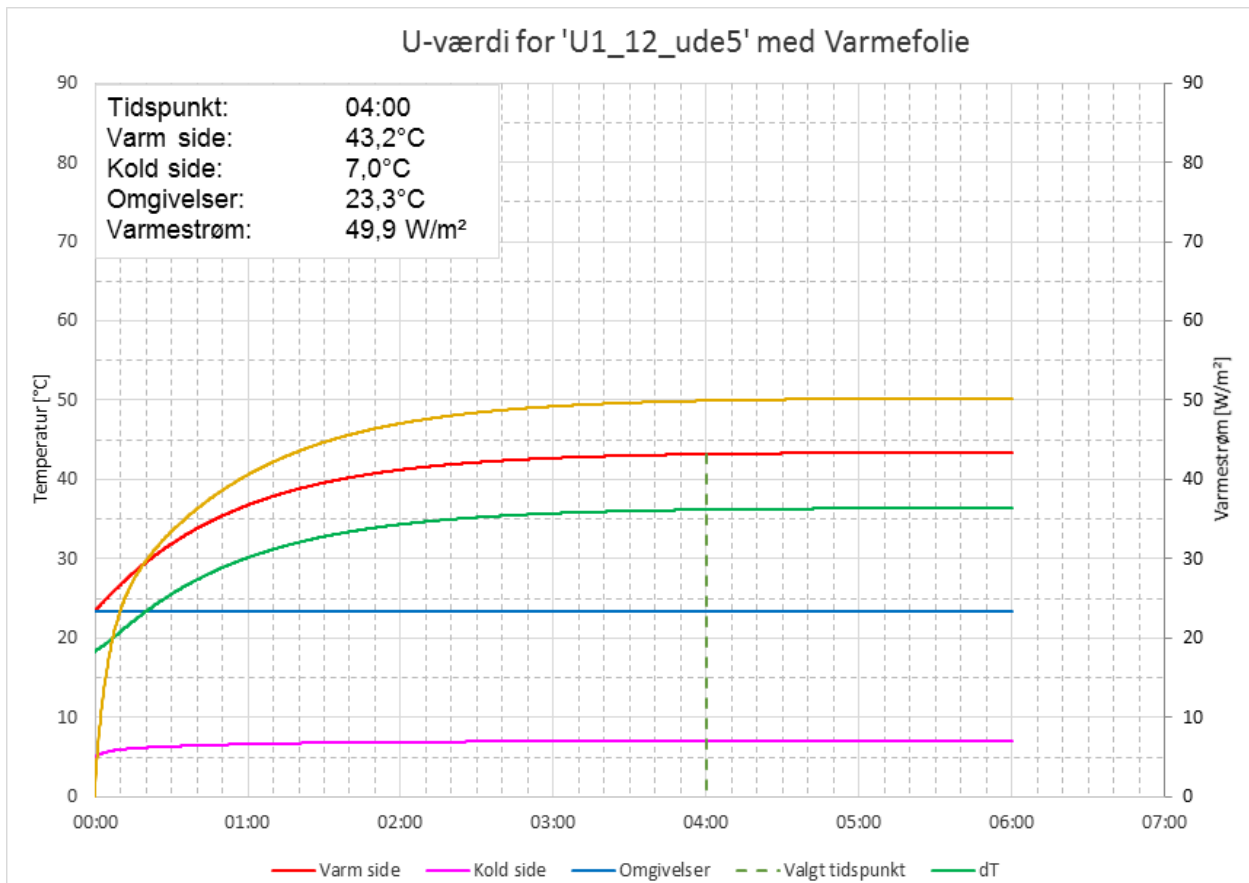
Gennem brug af simuleringer, har det været muligt at undersøge effekten af ændringer i randbetingelser. For de simulerede ruder blev følgende ændringer i udetemperatur undersøgt:

- Anden konstant udetemperatur (vinter 0°C, efterår 5°C)
- Variabel udetemperatur (sinusvariation over 1 døgn i efteråret mellem 0 og 10°C)

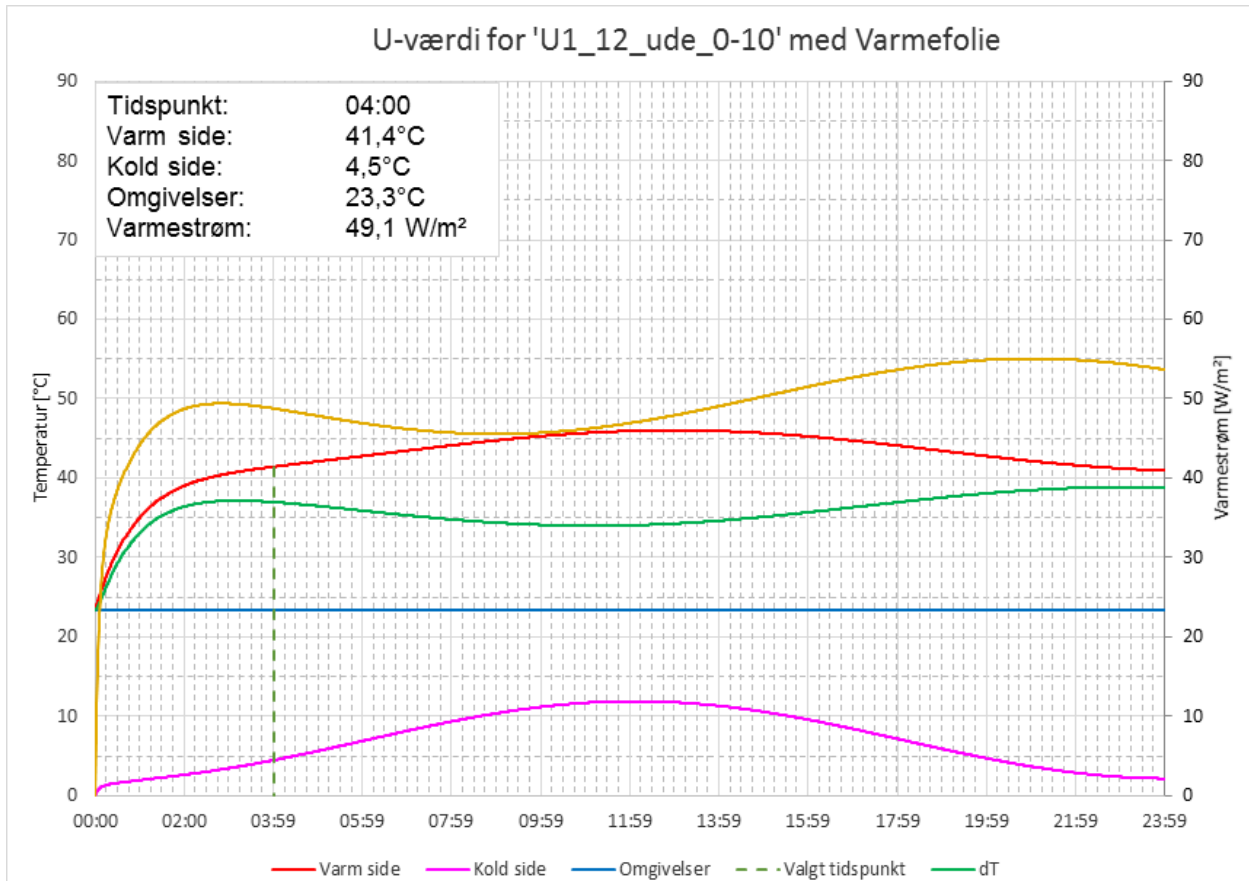
De efterfølgende grafer viser effekten på den accelererede opvarmningsforløb for en rude med forventet U-værdi på 1,12 W/m²K. Databehandling af disse grafer kan efterfølgende bruges på samme måde som samkøring af data har vist i de tidligere grafer, hvor U-værdien kan bestemmes ud fra temperaturforskelle mellem den varme og kolde side og tiden hvorpå disse aflæses.



Figur 37: Simulering på to-lagsrude med forventet U-værdi på 1,12 W/m²K og konstant udetemperatur 0°C.



Figur 38: Simulering på to-lagsrude med forventet U-værdi på 1,12 W/m²K og konstant udetemperatur 5°C.



Figur 39: Simulering på to-lagsrude med forventet U-værdi på 1,12 W/m²K og variation i udetemperatur 0-10°C.

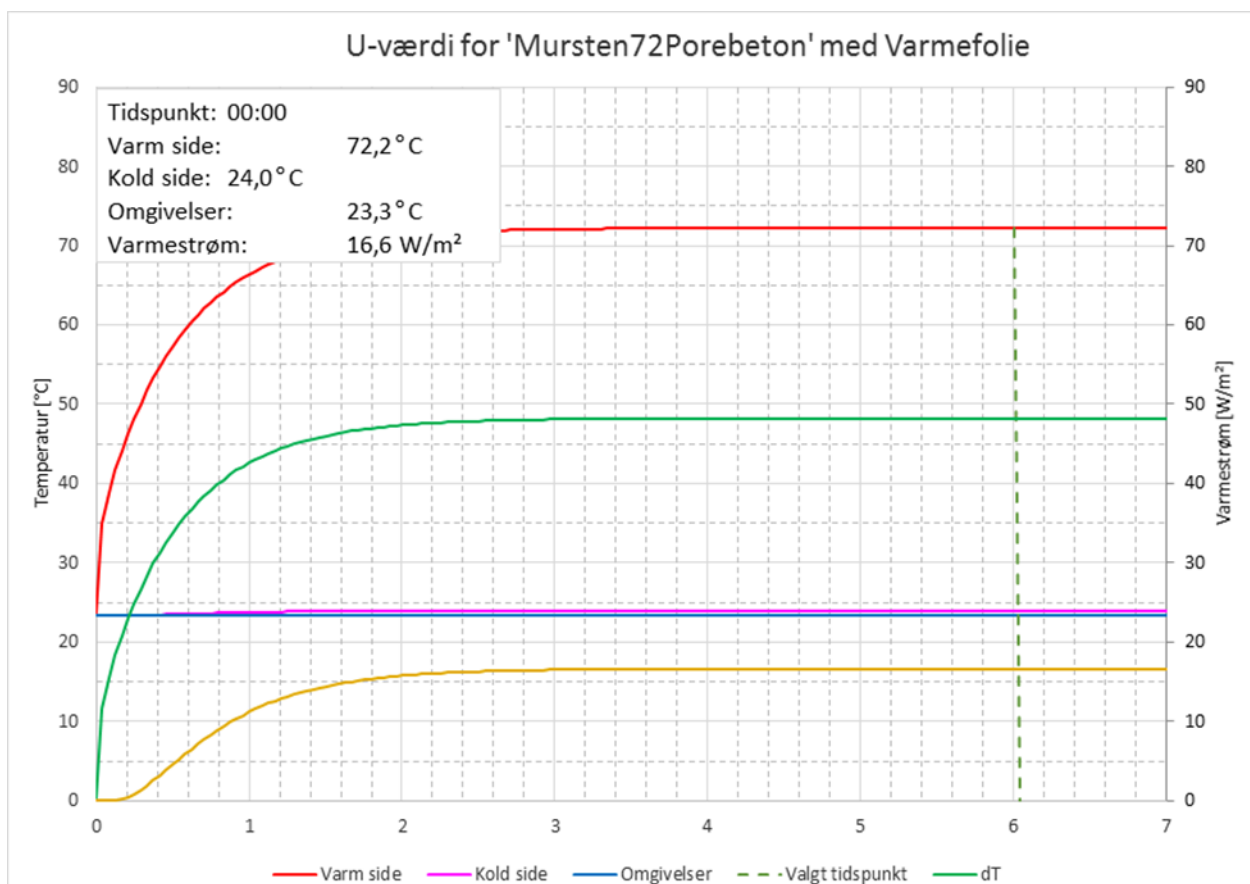
1.6.4. Ydervægge

Afprøvningen af en tung ydervæg i Hot-Boxen på Teknologisk Institut viste en stor betydning af den termiske masse på det accelereret temperaturforløb af en tung ydervægskonstruktion. Ved anvendelse af simuleringerne har det været muligt på en hurtig måde at skabe overblik over betydning af andre parametre, såsom isoleringsevne og udetemperaturforhold, samt påført varmeeffekt ved anvendelse af metoden baseret på et accelereret temperaturforløb.

Effekten af isolering blev undersøgt for følgende U-værdier for en tung ydervægskonstruktion af mursten på den udvendige side, og porebeton på den indvendige side:

- Forventet $U= 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ (300 mm isolering)
- Forventet $U= 0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ (200 mm isolering)
- Forventet $U= 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ (150 mm isolering)
- Forventet $U= 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ (120 mm isolering)
- Forventet $U= 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ (100 mm isolering)
- Forventet $U= 0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ (72 mm isolering)
- Forventet $U= 0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$ (50 mm isolering)

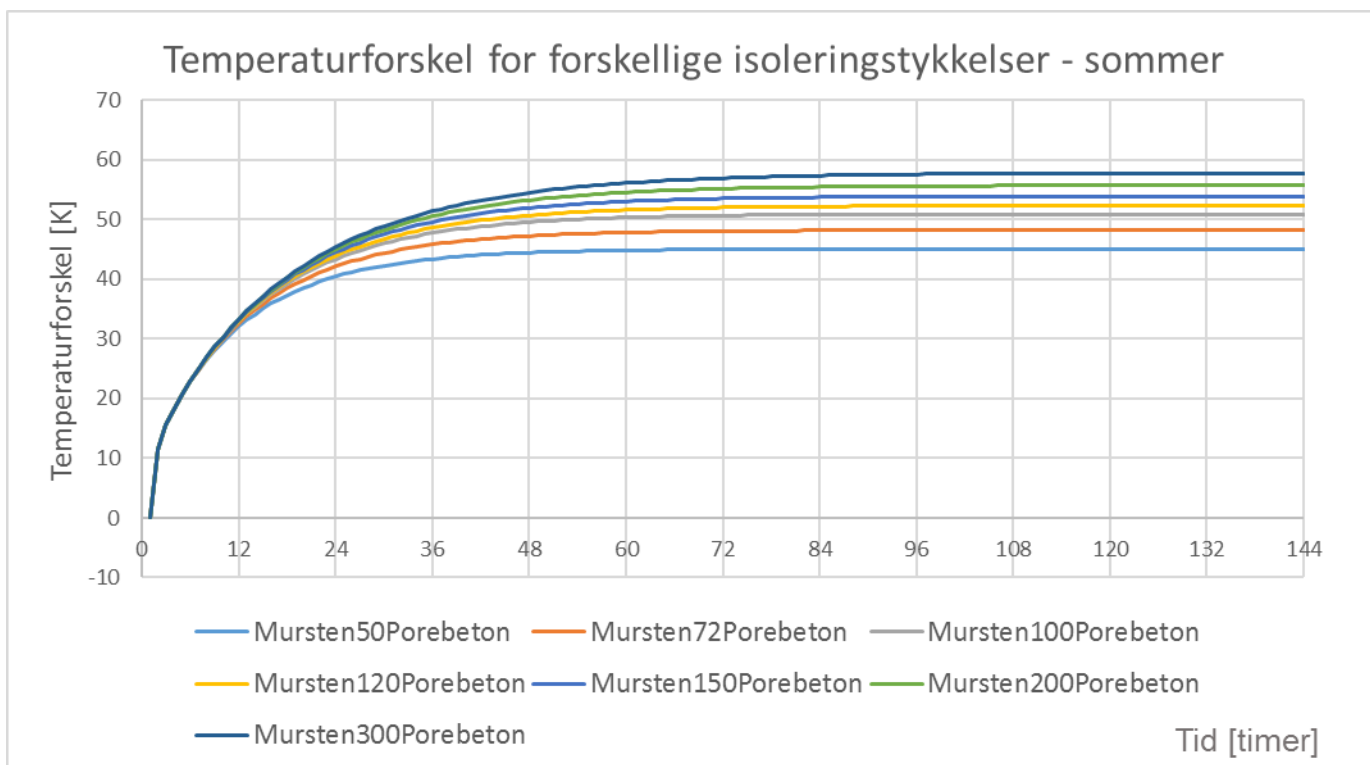
Nedenstående grafer viser udvalgte resultater ved påføring af en varmeeffekt på 75W/m^2 , konstant indetemperatur på 23°C , og en konstant udetemperatur på hhv. 23°C (sommer) og 0°C vinter.



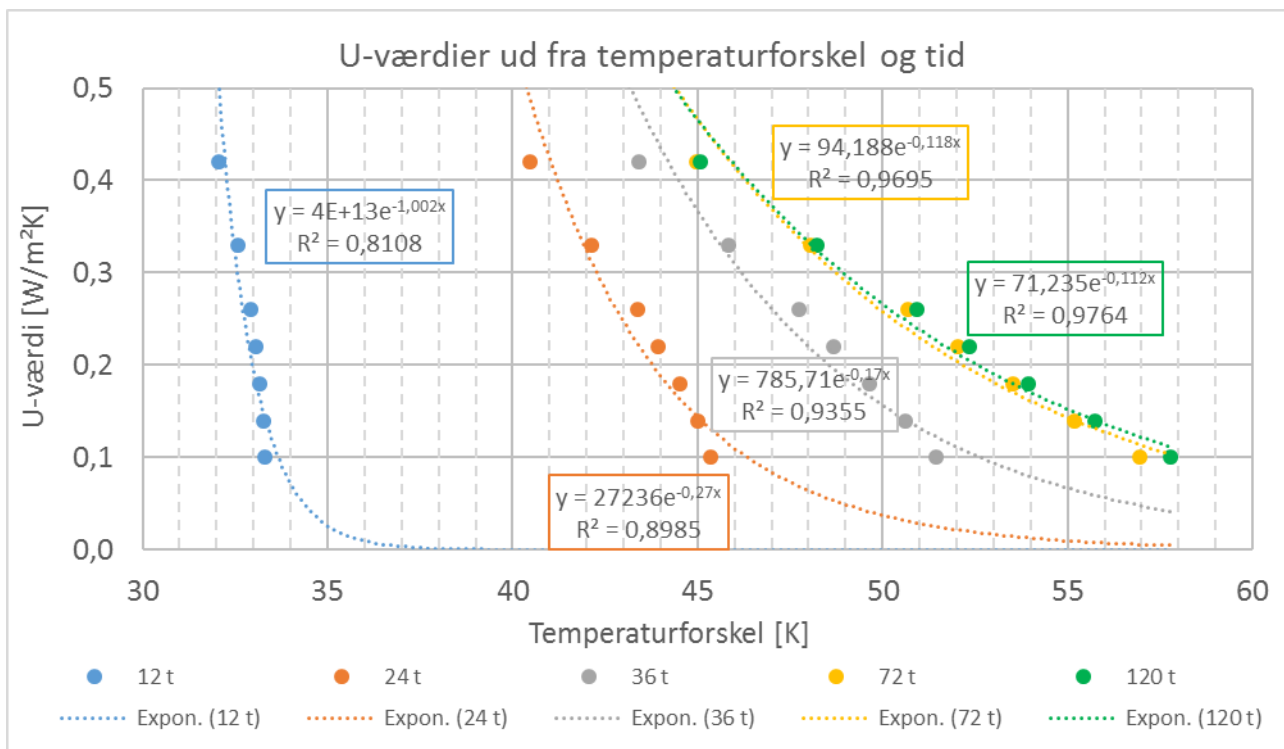
Figur 40: Simulering på tung ydervæg med U-værdi på $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ og konstant udetemperatur 23°C .

Opvarmningsforløb på ovenstående figur følger samme trends som de målte og simulerede ruder, bortset fra at det tager længere tid at opnå en konstant temperaturforskel mellem den varme og kolde side.

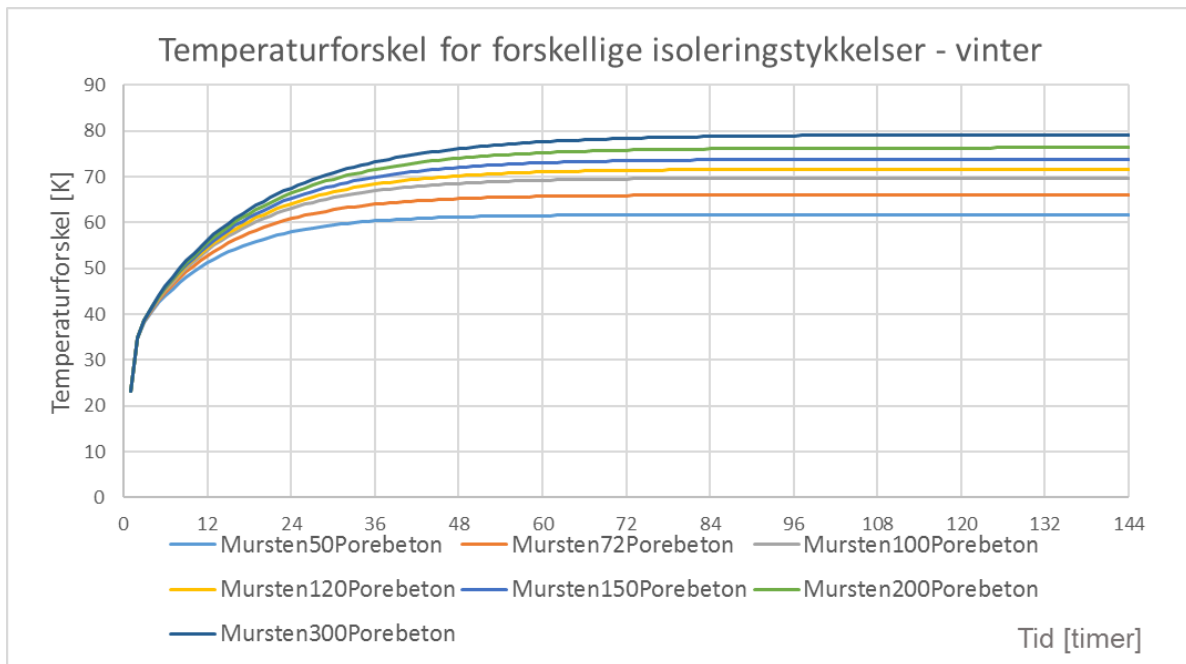
Gennem samkøring af data i nedenstående grafer er det igen muligt at aflæse U-værdi ud fra temperaturforskel mellem den varme og kolde side og tiden hvorpå disse aflæses.



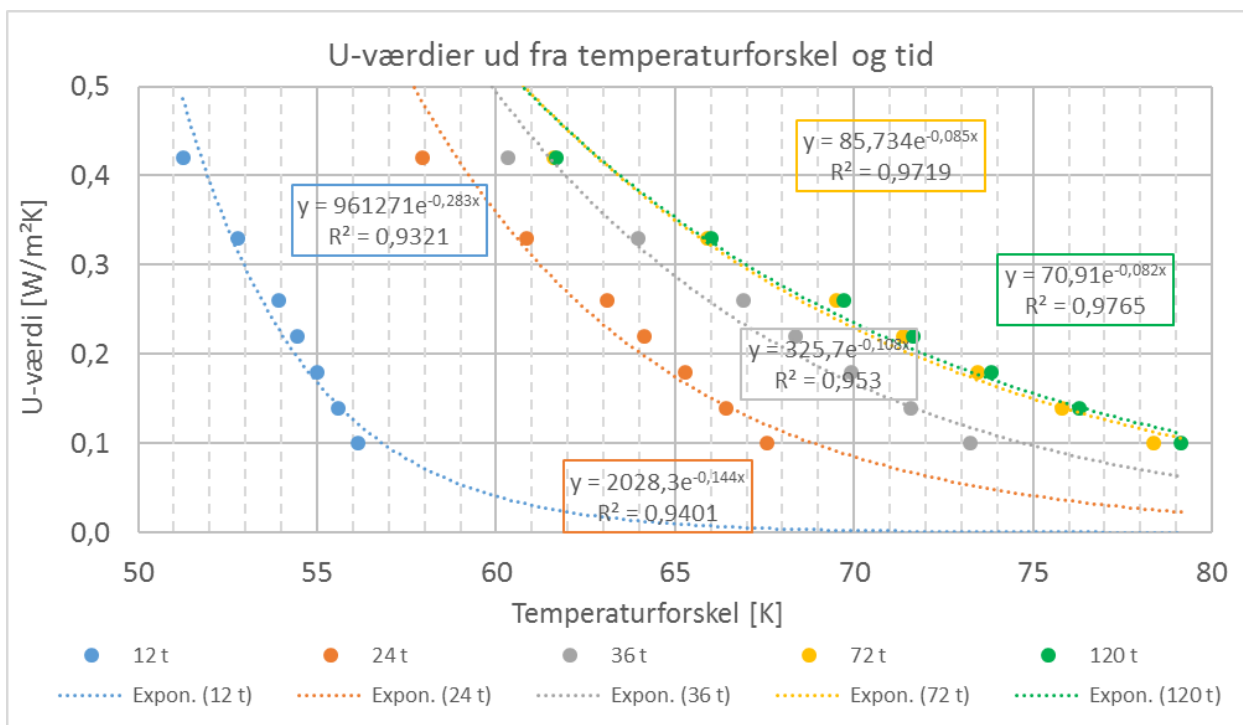
Figur 41: Opvarmningsforløbet for ydervæggen om sommer med forskellige isoleringstykkelser



Figur 42: U-værdibestemmelse ud fra temperaturforskel og tid (sommer)

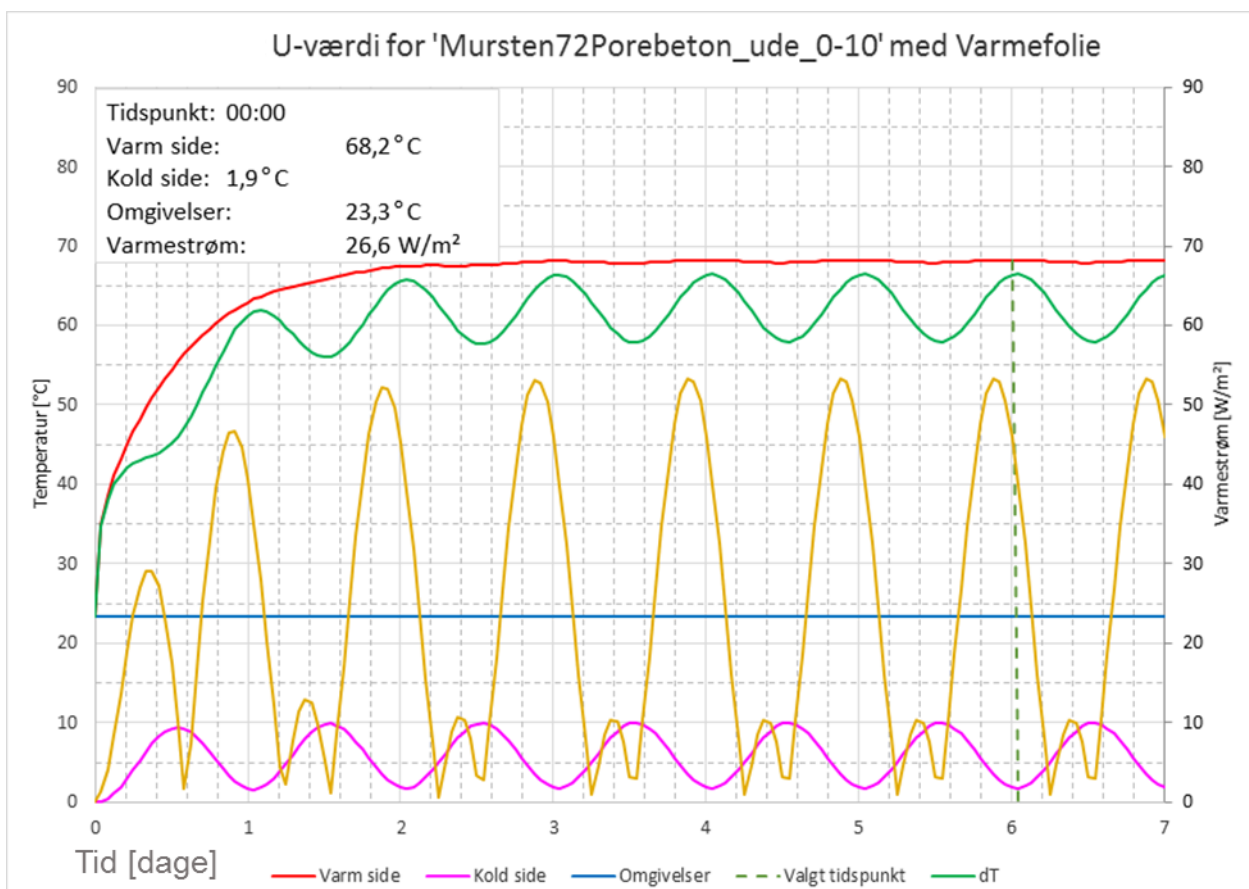


Figur 43: Opvarmningsforløbet for ydervæggen om sommer med forskellige isoleringstykkelser

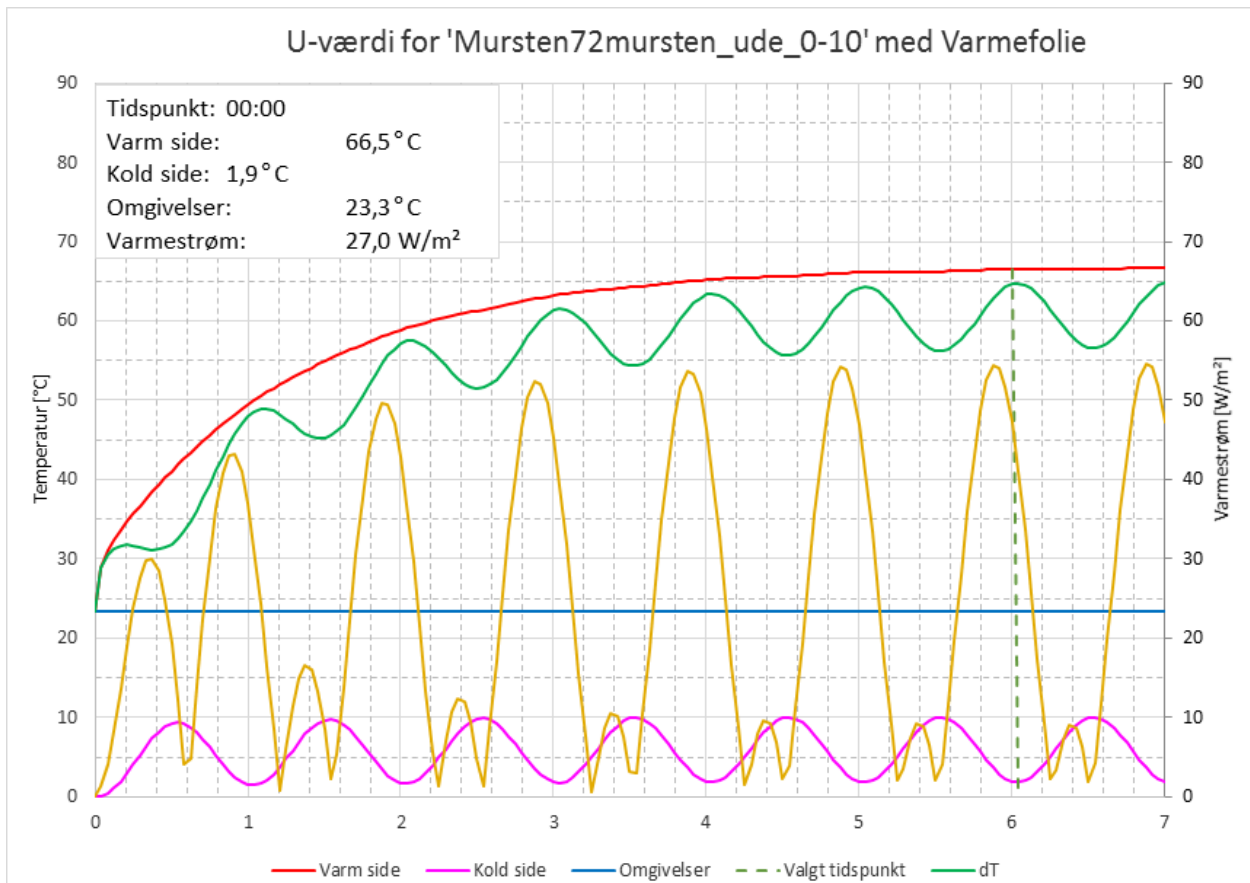


Figur 44: U-værdibestemmelse ud fra temperaturforskel og tid (vinter)

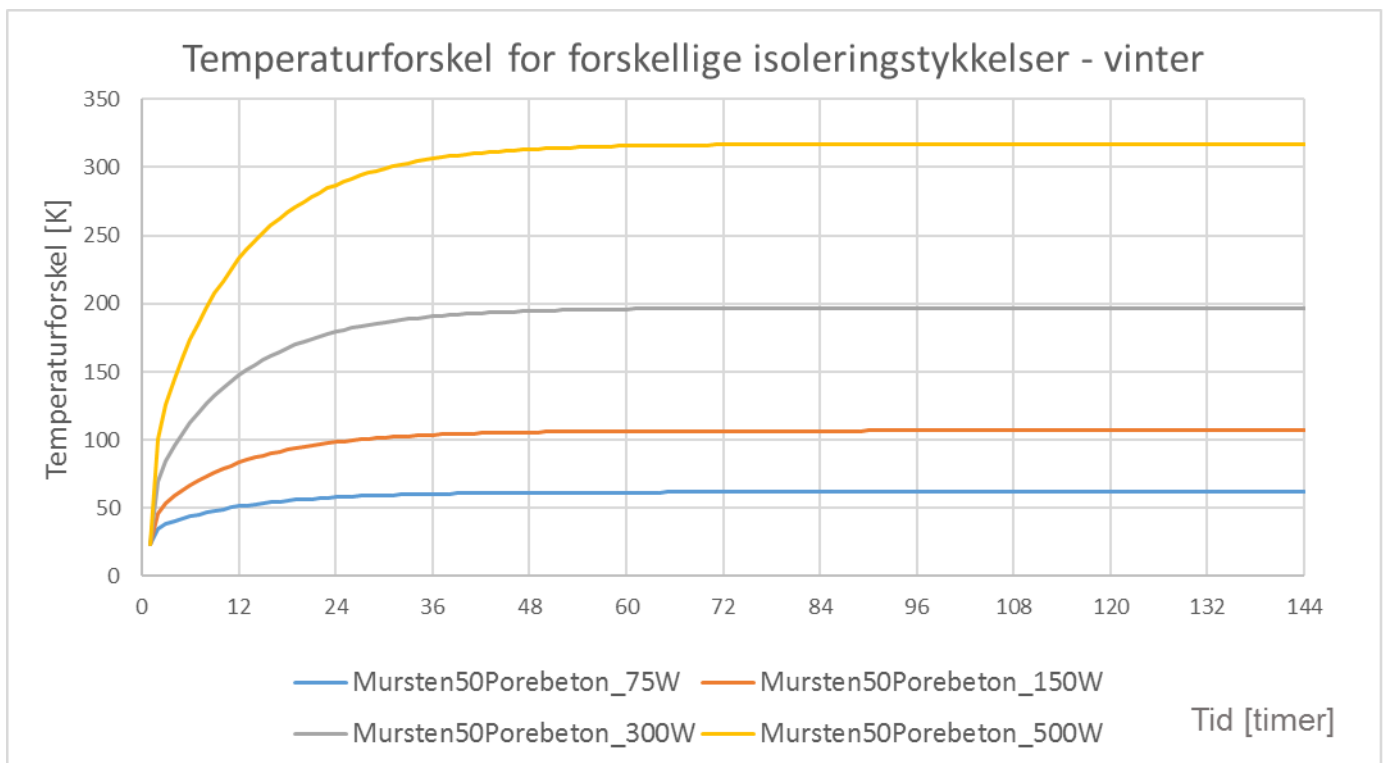
Da målingerne tager længere tid om at registrere en konstant temperatursforskel, blev der også udført simuleringer med en døgnvariation i temperatur. Nedenstående grafer viser resultaterne for en ydervæg med U-værdi på $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ og en variation i udetemperatur mellem $0\text{-}10^\circ\text{C}$. I den ene ydervæg anvendes mursten udvendig og porebeton indvendig, i den anden ydervæg anvendes mursten på begge sider. Ud fra graferne er det igen muligt at finde en konstant temperatursforskel mellem den kolde og varme side af væggen. Alle disse simuleringresultater kunne derfor blive brugt til at opstille generiske kurver for U-værdibestemmelse ud fra temperatursforskel mellem konstruktionens varme og kolde side, og tiden hvorpå disse aflæses. Endvidere kunne også indflydelse af den påførte varmeeffekt inddrages. En undersøgelse af forskellige påførte varmeeffekter viser dog at den påførte varmeeffekt kun har betydning for temperatursforskellen mellem den varme og kolde side af konstruktionen, og ikke på tiden hvorpå en konstant temperatursforskel registreres.



Figur 45: Simulering på tung ydervæg (mursten- porebeton) med U-værdi på $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ og variation i udetemperatur $0\text{-}10^\circ\text{C}$.



Figur 46: Simulering på tung ydervæg (mursten- mursten) med U-værdi på 0,33 W/m²K og variation i udetemperatur 0-10°C.



Figur 47: Simulering på tung ydervæg (mursten- porebeton) med U-værdi på 0,42 W/m²K, konstant udetemperatur på 0°C og påført varmeeffekt mellem 75-500W/m².

1.7. Onsite målinger på isoleret hulmurskonstruktion

Udover Hot-Box test og simuleringer, er der foretaget onsite målinger på en traditionel hulmurskonstruktion for en villa bygget i 1974.

295 mm hulmurskonstruktion:

- 105 mm tegl
- 85 mm isolering
- 105 mm tegl

Forventelig U-værdi:

$$\lambda_{\text{tegl}} = 0,70 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$\lambda_{\text{iso}} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$R_m = 0,04 + 0,105/0,70 + 0,085/0,04 + 0,105/0,70 + 0,13 = 2,60 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U = 1/R = 0,39 \text{ W/m}^2\text{K}$$



Figur 48: Villa fra 1974, Højbjerg



Figur 49: Testet hulmurskonstruktion

1.7.1. Prøveopstilling

Hulmurskonstruktionen er en 300 mm teglmur med hulmursisolering (papir). Opstillingen er vist på billederne nedenfor.



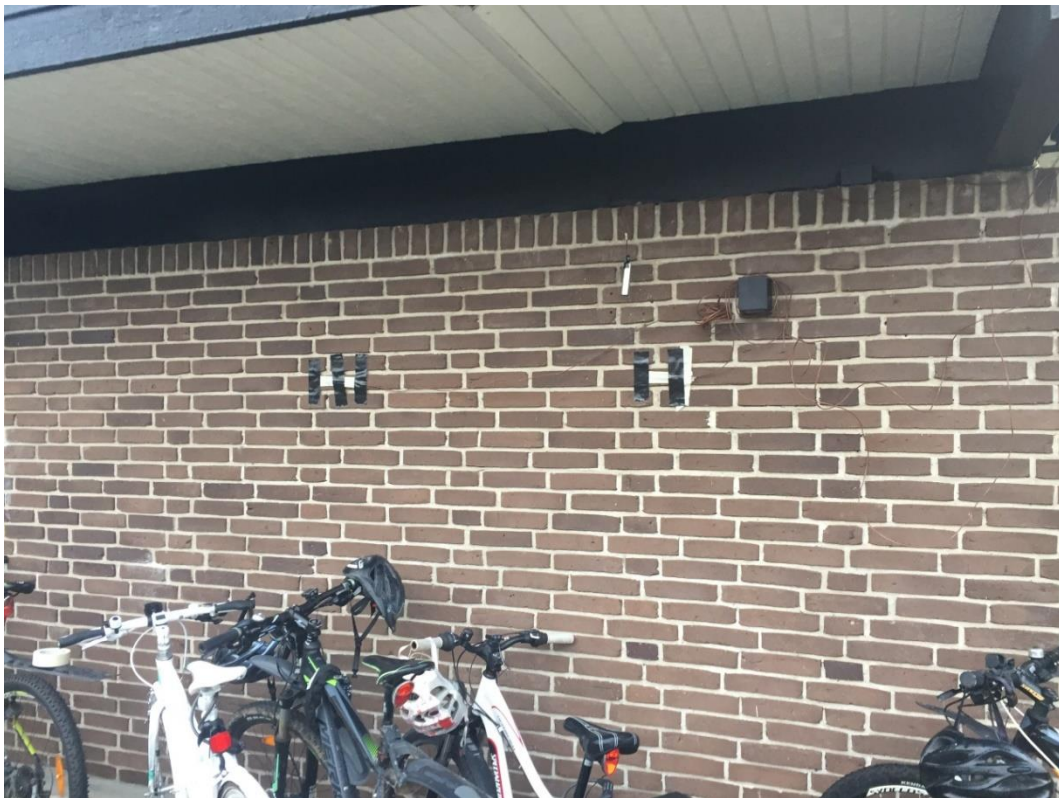
Figur 50: Testet væg set fra kontor



Figur 51: Folie monteret på væg



Figur 52: EPS udenpå folie på væg



Figur 53: Testet væg set udefra

1.7.2. Usikkerhed

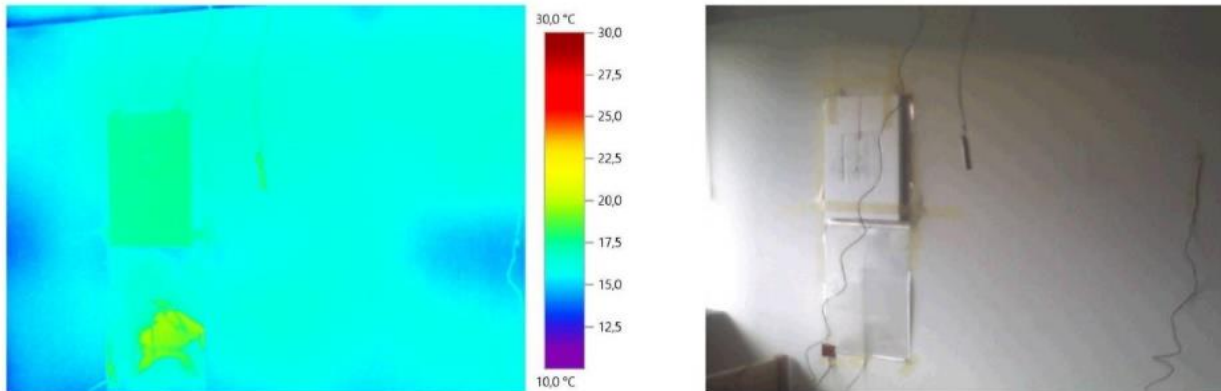
Solskin påvirker måleresultaterne og opvarmer rumluften med ca. 8 grader. I resterende del af måleperioden er persienner nedrullet.



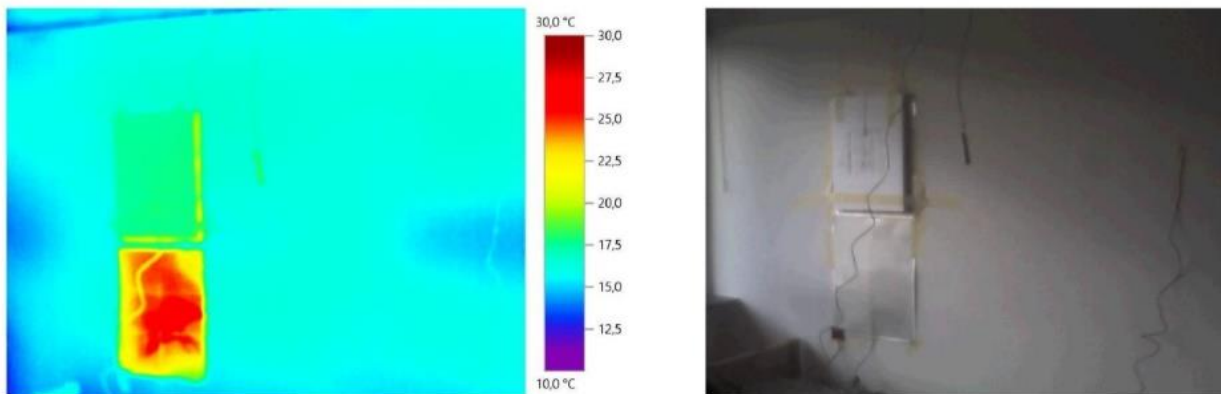
Figur 54: Solskin påvirker målinger

1.7.3. Termografi

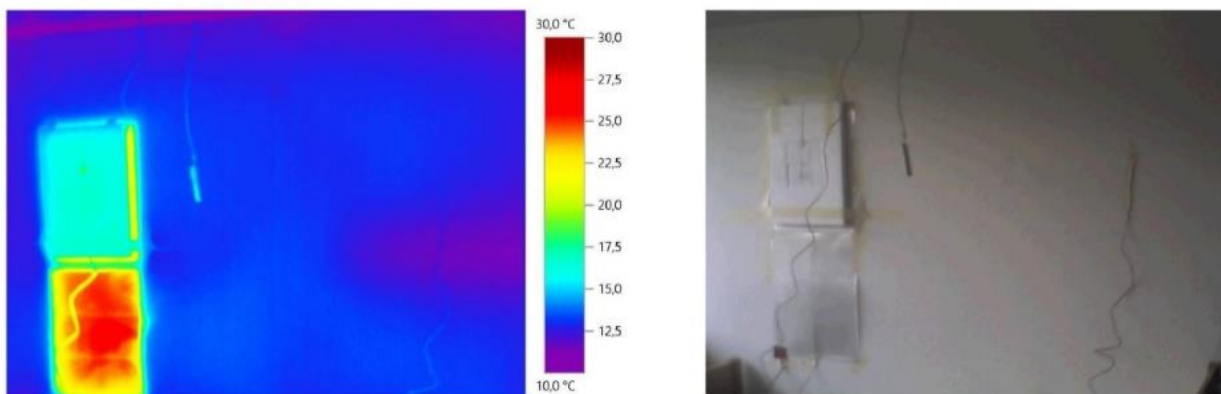
Der er foretaget termografering af hulmurskonstruktionen indefra og udefra.



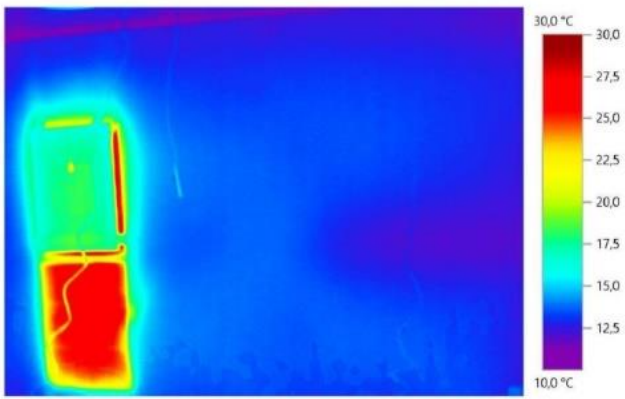
Figur 55: Termografi indefra – 0 minutter



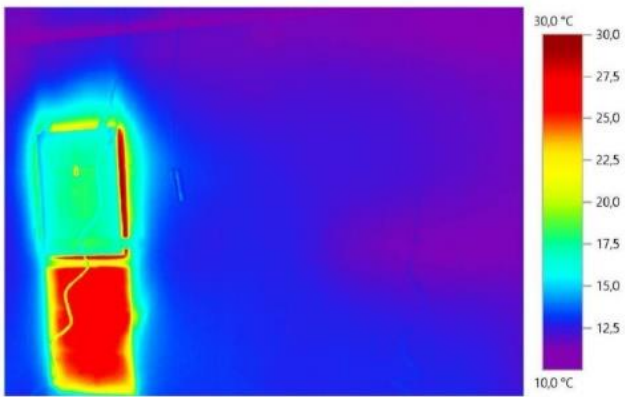
Figur 56: Termografi indefra – 10 minutter



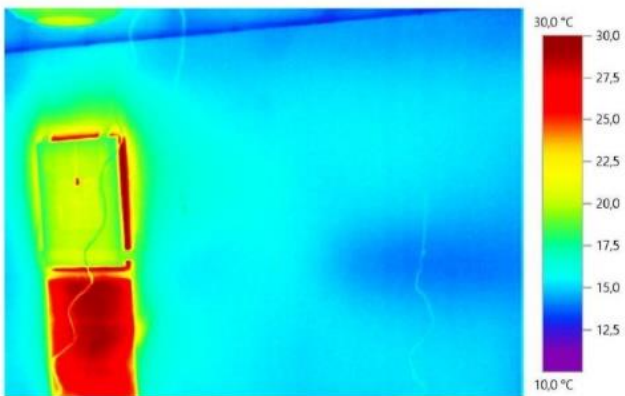
Figur 57: Termografi indefra – 60 minutter



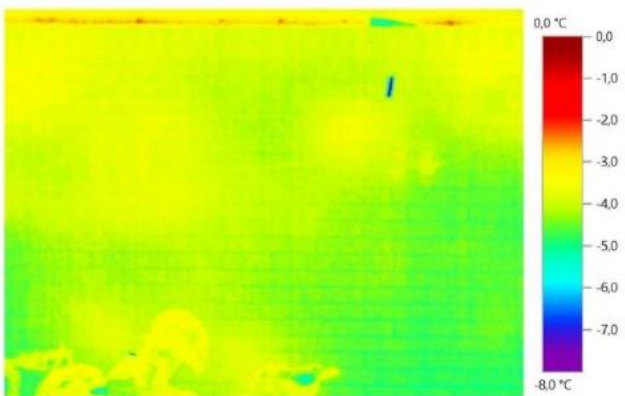
Figur 58: Termografi indefra – 6 timer



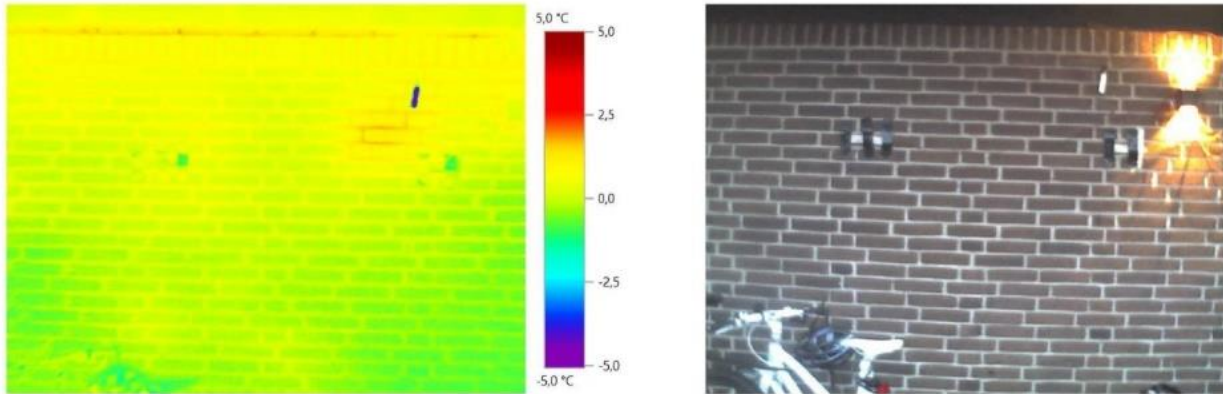
Figur 59: Termografi indefra – 22 timer



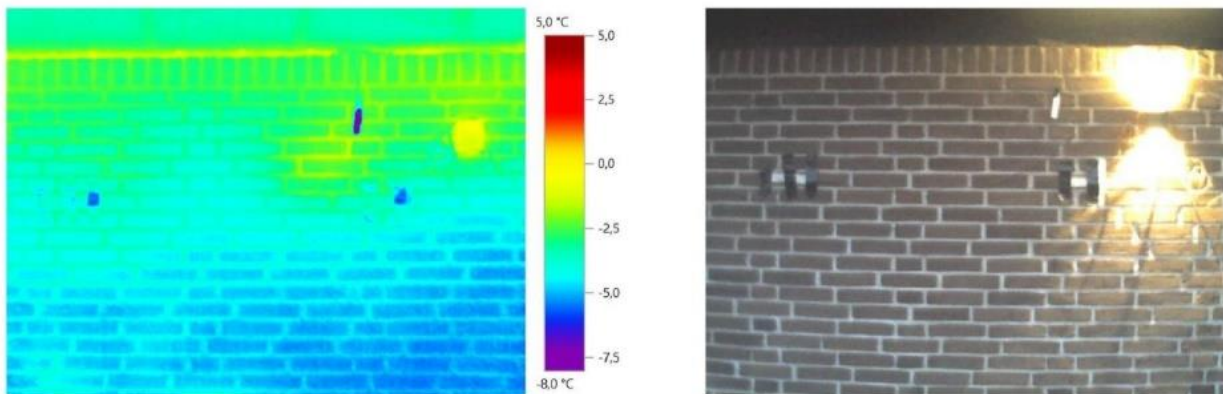
Figur 60: Termografi indefra – 46 timer



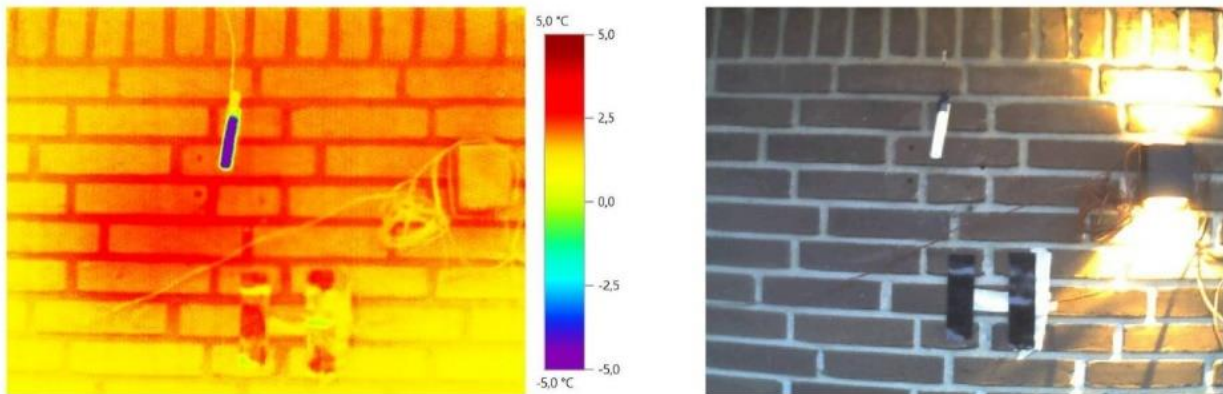
Figur 61: Termografi udefra – 0 minutter



Figur 62: Termografi udefra – 46 timer



Figur 63: Termografi udefra – 46 timer – Afstand 4 meter

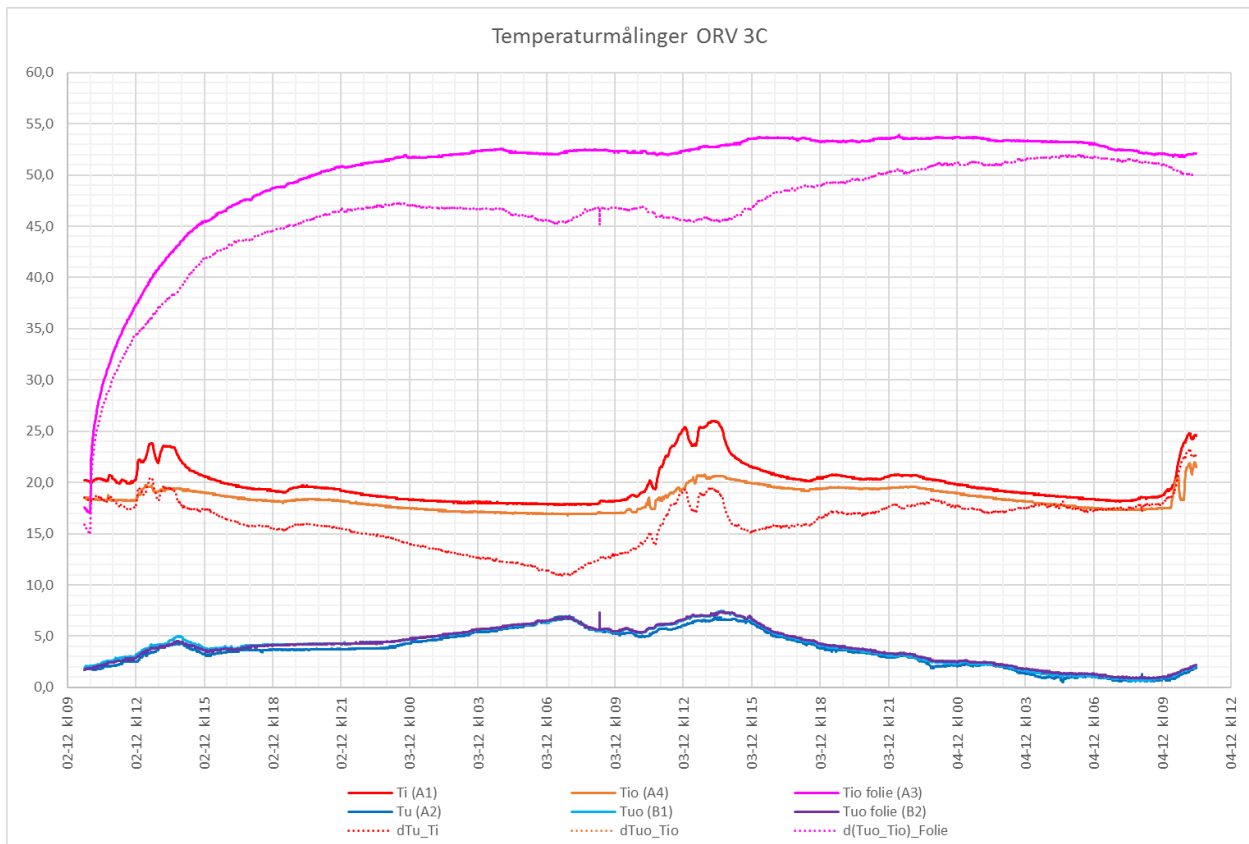


Figur 64: Termografi udefra – 46 timer – Afstand 1 meter

Termografi viser en temperaturvariation over område på 0-2 grader. Varmeste punkt er ikke ud for varmemolie, hvilket kan skyldes kuldebro i konstruktionen, fx ved ujævn hulmursisolering.

1.7.4. Måleresultater

Nedenstående viser måleforløbet. Der er målt over to døgn.

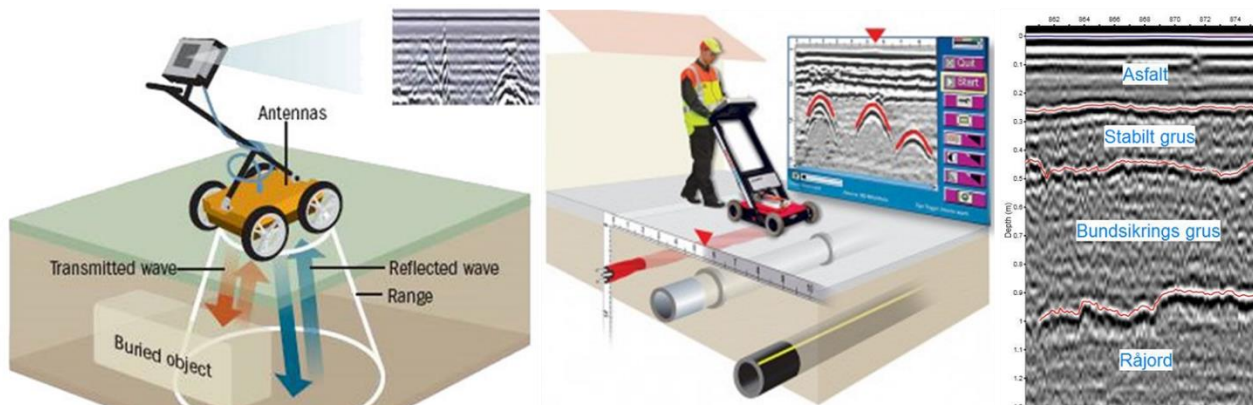


Figur 65: Måleforløb af testet hulmurskonstruktion

Som det ses af ovenstående figur vil der ofte være en ikke ubetydelig temperaturforskel over dagen og specielt solpåvirkning kan påvirke måleresultaterne markant. Grafen viser også at den udvendige overfladetemperatur primært følger udetemperaturen. Varmepåvirkningen indefra kan nærmest ikke genfindes på udvendig side og metoden til bestemmelse af U-værdi på denne måde giver urealistiske værdier, og vurderes for tunge konstruktioner at skulle gennemgå yderligere undersøgelser.

3. Metode 3 – Georadar

Udover simuleringer, Hot-Box test og in-situ måling på en tung ydervægskonstruktion blev der indledningsvis undersøgt om man kunne anvende en georadar som non-destruktivt måleinstrument til on-site dokumentation af isoleringstykkelse.



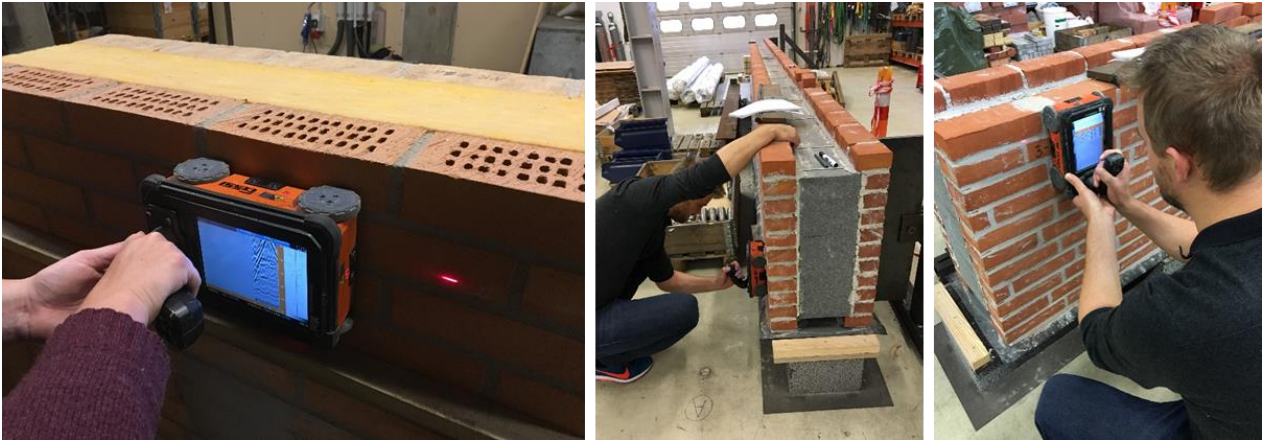
- Sender elektromagnetisk puls og registrerer overgang mellem forskellige materialer ud fra forskel i deres dielektriske modstand
- Bruges ofte til at finde armering i beton
- Kan også bruges til at finde murbindere

Figur 66: Brug af georadar

Georadaren blev brugt på 6 forskellige ydervægskonstruktioner med varierende isoleringstykkelse og materiale, se nogle af billederne nedenunder.

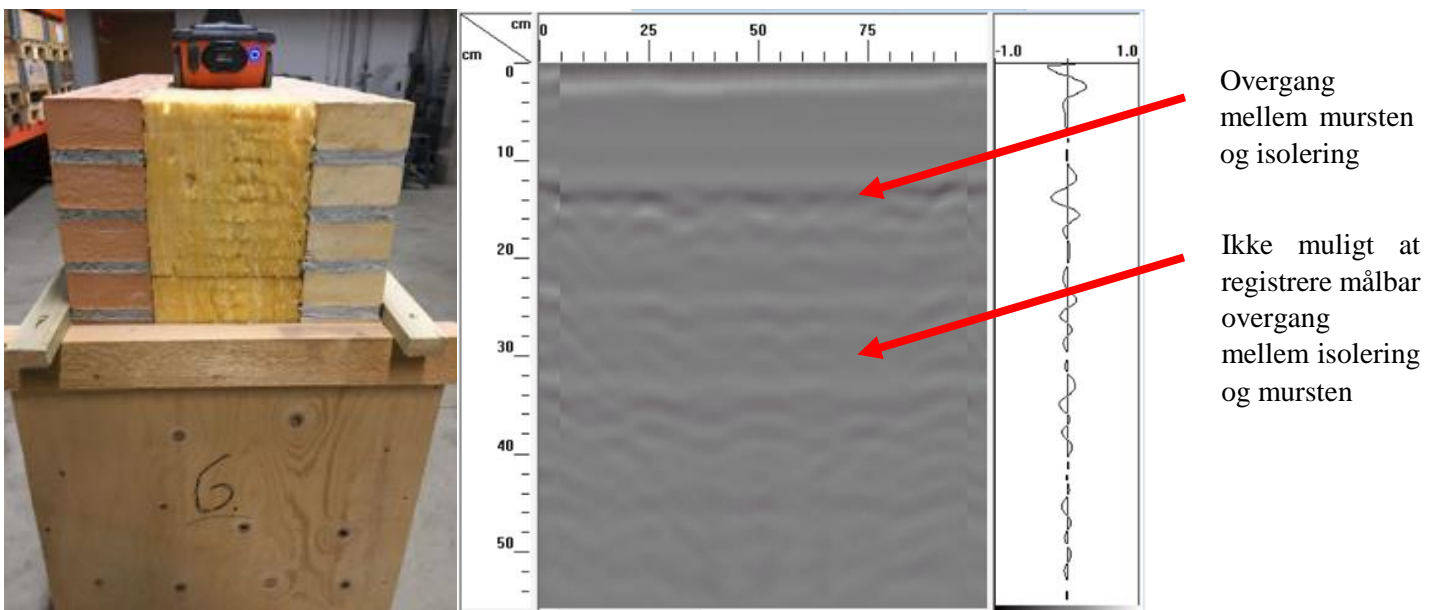


Figur 67: Brug af georadar på forskellige ydervægge

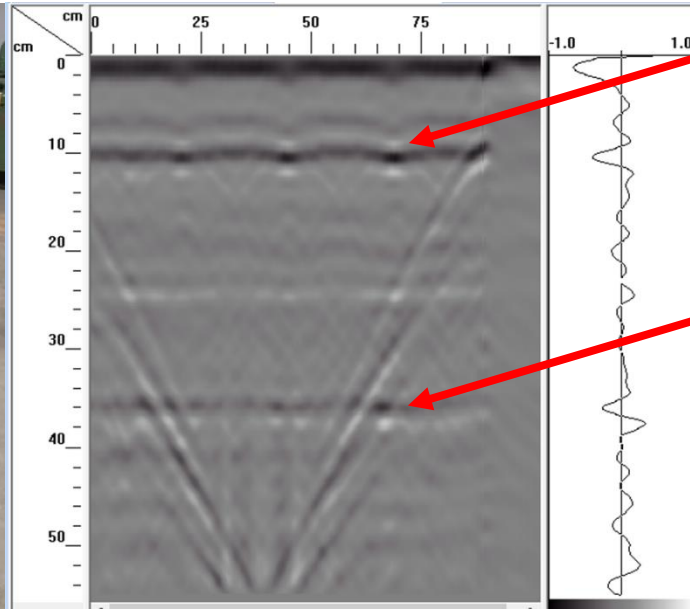


Figur 68: Brug af georadar på forskellige ydervægge

Resultaterne af 2 målinger på nedenstående grafer, viser at typen af den anvendte isolering har betydning for om georadaren kan registrere overgange mellem forskellige materialer, og dermed give en indikation af den anvendte isoleringstykkelse. Metoden vurderes derfor ikke egnet til videre brug af non-destruktive on-site målinger af isoleringstykkelse. Udover typen af isolering, så forventes anvendelse af hulrum, samt fugtniveauet i isoleringsmateriale også at have betydning på måleresultaterne.



Figur 69: Isoleringstypen gør det ikke muligt at registrere overgang mellem isoleringslaget og murværket.

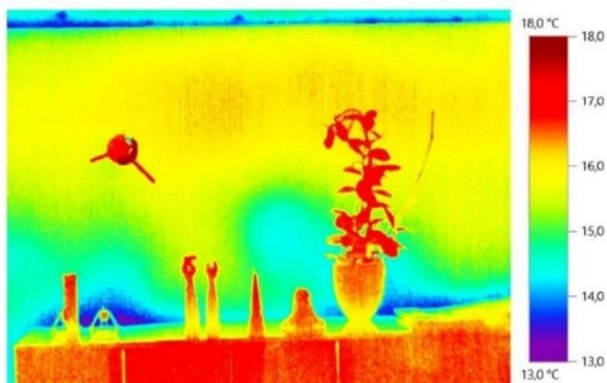


Overgang mellem mursten og isolering

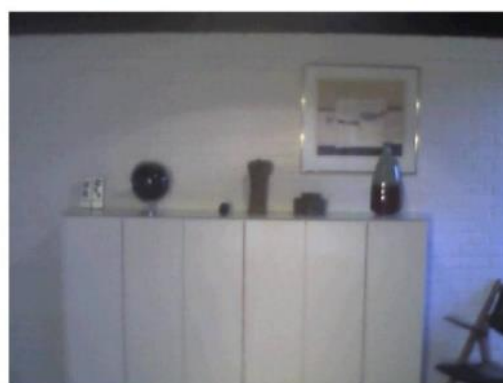
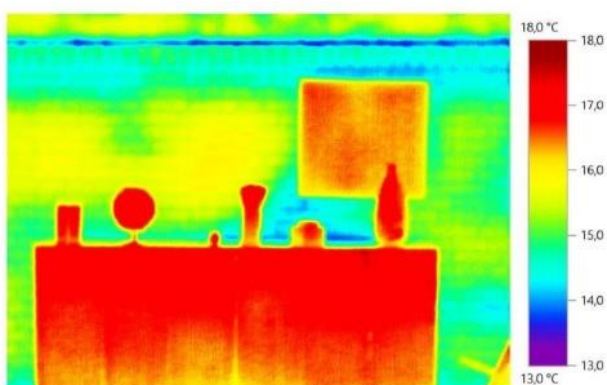
Overgang mellem mursten og isolering

4. Metode 4 – Termografering

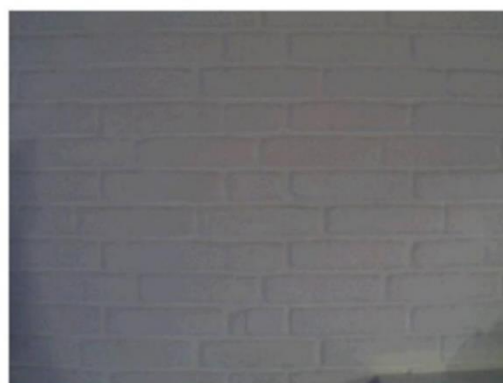
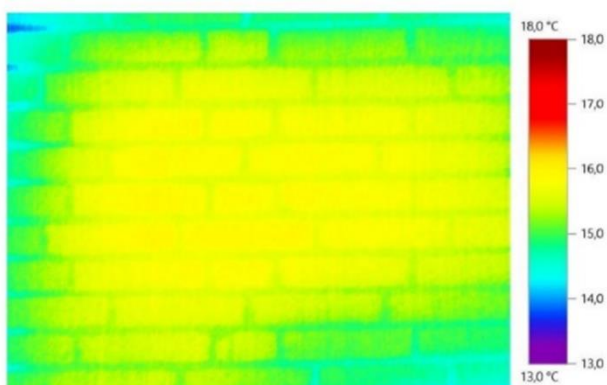
Der er anvendt termografering til at vurdere hvorvidt en ydervægskonstruktion har rimeligt ensartet temperaturforhold. Følgende billeder viser termografibilleder taget af en isoleret hulmurskonstruktion på 295 mm. Termografibillederne er taget med udeforhold på cirka 0°C og indetemperaturer på ca. 20°C.



Figur 70: Termografibillede af ydervæg mod nord



Figur 71: Termografibillede af ydervæg mod øst




Figur 72: Termografibillede af ydervæg mod øst (close-up)

Termografibillederne viser variation over overfladen på typisk 0-2 grader, hvilket med usikkerhederne beskrevet i afsnit ”Metode 1 – Temperaturforskelle og isolans” kan give usikkerheder på op til 50-60%. Det gør at hvis man ønsker at bestemme U-værdien med metoden, der indbefatter den indvendige overfladetemperatur, så skal man foretage målinger flere steder og vægte disse resultater.


5. Energimærkning

For at eftervise betydning af usikkerhed på ydervæggens U-værdier i forhold til energimærkning, er der lavet en analyse af et muret hus fra 1952. Data for huset kan ses via figuren nedenfor.

Energimærke	kWh/m ² Grænseværdi	Eksempel Hus 100 m ²	Case Hus 107 m ²
A2020	20	< 20	< 20
A2015	< 30,0 + 1.000/A	< 40,0	< 39,3
A2010	< 52,5 + 1.650/A	< 69,0	< 67,9
B	< 70,0 + 2.200/A	< 92,0	< 90,6
C	< 110 + 3.200/A	< 142,0	< 139,9
D	< 150 + 4.200/A	< 192,0	< 189,3
E	< 190 + 5.200/A	< 242,0	< 238,6
F	< 240 + 6.500/A	< 305,0	< 300,7
G	> 240 + 6.500/A	> 305,0	> 300,7



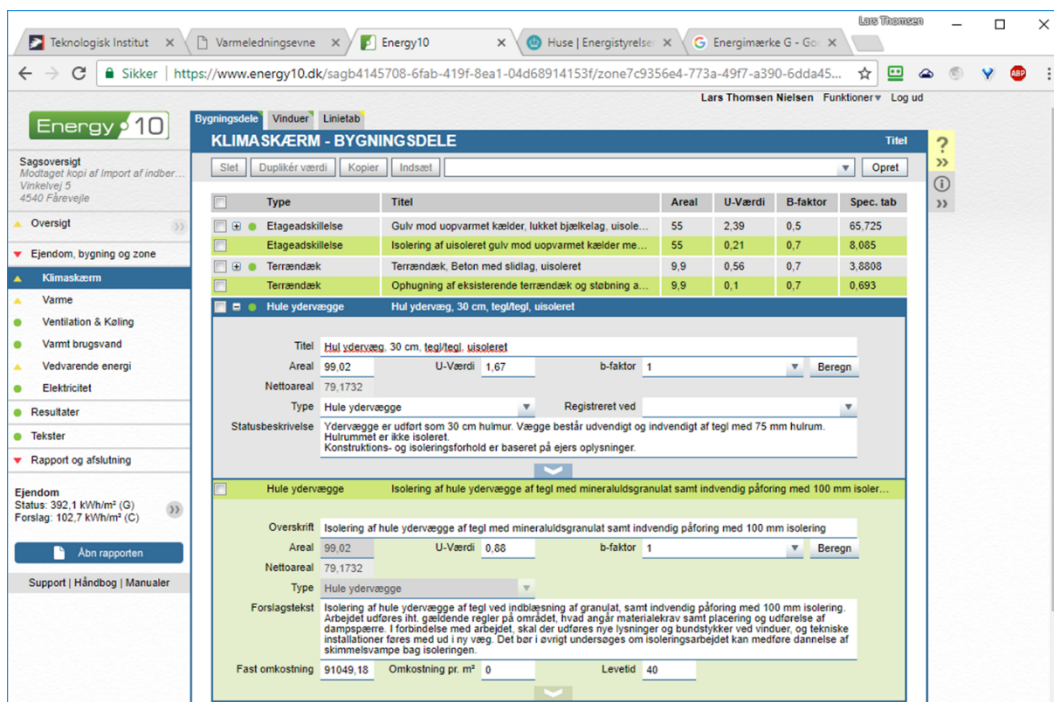
BBR areal: 107 m²
 Opvarmet etageareal: 107 m²
 Heraf opvarmet tagetage: 40 m²
 Uopvarmet kælder: 55 m²
 Opførelsesår: 1952
 Varmekapacitet: Middel tung



Energistatus: 389,0 kWh/m²

Figur 73: Energimærkning og data for analyseret hus

Analysen er foretaget i programmet Energy10, som ofte anvendes af Energikonsulenter. Et screendump af programmet er vist på figuren nedenfor.



Figur 74: Energy10 program til bestemmelse af Energimærkning af huse

Analysen foretaget i Energy10 viser at hvis U-værdien for ydervægskonstruktionen er estimeret for dårlig, så har det betydning for varmetabet for bygningen, men i dette tilfælde er det ikke nok til at rykke Energimærket.







Figur 75: Analyseret hus

Klimaskærm

- Uisoleret hulmur: 79,1 m²
- U-værdi: 1,63 W/m²K
- Specifikt tab: 129,1 W/K

Analyse

I det følgende er der indført en ”positiv” usikkerhedsanalyse på U-værdien for ydervægskonstruktionen.

Usikkerhed	U-værdi W/m ² K	Varmetab W/K	Energistatus kWh/m ²	Forskel kWh/m ²	Energimærke
0%	1,63	129,1	389,0	0	
÷10%	1,47	116,1	376,4	12,6	
÷20%	1,30	103,2	363,2	25,8	
÷30%	1,14	90,3	350,8	38,2	

6. Sammenfatning

Dette notat beskriver de forskellige undersøgte metoder i projektet, for at undersøge om en ny hurtig metode til bestemmelse af U-værdi onsite er brugbar. Udviklingen af sådan en målemetode har vist sig mere vanskeligt end forventet. Især varmekapaciteten i tunge ydervægge har vist sig at have stor betydning, specielt for varigheden af varmepåvirkningen og anvendelse af metoden. Derfor er målinger blevet suppleret af simuleringer, samt undersøgt flere non-destruktive metoder såsom brug af termografi og georadar.

Resultaterne fra afprøvning af metoden baseret på et accelereret temperaturforløb på forskellige rudetyper i lab, gennem påføring af en varmeeffekt på konstruktioner, viser god sammenhæng med simuleringsresultater. Simuleringerne viser desuden en lignende trend for tunge ydervægskonstruktioner. Varmekapaciteten af tunge ydervægge spiller dog en stor rolle og gør en hurtig målemetode vanskeligt. Samtidig er usikkerheder og randbetingelser yderst betydningsfulde. Derfor anbefales der at supplere in-situ målinger med kendte metoder såsom termografi. Målinger med georadar har desværre vist at det er ikke muligt at bruge den til non-destruktive undersøgelser af isoleringstykkelser in-situ.