

# U-verdier for vegger av lettklinkermurverk

**Hege Bjerke Færevaaag**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Tore Kvande, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg, anlegg og transport





Oppgavens tittel: <b>U-verdier for vegger av lettklinkermurverk</b> U-values for LECA masonry	Dato: 10.juni 2014		
	Antall sider (inkl. bilag):		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Hege Bjerke Færevaaag			
Faglærer/veileder: Tore Kvande			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:			

**Ekstrakt:**  
Rapportens formål er å undersøke hvor sensitivt lettklinkermurverk er med tanke på å oppnå prosjektert U-verdi. Det er undersøkt hvilke forhold under oppmuring og i produksjon av blokkene som påvirker U-verdien og disse forholdene er vurdert opp mot hverandre. Parametrene som er undersøkt er fugebredde, fugetykkelse, åpne stussfuger og varmekonduktiviteten til isolasjon og lettklinkerbetong. Beregning av U-verdi er utført både i henhold til NS-EN ISO 6946 og ved bruk av simuleringprogrammet COMSOL Multiphysics.

For å kunne sammenligne beregningene med virkelige verdier er det gjort en måling av U-verdien til et murfelt i et skjermet varmemestrømsapparat (guarded hot box). De faktiske varmekonduktiviteten til materialene brukt i murfeltet er også målt for å gjøre sammenligningsgrunnlaget fullstendig.

Studien har vist at det knyttes flere usikkerheter rundt prosjektert U-verdi for denne typen lettklinkermurverk. Utførelsen av murerarbeidet vil ha stor betydning for den reelle U-verdien for vegg. Selv når det ble murt med et fokus på å unngå utførelsesfeil, var den beregnede U-verdien nesten 6 % lavere enn den målte verdien.

Åpne stussfuger er den parameteren som potensielt kan gi størst endring i prosjektert U-verdi, under utførelsen av murerarbeidet. Stussfuger helt ned i 4 mm vil kunne gi en betydelig endring i U-verdien på grunn av naturlig konveksjon. I tillegg til at effekten av denne parameteren kan være stor, er det observert at åpne og delvis åpne stussfuger er vanlig i denne typen murverk. Det er derfor dette som er ansett som det mest sårbare forholdet med tanke på å oppnå prosjektert U-verdi.

Beregningsresultatene viser at det for denne typen konstruksjoner er fordelaktig å bruke et beregningsprogram for flerdimensjonal varmemestrøm. U-verdiene som er beregnet etter NS-EN ISO 6946 er 3-6 % lavere enn beregningene gjort med COMSOL Multiphysics.

Stikkord:

1. U-verdi
2. Isolasjonsblokk
3. COMSOL Multiphysics
4. NS-EN ISO 6946
5. Skjermet varmemestrømsapparat

(sign.)



## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet, våren 2014. Oppgaven er skrevet innenfor hovedprofilen Bygnings- og materialteknikk ved Institutt for bygg, anlegg og transport.

Først og fremst vil jeg rette en takk til min veileder Tore Kvande for inspirerende og god veiledning. Spesielt vil jeg trekke frem at han var til stor hjelp i valg og utforming av oppgave, at han alltid har tatt seg tid og har gitt meg gode innspill på innholdet i oppgaven. Jeg ønsker også å takke for at han steppet inn som murermester under oppmuringen av murfeltet som ble målt i varmestrømsapparatet.

En takk rettes også til alle andre som har hjulpet med oppgaven. Avdelingsingeniør Ole Aunrønning for hjelp med riving, muring og instrumentering av murfelt. Silje Korsnes for innføring i COMSOL Multiphysics og samtaler rundt feltstudien. Per Christian Moe for hjelp med måling av varmekonduktiviteter. Steinar Grynning for analyse av resultatene fra varmestrømsapparatet. Erlend Kristiansen, ved COMSOL Multiphysics for svar på spørsmål og hjelp med COMSOL-modellene.

Trondheim, juni 2014

---

Hege Bjerke Færevaag



## Sammendrag

Rapportens formål er å undersøke hvor sensitivt lettklinkermurverk er med tanke på å oppnå prosjektert U-verdi. Det er undersøkt hvilke forhold under oppmuring og i produksjon av blokkene som påvirker U-verdien og disse forholdene er vurdert opp mot hverandre. Parametrene som er undersøkt er fugebredde, fugetykkelse, åpne stussfuger og varmekonduktiviteten til isolasjon og lettklinkerbetong.

For å dokumentere usikkerhetene forbundet med oppmuringen av isolasjonsblokkene er det utført en feltstudie. To vegger ble revet og alle avvik i oppmuringen ble dokumentert. Beregning av U-verdi er utført både i henhold til NS-EN ISO 6946 og i simuleringprogrammet COMSOL Multiphysics.

For å kunne sammenligne beregningene med virkelige verdier er det gjort en måling av U-verdien til et murfelt i et skjermet varmestrømsapparat (guarded hot box). De faktiske varmekonduktivitene til materialene brukt i murfeltet er også målt for å gjøre sammenligningsgrunnlaget fullstendig.

Rapporten viser at det er flere usikkerheter knyttet til prosjektert U-verdi for denne typen lettklinkermurverk. Utførelsen av murerarbeidet vil ha stor betydning for U-verdien for veggene. Selv når det ble murt med et fokus på å unngå utførelsesfeil, var den beregnede U-verdien nesten 6 % lavere enn den målte verdien. Det er antatt at dette avviket i hovedsak kommer av de åpne stussfugene som ble registrert under oppmuring.

Fugebredden og fugetykkelsen vil påvirke U-verdien noe for alle blokkvariantene og har størst innvirkning på blokker med god varmeisolering. Store avvik i fugebredde og fugetykkelse vil få stor betydning for U-verdien. Det er imidlertid enkelt å unngå dette ved å bruke mørtelkasse ved muring av denne typen murverk.

Åpne stussfuger er den parameteren som potensielt kan gi størst endring i U-verdi. Simuleringene i COMSOL Multiphysics viser at naturlig konveksjon kan oppstå i stussfuger helt ned i 4 mm og dette vil gi en betydelig endring i U-verdi. I tillegg til at effekten av denne parameteren kan være stor, er det observert at åpne og delvis åpne stussfuger er vanlig i denne typen murverk. Åpne stussfuger er derfor ansett å være det mest sårbare forholdet med tanke på å oppnå prosjektert U-verdi.

Varmekonduktiviteten til isolasjonen har også stor innvirkning på U-verdien. Denne verdien er imidlertid som oftest nøye kontrollert av produsenten. Ved bruk av

deklarerert varmekonduktivitet i U-verdiberegningene er det ikke sannsynlig at denne parameteren fører til avvik i U-verdien. Varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen har liten påvirkning på U-verdien.

Beregningsresultatene viser at det for konstruksjoner av lettklinker isolasjonsblokker er fordelaktig å bruke et beregningsprogram for flerdimensjonal varmestrøm. U-verdiene som er beregnet etter NS-EN ISO 6946 er 3-6 % lavere enn beregningene gjort med COMSOL Multiphysics. Dette betyr at beregningene gjort etter standarden mest sannsynlig gir en U-verdi som er urealistisk bra.



## Abstract

The purpose of this study is to investigate the uncertainties associated with achieving the planned thermal performance for insulated light expanded clay aggregate (LECA) masonry. It is performed a parameter study to investigate the sensitivity of the material properties and the structure of the masonry block system. The parameters studied are the width of the horizontal joints, thickness of horizontal joints, open vertical joints and the thermal conductivity of insulation and lightweight aggregate concrete.

The uncertainties associated with execution of the masonry have been documented through a field study. Two walls were demolished piece by piece and all deviations in the masonry were recorded. Calculations of the U-values are performed both according to NS-EN ISO 6946 and using the simulation software COMSOL Multiphysics.

To compare the calculations with real values, the U-value for a wall element of insulated masonry blocks is measured in a guarded hot box. The actual thermal conductivity of the materials, used in the masonry wall element, is also measured. This makes the calculations comparable to the measurements.

The study has shown that there are several uncertainties associated with the planned U-value for this type of insulated masonry. The execution of the masonry work will have a large impact on the real U-value of the wall. Even when the brickwork was performed with a focus on avoiding execution errors, the calculated U-value was almost 6 % lower than the measured value. It is believed that the deviation mainly comes from the open vertical joints registered during the execution of the masonry.

The width and thickness of the horizontal joints will affect the U-value to some extent for all the block variants, but especially blocks with a good thermal performance. For large deviations, the effect of these factors can have a great impact on the U-value. However, this is easy to avoid by using a mortar box when constructing this kind of masonry.

Open vertical joints is the parameter that potentially can provide the greatest change in the U-value, during the execution of the masonry work. Vertical joints down to 4 mm could result in a significant change in U-value due to natural convection. In addition to the effect of this parameter, it is also observed that open

and semi-open vertical joints are common in this kind of masonry. Therefore this is considered the most vulnerable factor when trying to achieve the planned U-value.

The thermal conductivity of the insulation also has a great impact on the U-value. However, the manufacturer usually carefully controls this value. It is unlikely that this parameter will give a deviation in the U-value when the declared thermal conductivity is used for the calculations. The thermal conductivity of lightweight aggregate concrete has little effect on the U-value.

The results from the calculations show that for this kind of masonry is beneficial to use calculation software for multidimensional heat flow. The U-values calculated according to NS-EN ISO 6946 are 3-6 % lower than the results from the simulations in COMSOL Multiphysics. This means that the calculations done according to the standard most likely gives a U-value that is unrealistically good.

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Bakgrunn og innledning .....</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn .....	1
1.2	Formål .....	1
1.3	Begrensninger .....	2
1.4	Oppbygging.....	3
<b>2</b>	<b>Isolasjonsblokken .....</b>	<b>5</b>
2.1	Isolasjonsblokkens historie .....	5
2.2	Isoblokk-variantene .....	7
2.3	Tidligere arbeider .....	8
<b>3</b>	<b>Feltstudie .....</b>	<b>11</b>
3.1	Riving av murfelt – Leca Isoblokk 25 .....	11
3.2	Muring og riving av murfelt – Scan Isoblokk 35 .....	13
3.3	Byggeplassbesøk .....	15
3.4	Vurdering av feltstudien .....	16
<b>4</b>	<b>U-verdi målt i laboratoriet .....</b>	<b>17</b>
4.1	Forsøksoppsett .....	17
4.2	Måleusikkerheter .....	18
4.3	Resultater.....	19
<b>5</b>	<b>Varmekonduktivitet målt i laboratoriet .....</b>	<b>21</b>
5.1	Metode .....	21
5.2	Resultat.....	22
<b>6</b>	<b>Beregning av U-verdi .....</b>	<b>23</b>
6.1	Materialdata.....	23
6.2	Beregning etter NS-EN ISO 6946.....	24
6.3	Beregning med COMSOL Multiphysics .....	25
6.4	Parameterstudie .....	27
6.4.1	Beregningsoppsett .....	27
6.4.2	Parametere .....	27
<b>7</b>	<b>Beregningsresultater.....</b>	<b>33</b>
7.1	U-verdier .....	33
7.1.1	NS-EN ISO 6946 .....	33
7.1.2	COMSOL Multiphysics .....	34
7.1.3	Sammenligning av beregningene.....	34
7.2	Parameterstudie .....	35
7.2.1	NS-EN ISO 6946 .....	35
7.2.2	COMSOL Multiphysics .....	40
7.2.3	Parametersammenligning .....	48

<b>8</b>	<b>Diskusjon.....</b>	<b>51</b>
8.1	Parametrene.....	51
8.2	U-verdi målt i laboratoriet.....	54
8.3	Beregningssammenligning av COMSOL Multiphysics og NS-EN ISO 6946.....	56
8.4	Utførelses- og produktforbedringer.....	56
<b>9</b>	<b>Konklusjon .....</b>	<b>59</b>
	<b>Vedlegg 1 .....</b>	
	<b>Vedlegg 2 .....</b>	
	<b>Vedlegg 3 .....</b>	
	<b>Vedlegg 4 .....</b>	
	<b>Vedlegg 5 .....</b>	
	<b>Vedlegg 6 .....</b>	

## Figurer

Figur 1 – Leca Isoblokk 35 (Weber, 2014a.).....	6
Figur 2 – Scan Isoblokk 35; normalblokk, hjørneblokk og armeringsblokk (BMC, 2012).....	6
Figur 3 – Riving av vegg.....	12
Figur 4 – Ekstra fugebredde.....	12
Figur 5 – Fugetykkelse.....	13
Figur 6 – Stussfuge 5-6 mm.....	13
Figur 7 – Muring med mørtelkasse.....	13
Figur 8 – Mørtelfuger murt med mørtelkasse.....	13
Figur 9 – Åpen stussfuge, ca. 4 mm. ....	14
Figur 10 – Åpen stussfuge, ca. 4 mm.....	14
Figur 11 – Limrester.....	14
Figur 12 – Kjellervegg. Høyden er justert med hjelp av tykke fuger.....	15
Figur 13 – Fugetykkelse, kjellervegg. ....	15
Figur 14 – Luft mellom mørtelfuge og laftestrimmel.....	15
Figur 15 – Mørtelfuge går 10-20 mm inni laftestrimmel.....	15
Figur 16 - Åpen stussfuge mellom isolasjonkjernene. Horisontalsnitt. ....	16
Figur 17 – Murfelt.....	17
Figur 18 – Skjermet varmemestrømsmåler.....	17
Figur 19 – Innheising av murfelt.....	17
Figur 20 - Skjermet varmemestrømsapparat (guarded hot box) (NS-EN ISO 8990:1997).....	18
Figur 22 – Varmestrøms plateapparat med prøvestykke av EPS.....	21
Figur 23 – Varmestrøms plateapparat med prøvestykke av EPS og isoleringsramme.....	21
Figur 21 - Varmestrøms plateapparat. ....	21
Figur 24 – Scan Isoblokk 35 tegnet i COMSOL Multiphysics.....	26
Figur 25 – Vertikalsnitt av Scan Isoblokk 35.....	26
Figur 26 – Horisontalsnitt av Scan Isoblokk 35.....	26
Figur 27 – Mesh for Scan Isoblokk 35 cm med 7 mm stussfuge.....	26
Figur 28 – Standard fugebredde Scan Isoblokk 35.....	28
Figur 29 – Ekstra fugebredde; 40 mm (2 x 20 mm), Scan Isoblokk 35.....	28
Figur 30 - Ekstra fugebredde med halv fugetykkelse, Scan Isoblokk 35 cm.....	29
Figur 31 - Endring av U-verdi for ekstra fugebredde. ....	36
Figur 32 - Endring i U-verdi for minkende bredde på laftestrimmel.....	36
Figur 33 - Endring i U-verdi ved endring av fugetykkelse. ....	37
Figur 34 – Kombinert ekstra fugebredde og fugetykkelse for Scan Isoblokk 35.....	38
Figur 35 – Kombinert ekstra fugebredde og fugetykkelse for Leca Isoblokk 35.....	38

Figur 36 - Endring i U-verdi ved endring i varmekonduktiviteten til isolasjonen. ....	39
Figur 37 - Endring i U-verdi ved endring av varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen..	39
Figur 38 - Endring av U-verdi for ekstra fugebredde .....	41
Figur 39 - Endring i U-verdi for minkende bredde på laftestrimmel .....	41
Figur 40 - Endring av U-verdi for ekstra fugebredde med halv og vanlig fugetykkelse.....	42
Figur 41 - Endring av U-verdi ved endring av fugetykkelse.....	42
Figur 42 - Endring i U-verdi ved endring av varmekonduktiviteten til isolasjon .....	43
Figur 43 - Endring i U-verdi ved endring av varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen..	43
Figur 44 – Kombinert ekstra fugebredde og fugetykkelse for Scan Isoblokk 35 .....	44
Figur 45 - Kombinert ekstra fugebredde og fugetykkelse for Leca Isoblokk 35 .....	44
Figur 46 – Overflatetemperatur [°C]. Fugetykkelse = 10 mm, Fugebredde = 2 x 105 mm. ..	45
Figur 47 – Overflatetemperatur [°C]. Fugetykkelse = 20 mm, Fugebredde = 2 x 125 mm ...	45
Figur 48 - Endring i U-verdi for åpne stussfuger. Beregnet i COMSOL Multiphysics. ....	45
Figur 49 - Lufthastigheten [m/s] i stussfugene for Leca Isoblokk 35 .....	46
Figur 50 – Lufthastighet [m/s] i stussfuge, Leca Isoblokk 35, 5 mm stussfuge.....	47
Figur 51 – Temperaturer[°C] midt i vegg(fra kald side). Leca Isoblokk 35, 5 mm stussfuge..	47
Figur 52 – Temperatur [°C] i stussfugene. Leca Isoblokk 35, 5 mm stussfuger .....	47
Figur 53 – Temperatur [°C] i horisontalsnitt. Scan Isoblokk 35, 5 mm stussfuger .....	47
Figur 54 - Endring i U-verdi ved endring av parametere. Beregnet i COMSOL Multiphysics .....	48
Figur 55 - Endring i U-verdi ved endring av parametere. Beregnet i COMSOL Multiphysics .....	48

## Tabeller

Tabell 1 – U-verdi for blokkvariantene (BMC, 2012), (Weber, 2014b.,c.,d.) .....	7
Tabell 2 – Varmekonduktivitet [W/m K] for vanger og isolasjon (RC Beton, 2014), (Weber, 2013a.,b.,c.), (Weber, 2014b.,c.,d.) .....	7
Tabell 3 – Målt og oppgitt U-verdi [W/m <sup>2</sup> K] for et veggfelt med Scan Isoblokk 35.....	19
Tabell 4 – Varmekonduktivitet for EPS og lettklinker for Scan Isoblokk .....	22
Tabell 5 – Varmekonduktivitetene som er brukt i beregning av U-verdi. ....	23
Tabell 6 – Bredde for vanger, isolasjonskjerne, mørtelfuger og laftestrimmel for isolasjonsblokkene. Lettklinker- og mørtelbredden er totalen for begge vangerne. ....	28
Tabell 7 – Korreksjonsfaktor for fuktinnhold (NS-EN ISO 10456).....	30
Tabell 8 – U-verdier[W/m <sup>2</sup> K] beregnet etter NS-EN ISO 6946 og oppgitt av leverandør.....	33
Tabell 9 – U-verdier[W/m <sup>2</sup> K] oppgitt av leverandør og beregnet. ....	34
Tabell 10 – U-verdi [W/m <sup>2</sup> K] beregnet etter NS-EN ISO 6946 og i COMSOL Multiphysics. ....	35
Tabell 11 – U-verdi for luftspalte mellom mørtel og laftestrimmel. ....	40
Tabell 12 – Eksempel på endring i U-verdi for en vegg med lite eller mye stussfuger, basert på de to murfeltene som er revet i feltstudien .....	47
Tabell 13 – Sannsynlige avvik for Scan Isoblokk 35.....	52
Tabell 14 – Sannsynlige avvik for Leca Isoblokk 35 .....	53
Tabell 15 – Maksimale avvik for Scan Isoblokk 35.....	54
Tabell 16 – Maksimale avvik for Scan Isoblokk 35.....	54
Tabell 17 – U-verdi [W/m <sup>2</sup> K] for Scan Isoblokk 35. Sammenligning av målte og beregnede verdier .....	54
Tabell 18 – Antatte avvik for vegg målt i laboratoriet .....	55
Tabell 19 – Forbedring i U-verdi med bredere laftestrimmel .....	57





# 1 Bakgrunn og innledning

## 1.1 Bakgrunn

Isolasjonsblokker, også kalt sandwichblokker, er et murprodukt med vanger av lettklinkerbetong og en midtre kjerne av isolasjon. Denne typen lettklinkermurverk brukes som yttervegger i varmeisolererte konstruksjoner. Som isolasjonsmaterialet i kjernen benyttes polyuretanskum (PUR) eller ekspandert polystyren (EPS).

Tykkelsen bestemmes ut i fra hvor god varmeisolering som ønskes for veggen . Veggene mures som massive vegger, uten hulrom for ventilering og drenering. Det mures med strengmuring. Det vil si to skilte mørtelstrenger i liggefugen mellom blokkene. Mellom mørtelstrengene legges det inn isolasjonsstrimler (laftestrimler) for å oppnå god varmeisolering.

Lettklinkermurverk er robuste konstruksjoner og lette å bygge. Sammenlignet med bindingsverkvegger som er varmeisolert på byggeplass, kan det tenkes at veggene blir utført med få avvik som virker på U-verdien til den ferdige veggen. Det er imidlertid ikke dokumentert at dette stemmer.

## 1.2 Formål

Rapportens formål er å undersøke hvor sensitivt lettklinkermurverk er med tanke på å oppnå prosjektert U-verdi. Det er undersøkt hvilke forhold i oppmuring og i produksjon av blokkene som påvirker U-verdien. Disse er vurdert opp mot hverandre for å identifisere de forholdene som vil gi størst endring i U-verdi.

Kuldebroer, utettheter og isolasjonsfeil får større konsekvenser for konstruksjoner med store isolasjonstykkelser. Etter hvert som kravene til varmeisolering øker blir det viktigere å ta hensyn til faktorene som kan ha negativ innvirkning på varmeisoleringssevnen til konstruksjonen. Mørtel har langt større varmeledningsevne enn lettklinkerbetong og isolasjon. Fugene vil derfor være kuldebroer i veggen.

Bredden og tykkelsen til fugene kan variere og er avhengig av hvordan det mures. Disse variasjonene vil videre påvirke veggens varmeisoleringssevne. Dette er her vurdert i en parameterstudie med beregninger etter NS-EN ISO 6946 og beregninger utført i COMSOL Multiphysics.

Størrelsesforskjell på blokkene, samt skjevheter i vegg eller underlag, kan føre til at isolasjonsblokkene ikke blir murt helt i knas. Dette vil gi åpne stussfuger. Hvis det oppstår naturlig konveksjon i stussfugene vil det kunne ha stor innvirkning på

varmeisoleringssevnen til veggen. Dette undersøkes i simuleringsprogrammet COMSOL Multiphysics.

Den viktigste materialeegenskapen for å oppnå en god U-verdi er varmekonduktiviteten (også referert til som  $\lambda$ -verdien). For lettklinkerbetong, PUR og EPS vil varmekonduktiviteten være avhengig av densiteten til materialet. For lettklinkerbetong vil i tillegg fuktinnholdet være en viktig faktor. I denne rapporten er U-verdiens sensitivitet for variasjon i varmekonduktivitet for isolasjon og lettklinkerbetong undersøkt.

For å kunne sammenligne beregningene med virkelige verdier er det gjort en måling av U-verdien til et murfelt i et skjermet varmemestrømsapparat (guarded hot box). De faktiske varmekonduktiviteten til materialene brukt i murfeltet er også målt for å gjøre sammenligningsgrunnlaget fullstendig.

Beregningene er utført både i henhold til NS-EN ISO 6946 og ved bruk av simuleringsprogrammet COMSOL Multiphysics. Disse beregningene er sammenlignet for å undersøke om de forenklede beregningene gjort etter standarden vil gi et stort avvik fra beregningene gjort i COMSOL Multiphysics der flerdimensjonal varmemestrøm i større grad tas hensyn til.

### **1.3 Begrensninger**

I rapporten er fem typer isolasjonsblokker vurdert; Scan Isoblokk 35, Scan Isoblokk 25, Leca Isoblokk 25, Leca Isoblokk 30 og Leca Isoblokk 25. Målingene gjort i laboratoriet er kun gjort for Scan Isoblokk 35. Arbeidet med å bygge opp og måle U-verdien for et murfelt i et skjermet varmemestrømsapparat er omfattende. Det var derfor kun tid og ressurser til å måle et murprodukt. Måling av varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen og isolasjonen ble også kun gjort for Scan Isoblokk 35. For Leca Isoblokkene eksisterer det godt dokumentert informasjon om varmekonduktiviteten (SINTEF Byggforsk, 2011). Det var derfor ikke behov for å måle denne typen blokker.

For måling av U-verdi i laboratoriet samt beregningene gjort etter NS-EN ISO 6946 og i COMSOL Multiphysics, er det ikke brukt eller tatt hensyn til U-blokker, endeblokker, hjørneblokker, toppblokker eller overdekningsblokker. Det er kun brukt og beregnet med normalblokker. Dette gir en noe bedre U-verdi enn det en reell konstruksjon med denne typen blokker vil ha.

## 1.4 Oppbygging

Rapporten starter med en introduksjon til isolasjonsblokken og en innføring i isolasjonsblokkens historie. Det er så gjort rede for blokkvariantene som er undersøkt. Videre er det tatt for seg litteratur som er relevant for denne rapporten.

For å dokumentere usikkerhetene forbundet med oppmuringen av isolasjonsblokkene er det utført et feltstudie. Feltstudiet består i oppmuring av en vegg og riving av to vegger murt med denne typen blokker. Det er også gjennomført et byggeplassbesøk for å se denne typen arbeid utført i praksis av erfarne murere. På bakgrunn av feltstudien er parametrene som skal undersøkes identifisert og realistiske verdier for parametrene er funnet.

Videre er et murfelt med Scan Isoblokk 35, målt i et skjermet varmestrømsapparat for å finne U-verdien. Dette er gjort for å kunne sammenligne den reelle U-verdimålingen med beregningene. Lettklinkerbetong og EPS fra det samme partiet med isolasjonsblokker er målt i et varmestrømsplateapparat for å finne varmekonduktiviteten til materialene. Dette er gjort for å sikre riktige verdier til beregningene.

Beregning av U-verdi for fem forskjellige isolasjonsblokker er gjort i henhold til NS-EN ISO 6946 og i simuleringsprogrammet COMSOL Multiphysics. Det er utført et parameterstudie med begge beregningsmetodene for å undersøke virkningen av de forskjellige parameterne. I disse beregningene er resultatene fra feltstudien og målt varmekonduktivitet brukt.

Videre følger en diskusjon der det er satt opp det som anses som sannsynlige avvik for parametrene og endringen dette vil gi for U-verdien. De sannsynlige maksimale avvikene er også diskutert. Til slutt er det satt opp de antatte avvikene for veggene som er målt i varmestrømsapparatet for å få en beregning som gir samme resultat som målingene.



## 2 Isolasjonsblokken

Isolasjonsblokker egner seg godt til yttervegger for flere typer bygg som eneboliger, rekkehus og terrassehus, samt mindre næringsbygg, hoteller, skoler og institusjonsbygg. Fordelen med slike isolasjonsblokker er at de fungerer både som bæring, isolasjon og værhud. (maxit, 2006)

Det anbefales å bruke en mørtelkasse for å enkelt mure to separate mørtelfuger i riktig bredde og tykkelse. Deretter legges det en laftestrimmel mellom fugene for å hindre at fugene blir gjennomgående kuldebroer.

Ved åpninger for vinduer og dører samt i toppen av veggen, må det ofte forsterkes ved hjelp av U-blokker, toppblokker og overdekningsblokker. I hjørner og på sidene av åpninger brukes henholdsvis, hjørneblokker og endeblokker. U-blokkene og endeblokkene har dårligere varmeisoleringssevne enn resten av veggen. (SINTEF Byggforsk, 2013) I beregningene i denne rapporten vil dette ikke bli tatt hensyn til og det vil kun bli sett på normalblokker.

### 2.1 Isolasjonsblokkens historie

Isolasjonsblokker med vanger av lettklinker og isolasjonskjerne av PUR ble introdusert på det norske markedet i 1982. Dette var produktet Leca Isoblokk produsert av Norsk Leca, nå Weber Saint-Gobain. Isoblokken har blitt en suksess i det norske markedet og har gjort arkitektur med bruk av murblokk-produkter mer synlig. (Vik og Hyrve, 1991)

Den massive Leca blokken kom til det norske markedet som et isolasjonsprodukt allerede på midten av 50-tallet. U-verdien til disse 250 mm blokkene var  $0,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  og var ansett som tilstrekkelig varmeisolasjon for en yttervegg helt frem til oljekrisen på 70-tallet. Oljekrisen førte til et større fokus på energisparing og man begynte å se etter nye løsninger som kunne redusere oppvarmingsbehovet. (Vik og Hyrve, 1991)

I 1978 ble den første isolasjonsblokken introdusert i Norge. Dette var den tyske Gisoton blokken med et hulrom med 100 mm løs polystyren. For en veggtykkelse på 300 mm ga den en U-verdi på  $0,45 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . (Vik og Hyrve, 1991)

Forskriftskravet for maksimal U-verdi ble i 1981 senket til  $0,35 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Dette gjorde at det måtte utvikles et nytt konsept for isolasjonsblokker. Fra 1977 til 1982 utviklet Leca sandwichblokken Leca Isoblokk. Denne blokken hadde PUR som

isolasjonskjerne. Dette gjorde at U-verdien ble redusert til  $0,35 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , samtidig som blokktykkelsen ble redusert fra 300 mm til 250 mm. (Vik og Hyrve, 1991)

PUR inneholdt KFK-stoffer som er skadelig for ozonlaget. En ny Leca Isoblokk uten KFK ble derfor introdusert i 1989. Isolasjonstykkelsen måtte økes for å kompensere for høyere varmekonduktivitet til PUR uten KFK. Blokkene beholdt derimot den samme tykkelsen på grunn av smalere vanger med bedre styrke. U-verdien ble også senket med 10 %. (Vik og Hyrve, 1991)

Senere har Leca Isoblokk 30 kommet på markedet og i 2009 ble Leca Isoblokk 35 introdusert, se Figur 1 (Bygg bedre. 2009). U-verdien for denne isoblokken er  $0,15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Dette er godt under isolasjonskravet til Byggeteknisk forskrift (TEK10) for yttervegger, som er  $0,18 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . (Weber, 2011)

For å møte fremtidens krav for energibruk i bygninger har Weber produsert Leca Rex Isoblokk med 300 mm isolasjonskjerne og total tykkelse 500 mm. Denne blokktykkelsen vil ikke alltid være praktisk å bygge med. (Time et al., 2012) Blokken finnes ikke på de norske produksidene til Weber, men på den svenske nettsiden er den tilgjengelig. Blokken har en oppgitt U-verdi på 0,07 (Weber, 2014a.) Weber har også produsert en prototype for en blokk med vakuumisolasjonspaneler (VIP) støpt inn i PUR-isolasjonen. Denne er ikke ute på markedet enda, men det er blitt gjort målinger på en vegg murt med denne typen blokker på SINTEF Byggforsk, se delkapittel 2.3.



Figur 1 – Leca Isoblokk 35 (Weber, 2014a.)



Figur 2 – Scan Isoblokk 35; normalblokk, hjørneblokk og armeringsblokk (BMC, 2012)

BMC AS (Building Material Corporation) er et danskeid selskap. De produserer Scan Isoblokk som på nåværende tidspunkt er eneste produkt tilsvarende Leca Isoblokk som levers til Norge. Scan Isoblokk ble produsert første gang i 1991 og ble introdusert på det norske markedet samme år. BMC produserer og leverer lettklinkerkuler til RC Beton som produserer blokkene. Disse blir levert tilbake til BMC og distribueres til det norske markedet. Isoblokkene leveres også til Danmark,

Sverige, Tyskland og Holland.(BMC, 2014a.) Scan Isoblokk 35 kan ses i Figur 2 og har en U-verdi på 0,17 W/m<sup>2</sup> K i følge BMC (2012).

## 2.2 Isoblokk-variantene

Isolasjonsblokkene finnes i flere forskjellige typer og størrelser. I Norge er det to leverandører, Weber Saint-Gobain som produserer Leca Isoblokk og BMC som produserer Scan Isoblokk. I denne rapporten er de fem forskjellige isolasjonsblokker undersøkt. Tabell 1 viser blokktypene med tilhørende U-verdi og blokktykkelse.

Tabell 1 – U-verdi for blokkvariantene (BMC, 2012), (Weber, 2014b.,c.,d.)

	<b>U-verdi</b> [W/m <sup>2</sup> K]	<b>Blokktykkelse</b>
Scan Isoblokk 35	0,17	350 mm
Scan Isoblokk 25	0,29	250 mm
Leca Isoblokk 35	0,15	350 mm
Leca Isoblokk 30	0,22*	300 mm
Leca Isoblokk 25	0,29*	250 mm

\*Verdien er for *komplett* vegg uten dører og vegger

Hovedforskjellen mellom Scan Isoblokk og Leca Isoblokk er at Scan bruker EPS som isolasjonskjerne og Leca bruker PUR. EPS-isolasjonen limes fast mellom lettklinkervangene, mens PUR-isolasjonen skummes mellom vangene og holder dermed vangene sammen når den stivner.

Blokkene har også forskjellig materialegenskaper. Den viktigste egenskapen i denne sammenheng er varmekonduktiviteten. Disse er opplyst i Tabell 2.

Tabell 2 – Varmekonduktivitet [W/m K] for vanger og isolasjon (RC Beton, 2014), (Weber, 2013a.,b.,c.), (Weber, 2014b.,c.,d.)

	<b>Scan</b> <b>Isoblokk</b>	<b>Leca</b> <b>Isoblokk</b>
<b>Vanger</b>	0,16	0,26
<b>Isolasjon</b>	0,038	0,024

Informasjonen om materialegenskapene til Scan Isoblokk opplyst i produktblader og ytelseserklæring er ikke konsekvente. Gjennom mailkorrespondanse med RC Beton ble varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen og isolasjonen brukt i Scan Isoblokk opplyst (RC Beton, 2014).

Scan Isoblokk 35 og Leca Isoblokk 35 har i følge leverandørene U-verdi på henholdsvis 0,17 W/m<sup>2</sup>K og 0,15 W/m<sup>2</sup>K (BMC, 2012)(Weber, 2014b.).

Kravet for U-verdi for yttervegger gitt i TEK10 er  $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Disse produktene tilfredsstillter derfor kravet til TEK10 uten tilleggsisolering. Hvis virkelig U-verdi er høyere enn beregnet er det ikke sikkert at konstruksjonen tilfredsstillter varmeisoleringskravene. Det er derfor størst fokus på disse blokktypene i denne rapporten.

### 2.3 Tidligere arbeider

SINTEF Byggforsk har gjennomført en undersøkelse med måling av U-verdi for veggkonstruksjoner med vakuumisolasjonspaneler. Dette er oppsummert i artikkelen ”*Large scale measurements and calculations of wall elements with vacuum insulation panels (VIPs)*”. (Korsnes et al., 2014) Et av veggfeltene som ble undersøkt var murt opp med en prototype Leca isolasjonsblokk med VIP støpt inn i PUR-kjernen. U-verdien ble beregnet i COMSOL Multiphysics og i THERM 1D og i tillegg ble den målt i et skjermet varmestrømsapparat. Resultatene viste at de beregnede U-verdiene var 20 % (COMSOL) og 21 % (THERM) mindre enn den målte verdien fra varmestrømsapparatet. Dette er relativt store avvik og det er uvanlig at de målte verdiene er høyere enn de beregnede. (Korsnes et al., 2014).

En foreløpig parameterstudie viste at avviket i U-verdi kunne skyldes mørtel fra horisontalfugene som hadde trengt inn i rommet mellom de to fugene som er fylt med mineralull (Korsnes et al., 2014). Hvorvidt dette har skjedd kan undersøkes ved å rive vegg og inspisere fugene. Dette er gjort i feltstudien som er utført i forbindelse med denne rapporten, se Kapittel 3.

Det store avviket mellom målte og beregnede verdier som ble dokumentert i Korsnes et al. (2014), var den utløsende faktoren for at parametere som påvirker U-verdien til lettklinkermurverk er undersøkt i denne rapporten.

Norges byggforskningsinstitutt (senere SINTEF Byggforsk) utførte i 1986 en rekke målinger som ble samlet i prosjektrapporten ”*Måling av k-verdier for hele veggmoduler*” (Uvsløkk, 1986). I denne undersøkelsen ble U-verdien (tidligere kaldt k-verdi) til 18 veggfelt målt i et skjermet varmestrømsapparat. Blant disse, var et murtfelt med Leca Isolasjonsblokk med tykkelse 250 mm. Dette er den første isolasjonsblokken produsert av Leca, se delkapittel 2.1. Blokken hadde vanger på 100 mm og en PUR-kjerne på 50 mm. Murtfeltet ble murt med to adskilte mørtelstrenger, men det ble ikke benyttet laftestrimmel mellom mørtelfugene.

U-verdien til veggfeltet ble målt i et skjermet varmestrømsapparat og i tillegg beregnet etter NS 3031 (1981) med målte verdier for varmekonduktiviteten til materialene. Resultatene viste at disse verdiene stemte godt overens med hverandre.



Målingene i varmemestrømsapparatet ga en U-verdi på 0,326 W/m<sup>2</sup> K og beregningene med målte  $\lambda$ -verdier ga en U-verdi på 0,325 W/m<sup>2</sup> K. Altså en feil på kun -0,3 %. (Uvsløkk, 1986) Grunnen til at det her blir et så lite avvik, kan være at det er luft og ikke laftestrimmel mellom mørtelstrengene. I beregningene er det mest sannsynlig lagt inn en varmemotstand for luft, men denne er ikke så mye større enn varmemotstanden til mørtelen. Mørtel i luftrommet mellom mørtelfugene vil derfor ikke utgjøre noen betydelig forskjell.

På tross av liten forskjell mellom målt og beregnet U-verdi, konkluderer rapporten med at for denne typen konstruksjoner gir beregningene for lav U-verdi i forfold til den målte verdien. Dette fordi det kan være vanskelig å få med full effekt av kuldebroene i beregningene. (Uvsløkk, 1986)

I artikkelen "Energy Design of Sandwich Masonry Blocks" (Time et al., 2012) blir det blant annet sett på effekten av naturlig konveksjon i stussfuger for Leca Isoblokk Rex. Naturlig konveksjon i stussfugene vil føre til transport av varme fra varm til kald side av vegg. Det er gjort simuleringer i COMSOL Multiphysics, THERM 6 2D og beregninger etter NS-EN ISO 6946. Resultatene viste at stussfugene med luft ville ha stor betydning for varmeisoleringssevnen til konstruksjonen. Spesielt hvis stussfugene er tykkere enn 4 mm. Resultatene viste også at beregningene gjort med THERM er konservative for smale stussfuger og overestimerer U-verdien sammenlignet med beregningene gjort etter NS-EN ISO 6946 og simuleringene i COMSOL. For tykkere stussfuger vil simuleringene i COMSOL Multiphysics føre til en betydelig økning i U-verdien. Endringen i U-verdien for beregningene gjort etter standarden vil fremdeles være liten. Det skyldes at denne beregningen kun i liten grad tar hensyn til effekten fra naturlig konveksjon. (Time et al., 2012)

Arbeidsutførelsens innvirkning på U-verdien for vegger av bindingsverk er undersøkt i hovedoppgaven til Helen Gåsvik, *"Innvirkning av forskjellige arbeidsutførelser på varmeisolasjonen"* (1984). Her blir flere veggfelt av bindingsverk, med forskjellige isolasjonsfeil, målt i et skjermet varmemestrømsapparat. U-verdiene for veggene med "feilfri" arbeidsutførelse ble også beregnet, både med nominelle  $\lambda$ -verdier fra NS 3031 (1981) og med målte  $\lambda$ -verdier. Beregnet U-verdi med målte  $\lambda$ -verdier var lavere enn de målte U-verdien for en "feilfri" konstruksjon, selv om disse verdiene i teorien skulle vært like. Dette er det samme som ble funnet i Uvsløkk (1986) og kommer av at en vegg aldri vil bli helt "ideell", slik som i beregningene. For de to veggtypene som ble undersøkt var U-verdiene beregnet med nominelle  $\lambda$ -verdier, 13 % og 15 % høyere enn de beregnet med målte verdier. Dette er på grunn av sikkerhetspåslaget som er innebygd i varmekonduktiviteten til materialene. Gåsvik konkluderer med at det ser ut som sikkerhetspåslaget en får ved beregning etter NS 3031 er nok til å dekke økningen i U-verdi ved de vanligste isolasjonsfeilene.



### 3 Feltstudie

Det ble utført en feltstudie i laboratoriene til SINTEF Byggforsk, NTNU, for å observere utførelsen av lettklinkermurverk. Observasjonen ble gjort med tanke på de faktorene som kan påvirke U-verdien. Det ble gjort observasjoner av en vegg med en variant av Leca Isoblokk 25 under riving av veggen. Oppmuringen av et murfelt med Scan Isoblokk 35, som er målt i laboratoriet i Kapittel 4, er også observert og deretter rivingen av det samme murfeltet. Det ble i tillegg gjennomført et besøk på byggeplass.

De faktorene som på forhånd ble antatt å kunne påvirke U-verdien under lettklinkermurverk i oppmuringen av veggen er:

- Fugebredde
- Fugetykkelse
- Åpne stussfuger

Disse forholdene ble derfor observert i feltstudien.

For å kunne dokumentere i hvor stor grad utførelsen påvirker U-verdien er det viktig å få reelle mål på faktorene nevnt ovenfor. For eksisterende lettklinkermurverk er disse faktorene vanskelige å måle. Feltundersøkelsen er derfor gjort i forbindelse med riving og muring av murvegger bygget av isolasjonsblokker.

#### 3.1 Riving av murfelt – Leca Isoblokk 25

I laboratoriet til SINTEF Byggforsk var et murfelt som tidligere hadde blitt undersøkt i andre forskningsprosjekter, se delkapittel 2.3. Dette murfeltet var murt i Leca Isoblokker, med et 50 mm tykt vakuumisolasjonspanel lagt inn i PUR-isolasjonen i kjernen. (Korsnes et al., 2014) Blokkene er ellers like Leca Isoblokk 25 og utførelsen av murerarbeidet er derfor det samme. I denne feltstudien ble murfeltet revet for å se på mørtelfugene og å registrere fugebredd og fugetykkelse.

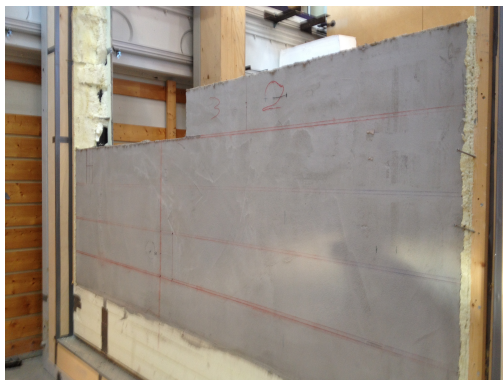
Veggen ble plukket fra hverandre blokk for blokk, fra topp til bunn, se Figur 3. For hvert sjikt ble det tatt bilder av mørtelfugene og blokkene. Dette er vist i Figur 4. Bildene ble analysert og fugebredden og mellomrommet mellom stussfugene ble målt.

##### *Fugebredde*

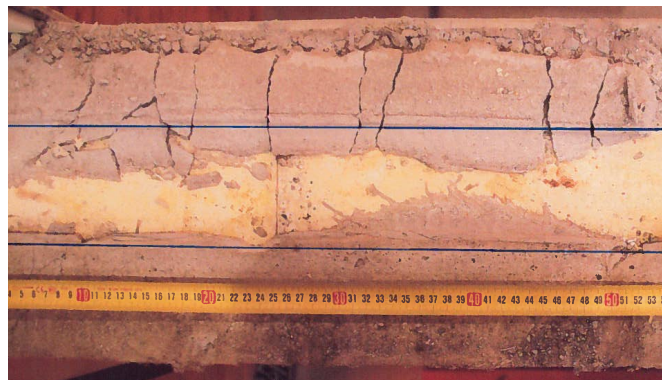
Bredden på mørtelfugene var svært varierende. Det var stor forskjell fra sjikt til sjikt og innad i sjiktene. Noen steder er fugene smalere enn lettklinkervangene, men de fleste stedene er de like brede eller bredere enn vangene. Laftestrimmelen som brukes

er 90 mm, men denne trykkes sammen når fugene blir bredere. På det meste var det nesten 70 mm (40 mm + 30 mm) mørtel som går inn i isolasjonskjernen, se Figur 4. Her har mørtelen gått under laftestrimmelen, altså laftestrimmelen er ikke presset sammen på midten, men den er presset opp mot blokken over. Som bildet viser er dette bare et lite område, men det er flere slike "utstikkere" forskjellige steder i vegg. I tillegg er det flere steder med lange områder der fugen er bredere enn vangene.

Det er vanskelig å konkludere med en konkret tendens siden variasjonene er så store. Det anslås likevel at det i gjennomsnitt er en ekstra fugebredde på ca. 12 mm. Anslaget er gjort med tanke på at de store breddene vil ha mer å si enn de mindre, se Figur 32, delkapittel 7.2.1, men disse er gjerne ikke i full fugetykkelse slik at dette går opp i opp.



Figur 3 – Riving av vegg



Figur 4 – Ekstra fugebredde

### *Fugetykkelse*

Veggen blir plukket fra hverandre blokk for blokk. Det er derfor lett for at fugene blir ødelagt eller deler seg. Målene for fugetykkelsen er derfor noe usikre, men det ser ut til at den er 10-12 mm, se Figur 5.

### *Stussfuger*

De fleste blokkene var murt helt i knas, som kan ses i Figur 4. Det også ble observert flere stussfuger med bredde 1-3 mm. Figur 6 viser den bredeste stussfugen, som ble målt til 5-6 mm.



Figur 5 – Fugetykkelse



Figur 6 – Stussfuge 5-6 mm

### 3.2 Muring og riving av murfelt – Scan Isoblokk 35

For å kunne sammenligne de beregnede U-verdiene med en reell verdi er det utført en måling på et murfelt i et skjermet varmestrømsapparat i Kapittel 4. Dette murfeltet ble murt opp på laboratoriene til SINTEF Byggforsk. Murfeltet ble deretter målt i varmestrømsapparatet, før det ble revet igjen. Under oppmuring og riving ble fugebredde, fugetykkelse og åpne stussfuger registrert.

Oppmuringen ble utført så nøyaktig som mulig, men den ble ikke utført av faglærte murere. Som vist i Figur 7 ble det brukt mørtelkasse for å få så jevn fugebredde og fugetykkelse som mulig. Det ble også fokusert på å mure blokkene helt i knas for å unngå åpne stussfuger. Det ble observert at noen av blokkene veide mer enn andre grunnet fuktighet. Dette vil ha en innvirkning på varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen, se delkapittel 6.4.2.



Figur 7 – Muring med mørtelkasse



Figur 8 – Mørtelfuger murt med mørtelkasse.

#### *Fugebredde*

Grunnet bruk av mørtelkasse ble fugebredden stort sett jevn. Mørtelfugene ble likevel jevnt over noe bredere enn lettklinkervangene, se Figur 8. Etter rivingen av vegg ble alle fugebreddene målt ut i fra bilder som ble tatt for hvert sjikt. Gjennomsnittlig ekstra fugebredde ble beregnet til å være ca. 20 mm. Den ekstra fugebredden var

imidlertid ikke like tykk som resten av fugene og ble målt til å være ca. 5 mm. Laftestrimmelen lå på toppen av den ekstra mørtelen og kuldebroen blir derfor ikke like stor. Det er tatt hensyn til dette i noen av beregningene gjort i COMSOL og er illustrert i Figur 30, delkapittel 6.4.2.

### *Fugetykkelse*

Fugetykkelsen ble ca. 10 mm, med unntak av på endene der mørtelkassen ikke kom inntil kanten slik at mørtelen måtte legges manuelt. Fugetykkelsen varierte her noe mer.

### *Stussfuger*

Under oppmuring ble det observert stor variasjon i størrelsen på stussfugene. Noen blokker var murt helt i knas som i Figur 9, mens andre hadde åpne stussfuger som vist i Figur 10. I motsetning til murfeltet som ble undersøkt i delkapittel 3.1, var det et fåtallet av stussfugene som var helt tette. De fleste hadde en åpning på 2-3 mm og det var også mange stussfuger på 4-7 mm. Det kan være flere grunner til at dette. Blokkene kan være ujevne i størrelse slik at de passer dårlig sammen. Skjevt underlag vil også kunne medføre åpne stussfuger. Det var i tillegg limrester på siden av flere av blokkene som vist i Figur 11. Som tidligere beskrevet blir vangene og isolasjonskjernen i Scan Isoblokk limt sammen. På noen blokker har noe av limet rent ut mellom vangene og isolasjonen og stivnet. Dette gjorde at de ikke kunne settes helt inntil hverandre. Gjennomsnittlig åpning mellom blokkene ble beregnet til ca. 3 mm.



Figur 9 – Åpen stussfuge, ca. 4 mm.



Figur 10 – Åpen stussfuge, ca. 4 mm



Figur 11 –  
Limrester.

### 3.3 Byggeplassbesøk

På byggeplassen som ble besøkt ble det murt et påbygg til en enebolig med Leca Isoblokk 35. Murerne hadde lang erfaring med ulike typer murearbeid, også forskjellige typer lettklinker isolasjonsblokker.

Murerne murte ikke med mørtelkasse fordi dette gjør det vanskeligere å kontrollere tykkelsen på fugene. Ved å variere tykkelsen på fugene kunne de oppnå den høyden de ønsket uten å skjære til blokker. Dette kan ses på kjellerveggen vist i Figur 12 og Figur 13 som gjennomgående hadde fugetykkelser på rundt 20 mm og flere steder hele 30 mm. Til sammenligning vil bruk av mørtelkasse gi en fugetykkelse på ca. 10 mm.



Figur 12 – Kjellervegg. Høyden er justert med hjelp av tykke fuger.



Figur 13 – Fugetykkelse, kjellervegg.



Figur 14 – Luft mellom mørtelfuge og laftestrimmel



Figur 15 – Mørtelfuge går 10-20 mm inni laftestrimmel.

Et annet resultat av ikke å bruke mørtelkasse er mindre kontrollert fugebredde. Mørtelkassen er tilpasset slik at fugene skal bli samme bredde som vangene. Murerne hevdet at det ikke var et problem at fugene ble bredere enn vangene og dermed gikk inn i laftestrimmelen. Ifølge murerne kunne derimot fugene oftere bli smalere enn laftestrimmelen slik at det ble luft mellom mørtelfugen og laftestrimmelen. Gjennom observasjoner av flere ”vertikalsnitt”(i døråpninger, vindusåpninger etc.) ble dette

bekreftet, se Figur 14. Det ble imidlertid også på flere steder observert mørtelfuger som gikk ut i laftestrimmelen som vist i Figur 15.

Ifølge murerne er blokkene jevne i størrelsen slik at de kan mures helt i knas. Det blir likevel en åpning i stussfugen mellom isolasjonsskjernene. Dette er fordi PUR-isolasjonen trekker seg tilbake når den stivner i formen under produksjon. For de observerte blokkene fører dette til en åpning på 4-7 mm. Et eksempel på dette er vist i Figur 16.



Figur 16 - Åpen stussfuge mellom isolasjonsskjernene. Horisontalsnitt.

Murerne mente det var lite utfordringer med å bygget med dette produktet. De påpekte at det viktigste var å være nøyaktig med oppmåling. Åpne stussfuger ble sett på som uproblematisk siden det var uventilert luft. Det var derfor ikke et fokus på å forhindre dette.

### 3.4 Vurdering av feltstudien

Feltstudien besto i muring av en murvegg, riving av to murvegger og et byggeplassbesøk. Det ble funnet og dokumentert avvik for alle de tre parameterne som i hovedsak ble undersøkt. Den ekstra fugebredden var svært varierende og ble på et sted funnet til å være så mye som 70 mm. Gjennomsnittlig ekstra fugebredde for de to veggfeltene var 12 mm og 20 mm. For den sistnevnte veggen var det spesielt tydelig at den ekstra fugebredden var mindre i tykkelse enn resten av fugen. For de to veggfeltene murt i laboratoriet var fugetykkelsen ca. 10-12 mm. På byggeplassbesøket ble det derimot funnet at fugene kunne ha en tykkelse på opp til 30 mm. Det er også stor forskjell i størrelsen på stussfugene. Det ble funnet stussfuger som var opp til 7 mm. For Leca Isoblokk ble det registrert at stussfugene gjerne er åpne mellom isolasjonsskjernene.



## 4 U-verdi målt i laboratoriet

U-verdien til et veggfelt murt med Scan Isoblokk 35 ble målt i et skjermet varmestrømsapparat (guarded hot box) på laboratoriet til SINTEF Byggforsk. Dette ble gjort for å klargjøre sammenhengen mellom målte og beregnede U-verdier. Hensikten var å finne ut hvor stort avviket er mellom beregningene og den faktiske U-verdien for veggen.

Som beskrevet i feltstudien, delkapittel 3.2, er det murt opp et murfelt med Scan Isoblokk 35. Murfeltet er vist i Figur 17. I motsetning til Gåsvik (1984) er det ikke lagt inn isolasjonsfeil, men forsøkt murt uten utførelsesfeil. Noen avvik er likevel registrert i feltstudien.

### 4.1 Forsøksoppsett

Målingene er gjort i henhold til NS-EN ISO 8990:1997 *Varmeisolering. Bestemmelse av stasjonære varmeoverføringsegenskaper. Kalibrert og skjermet varmestrømsapparat.*

Det er brukt et skjermet varmestrømsapparat som kan ses i Figur 18. Apparatet er nyttig for konstruksjoner der det er vanskelig å beregne U-verdi. Dette kan for eksempel være veggkonstruksjoner med kuldebroer. Veggen (prøvelegeme) er murt opp i en sjablon som kan løftes og plasseres i varmestrømsapparatet mellom varm og kald side, som vist i Figur 19. Rundt murfeltet er det isolert med ekstrudert polystyren (XPS) og skjøtene er tettet med tape.



Figur 17 – Murfelt



Figur 18 – Skjermet varmestrømsmåler

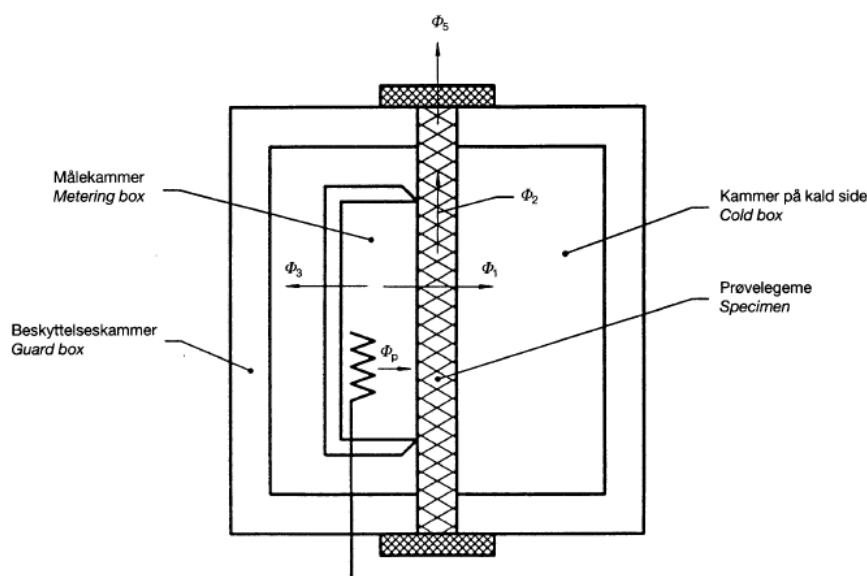


Figur 19 – Innheising av murfelt

Figur 20 viser oppsettet til det skjermede varmestrømsapparatet. Prøvelegemet er en skille mellom det varme og det kalde kammeret. I dette forsøket er temperaturen i det kalde kammeret holdt konstant til 0 °C. I målekammeret er det tilført varme slik at

dette konstant holder 20 °C. Beskyttelseskammeret rundt målekammeret holder samme temperatur som målekammeret, slik at varmestrømmen gjennom de fem veggene i målekammeret,  $\Phi_3$ , og varmestrømmen parallelt med legemet,  $\Phi_2$ , er tilnærmet lik 0. Når systemet har nådd stasjonær tilstand er den totale varmestrømmen gjennom prøvelegemet lik varmetilførselen i målekammeret. Varmetilførselen (effekten) og luft- og overflatetemperaturer måles og dette kan deretter brukes for å beregne U-verdien til prøvelegemet. (Uvsløkk, 1986), (NS-EN ISO 8990:1997)

Det er montert termoelementer på veggene for å registrere overflatetemperaturene på kald og varm side. Termoelementene blir festet med tape, midt på blokker, på horisontale fuger og på stussfuger. Det er festet 20 termoelementer på hver side av murfeltet.



Figur 20 - Skjermet varmestrømsapparat (guarded hot box) (NS-EN ISO 8990:1997).

De faktiske overgangsmotstandene beregnes ut i fra resultatene fra forsøket. Det korrigeres for disse slik at U-verdien oppgis med standard overgangsmotstander, 0,04 og 0,13 (NS-EN ISO 6946, 2007).

## 4.2 Måleusikkerheter

Måleusikkerheten til termoelementene påvirkes av termoelementet og kompensasjonskabelen. Termoelementene brukt er Type T – Kopper Konstantan, Klasse 1. Denne typen termoelementer har en måleusikkerhet tilsvarende den største verdien av  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $\pm 0,004 \cdot t$ , der t er aktuell temperatur. (Pyro °Control, 2004).

Termoelementene er forsøkt plassert midt på blokkene, på horisontalfugene og på stussfugene. De er montert utenpå pussene og det er målt for å finne riktig plassering. Det er derfor noe usikkerhet knyttet til om de er festet nøyaktig på fugene.

Usikkerheten for det endelige måleresultatet, U-verdien, er 5 %. Dette er basert på tidligere erfaringer med dette varmestrømsapparatet.

### 4.3 Resultater

U-verdien for veggfeltet murt med Scan Isoblokk 35 ble målt til  $0.195 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

Tabell 3 viser den målte verdien sammenlignet med verdien som er oppgitt av BMC (2012)

Tabell 3 – Målt og oppgitt U-verdi [ $\text{W/m}^2 \text{ K}$ ] for et veggfelt med Scan Isoblokk 35

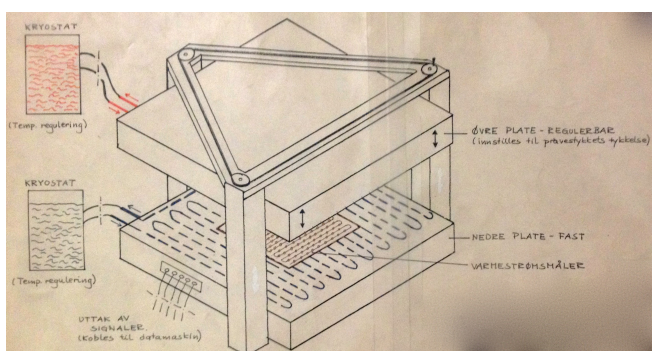
	<b>U-verdi</b>	<b>Avvik</b>
Målt i varmestrømsapparat	0.195	
Oppgitt fra BMC	0.17	-13 %

Det ble registrert overflatetemperaturer av termoelementer festet på veggen. De gjennomsnittlige overflatetemperaturene over måleperioden er vist i Vedlegg 2. Termoelementene er festet midt på blokker, på horisontalfugene og på stussfugene. Det er undersøkt om temperaturene gjenspeiler effekten av at fugene fungerer som kuldebroer. Temperaturforskjellene er imidlertid svært små i forhold til usikkerheten til målingene. Det er derfor vanskelig å si noe om effekten av kuldebroene, utover den registrerte U-verdien. Et klart mønster som kan ses ut i fra temperaturene er at det er varmere oppe enn nede på begge sider av veggen, noe som er naturlig.



## 5 Varmekonduktivitet målt i laboratoriet

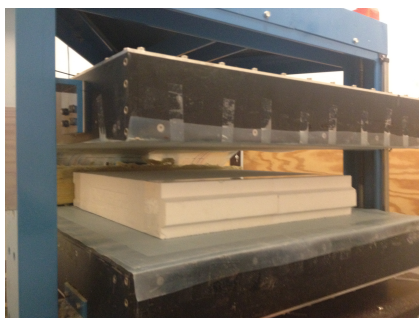
Varmekonduktiviteten ( $\lambda$ -verdien) er den materialeegenskapen som har størst betydning for U-verdien til en konstruksjon. For å kunne sammenligne de beregnede U-verdiene (Kapittel 7) og U-verdimålingene gjort i laboratoriet (Kapittel 4), må  $\lambda$ -verdiene brukt i beregningene, være de samme som  $\lambda$ -verdiene for de faktiske materialene som ble målt.  $\lambda$ -verdiene ble derfor målt for to prøver av samme parti Scan Isoblokker som ble brukt til murfeltet i Kapittel 4. Blokkene ble skjært fra hverandre og varmekonduktiviteten til EPS (isolasjonskjernen) og lettklinkervangene ble målt hver for seg.



Figur 21 - Varmestrøms plateapparat.

### 5.1 Metode

Måling av varmekonduktivitetene ble gjort i laboratoriet på SINTEF Byggforsk og det ble brukt et varmestrøms plateapparat som er illustrert i Figur 21. Dette varmestrømsapparatet måler et prøvestykke på 600 x 600 mm. Den nederste og øverste platen holder en temperatur på henholdsvis 0 °C og 20 °C ved at en temperaturregulierende væske går gjennom platene. Prøvestykket legges mellom de to platene og apparatet reguleres etter tykkelsen til prøven. Rundt prøvestykket legges det en isoleringsramme av mineralull. Varmestrøms plateapparatet med prøvestykke av EPS er vist i Figur 22 og Figur 23. Det er festet termoelementer helt i overflaten av platene for å kunne finne den riktige temperaturdifferansen over prøvestykket.



Figur 22 – Varmestrøms plateapparat med prøvestykke av EPS.



Figur 23 – Varmestrøms plateapparat med prøvestykke av EPS og isoleringsramme.

På grunn av temperaturdifferansen over prøvestykket vil det bli en vertikal nedadrettet varmestrøm gjennom prøven. På den nedre platen er varmestrømsmålere plassert symmetrisk med måleareal 300 x 300 mm. Disse måler varmestrømmen gjennom materialet og ved hjelp av tykkelsen på prøvestykket og temperaturdifferansen, kan varmekonduktiviteten [W/m K] for materialet beregnes.

## 5.2 Resultat

Tabell 4 viser målt varmekonduktivitet sammen med oppgitt varmekonduktivitet fra leverandør. For Scan Isoblokk er det i produktblad og ytelseserklæringer fra BMC, oppgitt flere forskjellige varmekonduktiviteter for både isolasjonskjernen og lettklinkervangene. Verdiene nedenfor er gitt gjennom mailkorrespondanse med RC Beton (2014). De målte verdiene er gjennomsnittet av de to prøveresultatene. Fullstendig prøverapport kan ses i Vedlegg 3.

Tabell 4 – Varmekonduktivitet for EPS og lettklinker for Scan Isoblokk

	<b>Oppgitt <math>\lambda</math>-verdi</b>	<b>Målt <math>\lambda</math>-verdi</b>	<b>Avvik</b>
<b>EPS</b>	0,038	0,033	15 %
<b>Lettklinkerbetong</b>	0,16	0,205	- 22 %

Merknad: Måleusikkerheten er  $\pm 1,9$  %.

Som Tabell 4 viser har isolasjonen en lavere varmekonduktivitet enn det som er oppgitt av RC Beton. Det vil være usikkerheter knyttet til produksjonen. Leverandørene skal derfor alltid oppgi en deklart varmekonduktivitet for varmeisolasjonsmaterialer. Ved deklarasjon av varmekonduktivitet gis et påslag for produksjonsusikkerhet slik at deklart varmekonduktivitet skal representere 90 % av produksjonen. (SINTEF Byggforsk, 2004) Dette gjør at varmekonduktiviteten gjerne er mindre enn det som er oppgitt. For Scan Isoblokk er det ikke gitt en deklart verdi for isolasjonen. Det ser likevel ut som den oppgitte verdien tar høyde for produksjonsusikkerheten.

For lettklinkerbetongen er de målte verdiene betydelig høyere enn den som er oppgitt av BMC.  $\lambda$ -verdien er avhengig av densiteten og fuktinnholdet til lettklinkerbetongen. Luft er det varmeisolerende materialet i lettklinkerbetong. Høyere porøsitet og lavere densitet vil derfor føre til en lavere varmekonduktivitet. Varme transporteres 15 ganger raskere gjennom vann enn gjennom luft og varmekonduktiviteten til lettklinkerbetong blir derfor høyere med økende fuktinnhold. (Chandra, 2002) Lettklinkervangene som er målt ble tørket i varmeskap ved 105 °C og skal være tørre. Densiteten til prøvene var i underkant av 700 kg/m<sup>3</sup> ved prøving, mens den oppgitte densiteten er 800 kg/m<sup>3</sup>. Det er derfor ingen grunn til at den målte varmekonduktiviteten skal være høyere enn den oppgitte verdien. Dette kan bety at oppgitt varmekonduktivitet fra leverandøren er feil.

## 6 Beregning av U-verdi

Bygningskomponenter er vanligvis bygget opp av både homogene sjikt og sjikt som er sammensatt av flere materialer. For murkonstruksjoner utgjør utvendig og innvendig puss homogene sjikt, mens lettklinkerblokkene og fugene er sammensatte sjikt. I slike konstruksjoner blir det flerdimensjonal varmemestrøm. Det vil si at varmemestrømmen ikke bare vil gå rett gjennom, men også sideveis og vertikalt. Dette gjør det vanskelig å utføre nøyaktige beregninger uten å bruke spesialiserte analyseprogrammer for flerdimensjonal varmemestrøm. (SINTEF Byggforsk, 1998) I denne rapporten er det utført beregninger av U-verdi med en forenklet beregningsmetode etter NS-EN ISO 6946 og en flerdimensjonal analyse ved hjelp av simuleringsprogrammet COMSOL Multiphysics. For konstruksjoner uten gjennomgående metall i isolasjonssjiktet skal den forenklete beregningsmetoden gi tilstrekkelig nøyaktighet. Det er undersøkt om dette stemmer for denne typen lettklinkermurverk, med en sammenligning av resultatene i delkapittel 7.1.2.

### 6.1 Materialdata

Når det skal gjøres beregninger på en vegg som også skal måles, er det viktig å ha nøyaktige verdier for bygningsmaterialene slik at grunnlaget for beregningene og målingene samsvarer. Materialelegenskaper kan variere fra produsent til produsent og for forskjellige partier fra samme produsent. (Korsnes et al., 2014) Kvaliteten til beregningene er derfor avhengig av at materialelegenskapene er så riktig som mulig.

Varmekonduktivitetene som er brukt i beregningene er gitt i Tabell 5.

Tabell 5 – Varmekonduktivitetene som er brukt i beregning av U-verdi.

	Oppgitte $\lambda$ -verdier	Målte $\lambda$ -verdier
<b>Lettklinker</b> – Scan	0,16	0,205
<b>Lettklinker</b> – Leca	0,26	-
<b>EPS</b> – Scan	0,038	0,033
<b>PUR</b> – Leca	0,024	-
<b>Puss</b>	1	-
<b>Mørtel</b>	0,61	-
<b>Mineralull (laftestrimmel)</b>	0,037	-

Verdiene for puss og mineralull er hentet fra SINTEF Byggforsk (2003), lettklinker og PUR for Leca Isoblokker er hentet fra henholdsvis Weber (2013a.,b.,c.) og Weber (2014b.,c.,d..) og lettklinker og EPS for Scan Isoblokker er oppgitt gjennom mailkorrespondanse med RC Beton (2014). Mørtelen som er brukt er Weber

Murmørtel M5. Det er ikke oppgitt varmekonduktivitet for dette produktet. NS-EN 1745:2012 *Murverk og murprodukter – Metoder for bestemmelse av termiske egenskaper*, Tabell A.12, gir varmekonduktivitet avhengig av netto tørrdensitet til mørtel. Tørrdensiteten ble målt i laboratoriet til å være ca. 1 600 kg/m<sup>3</sup>. Dette gir en varmekonduktiviteten på 0,61 W/m K (NS-EN 1745, 2012).

Som beskrevet i Kapittel 5 er  $\lambda$ -verdiene for EPS og lettklinkerbetongen i Scan Isoblokk 35 også målt i laboratoriet. Det er opplyst fra leverandør at Scan Isoblokk 35 og Scan Isoblokk 25 har de samme  $\lambda$ -verdiene for EPS og lettklinkerbetong (RC Beton, 2014). De målte verdiene er derfor brukt for begge selv om bare Scan Isoblokk 35 er målt. U-verdien er beregnet for både målte og oppgitte  $\lambda$ -verdier. For parameterstudien er kun målte verdier brukt. Beregningene er derfor sammenlignbare med målingen fra varmestrømsapparatet i Kapittel 4.

## 6.2 Beregning etter NS-EN ISO 6946

Beregningene i dette delkapittelet er gjort i henhold til NS-EN ISO 6946:2007 *Bygningskomponenter og -elementer. Varmemotstand og varmegjennomgang. Beregningsmetode*. Grunnleggende varmetransport blir forklart i Vedlegg 4 sammen med definisjoner og likninger for varmegjennomgangskoeffisient (U-verdi), varmekonduktivitet ( $\lambda$ ), varmemotstand (R) og total varmemotstand ( $R_T$ ).

Det beregnes en øvre og en nedre grenseverdi for konstruksjonens virkelige varmemotstand. Varmemotstanden som brukes for konstruksjonen er middelveiden av de to grenseverdiene. Konstruksjonen deles først opp i felt som kun består av homogene materialsjikt og hulrom. For vegger bygget opp av isolasjonsblokker vil blokkene være ett felt og fugene ett felt.

*Øvre grenseverdi* for den totale varmemotstanden,  $R'_T$ , er bestemt ved å forutsette endimensjonal varmestrøm perpendikulært til overflaten av konstruksjonen. Den beregnes etter formelen

$$\frac{1}{R'_T} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}} \quad [W/m^2 K] \quad (1)$$

$R_{Ta}, R_{Tb}, \dots, R_{Tq}$  = total varmemotstand for hvert felt beregnet etter ( 7 ), Vedlegg 4, [m<sup>2</sup> K/W]

$f_a, f_b, \dots, f_q$  = brøkandelen av arealet til hvert felt

*Nedre grenseverdi* for den totale varmemotstanden,  $R''_T$ , bestemmes ved å forutsette uendelig god sideveis varmeledning. Dette vil si at man behandler de forskjellige



homogene materialsjiktene som et ”legert” materiale. Den legerte varmemotstanden beregnes etter formelen

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}} \quad [W/m^2 K] \quad ( 2 )$$

$R_{aj}, R_{bj} \dots, R_{qj}$  = varmemotstand for hvert materialsjikt beregnet etter ( 6 ),  
Vedlegg 4,  $[m^2 K/W]$

Nedre grenseverdi for den totale varmemotstanden beregnes deretter etter formelen

$$R''_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad [W/m^2 K] \quad ( 3 )$$

Middelverdien av den øvre og den nedre grenseverdien beregnes for å finne den totale varmemotstanden,  $R_T$ , for en bygningskomponent som består av både homogene og ikke-homogene sjikt

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} \quad [W/m^2 K] \quad ( 4 )$$

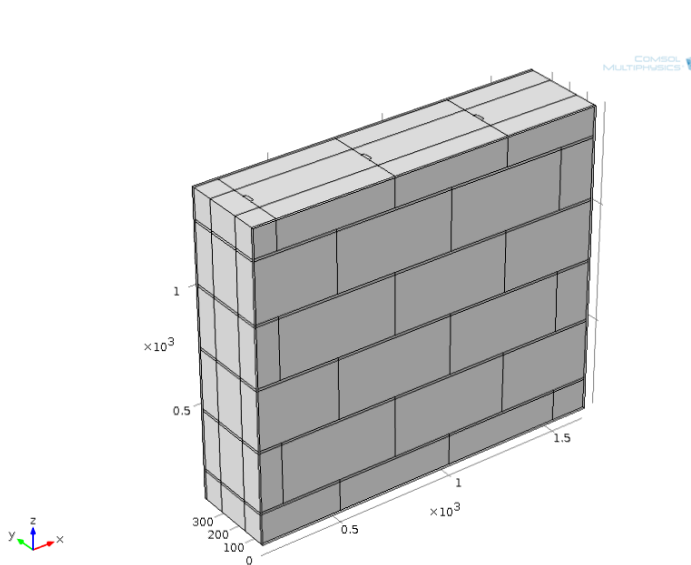
U-verdien til konstruksjonen kan deretter beregnes ved bruk av den totale varmemotstanden og likning ( 5 ).

Beregningene er gjort i Microsoft Exel og er vist i Vedlegg 5.

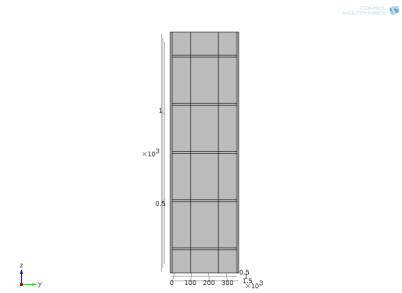
### 6.3 Beregning med COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics® er et simuleringsverktøy som i denne rapporten er brukt for å beregne U-verdi for forskjellige lettklinkermurverk. Programmet kan brukes til å modellere og simulere flere typer fysikkfenomen. Det finnes programpakker for forskjellige områder innenfor fysikk og disse kan også kobles sammen for å se på sammensatte problemer. For de fleste beregninger gjort i denne rapporten er programpakken ”Heat Transfer in Solids”(varmetransport i faststoff) anvendt. Denne modulen brukes i hovedsak for å undersøke varmetransport ved ledning. For å undersøke effekten av naturlig konveksjon, er modulen ”Conjugate Heat Transfer” (koblet varmetransport) anvendt. Dette er en programpakke som kombinerer varmetransport i faststoff og fluider. Programpakken er anvendt for å undersøke effekten av naturlig konveksjon i åpne stussfuger.

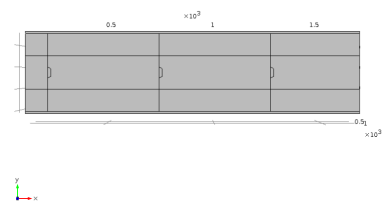
Ved bruk av COMSOL Multiphysics kan komplekse geometrier modelleres i 3D uten forenklinger. For å beregne U-verdi for de forskjellige murproduktene er geometrien tegnet, som Figur 24, Figur 25 og Figur 26 viser. Alle lengder er lagt inn som variabler slik at de enkelt kan varieres i parameterstudien. Materialer for hele geometrien legges inn og materialegenskapene settes. For disse beregningene er det kun varmekonduktiviteten som er relevant, med unntak av beregningene for luft i stussfugene. Luftens densitet og spesifikke varmekapasitet vil da også være relevant, men disse verdiene ligger predefinert i COMSOL Multiphysics.



Figur 24 – Scan Isoblokk 35 tegnet i COMSOL Multiphysics

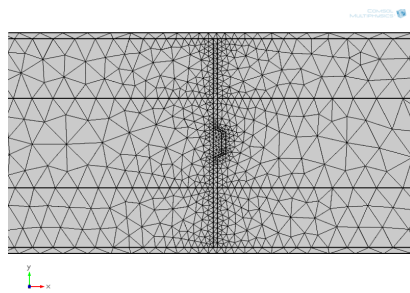


Figur 25 – Vertikalsnitt av Scan Isoblokk 35



Figur 26 – Horisontalsnitt av Scan Isoblokk 35

Videre må grensebetingelser for geometrien settes. Temperaturen settes til 0 °C på den ene siden av vegg og 20 °C på den andre siden av vegg. Rundt ytterkantene defineres uendelig varmeisolasjon slik at ingen varme unnslipper her. For beregningene gjort i Conjugate Heat Transfer-modellen, må tyngdekraften legges inn som en volumkraft. Etter at simuleringen er fullført kan U-verdien kalkuleres ut ifra data fra simuleringen.



Figur 27 – Mesh for Scan Isoblokk 35 cm med 7 mm stussfuge

Det må så settes et passende mesh (elementoppdeling) for veggen. For beregningene som ikke tar hensyn til naturlig konveksjon kan funksjonen physics-controlled mesh brukes. Naturlig konveksjon innebærer tunge numeriske beregninger som krever høy datakapasitet. Utfordringen ligger i å lage et mesh som er fint nok til å gi gode simuleringer, men grovt nok til at datamaskinen har nok kapasitet til å utføre beregningene. Meshet må spesifiseres manuelt. Meshet som er brukt er fint i stussfugene og i områder med komplisert geometri og grovere for fast materiale og der geometrien er enklere slik Figur 27 viser.

## 6.4 Parameterstudie

I dette delkapittelet er det utført en parameterstudie for å undersøke hvilken av parametrene som har størst innvirkning på U-verdien til isolasjonsblokkene. Forholdene som ble dokumentert gjennom feltstudien i Kapittel 3, er lagt til grunn for parametervariasjonene. Det er også undersøkt hvordan usikkerhet i produksjonen vil påvirke U-verdien.

### 6.4.1 Beregningsoppsett

Beregningene er gjort etter NS-EN ISO 6946 for alle murproduktene. Beregninger for Scan Isoblokk 35 og Leca Isoblokk 35 er også gjort i COMSOL Multiphysics.

Utgangspunktet for parametervariasjonene er standardvarianten av hvert murprodukt. Det vil si, uten utføringsfeil og med oppgitte eller målte verdier for varmekonduktiviteten. Det er regnet med et lag med puss på 10 mm på begge sider av veggen for alle variantene.

### 6.4.2 Parametere

Parameterne som er undersøkt er:

- Fugebredde
- Fugetykkelse
- Varmekonduktiviteten til isolasjonen
- Varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen
- Åpne stussfuger

Fugebredden og fugetykkelsen påvirker U-verdien individuelt, samtidig som de sammen har en forsterket negativ effekt. Fugebredden har mer å si når fugetykkelsen er stor og fugetykkelsen har mer å si når fugebredden er stor. En kombinasjon av disse er derfor undersøkt i tillegg til at de er undersøkt hver for seg.

I feltstudien ble det også observert at det kunne forekomme luftrom mellom mørtel og laftestrimmel. Det er antatt at luftrommet vil ha liten effekt på varmeisoleringssevnen, men det er gjort beregninger for å verifisere at det stemmer.

## Fugebredde

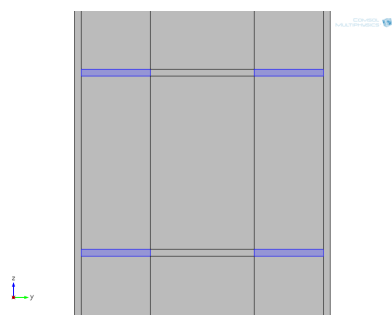
Standard fugebredde for murproduktene brukt i beregningene er bestemt ut i fra bredden på laftestrimmelen. Det antas at mørtelen fyller ut helt til laftestrimmelen og at det dermed ikke er noe luftrom. Luft mellom mørtel og laftestrimmel blir undersøkt i et eget avsnitt. Bredden til laftestrimmelen varierer med leverandør og blokktykkelse. Dette kan ses i Tabell 6.

Tabell 6 – Bredde for vanger, isolasjonkjerne, mørtelfuger og laftestrimmel for isolasjonsblokkene. Lettklinker- og mørtelbredden er totalen for begge vangene.

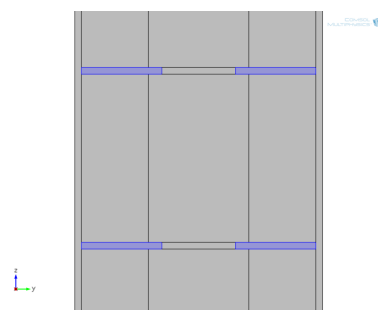
	Scan 35 cm	Scan 25 cm	Leca 35 cm	Leca 30 cm	Leca 25 cm
<b>Lettklinkerbetong</b>	200 mm	148 mm	200 mm	164 mm	164 mm
<b>Isolasjonskjerne</b>	150 mm	102 mm	150 mm	135 mm	85 mm
<b>Mørtelfuger</b>	200 mm	160 mm	210 mm	209 mm	159 mm
<b>Laftestrimmel</b>	150 mm	90 mm	140 mm	90 mm	90 mm

I parametervariasjonen vil standard fugebredde være den smaleste fugebredden. Fugebredden økes så trinnvis til mørtelfugen er gjennomgående.

Figur 28 og Figur 29 viser to utklipp fra geometrien i COMSOL Multiphysics, med henholdsvis standard fugebredde og med ekstra mørtel i rommet med isolasjon.



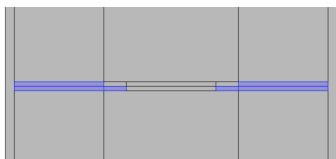
Figur 28 – Standard fugebredde Scan Isoblokk 35



Figur 29 – Ekstra fugebredde; 40 mm (2 x 20 mm), Scan Isoblokk 35

Under rivingen av veggen med Scan Isoblokk 35, som ble murt opp med mørtelkasse, ble det observert at den ekstra fugebredden ikke var like tykk som resten av fugene. Den ekstra fugebredden ble målt til å være ca. halvparten av tykkelsen til resten av fugene. Figur 30 viser et utsnitt av modellen som ble laget i COMSOL Multiphysics for å simulere dette. Det er kun gjort beregninger med denne typen fuger for Scan

Isoblokk 35. Denne beregningen ble gjort for å ha en modell som bedre beskriver den reelle situasjonen for veggen som ble målt i varmestrømsapparatet.



Figur 30 - Ekstra fugebredde med halv fugetykkelse, Scan Isoblokk 35 cm

### **Fugetykkelse**

Standard fugetykkelse er satt til 10 mm. Bruk av mørtelkasse gir denne fugetykkelsen. Det ble oppsvert i feltstudien at fugene kan være opp til 30 mm tykke. U-verdien blir derfor beregnet for fugetykkelse 10-30 mm.

### **Luft mellom mørtel og laftrimmel**

Scan Isoblokk 25, Leca Isoblokk 35 og Leca Isoblokk 30 leveres med laftrimmel som er smalere enn isolasjonskjernen i blokkene. For beregning av U-verdien i delkapittel 6.3 er det antatt at mørtelen går helt ut til laftrimmelen. I feltstudien ble det funnet at dette ikke alltid er tilfelle, se Figur 14. Det vil ofte være et luftrom mellom mørtel og laftrimmel. For disse tre isoblokkene er det derfor gjort en beregning for å se hvor mye dette kan påvirke U-verdien. Varmemotstanden til luft med horisontal varmestrømsretning er gitt i NS-EN ISO 6946, Tabell 2 (2007).

### **Varmekonduktiviteten til isolasjon og lettklinker**

Varmekonduktiviteten til EPS og lettklinkerbetong fra Scan Isoblokk er målt og gitt i Kapittel 4. De målte verdiene er brukt som standardverdi for parameter variasjonen. For Leca Isoblokk brukes varmekonduktiviteten som er oppgitt fra Weber (2014b.,c.,d.). For PUR-isolasjonen er dette den deklarererte varmekonduktiviteten. Denne inneholder et påslag for produksjonsusikkerheten i motsetning til den målte varmekonduktiviteten til EPS-isolasjonen i Scan Isoblokk. Standardverdien for varmekonduktiviteten er den laveste som er regnet med for hver isoblokk. Dette medfører at parameter variasjonen vil gi lik eller høyere U-verdi for blokkene.

Som beskrevet i delkapittel 5.2 er luft det varmeisolerende materialet i lettklinkerbetong og varmekonduktiviteten blir derfor høyere med høyere densitet. Fuktinnholdet i lettklinkerbetongen påvirker også varmekonduktiviteten. I henhold til NS-EN ISO 10456:2007 *Byggematerialer og -produkter. Hygrotermiske egenskaper – Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarererte og praktiske termiske verdier* kan det regnes et fuktpåslag på varmekonduktiviteten basert på basisverdien. Fuktpåslaget for ulike anvendelser og ulikt fuktinnhold er vist i Tabell 7.

Tabell 7 – Korreksjonsfaktor for fuktinnhold (NS-EN ISO 10456).

Bruksområde	Fuktinnhold [%]	Korreksjonsfaktor for $\lambda$ -verdi
I fuktbeskyttet bygningsdel	2 %	1,05
Utvendig over terreng	4 %	1,11
Beskyttet under terreng, pusset, drenert	6 %	1,17

Gjennom mailkorrespondanse med RC Beton (2014) er det oppgitt at densitet og varmekonduktivitet til lettklinkerbetongen i Scan Isoblokk kan variere med 10 %. Denne variasjonen sammen med variasjonene forbundet med fuktinnhold gjør at det må regnes med en relativt stor usikkerhet i  $\lambda$ -verdien til lettklinkerbetongen.

For EPS og PUR er også varmekonduktiviteten avhengig av densiteten. I følge RC Beton (2014) varierer densiteten og dermed også varmekonduktiviteten med 10 % for EPS brukt i Scan Isoblokk. For stivt PUR vil varmekonduktiviteten endres lite i tetthetsområdet 30 til 100 kg/m<sup>3</sup> (PU NORDIC, 2013). Studier som er utført av Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München har vist at fukt også gir minimal økning i varmekonduktiviteten for PUR (PU NORDIC, 2013). For EPS kan det, som for lettklinkerbetong, gis et fuktpåslag i henhold til NS-EN ISO 10456 (2007). EPS som er utsatt for fukt, for eksempel utenpå vegg mot grunn, kan ha en økning i varmekonduktivitet på 8 %. EPS brukt i lettklinkerblokker med puss på utsiden, vil være relativt fuktbeskyttet og det er ikke sannsynlig at den vil få nevneverdig økning i varmekonduktiviteten grunnet fukt.

### Åpne stussfuger

Under feltstudien ble det observert at åpne stussfuger mellom blokkene ofte forekommer, altså at blokkene ikke er murt helt i knas. Størrelsesforskjell på blokkene, skjevheter i vegg eller underlag kan være medvirkende årsaker til dette.

I *"Teknisk Godkjenning"* for Leca Isoblokk 35 (SINTEF Byggforsk, 2011) er det anbefalt at ved stussfuger større enn 8 mm må fugen isoleres med laftestimmel eller PUR-skum. Det er ikke kjent hvorvidt dette blir gjort i praksis.

For vegger med puss på begge sider vil de åpne stussfugene fungere som uventilerte luftspalter. Stillestående luft isolerer, men naturlig konveksjon oppstår i luftspaltene vil dette kunne gi store varmetap. Time (2012) undersøkte åpne stussfuger for Leca Isoblokk Rex, en 500 mm tykk isolasjonsblokk med en isolasjonskjerne på 300 mm, se delkapittel 2.3. Det ble konkludert med at stussfuger større enn 4 mm hadde stor innvirkning på U-verdien. Det er ikke kjent om stussfugene vil ha like stor innvirkning på U-verdien for mindre isolasjonstykkelser.

Åpne stussfuger er undersøkt i COMSOL Multiphysics for Scan Isoblokk 35 og Leca Isoblokk 35. For Leca Isoblokk er det både undersøkt gjennomgående stussfuger og stussfuger som er åpne kun mellom isolasjonsskjernene.

Til simuleringene er programpakken Conjugate Heat Transfer i COMSOL Multiphysics brukt. Denne tar både hensyn til varmetransport ved ledning og ved naturlig konveksjon for delene av konstruksjonen bestående av luft. U-verdi er beregnet for stussfuger på 4-10 mm. Mindre luftspalter er vanskelig å simulere og det er forventet at disse vil ha liten effekt på U-verdien.





## 7 Beregningsresultater

I dette kapitlet presenteres resultatene fra beregningene av U-verdi og fra parameterstudien. Beregningen er gjort både etter NS-EN ISO 6946 og i simuleringprogrammet COMSOL Multiphysics og disse beregningene er sammenlignet. I parameterstudien er hver av parametrene først analysert individuelt. De er så sammenlignet for å undersøke hvilken parametre som har størst innvirkning på U-verdien.

### 7.1 U-verdier

U-verdiene er beregnet for de fem blokktypene, etter NS-EN ISO 6946 og i simuleringprogrammet COMSOL Multiphysics.

#### 7.1.1 NS-EN ISO 6946

Tabell 8 viser beregnet U-verdi for med målte og oppgitte  $\lambda$ -verdier. Disse er sammenlignet med U-verdi oppgitt av leverandør. U-verdi for Scan Isoblokk er oppgitt i BMC (2012) og for Leca Isoblokk i Weber (2014b.,c.,d.).

Tabell 8 – U-verdier [ $W/m^2 K$ ] beregnet etter NS-EN ISO 6946 og oppgitt av leverandør.

	Oppgitt av leverandør	NS-EN ISO 6946		Avvik [%]	
		Oppgitt $\lambda$	Målt $\lambda$	Oppgitt $\lambda$	Målt $\lambda$
Scan Isoblokk 35	0,17	0,188	0,177	- 9 %	- 4 %
Scan Isoblokk 25	0,29	0,266	0,254	9 %	14 %
Leca Isoblokk 35	0,15	0,143	-	5 %	-
Leca Isoblokk 30	0,22*	0,162	-	36 %	-
Leca Isoblokk 25	0,29*	0,234	-	24 %	-

\*Verdier er for *komplett* vegg uten vinduer og dører.

Tabell 8 viser at U-verdiene oppgitt av leverandørene er høyere enn beregnede U-verdier for alle blokker med unntak av Scan Isoblokk 35. Dette skyldes trolig bruk av et sikkerhetspåslag for produksjonsusikkerheten i beregningene til leverandørene. Dette er mest sannsynlig fordi leverandørene har bakt inn en sikkerhetsfaktor i beregningene. For Leca Isoblokk 30 og Leca Isoblokk 25 er avviket spesielt stort. Det skyldes at oppgitte U-verdier for disse blokkene er for komplett vegg uten vinduer og dører. Som beskrevet tidligere består komplette vegger av normalblokker, men også U-blokker og endeblokker som gjør den totale U-verdien til veggen dårligere. Dette er det tatt hensyn til for disse to verdiene. Avviket for Leca Isoblokk 30 og 25 er derfor mindre enn det som vises i Tabell 8.

Scan Isoblokk 35 utmerker seg. Etter NS-beregningene har denne en betydelig høyere U-verdi enn det som er oppgitt av BMC. Isoblokken skal ifølge leverandøren oppfylle kravet til TEK10 for yttervegger som er  $0,18 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (BMC, 2014b.). Med beregningene gjort etter NS-EN ISO 6946 ser dette derimot ikke ut til å stemme. I produktblader og ytelseserklæringer er det oppgitt flere forskjellige varmekonduktiviteter for både vangene og isolasjonen. Regnes det med beste opplyste verdi for konduktiviteten til både isolasjon og lettklinkerbetong blir U-verdien  $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$  som oppgitt (BMC, 2012). Bruker man derimot verdiene som er opplyst fra leverandør over mail, blir verdien betydelig høyere. Tabell 8 viser dette. Målte verdier for varmekonduktiviteten vil gi en lavere U-verdi enn oppgitte varmekonduktiviteter gjør, men U-verdien er likevel ikke så lav som det er oppgis.

### 7.1.2 COMSOL Multiphysics

U-verdi for alle blokkvariantene er beregnet i COMSOL Multiphysics. Resultatene kan ses i Tabell 9. De beregnede U-verdiene er lavere enn oppgitt fra leverandør for alle blokkene, med unntak av Scan Isoblokk 35. Denne har høyere beregnet U-verdi enn det som er oppgitt.

Tabell 9 – U-verdier [ $\text{W/m}^2 \text{ K}$ ] oppgitt av leverandør og beregnet.

	<b>Oppgitt av leverandør</b>	<b>COMSOL Multiphysics</b>	<b>Avvik</b>
<b>Scan Isoblokk 35</b>	0,17	0,183	-7 %
<b>Scan Isoblokk 25</b>	0,29	0,268	8 %
<b>Leca Isoblokk 35</b>	0,15	0,148	2 %
<b>Leca Isoblokk 30</b>	0,22*	0,173	27 %
<b>Leca Isoblokk 25</b>	0,29*	0,244	19 %

\*Verdiene er for en *komplett* vegg uten vinduer og dører.

### 7.1.3 Sammenligning av beregningene

U-verdiene er beregnet i regneark etter den forenklete beregningsmetoden gitt i NS-EN ISO 6946 og med simuleringssystemet COMSOL Multiphysics. For konstruksjoner uten gjennomgående metall skal beregningsmetoden gitt i NS-EN ISO 6946 gi tilstrekkelig nøyaktighet (SINTEF Byggforsk, 1998). Tabell 10 viser at denne metoden likevel gir et avvik for denne typen konstruksjoner.

Tabell 10 – U-verdi [ $W/m^2K$ ] beregnet etter NS-EN ISO 6946 og i COMSOL Multiphysics.

	Oppgitt av leverandør	NS-EN ISO 6946	COMSOL Multiphysics	Avvik; NS fra COMSOL	
<b>Scan Isoblokk 35</b>	0,17	0.177	0.183	0,006	- 3,2 %
<b>Scan Isoblokk 25</b>	0,29	0.254	0.268	0,014	- 5,6 %
<b>Leca Isoblokk 35</b>	0,15	0.143	0.148	0.004	- 2,9 %
<b>Leca Isoblokk 30</b>	0,22*	0.162	0.173	0,011	- 6,2 %
<b>Leca Isoblokk 25</b>	0,29*	0.234	0.244	0.010	- 4,2 %

\*Verdien er for en *komplett* vegg uten vinduer og dører.

Beregningene fra COMSOL Multiphysics gir en høyere og dermed en mer konservativ U-verdi for alle murproduktene. Dette antyder at den flerdimensjonale varmestrømmen som er viktig for konstruksjoner med sammensatte sjikt, ikke er tilstrekkelig tatt høyde for ved beregninger etter NS-EN ISO 6946.

Forskjellen er størst for Leca Isoblokk 30. Dette er den isolasjonsblokken med bredest mørtelfuger i forhold til bredden på laftestrimmelen.

## 7.2 Parameterstudie

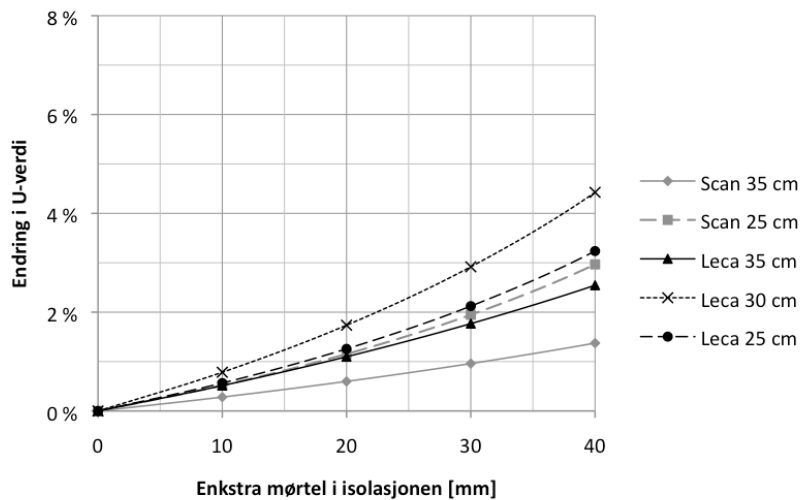
For å identifisere det mest sårbare forholdet med tanke på å oppnå prosjektert U-verdi er det gjennomført et parameterstudie. Dette er gjort både ved beregning etter NS-EN ISO 6946 og ved simuleringer i COMSOL Multiphysics. Parameterne som er undersøkt er fugebredde, fugetykkelse, åpne stussfuger og varmekonduktivitet til isolasjon og lettklinkerbetong.

### 7.2.1 NS-EN ISO 6946

For parameterstudien gjort med beregninger etter NS-EN ISO 6946 er alle de fem blokkvariantene vurdert med tanke på fugebredde, fugetykkelse og varmekonduktivitet til isolasjon og lettklinkerbetong.

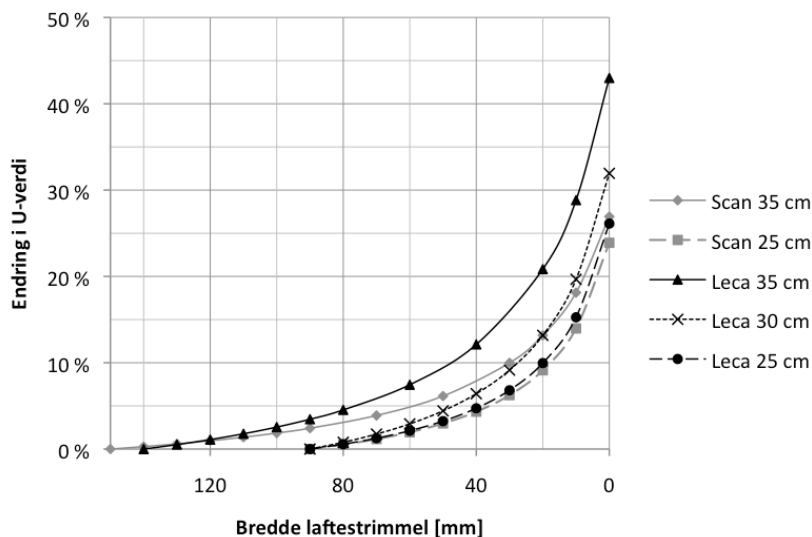
#### Fugebredde

Standard fugebredde er definert fra ytterkant av vange og til laftestrimmelen. Dette tilsvarer 0 mm ekstra fugebredde. Mørtelsøl eller bredere mørtelfuger vil gi ekstra fugebredde og U-verdien vil bli høyere enn standardverdien. I Figur 31 vises endring i U-verdi for de forskjellige murproduktene for ekstra fugebredde. Som det ble dokumentert i feltstudien i Kapittel 3 bør det antas en viss ekstra mørtelfugebredde. Hvor mye, vil variere fra vegg til vegg og også innad i vegg. Grafen viser endring i U-verdi frem til fugene er 40 mm bredere enn standardbredde. Denne fugebredden kan forekomme, men ut i fra feltstudien regnes det som usannsynlig at fugebredden vil bli større enn dette for hele vegg.



Figur 31 - Endring av U-verdi for ekstra fugebredde.

Figur 31 og Figur 32 viser at fugebredden har størst innvirkning på murproduktene med minst isolasjon i kjernen. Fugebredden påvirker også i størst grad de murproduktene som har lavest U-verdi i utgangspunktet. Leca Isoblokk 30 følger ikke denne trenden. Denne har størst endring i U-verdi, selv om den verken har minst isolasjon eller best U-verdi. Dette skyldes at den har en smal laftestrimmel i forhold til isolasjonstykkelsen. Den starter altså med bredere mørtelfuger enn de andre i utgangspunktet og har derfor også en raskere endring i U-verdi.



Figur 32 - Endring i U-verdi for minkende bredde på laftestrimmel.

Figur 32 viser de samme dataene, men her er endringen i U-verdi vist i forhold til bredden på laftestrimmelen i fugen. Denne figuren viser også hvordan U-verdien vil

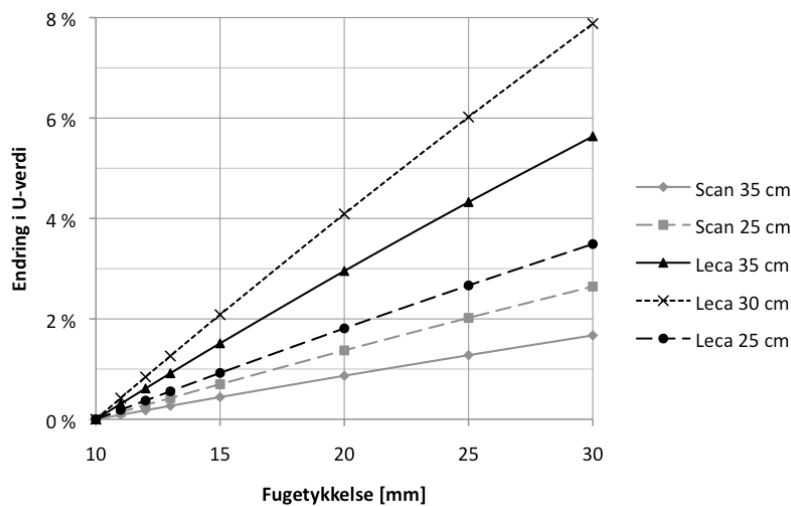
endre seg hvis laftestrimmelen blir enda smalere og til slutt når mørtelfugene er helt gjennomgående. Det er ikke realistisk siden det alltid skal brukes laftestrimmel. Grafen er likevel interessant for å forstå hvor stor effekt det kan ha hvis laftestrimmel mot formodning ikke skulle bli brukt.

Det er tydelig fra Figur 32 at det er stor forskjell mellom 10 mm laftestrimmel og ingen laftestrimmel. Når laftestrimmelen derimot blir bredere, vil endring i bredden ha mindre å si for U-verdien.

## Fugetykkelse

I feltstudien i Kapittel 3 ble det gjort et byggeplassbesøk. Der ble funnet at fugetykkelsen kan være betydelig tykkere enn det som er standard ved bruk av mørtelkasse. Figur 33 viser hvordan dette endrer U-verdien til de forskjellige murproduktene.

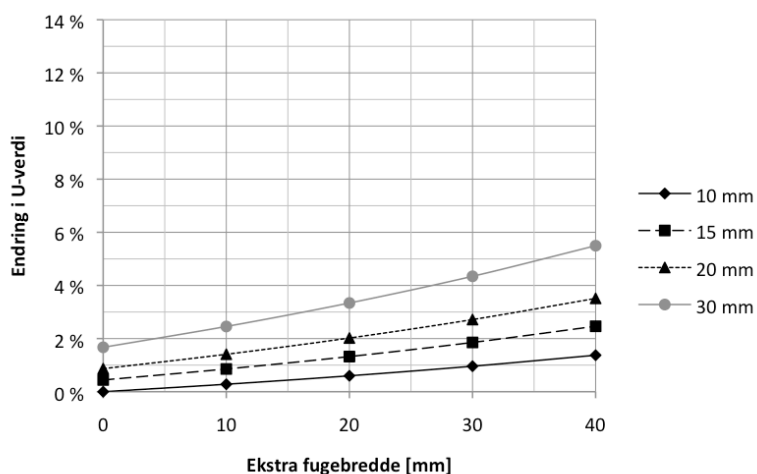
I likhet med fugebredden, påvirker fugetykkelsen i størst grad de murproduktene med lavest U-verdi. Unntaket er Scan Isoblokk 35, som fugetykkelsen har minst innvirkning på. Dette skyldes at murproduktet har relativt smale mørtelfuger i forhold til isolasjonsbredden og bredden på laftestrimmelen.



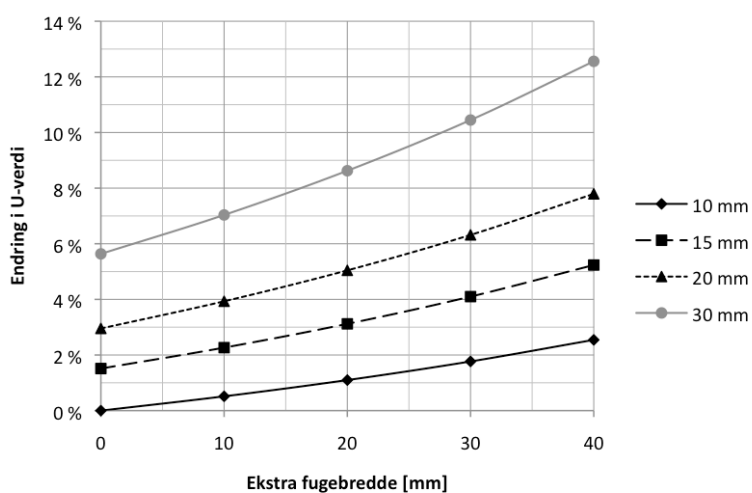
Figur 33 - Endring i U-verdi ved endring av fugetykkelse.

## Fugebredde og fugetykkelse

Figur 34 og Figur 35 viser hvordan en kombinasjon av ekstra fugetykkelse og ekstra fugebredde vil endre U-verdien til henholdsvis Scan Isoblokk 35 og Leca Isoblokk 35. Figurene viser at disse kombinert vil ha en forsterket negativ effekt på U-verdien. Ved store fugetykkelser vil ekstra fugebredde gi en betydelig større endring i U-verdien enn ved vanlig fugetykkelse.



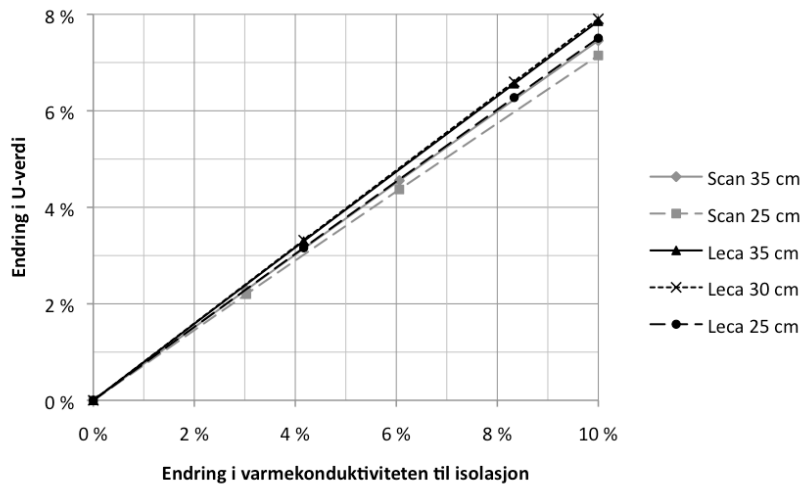
Figur 34 – Kombinert ekstra fugebredde og fugetykkelse for Scan Isoblokk 35



Figur 35 – Kombinert ekstra fugebredde og fugetykkelse for Leca Isoblokk 35

## Varmekonduktiviteten til isolasjon

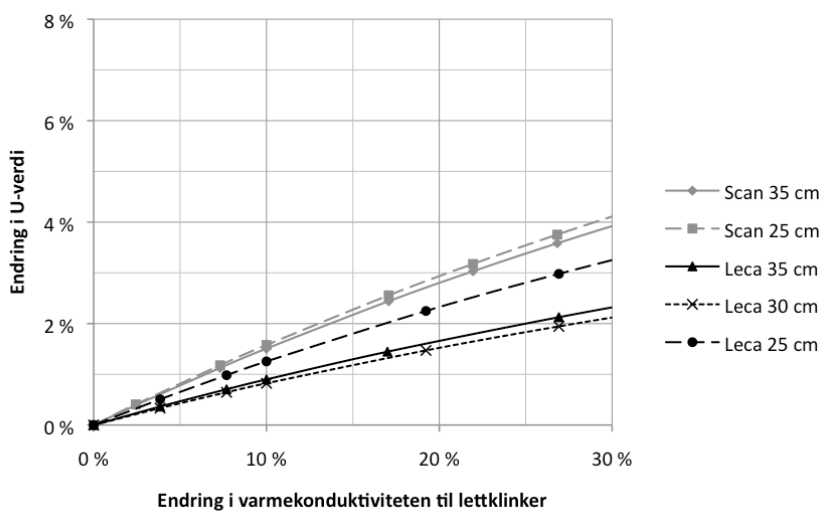
Figur 36 viser endringen i U-verdi for de forskjellige murproduktene ved endring av varmekonduktiviteten til isolasjonen. En økning i varmekonduktiviteten med opptil 10 %, gir en tilnærmet lineær endring i U-verdi. Endringen i U-verdi er relativt stor for alle murproduktene og forskjellen mellom dem er liten.



Figur 36 - Endring i U-verdi ved endring i varmekonduktiviteten til isolasjonen.

### Varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen

Varmekonduktiviteten til lettklinkerbetong varierer med både densitet og fuktinnhold. Som beskrevet i delkapittel 6.1, kan varmekonduktiviteten bli 10 % høyere ved høy densitet (Sørensen, 2014) og hele 17 % høyere ved høyt fuktinnhold (NS-EN ISO 10456:2007+NA:2010). Varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen har derfor en større usikkerhet sammenlignet med isolasjonen. Endring i U-verdi for opp til 30 % endring i varmekonduktivitet er vist i Figur 37.



Figur 37 - Endring i U-verdi ved endring av varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen.

## Luft mellom mørtel og laftestrimmel

I feltstudien ble det observert at luftspalter mellom mørtelfugene og laftestrimmelen kunne forekomme. Dette gjelder i hovedsak for murproduktene med laftestrimmel som er smalere enn isolasjonen mellom vangene. For disse murproduktene ble U-verdi med en luftspalte mellom mørtel og laftestrimmel beregnet. Resultatet er vist i Tabell 11. Det har liten innvirkning på U-verdien om det er mørtel ut til laftestrimmelen eller om det er luft. Stillestående luft isolerer bedre enn mørtel så luft vil ha en marginal positiv effekt på U-verdien fremfor mørtel. Varmemotstandene for luftspaltene er hentet fra NS-EN ISO 6946 (2007).

Tabell 11 – U-verdi for luftspalte mellom mørtel og laftestrimmel.

	Luftspalte [mm]	Varme- motstand [m <sup>2</sup> K/W]	U-verdi, standard [W/m <sup>2</sup> K]	U-verdi m/luft [W/m <sup>2</sup> K]	Endring i U-verdi [%]
<b>Scan Isoblokk 25</b>	6 mm	0,12	0,254	0,253	- 0,38 %
<b>Leca Isoblokk 35</b>	5 mm	0,11	0,143	0,143	- 0,37 %
<b>Leca Isoblokk 30</b>	22,5 mm	0,18	0,162	0,161	- 0,73 %

### 7.2.2 COMSOL Multiphysics

Det er også gjort en parameterstudie med beregninger i COMSOL Multiphysics. Det er kun gjort beregninger for Scan Isoblokk 35 og Leca Isoblokk 35. I tillegg til parametrene vurdert i forrige delkapittel er det i COMSOL Multiphysics også vurdert effekten av åpne stussfuger.

Resultatene er fremstilt i grafer sammen med resultatene fra beregningene etter NS-EN ISO 6946.

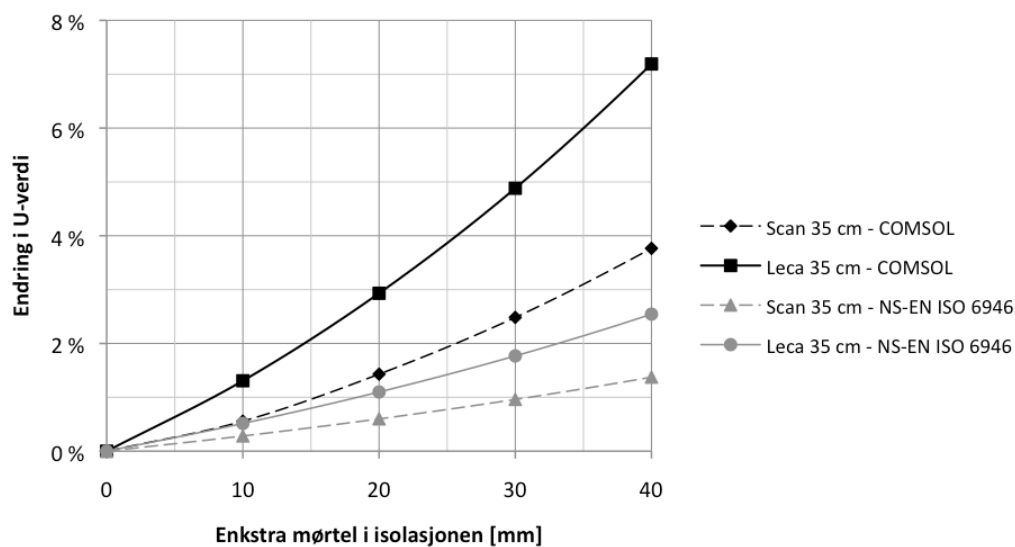
### Fugebredde

Figur 38 viser endringen i U-verdi for endring i fugebredden. U-verdien øker når fugene blir bredere. Som for beregningene gjort etter NS-EN ISO 6946, er endringen større for Leca Isoblokk 35 enn for Scan Isoblokk 35. Beregningene gjort i COMSOL Multiphysics viser en større endring i U-verdiene enn beregningene gjort etter NS-EN ISO 6946.

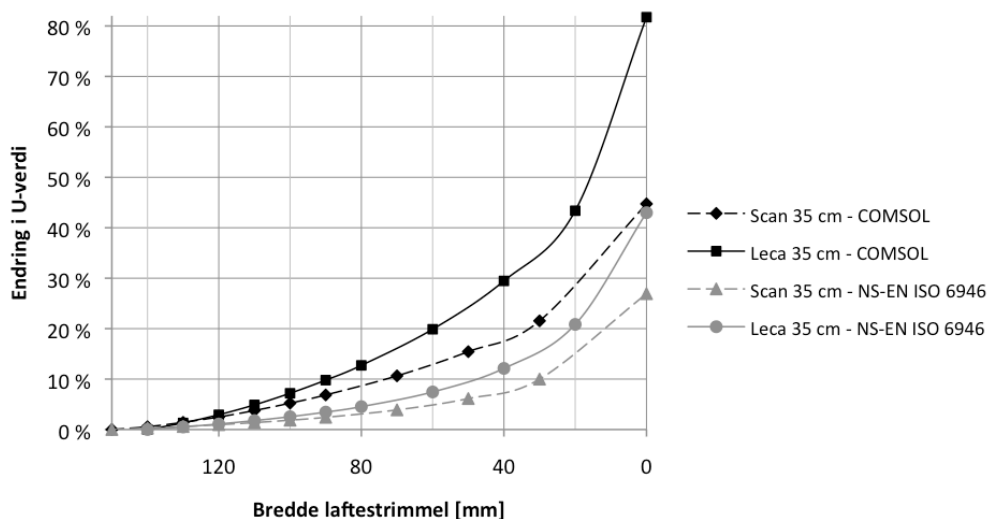
Figur 39 viser endring i U-verdien for ulike bredder på laftestimmelen helt ned til 0 mm. Grafen viser at avviket mellom beregningene blir større ved smalere laftestrimmel.

I isolasjonsblokker vil mørtelfugene ha en mindre varmemotstand enn resten av konstruksjonen. For bredere mørtelfuger er derfor mulig det oppstår økt grad av flerdimensjonal varmestrøm som ikke beregningene etter standarden tar hensyn til.



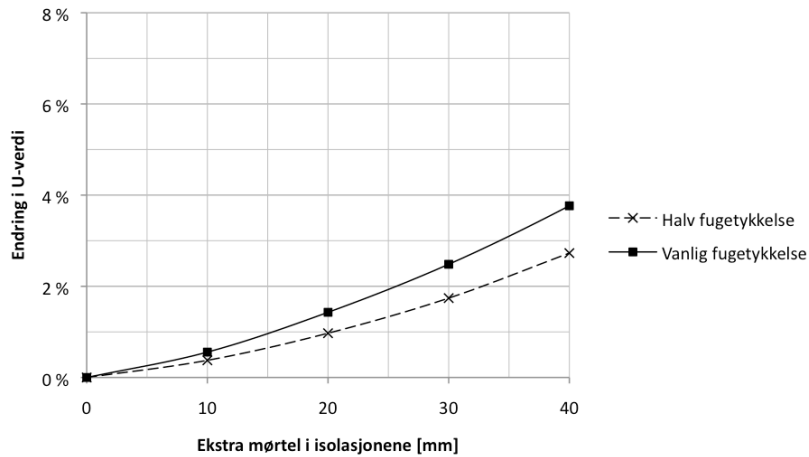


Figur 38 - Endring av U-verdi for ekstra fugebredde



Figur 39 - Endring i U-verdi for minkende bredde på laftestrimmel

Det er også gjort simuleringer for mørtelfuger som er bredere enn ønsket, men ekstra fugebredde er mindre i tykkelse enn resten av fugen. Resultatene fra denne simuleringen sammenlignet med resultatene for lik fugetykkelse for hele fugen kan ses i Figur 40. Resultatene viser at halv fugetykkelse for den ekstra fugebredden vil gi mindre endring i U-verdi. Endringen vil imidlertid bli større enn halvparten av endringen i U-verdi for mørtelfuger med full fugetykkelse. Disse beregningene er i hovedsak gjort for å kunne sette opp en reell U-verdi for murfeltet som er målt i varmestrømsapparatet.

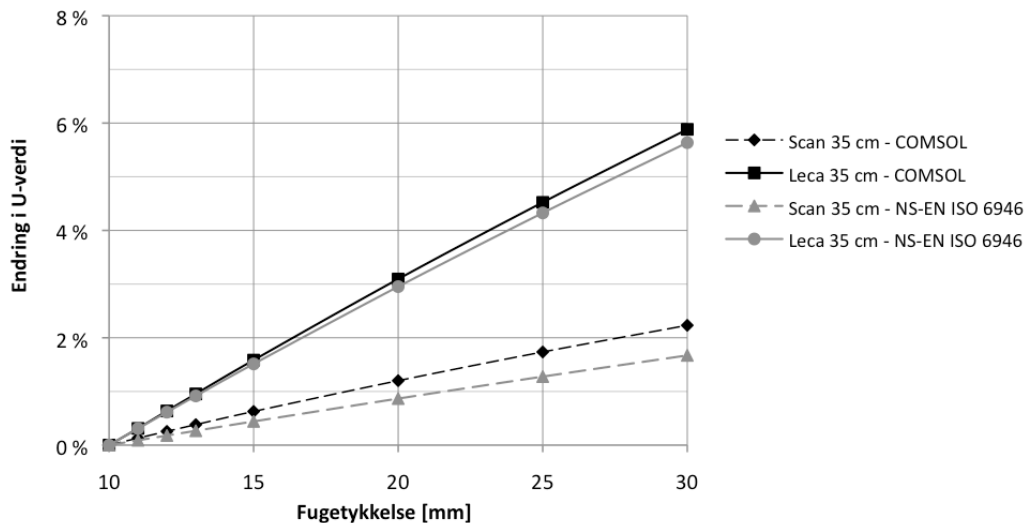


Figur 40 - Endring av U-verdi for ekstra fugebredde med halv og vanlig fugetykkelse

### Fugetykkelse

Figur 41 viser hvordan U-verdiene endrer seg med endring av tykkelsen på mørtelfugene. Beregningene viser at Leca Isoblokk 35 er mer følsom for endring i fugetykkelse.

Beregningen gjort i COMSOL Multiphysics og beregningene gjort i henhold til NS-EN ISO 6946 gir omtrent de samme resultatene.

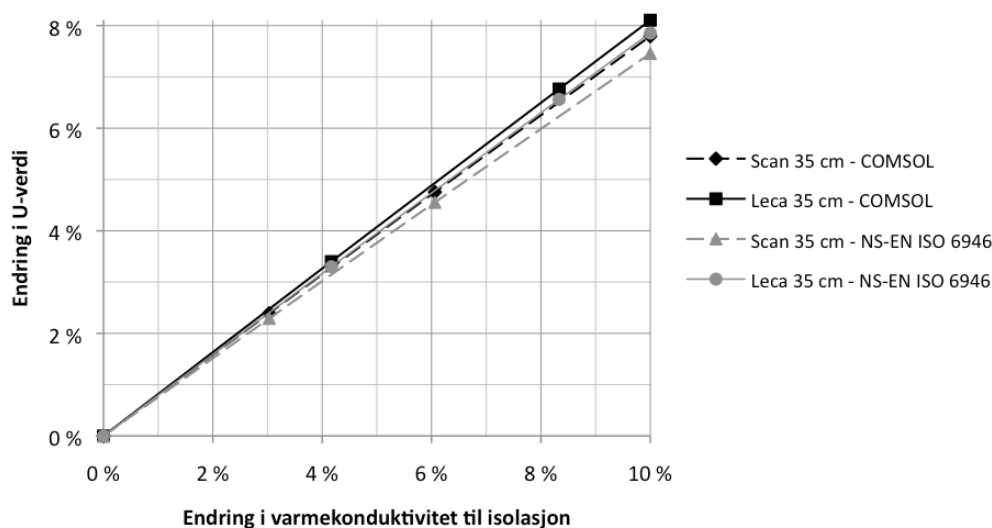


Figur 41 - Endring av U-verdi ved endring av fugetykkelse

## Varmekonduktivitet for isolasjon

Ved endring av varmekonduktivitet for isolasjonen vil U-verdien endre seg som vist i Figur 42. U-verdien er svært følsom for endringer i varmekonduktivitet for isolasjonen.

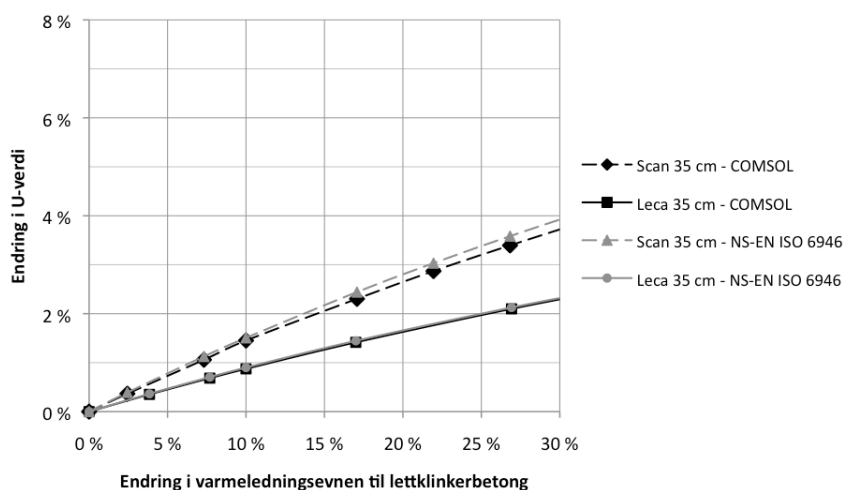
Det er liten forskjell mellom de to murproduktene. Forskjellen mellom beregningene gjort i COMSOL Multiphysics og beregningene som er gjort i henhold til NS-EN ISO 6946 er også små.



Figur 42 - Endring i U-verdi ved endring av varmekonduktiviteten til isolasjon

## Varmekonduktivitet for lettklinkerbetong

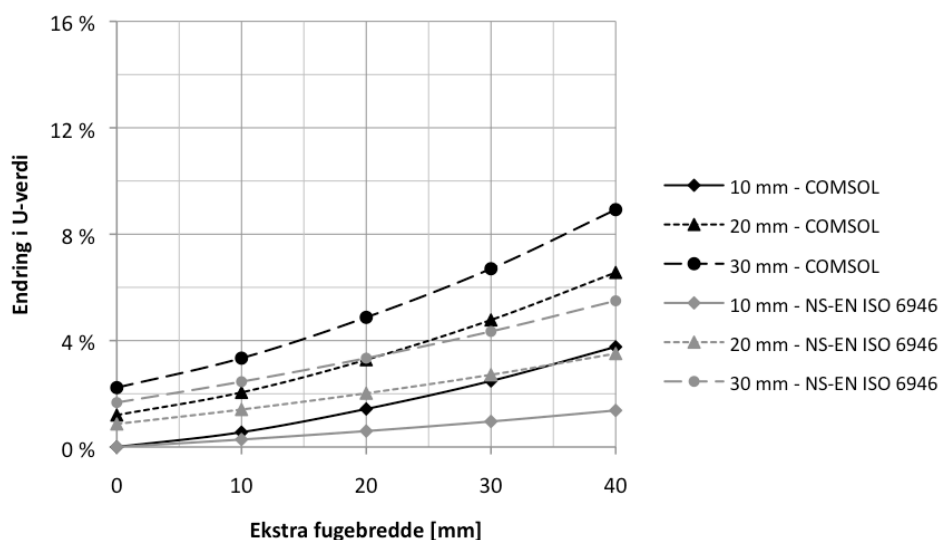
Figur 43 viser endring i U-verdi ved endring av varmekonduktivitet for lettklinkerbetongen. Scan Isoblokk 35 er mer følsom for denne endringen enn Leca Isoblokk 35. Forskjellene mellom beregningene gjort i COMSOL Multiphysics og beregningene gjort etter NS-EN ISO 6946 er små.



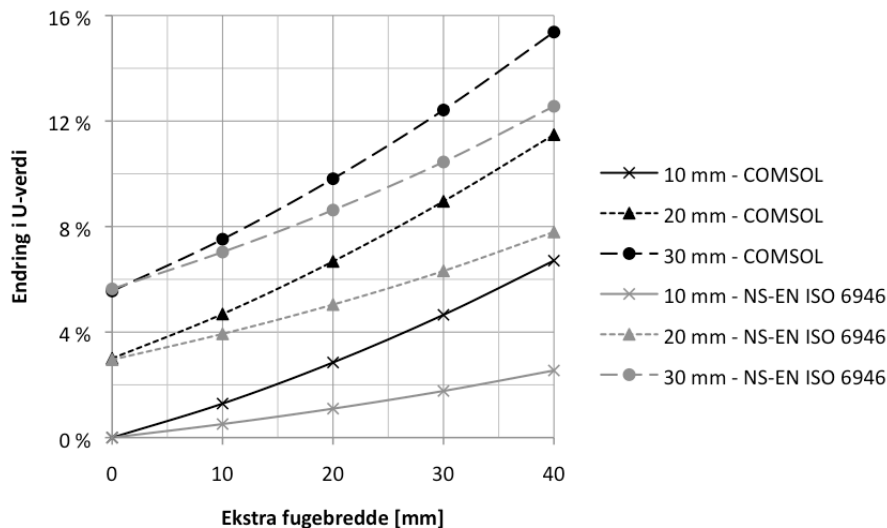
Figur 43 - Endring i U-verdi ved endring av varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen

## Fugebredde og fugetykkelse

Kombinert ekstra fugebredde og ekstra fugetykkelse vil ha en forsterket negativ effekt på U-verdien. Figur 44 og Figur 45 viser hvordan U-verdien endrer seg med økende fugebredde for forskjellige fugetykkelser for henholdsvis Scan Isoblokk 35 og Leca Isoblokk 35.



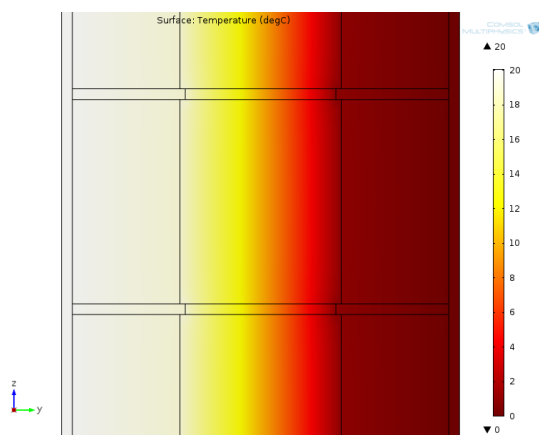
Figur 44 – Kombinert ekstra fugebredde og fugetykkelse for Scan Isoblokk 35



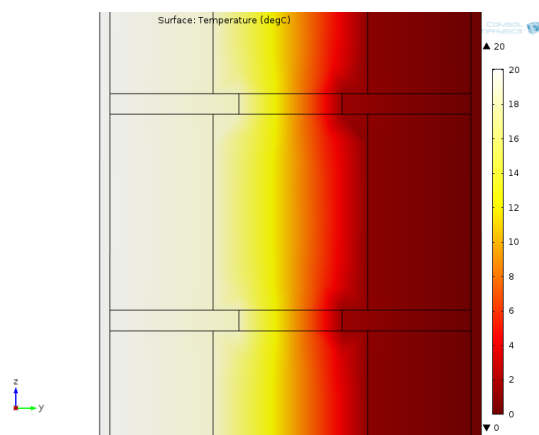
Figur 45 - Kombinert ekstra fugebredde og fugetykkelse for Leca Isoblokk 35

U-verdien øker fordi fugene, og dermed kuldebroene, blir større. Figurene nedenfor viser temperaturen for et vertikalsnitt gjennom en vegg med Leca Isoblokk 35. Figur 46 har standard fugebredde og tykkelse, mens Figur 47 har fuger som er 20 mm bredere på begge sider og en fugetykkelse på 20 mm. Figur 46 og Figur 47 viser at

temperaturfordelingen gjennom veggene er forskjellig for de to veggene grunnet kuldebroene i fugene.



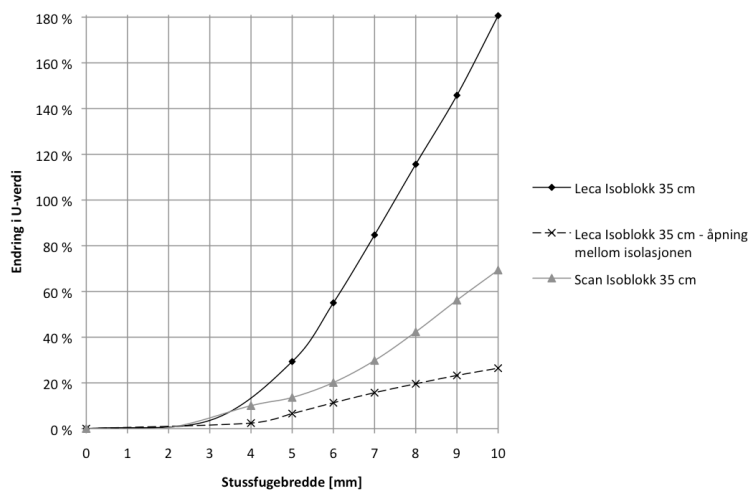
Figur 46 – Overflatetemperatur [°C]. Fugetykkelse = 10 mm, Fugebredde = 2 x 105 mm.



Figur 47 – Overflatetemperatur [°C]. Fugetykkelse = 20 mm, Fugebredde = 2 x 125 mm

## Stussfuger

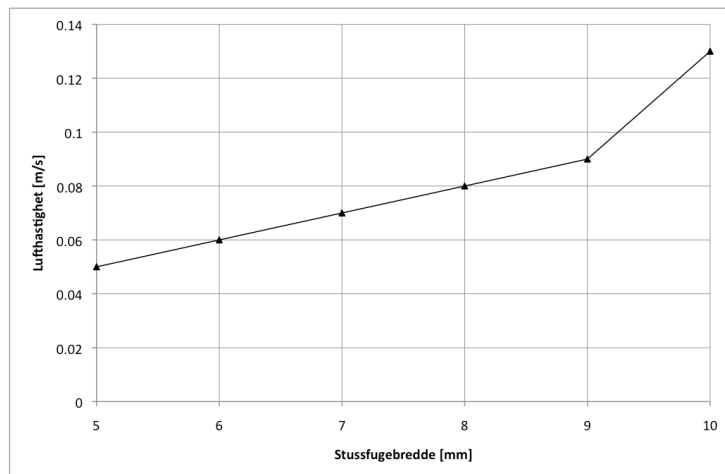
Det er gjort simuleringer med stussfuger for Scan Isoblokk 35 og Leca Isoblokk 35. For Leca Isoblokk 35 er både stussfuger som er åpne helt igjennom blokken (350 mm) og stussfuger som kun er åpen mellom isolasjonskjernene (150 mm) undersøkt. Resultatene er vist i Figur 48.



Figur 48 - Endring i U-verdi for åpne stussfuger. Beregnet i COMSOL Multiphysics.

For Leca Isoblokk 35 med åpning kun mellom isolasjonen og Scan Isoblokk 35 med gjennomgående åpen stussfuge er det beregnet U-verdi for stussfuger på 4-10 mm. Grunnet utfordringer med simuleringene er det kun gjort beregninger for stussfuger på 5-10 mm for Leca Isoblokk 35 med gjennomgående åpen stussfuge. Disse utfordringene skyldes blant annet kapasiteten til datamaskinen som ble brukt.

Figur 48 viser at gjennomgående, åpne stussfuger vil gi størst endring i U-verdi for Leca Isoblokk 35. Scan Isoblokk 35 er utformet med isolasjon som stikker ut og passer inn i blokken ved siden av. Luftspalten får derfor en bøy og den naturlige konveksjonen bremses. For Leca Isoblokk 35 med åpning kun mellom isolasjonsskjernene vil endring i U-verdi være enda mindre. Fordi lettklinkerbetongen isolerer på begge sider av luftspalten vil temperaturforskjellen mellom kald og varm side bli mindre slik at konveksjonen også blir mindre.



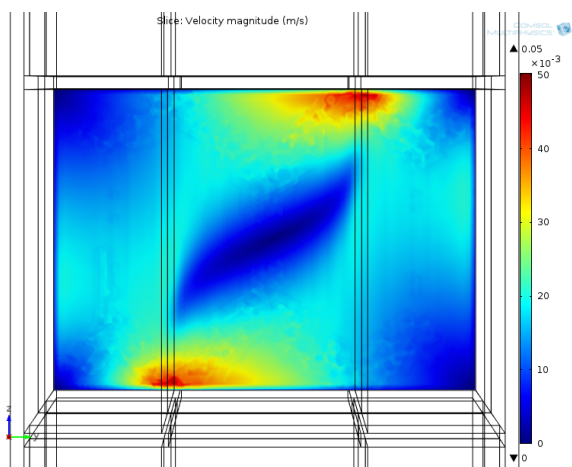
Figur 49 - Lufthastigheten [m/s] i stussfugene for Leca Isoblokk 35

U-verdien blir høyere når stussfugene blir større fordi det oppstår naturlig konveksjon i fugene. Luften varmes opp og stiger på varm side og kjøles ned og synker på kald side. Dette fører til at luften sirkulerer inne i stussfugen. Dette er illustrert i Figur 50. For bredere stussfuger vil lufthastigheten bli større. Figur 49 viser lufthastigheten for forskjellige stussfugebredder for gjennomgående fuger i Leca Isoblokk 35. Lufthastigheten vil øke tilnærmet lineært for stussfuger opp mot 9 mm. Over denne bredden vil lufthastigheten øke betydelig og ulineært.

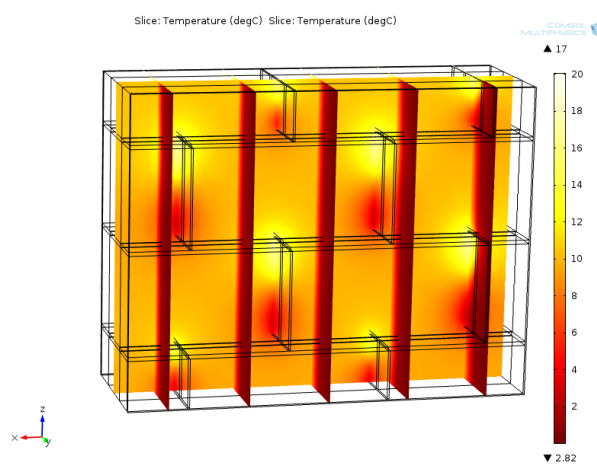
Figur 51 og Figur 52 viser temperatur i stussfugene i en vegg med Leca Isoblokk 35 og stussfuger på 5 mm. Figurene viser at den varme luften stiger og den kalde synker. Figur 53 viser et horisontalsnitt av en vegg med Scan Isoblokk 35 med stussfuger på 5 mm. Temperaturforskjellene viser kuldebroene stussfugene lager.

I feltstudien er alle stussfugene registrert. På bakgrunn av antall stussfuger av hver størrelse og prosentvis økning i U-verdi hver av dem vil gi, er den vektete endringen i U-verdi for hele veggfeltet funnet. Disse utregningene er vist i Vedlegg 6. To murfelt ble undersøkt i feltstudien. For det ene fantes det mange stussfuger på 4-7 mm, mens for det andre var det få store stussfuger. Tabell 12 viser endring i U-verdi for de forskjellige typene stussfuger simulert i COMSOL Multiphysics for et veggfelt med

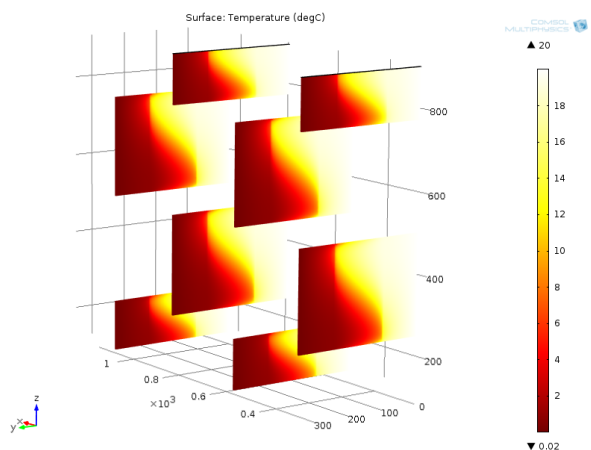
få åpne stussfuger og et veggfelt med mange åpne stussfuger. I disse beregningene er antatt at stussfuger under 4 mm ikke vil gi endring i U-verdien.



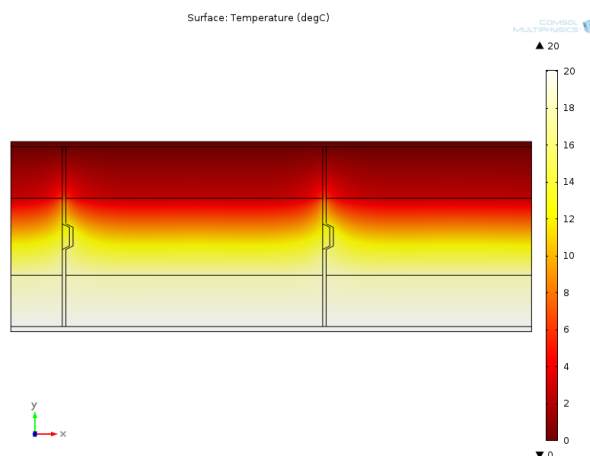
Figur 50 – Lufthastighet [m/s] i stussfuge, Leca Isoblokk 35, 5 mm stussfuge



Figur 51 – Temperaturer[°C] midt i vegg(fra kald side). Leca Isoblokk 35, 5 mm stussfuge



Figur 52 – Temperatur [°C] i stussfugene. Leca Isoblokk 35, 5 mm stussfuger



Figur 53 – Temperatur [°C] i horisontalsnitt. Scan Isoblokk 35, 5 mm stussfuger

Det må understrekes at dette kun er et eksempel på hvordan endringen i U-verdien kan se ut. Tallene henger direkte sammen med målingene fra feltstudien. Små endringer i målingene kan føre til store forskjeller. For eksempel vil en ekstra gjennomgående stussfuge på 7 mm i en vegg med Leca Isoblokk 35 gi en økning i U-verdi på nesten 2 % for et veggfelt av denne størrelsen.

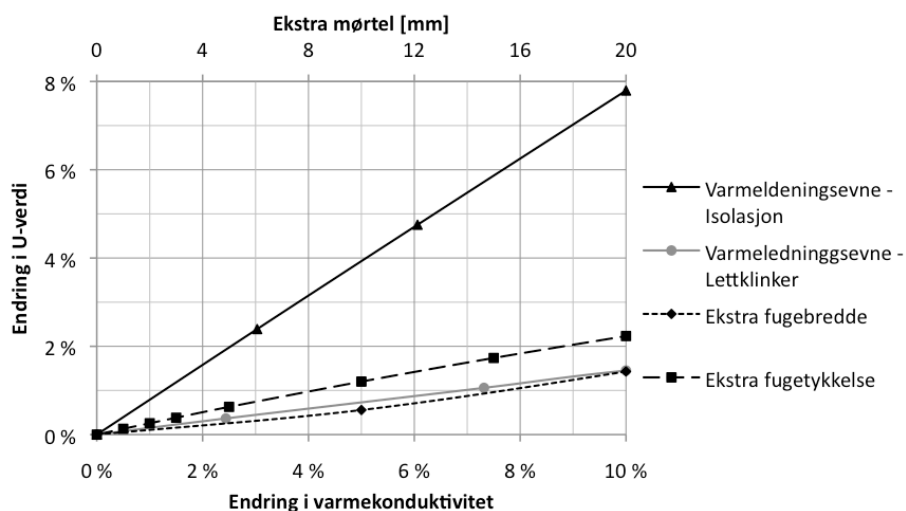
Tabell 12 – Eksempel på endring i U-verdi for en vegg med lite eller mye stussfuger, basert på de to murfeltene som er revet i feltstudien

	Få åpne stussfuger	Mange åpne stussfuger
Scan Isoblokk 35	1 %	5 %
Leca Isoblokk 35	2 %	10 %
Leca Isoblokk 35 – kun mellom isolasjon	0.5 %	2 %

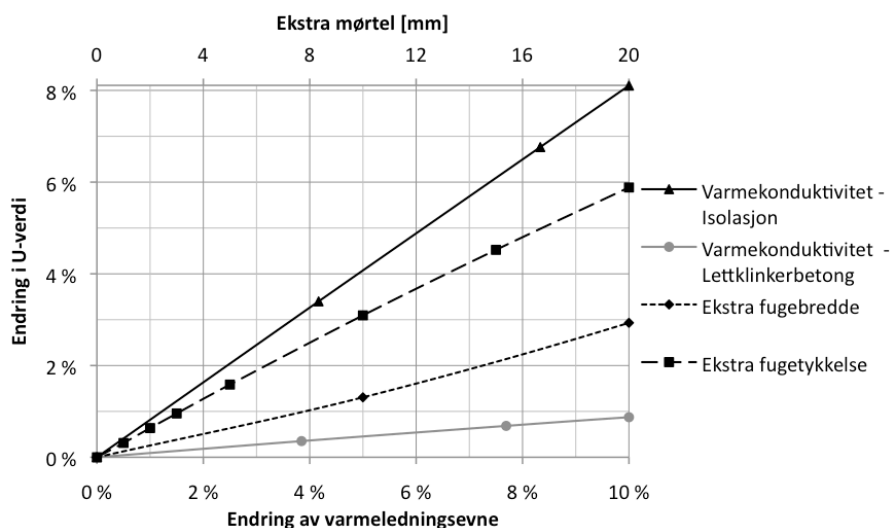
### 7.2.3 Parametersammenligning

For å undersøke hvilken parametere som har størst innvirkning på U-verdien er de plottet sammen i Figur 54 og Figur 55, for henholdsvis Scan Isoblokk 35 og Leca Isoblokk 35. Resultatene fra beregningene gjort i COMSOL Multiphysics er brukt i denne sammenligningen.

Endring i varmekonduktivitet for isolasjonen og lettklinkerbetongen er i gitt prosent på den nedre akse, mens endring i fugebredde og endring i fugetykkelse er gitt i millimeter på den øvre akse.



Figur 54 - Endring i U-verdi ved endring av parametere. Beregnet i COMSOL Multiphysics



Figur 55 - Endring i U-verdi ved endring av parametere. Beregnet i COMSOL Multiphysics

Som beskrevet tidligere vil varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen ha en større usikkerhet enn varmekonduktiviteten til isolasjonen. Grafene kan derfor være noe misvisendes for disse to parametere. Grafene viser U-verdi for opp til 10 % endring i



varmekonduktivitet for både isolasjon og lettklinkerbetong. Endringen i varmekonduktivitet for lettklinkerbetong kan være opp til 30 % grunnet variasjon i både densitet og fuktinnhold.



## 8 Diskusjon

Rapportens formål er å undersøke hvor sensitivt lettklinkermurverk er med tanke på å oppnå prosjektert U-verdi. Det er også undersøkt hvilke forhold som vil gi størst endring i U-verdi og de forskjellige parametrene er diskutert i dette kapittelet. Et murfelt er målt i et varmemestrømsapparat og det diskuteres hvilke forhold som gjør at murfeltet ender opp med den U-verdien som blir målt. Videre er forskjellen i resultatene fra beregningene etter NS-EN ISO 6946 og COMSOL Multiphysics diskutert. Det er så gitt forslag til utførelses- og produktforbedringer.

### 8.1 Parametrene

For å kunne konkludere med hvilken parameter som er mest følsom med tanke på å oppnå prosjektert U-verdi, må det først diskuteres i hvilken grad det er sannsynlig at avvik i de forskjellige parametrene inntreffer.

Fugebredden var svært varierende i de to veggene som ble revet i feltstudien. Det var likevel tydelig for begge veggene at mørtelfugene var bredere enn vangene. Avviket i fugebredde vil avhenge av murerne og om det blir brukt mørtelkasse. Ut i fra feltstudien blir det antatt at sannsynlig ekstra fugebredde er 20 mm, altså 10 mm på hver side av laftestrimmelen.

Fugetykkelsen er enkel å kontrollere hvis det blir brukt mørtelkasse. Feltstudien avdekket imidlertid at murere gjerne ikke ønsker å bruke mørtelkasse. Dette er fordi de synes det er enklere å beregne og legge på mørtel selv og fordi det da er lettere å kontrollere fugetykkelsen. Det anses derfor som sannsynlig at fugene kan ha en tykkelse på 20 mm.

Usikkerheten i varmekonduktiviteten for PUR, EPS og lettklinkerbetong er omtalt i delkapittel 6.4.2. Lettklinkerbetong vil ha større usikkerhet, både på grunn av variasjon i densiteten og på grunn av fuktpåkjønning. Det er derfor antatt at varmekonduktiviteten til lettklinkerbetongen har et avvik på 10 %.

Varmekonduktiviteten brukt for isolasjonen i Leca Isoblokk er den deklarererte verdien. Som beskrevet tidligere er det for deklarerert varmekonduktivitet gitt et påslag for produksjonsusikkerheten (SINTEF Byggforsk, 2004). For Leca Isoblokk er varmekonduktiviteten derfor mest sannsynlig lik eller bedre enn den deklarererte verdien. For Scan Isoblokk er den målte verdien brukt i beregningene. Produsenten har ikke oppgitt en deklarerert varmekonduktivitet, men den oppgitte verdien er betydelig høyere enn den målte. Det er mye usikkerhet knyttet til egenskapene til

Scan Isoblokk. Det er derfor antatt som sannsynlig at varmekonduktiviteten kan være 10 % høyere enn det som er målt. Dette er også den usikkerheten som er oppgitt av produsenten.

I feltstudien ble det avdekket at stussfugene varierer i størrelse fra 0-7 mm. Beregningene gjort i COMSOL Multiphysics viser at spesielt de store stussfugene vil påvirke U-verdien. Tidligere undersøkelser viser at stussfuger som er mindre enn 4 mm i liten grad vil påvirke U-verdien (Time, 2012). På bakgrunn av antall stussfuger av hver størrelse og prosentvis økning i U-verdi hver av dem vil gi, er den vektete endringen i U-verdi for hele veggfeltet funnet. Ved bare noen få store stussfuger vil det kunne endre U-verdien til en vegg med Leca Isoblokk 35 med 2 %. Hvis den derimot har flere store stussfuger vil den kunne ha en økning i U-verdi på over 10 %, kun på grunn av stussfugene. For en vegg murt med Scan Isoblokk 35 vil effekten av stussfugene bli noe mindre fordi isolasjonskjernen stikker ut og passer inn i blokken ved siden av slik at konveksjonen bremses. Basert på feltstudien og beregningsresultatene er det antatt en sannsynlig endring i U-verdien på 4 %, for en vegg av Scan Isoblokk 35. For Leca Isoblokk 35 er det ansett som sannsynlig at stussfugene vil føre til en endring i U-verdien på 2 %. Det er da antatt at det for Leca kun vil være mellomrom mellom isolasjonskjernene slik det ble observert på byggeplassen.

Sannsynlige avvik for hver parameter samt tilhørende U-verdi er presentert i Tabell 13 og Tabell 14. Denne sammenligningen viser at alle parametrene har en moderat innvirkning på U-verdien, men til sammen vil de kunne føre til en betydelig økning i U-verdi.

Tabell 13 – Sannsynlige avvik for Scan Isoblokk 35

<b>Parameter</b>	<b>U-verdi [W/m<sup>2</sup> K]</b>	<b>Endring i U-verdi</b>	
Egentlig U-verdi	<b>0,183</b>		
Fugebredde 20 mm ekstra	0,186	0,003	1 %
Fugetykkelse 20 mm	0,185	0,002	1 %
Isolasjon + 10 %	0,198	0,014	9 %
Lettklinker + 10 %	0,186	0,003	1 %
Stussfuger	0,191	0,006	3 %
Total endring		0,027	<b>15 %</b>
Ny U-verdi med avvik	<b>0.210</b>		

Tabell 14 – Sannsynlige avvik for Leca Isoblokk 35

Parameter	U-verdi [W/m <sup>2</sup> K]	Endring i U-verdi	
Egentlig U-verdi	<b>0,148</b>		
Fugebredde 20 mm ekstra	0,152	0,004	3 %
Fugetykkelse 20 mm	0,152	0,005	3 %
Isolasjon 0 % ( $\lambda_d$ )	0,148	0,000	0 %
Lettklinker + 10 %	0,149	0,001	1 %
Stussfuger	0,151	0,003	2 %
Total endring		0,013	<b>9 %</b>
Ny U-verdi med avvik	<b>0,161</b>		

For Scan Isoblokk 35 vil de parametrene som endrer U-verdien mest når de sannsynlige avvikene er tatt i betraktning, være stussfugene og varmekonduktiviteten til isolasjonen. For Leca Isoblokk 35 vil derimot fugebredden og fugetykkelsen ha størst innvirkning. Leca Isoblokk 35 er lavere enn Scan Isoblokk 35 og har derfor flere fuger per kvadratmeter.

I tillegg til en vurdering av endringen av U-verdi ved sannsynlige avvik for de forskjellige parametrene er det gjort en vurdering av endringen i U-verdi for det som anses som det maksimale avviket for parameteren.

Maksimalt avvik for de forskjellige parametrene er presentert i Tabell 15 og Tabell 16. Basert på feltstudien anses det som usannsynlig at fugene blir mer enn 40 mm bredere enn de skal være, i hvert fall ved bruk av laftestrimmel. Største fugetykkelse antas å være 30 mm.

Det maksimale avviket i varmekonduktiviteten til lettklinkerbetong er basert på det som er oppgitt fra leverandør (RC Beton, 2014). Avviket skyldes usikkerheten i densiteten og er på 10 %. Det er i tillegg lagt på et fuktpåslag på 17 % for fuktutsatt lettklinkerbetong (NS-EN ISO 10456, 2007). For isolasjonen i Scan Isoblokk er varmekonduktiviteten oppgitt til å være 0,038 W/m K. Dette er 15 % høyere enn den målte verdien. Det anses ikke som sannsynlig at varmekonduktiviteten vil bli høyere enn dette.

Den maksimale endringen i U-verdi på grunn av åpne stussfuger er antatt å være % for Leca Isoblokk 35 og 7 % for Scan Isoblokk 35. Det er da antatt at stussfugene er gjennomgående både for Leca og Scan. Scan Isoblokk vil fremdeles ha en utstikker på isolasjonskjernen som bremser konveksjonen og endring i U-verdi er derfor lavere.

Tabell 15 – Maksimale avvik for Scan Isoblokk 35

Parameter	U-verdi [W/m <sup>2</sup> K]	Endring i U-verdi	
Egentlig U-verdi	<b>0,183</b>		
Fugebredde 40 mm ekstra	0,190	0,007	4 %
Fugetykkelse 30 mm	0,187	0,004	2 %
Isolasjon + 15 %	0,205	0,021	12 %
Lettklinker + 27 %	0,189	0,006	3 %
Stussfuger	0,203	0,013	7 %
Total endring		0,052	<b>28 %</b>
Ny U-verdi med avvik	<b>0,235</b>		

Tabell 16 – Maksimale avvik for Scan Isoblokk 35

Parameter	U-verdi [W/m <sup>2</sup> K]	Endring i U-verdi	
Egentlig U-verdi	<b>0,148</b>		
Fugebredde 40 mm ekstra	0,158	0,011	7 %
Fugetykkelse 30 mm	0,156	0,009	6 %
Isolasjon + 10 %	0,160	0,012	8 %
Lettklinker + 27 %	0,151	0,003	2 %
Stussfuger	0,155	0,015	10 %
Total endring		0,049	<b>33 %</b>
Ny U-verdi med avvik	<b>0,197</b>		

Endringen i U-verdi for de maksimale avvikene er størst for varmekonduktiviteten til isolasjon og for åpne stussfuger. For Leca Isoblokk 35 vil også fugebredden og fugetykkelsen kunne føre til stor endring i U-verdi. Endring i varmekonduktiviteten til lettklinker vil derimot ha liten innvirkning på U-verdi for både Leca Isoblokk og Scan Isoblokk, selv med en økning på 27 %.

## 8.2 U-verdi målt i laboratoriet

U-verdi for Scan Isoblokk 35 målt i laboratoriet er høyere enn de beregnede U-verdiene. Beregningene gjort i COMSOL Multiphysics ligger nærmere den virkelige verdien enn beregningene gjort etter standarden. Dette er mest sannsynlig fordi den i større grad tar hensyn til effekten av flerdimensjonale varmestrømmer.

Tabell 17 – U-verdi [W/m<sup>2</sup> K] for Scan Isoblokk 35. Sammenligning av målte og beregnede verdier

	U-verdi	Avvik
<b>Målt i laboratoriet</b>	<b>0,195</b>	
<b>Beregnet etter NS-EN ISO 6946</b>	0,177	-8,8 %
<b>Beregnet med COMSOL</b>	0,183	-5,8 %

Avviket fra beregningene gjort i COMSOL Multiphysics kan komme fra feil i utførelsen. Det ble dokumentert i feltstudien at fugene gikk ut i isolasjonen med ca. 10 mm på hver side, men at den ekstra fugebredden kun var halv fugebredde. Stussfugene ble også målt og det var flere som var 4 mm og større. Fugetykkelsen var ikke mer enn 10 mm og skal ikke ha påvirket U-verdien mer enn beregnet. Varmekonduktiviteten til EPS'en og lettklinkerbetongen ble målt for det samme partiet med blokker som veggen ble bygget av. Dette er derfor relativt sikre verdier. Lettklinkerbetongen ble imidlertid tørket før  $\lambda$ -verdien ble målt og den murte veggen kan inneholde mer fukt enn det som ble målt. Alle stussfugene i veggen er målt. Ut i fra endringen i U-verdi for de forskjellige stussfugestørrelsene er det beregnet at stussfugene vil gi veggen en total endring i U-verdi på 4,85 %, se Vedlegg 6. Basert på de antatte avvikene og den målte verdien i varmemestrømsapparatet er det beregnet at lettklinkerbetongen bidrar med en endring i U-verdien på 0,33 %. Dette tilsier at lettklinkerbetongen har et avvik i varmekonduktiviteten på 2,2 %. Tabell 18 viser de antatte avvikene for veggen som er målt i det skjermede varmemestrømsapparatet, med tilhørende endring i U-verdi.

Tabell 18 – Antatte avvik for vegg målt i laboratoriet

Parameter		U-verdi [W/m <sup>2</sup> K]	Endring i U-verdi	
Egentlig U-verdi		<b>0,183</b>		
Fugebredde	20 mm ekstra, halve fuger	0,185	0,002	1 %
Fugetykkelse	10 mm	0,183	0,000	0 %
Isolasjon	Målt verdi	0,183	0,000	0 %
Lettklinker	+ 2,5 %	0,184	0,001	≈ 0 %
Stussfuger	Som målt	0,192	0,009	5 %
Total endring			0,011	<b>6 %</b>
U-verdi målt i varmemestrømsapparat		<b>0,195</b>		

Antakelsene som er gjort i dette delkapittelet er basert på at den målte U-verdien i varmemestrømsapparatet er riktig. Det er viktig å understreke at varmemestrømsapparatet har en måleusikkerhet på 5 %. Dette er imidlertid den største feilen apparatet kan ha og målingen er mest sannsynlig mer nøyaktig enn dette. Ut i fra avvikene observert i feltstudien og medførende endring i U-verdi, stemmer målingene bra.

### **8.3 Beregningsammenligning av COMSOL Multiphysics og NS-EN ISO 6946**

U-verdi for alle lettklinkerblokkene, beregnet med COMSOL Multiphysics og etter NS-EN ISO 6946 er gitt i delkapittel 0. Sammenligningen viser at beregningene med COMSOL Multiphysics gir en høyere U-verdi enn NS-beregningene som ligger 3-6 % lavere for alle blokktypene. Resultatene fra delkapittel 7.2.2 viser i tillegg at større fugebredde fører til en større endring i U-verdi for beregningene gjort i COMSOL Multiphysics. Ved gjennomgående mørtelfuger, uten laftestrimmel, vil økningen i U-verdi for Scan Isoblokk 35 være 27 % beregnet etter NS-EN ISO 6946 og 45 %, beregnet med COMSOL Multiphysics. For Leca Isoblokk 35 vil endringen være 43 % for beregningene gjort etter standarden og hele 82 % for beregninger gjort i COMSOL Multiphysics.

En mulig forklaring på de store forskjellene i beregningene er forenklingene gjort i beregningene etter NS-EN ISO 6946. I henhold til standarden beregnes det en øvre grenseverdi som forutsetter at det ikke strømmer noe varme sideveis i materialene og en nedre grenseverdi som forutsetter at det er uendelig god varmeledning sideveis i materialsjiktene. Middelerdien av disse grenseverdiene blir den totale varmemotstanden for bygningsdelen. Dersom det er stor forskjell mellom varmekonduktiviteten på materialene i konstruksjonen vil de to grenseverdiene ligge lengre fra hverandre. Den vikelige varmemotstanden kan være svært forskjellig fra middelerdien og kan i noen tilfeller nærme seg nedre grenseverdi. (SINTEF Byggforsk, 1998) COMSOL Multiphysics er et 3D simuleringsprogram som tar hensyn til flerdimensjonal varmestrøm. Det er derfor sannsynlig at disse beregningene vil gi en U-verdi nærmere den virkelige verdien enn det de forenklede beregningene etter standarden. Sammenligningen med U-verdi målt i laboratoriet støtter opp under dette.

### **8.4 Utførelses- og produktforbedringer**

Gjennom arbeidet med denne rapporten er det funnet mulige forbedringer for denne typen murprodukter.

For tre av blokkvariantene er laftestrimmelen smalere enn isolasjonskjernen for blokken. En økning i bredden til laftestrimlene vil føre til en reduksjon i U-verdien som kan ses i Tabell 19. Det være spesielt gunstig for Leca Isoblokk 30, som i utgangspunktet har en laftestrimmel som er 45 mm smalere enn den kan være.



Tabell 19 – Forbedring i U-verdi med bredere laftrimmel

	<b>Laftrimmel nå/ideelt</b>	<b>U-verdi [W/m<sup>2</sup> K]</b>	<b>U-verdi, forbedret [W/m<sup>2</sup> K]</b>	<b>Endring i U-verdi</b>
<b>Scan Isoblokk 25</b>	90 mm/100 mm	0,268	0,265	- 1 %
<b>Leca Isoblokk 35</b>	140 mm/150 mm	0,148	0,146	- 1 %
<b>Leca Isoblokk 30</b>	90 mm/135 mm	0,173	0,163	- 6 %

På byggeplassbesøket, under feltstudien, ble det avdekket at murerne brukte fugetykkelsen for å tilpasse høyden for veggene. Dette ble begrunnet med at det var enklere enn å kutte til blokker på toppen. Weber har møtt dette problemet ved å produsere en tilpasningsblokk som kun er 9 cm høy (Weber, 2011). Dette produktet bør brukes fremfor å justere høyden ved hjelp av fugene. Ut ifra resultatene i 7.2.1 er det tydelig at fugetykkelsen har en klar innvirkning på U-verdien og derfor ikke bør være tykkere enn nødvendig.

Anbefaling fra SINTEF Byggforsk (2011) sier at ved stussfuger over 8 mm bør disse isoleres. Stussfugeberegningene gjort i COMSOL Multiphysics viser at stussfuger helt ned i 4 mm vil endre U-verdien betydelig på grunn av naturlig konveksjon. Isolering av stussfuger på over 4 mm bør derfor vurderes anbefalt. Viktigheten av dette bør også understrekes.



## 9 Konklusjon

Denne rapporten har vist at det er knyttet flere usikkerheter til prosjektert U-verdi for denne typen lettklinkermurverk. Samlet vil disse kunne føre til betydelige avvik i U-verdien. Med økende isolasjonstykkelser og materialer med bedre varmeisoleringssegenskaper vil disse usikkerhetene øke.

Varmekonduktiviteten til isolasjon er den mest avgjørende parameteren for å oppnå prosjektert U-verdi. Denne verdien er imidlertid som oftest nøye kontrollert av produsenten. Ved bruk av deklartert varmekonduktivitet i U-verdiberegningene vil det ikke være lite sannsynlig at denne parameteren fører til avvik i U-verdien.

Åpne stussfuger er den parameteren som potensielt kan gi størst endring i prosjektert U-verdi under utførelsen av murerarbeidet. Stussfuger helt ned i 4 mm vil kunne gi en betydelig endring i U-verdien. I tillegg til at effekten av denne parameteren kan være stor, er det observert at åpne og delvis åpne stussfuger er svært vanlig i denne typen murverk. Åpne stussfuger blir derfor ansett som det mest sårbare forholdet med tanke på å oppnå prosjektert U-verdi.

For Scan Isoblokk 35 vil fugebredden og fugetykkelsen det mures med ha moderat innvirkning på U-verdien. For Leca Isoblokk 35 vil disse parametrene ha noe mer å si grunnet lavere blokkhøyde. Samlet vil likevel ekstra fugebredde og fugetykkelse kunne gi en vesentlig endring i U-verdi. Denne endringen kan nesten helt unngås ved bruk av mørtelkasse, som for veggen murt i denne studien. Å bruke fugetykkelsen for å justere høyden til veggen frarådes.

Varmekonduktiviteten til lettklinkerbetong kan variere mye grunnet densiteten og fuktinnhold, men selv store avvik vil kun ha moderat påvirkning på U-verdien.

Beregningsresultatene viser at det for denne typen konstruksjoner vil være hensiktsmessig å bruke et beregningsprogram som tar hensyn til flerdimensjonal varmestrøm. U-verdiene beregnet etter NS-EN ISO 6946 er lavere enn U-verdiene beregnet med COMSOL Multiphysics, for alle blokkvariantene som er undersøkt. Dette betyr at beregningene gjort etter standarden mest sannsynlig gir en U-verdi som er urealistisk bra. Avviket mellom beregningene blir større for vegger med bredere mørtelfuger.



## Referanser

BMC. 2012. *Scan Blokk, Scan Isoblokk til store og små bygg. Produktoversikt*. BMC-Norge. Tønsberg.

BMC. 2013. *Ydeevnedeklaration*. Hentet: 25.januar 2014. Hentet fra: [http://www.bmc-norge.no/index.php?option=com\\_content&view=article&id=118:scan-isoblokk&catid=93&Itemid=493](http://www.bmc-norge.no/index.php?option=com_content&view=article&id=118:scan-isoblokk&catid=93&Itemid=493)

BMC. 2014a. Mailkorrespondanse med Gunnar Fantoft, BMC Danmark. Mottatt: 8.mai 2014.

BMC. 2014b. *Scan Isoblokk*. Hentet: 25.januar 2014. Hentet fra: [http://www.bmc-norge.no/index.php?option=com\\_content&view=article&id=118:scan-isoblokk&catid=93&Itemid=493](http://www.bmc-norge.no/index.php?option=com_content&view=article&id=118:scan-isoblokk&catid=93&Itemid=493)

Bygg bedre. 2009. *Ny Leca Isoblokk 35 cm*. Maxit as. Hentet 10.april 2014. Hentet fra: [http://www.weber-norge.no/fileadmin/user\\_upload/Brosjyrerer/Bygg\\_Bedre/Bygg\\_Bedre\\_1-09\\_ORIGINAL.pdf](http://www.weber-norge.no/fileadmin/user_upload/Brosjyrerer/Bygg_Bedre/Bygg_Bedre_1-09_ORIGINAL.pdf)

Byggteknisk forskrift (TEK10). 2010. *Forskrift om tekniske krav til byggverk*. Kommunal- og moderniseringsdepartementet.

Chandra, S. og Berntsson, L. 2002. *Lightweight aggregate concrete : science, technology, and applications*. Constructon matererials, science and technology series. William Andrew Publishing/Noyes.

Korsnes, S., Time, B., Uvsløkk, S., Gustavsen, A., Gullbrekken, L., Rognvik, E. 2014. *Large scale measurements and calculations of wall elements with vacuum insulation panels (VIPs)*. SINTEF Building and Infrastructure, NTNU – Norwegian University of Science and Technology.

Maxit. 2006. *Leca Teknisk Håndbok*.

NS-EN 1745:2012 *Murverk og murprodukter. Metoder og bestemmelse av termiske egenskaper*. Standard Norge.

NS-EN ISO 10456:2007+NA:2010 *Byggematerialer og –produkter. Hygrotermiske egenskaper. Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarererte og praktiske termiske verdier* (ISO 10456:2007). Standard Norge.

NS-EN ISO 6946:2007 *Bygningskomponenter og -elementer. Varmemotstand og varmegjennomgang. Beregningsmetode.* (ISO 6946:2007). Standard Norge.

PU NORDIC. 2013. *Varmeisolasjonsmaterialer av stivt polyuretanskum (PUR/PIR)*. Hentet: 12.mars 2014. Hentet fra: [http://www.excellence-in-insulation.eu/site/fileadmin/user\\_upload/PDF/library/reports/BING\\_TECH\\_REP\\_on\\_Thermal\\_insulation\\_materials\\_made\\_of\\_rigid\\_polyurethane\\_foam\\_\\_NO\\_.pdf](http://www.excellence-in-insulation.eu/site/fileadmin/user_upload/PDF/library/reports/BING_TECH_REP_on_Thermal_insulation_materials_made_of_rigid_polyurethane_foam__NO_.pdf) )

Pyro °Control. 2004. *Termoelementer (TC)*. Hentet: 6.mai 2014. Hentet fra: <http://www.pyrocontrol.no/temperaturkatalogen/46-47.pdf>

RC Beton. 2014. Mailkorrespondanse med Peter Højbjerg Sørensen, Marketing, edb og prosjekt, RC Beton. Mottat: 14.februar 2014.

SINTEF Byggforsk. 1998. *471.008 Beregning av U-verdier etter NS-EN ISO 6946*. Byggforskserien. Oslo: Sintef Byggforsk.

SINTEF Byggforsk. 2003. *471.010 Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer*. Byggforskserien. Oslo: SINTEF Byggforsk.

SINTEF Byggforsk. 2004. *573.344 Varmeisolasjonsmaterialer. Typer og egenskaper*. Byggforskserien. Oslo: SINTEF Byggforsk.

SINTEF Byggforsk. 2004. *573.344 Varmeisolasjonsmaterialer. Typer og egenskaper*. Byggforskserien. Oslo: SINTEF Byggforsk.

SINTEF Byggforsk. 2011. *Teknisk Godkjenning. Leca Isoblokk 25 cm og 30 cm*. Gyldig til: 03.01.2016.

SINTEF Byggforsk. 2012. *523.242 Murte yttervegger av lettklinkerblokker*. Byggforskserien. Oslo: SINTEF Byggforsk.

SINTEF Byggforsk. 2013. *471.463 U-verdier. Vegger over terreng, murt av lettklinkerblokker med isolasjon*. Byggforskserien. Oslo: SINTEF Byggforsk.

Time, B., Uvsløkk, S., Gustavsen, A., Gullbrekken, L., Murphy, M., Hyrve, O. 2012. *Energy Design of Sandwich Masonry Blocks*. SINTEF Building and Infrastructure, NTNU – Norwegian University of Science and Technology, Saint-Gobain Weber.

Uvsløkk, S. 1986. *Måling av k-verdier for hele veggmoduler. Prosjektrapport 17*. Norges byggforskningsinstitutt. Trondheim.

Vik, B., Hyrve, O. 1991. *The Norwegian Insulated Block Concept*. Aker ExClay/Norsk Leca.

Weber. 2011. *Leca Isoblokk 35 cm*. Saint-Gobain Byggevarer AS. Hentet: 28.januar 2014. Hentet fra: [http://www.weber-norge.no/uploads/media/Leca\\_Isoblokk\\_35\\_cm\\_ORIGINAL\\_01.pdf](http://www.weber-norge.no/uploads/media/Leca_Isoblokk_35_cm_ORIGINAL_01.pdf)

Weber. 2013a. *Ytelseserklæring. Nr. DoP-NO-ISBL01 – Ver. 1. Leca Isoblokk 35 cm*. Saint-Gobain Byggevarer as. Oslo.

Weber. 2013b. *Ytelseserklæring. Nr. DoP-NO-ISBL01 – Ver. 2. Leca Isoblokk 30 cm*. Saint-Gobain Byggevarer as. Oslo.

Weber. 2013c. *Ytelseserklæring. Nr. DoP-NO-ISBL01 – Ver. 3. Leca Isoblokk 25 cm*. Saint-Gobain Byggevarer as. Oslo.

Weber. 2014a. *Leca Isoblokk Rex*. Weber Saint-Gobain Byggprodukter. Hentet: 26.mai 2014. Hentet fra: <http://www.weber.se/leca-registred-produkter/produkter/leca-registred-isoblock/leca-isoblock-rex.html>

Weber. 2014b. *Produktblad. Leca® Isoblokk 35 cm*. Saint-Gobain Byggevarer as. Oslo.

Weber. 2014c. *Produktblad. Leca® Isoblokk 30 cm*. Saint-Gobain Byggevarer as. Oslo.

Weber. 2014d. *Produktblad. Leca® Isoblokk 25 cm*. Saint-Gobain Byggevarer as. Oslo.





## **Innholdsfortegnelse**

<b>Vedlegg 1 - Oppgavetekst.....</b>	<b>.....</b>
<b>Vedlegg 2 - Overflatetemperaturer .....</b>	<b>.....</b>
<b>Vedlegg 3 - Måling av varmekonduktivitet .....</b>	<b>.....</b>
<b>Vedlegg 4 - Varmetransport.....</b>	<b>.....</b>
<b>Vedlegg 5 - U-verdiberegninger .....</b>	<b>.....</b>
<b>Vedlegg 6 - Stussfuger .....</b>	<b>.....</b>



# MASTEROPPGÅVE

(TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, masteroppgåve)

VÅREN 2014  
for  
**Hege Bjerke Færevaa**

U-verdiar for vegger av lettklinkermurverk  
eller  
U-values for LECA masonry

## BAKGRUNN

Til yttervegger av lettklinkerbetong i varmeisolererte konstruksjonar bruker man murblokker med ei midtre kjerne av varmeisolerande materiale, også kalla sandwichblokker eller isolasjonsblokker. Varmeisolasjonsmaterialet er PUR eller EPS avhengig av produsent. Veggene blir mura som massive vegger, utan holrom for ventilering og drenering. Det vanlegaste er å mure med to skilte mørtelstrengar i liggefugen mellom blokkene, såkalla strengmuring. For å oppnå god varmeisolering blir det lagt inn isolasjonsstrimlar av mineralull mellom mørtel-strengene i kvar mørtelfuge.

Yttervegger av lettklinkerblokker blir levert som komplette byggesystem. Det betyr at blokk-leverandørane i tillegg til isolasjonsblokker i standardformat leverer spesialblokker til hjørner og for armering, fundamentblokker, overdekningsbjelkar, armeringsprodukt og mur- og pussmørtel tilpassa den enkelte isolasjonsblokktypen.

Lettklinkermurverk er robuste konstruksjonar og lette å bygge. Samanlikna med trevegger varmeisolert på byggeplass, er det lett å tenke seg at veggane blir utført med få avvik som verkar inn på U-verdien til den ferdige veggen.

## OPPGÅVE

Hovudmålet med oppgåva er å studere kor ømfintleg lettklinkermurverk er med tanke på å oppnå prosjektert U-verdi. Studien må omfatte både forhold i produksjon av lettklinkerblokkene og i oppmuring av veggene. Aktuelle spørsmål er:

- Korleis slår variasjon i varmekonduktivitet til lettklinkerbetongen og isolasjonsmaterialet ut i berekna U-verdi?
- Kor ømfintleg er U-verdien for variasjonar i mørtelfugetjukkelse og bredde på isolasjonsstrimlane i mørtelfugene?
- Kva betydning har det at blokkene ikkje blir mura heilt i knas (opne stussfugar)?
- Kva er det mest sårbare forholdet med tanke på å oppnå prosjektert U-verdi?

Oppgåva vil omfatte følgjande element:

- A. *Numeriske berekningar*  
Parameterstudie for U-verdiar berekna etter NS-EN ISO 6946 og med COMSOL Multiphysics.
- B. *Laboratorieforsøk*  
Måling av U-verdiar på eitt veggfelt av isolasjonsblokker. Etterrekning av veggfelta gir i tillegg behov for måling av varmekonduktiviteten til dei enkelte materialsjikt i veggen.
- C. *Feltstudie*  
Observasjon av utføring med tanke på faktorar som verkar inn på U-verdien.
- D. *Litteraturstudie*  
Er det gjort tilsvarende undersøkingar på andre typar veggkonstruksjonar (treveggar)?

## GENERELT

Oppgåveteksten er meint som ei ramme for kandidatens arbeid. Justeringar vil kunne skje undervegs, når ein ser korleis arbeidet går. Eventuelle justeringar må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved vurderinga vert det lagt vekt på grundigheit i arbeidet og sjølvstendigheit i vurderingar og konklusjonar, samt at framstillinga er velredigert, klår, eintydig og ryddig utan å vere unødig voluminøs.

Det innleverte arbeidet skal innehalde:

- standard rapportframside (automatisk frå DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finn ein på sida <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- samandrag på norsk og engelsk (studentar som skriv masteroppgåve på eit ikkje-skandinavisk språk og som ikkje handterer eit skandinavisk språk, treng ikkje skrive samandrag av masteroppgåva på norsk)
- hovudteksten
- oppgåveteksten (denne teksten signert av faglærer) som Vedlegg 1.

Besvarelsen kan evt. utformas som ein vitenskapelig artikkel for internasjonal publisering. Besvarelsen inneheld da de same punktane som beskrivi over, men der hovudteksten omfattar ein vitenskapelig artikkel og ein prosessrapport.

Instituttets råd og retningslinjer for rapportskriving ved prosjektarbeid og masteroppgåve oppheldar seg på <http://www.ntnu.no/bat/studier/oppgaver>

### Kva skal innleverast?

Rutinar knytt til innlevering av masteroppgåva er nærare forklart på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgåva skal tingast via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgåva til instituttkontoret 2-4 dagar seinare. Instituttet betalar for 3 eksemplar, der instituttet skal ha 2 eksemplar. Ekstra eksemplar må kostast av kandidaten/ ekstern samarbeidspartnar.

Ved innlevering av oppgåva skal kandidaten levere ein CD med arbeidet i digital form i pdf- og word-versjon med underliggjande materiale (til dømes innsamla data) i digital form (t.d. excel-filer). Vidare skal kandidaten levere innleveringsskjemaet (frå DAIM) der både Ark-Bibl i SB I og Fellestenester (Byggsikring) i SB II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med dei aktuelle signaturane skal underskrivast av instituttkontoret før skjemaet vert levert til Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samla inn under arbeidet med oppgåva, skal leverast inn saman med oppgåva.

Arbeidet er etter gjeldande reglement NTNU sin eigedom. Eventuell bruk av materialet kan berre skje etter godkjenning frå NTNU (og ekstern samarbeidspartnar der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatata av arbeidet til undervisnings- og forskingsformål som om det var utført av ein tilsett. Ved bruk ut over dette, som utgjeving og annen økonomisk bruk, må det inngåast særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

**(Evt) Avtalar om ekstern rettleiing, gjennomføring utanfor NTNU, økonomisk stønad m.m.** gjer ein greie for her når dette er aktuelt. Sjå <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank> for avtaleskjema.

**Helse, miljø og sikkerheit (HMS):**

NTNU legg stor vekt på tryggleiken til den enkelte arbeidstakar og student. Tryggleiken til den enkelte skal kome i første rekke og ingen skal ta unødige sjansar for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgåva få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerheit ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgåva skal delta i feltarbeid, tokt, synfaring, feltkurs eller ekskursjonar, skal studenten setje seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m." Dersom studenten i arbeidet med oppgåva skal delta i laboratorie- eller verkstadarbeid skal studenten setje seg inn i og følgje reglane i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumenta finn ein på fakultetet sine HMS-sider på nettet, sjå <http://www.ntnu.no/ivt/adm/hms/>.

Studentar har ikkje full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom ein student ønskjer same forsikringsdekning som tilsette ved universitetet, vert det tilrådd at han/ho teiknar reiseforsikring og personskadeforsikring. Meir om forsikringsordningar for studentar finn ein under same lenke som ovanfor.

**Oppstart og innleveringsfrist:**

Oppstart og innleveringsfrist er i henhold til informasjon i DAIM.

**Faglærer ved instituttet: Tore Kvande**

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 22.01.2014, (revidert: 02.06.2014)

Underskrift

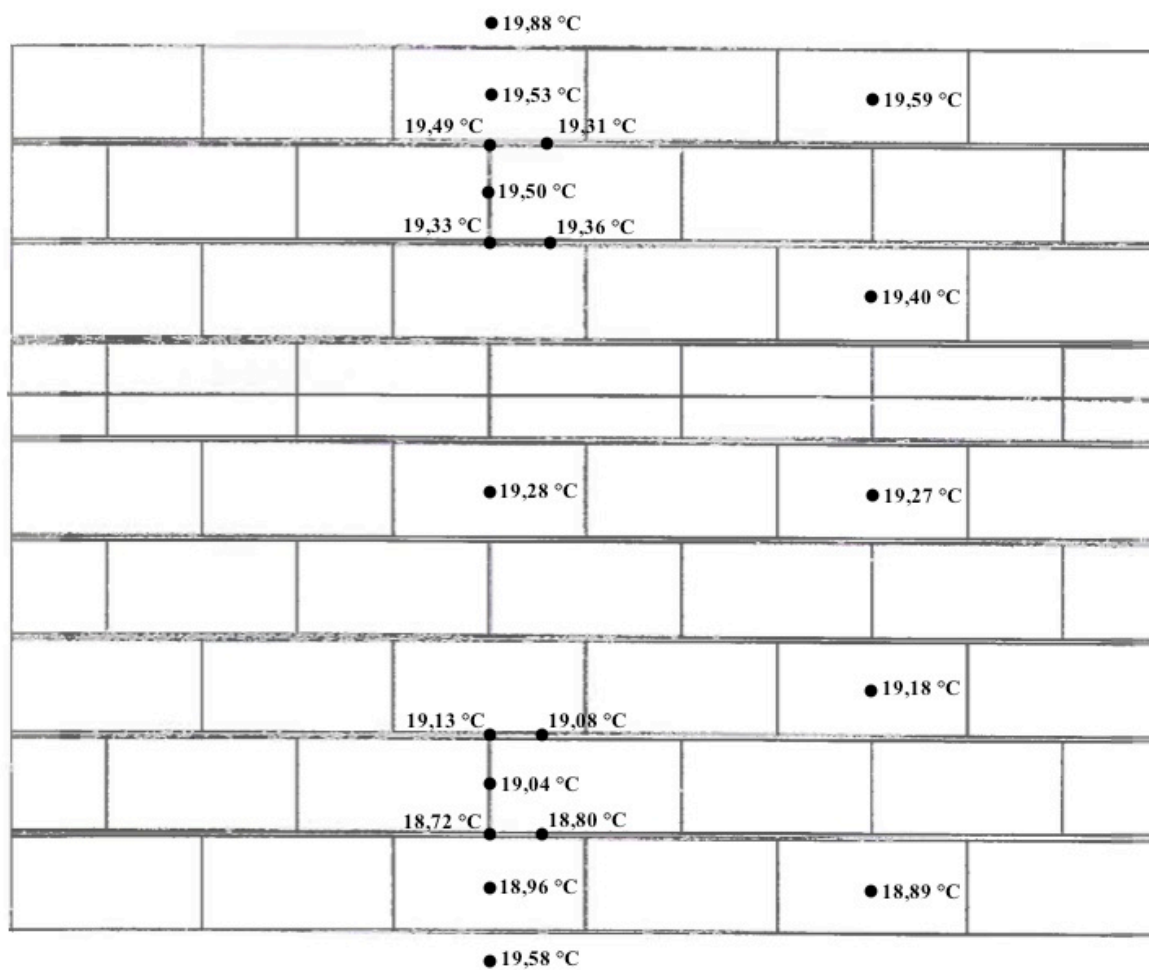


Faglærer

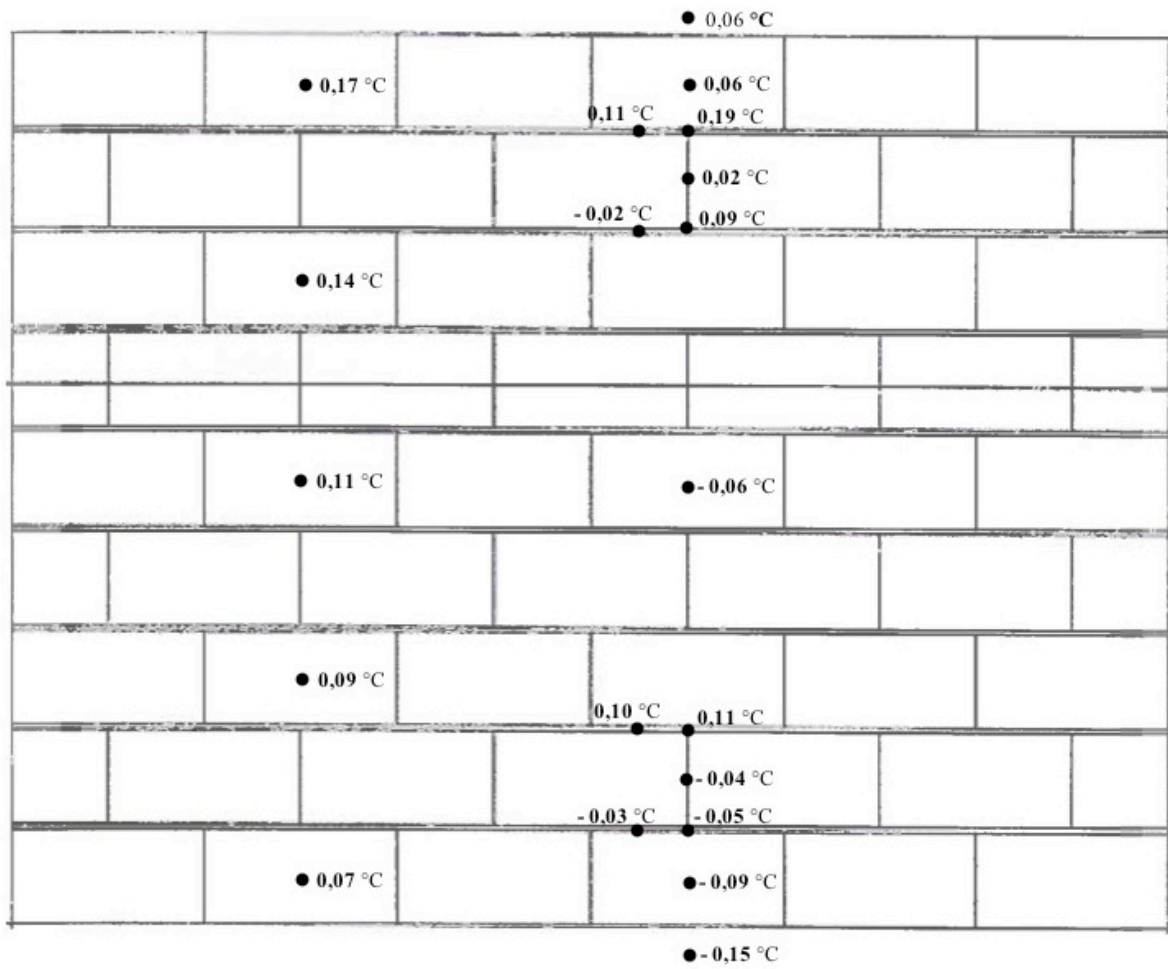
## Vedlegg 2 – Overflatetemperaturer

Figurene viser de gjennomsnittlige overflatetemperaturene over måleperioden. Termoelementene ble festet på forskjellige steder på veggen slik temperaturfordelingen på figurene viser.

### Varm side



# Kald side





# Vedlegg 3 – Måling av varmekonduktivitet

## Varmekonduktivitet – EPS



Prosjektnr: 102006738 Dato: 04.04.2014

Side 2 av 2

### Prøverapport Varmemotstand og Varmekonduktivitet

**Produsent:**

BMC

**Produktnavn:**

0

**Produkttype:**

Ekspandert polystyren (EPS)

**Dimensjoner på produkt, mm:****Produksjonssted og dato:****Prøveuttak sted og dato:****Prøvemottak:****Prøvedato:**

2. - 3. April 2014

**Prøvem metode:**

Prøvingen er gjennomført i henhold til gjeldende utgave av ISO 8301 og NS-EN 12667.

**Prøveapparat:**

Varmestrøms plateapparat, HFM, for et prøvestykke med kjøleplater 600 x 600 mm og symmetrisk plasserte varmemotstandsmålere med måleareal 300 x 300 mm. Vertikalt nedadrettet varmestrøm.

**Kalibrering:**

Kalibrert 31.03.2014 med kalibreringsplate LA 78 fra National Physical Laboratory, NPL. Sertifikatnummer PP21/N98/001f datert 29.10.1998. Varmemotst. = 2,161 m<sup>2</sup>K/W ved middeltemp. 10 °C. NPL har kalibreringsnr. 0478 fra NAMAS. Referanseplatene recalibrert ved SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut 15.03.2010

**Kondisjonering:**

23 ± 2 °C, minimum 6 timer

Tabell 1. Prøvestykke

Prøve nr.	1	2	3	4
Tykkelse mm	88,7	88,2	-	-
Densitet v/prøving kg/m <sup>3</sup>	27,6	28,1	-	-
Fukttinnhold kg/kg	-	-	-	-

Tabell 2. Prøvebetingelser.

Prøve nr.	1	2	3	4
Temperatur rom °C	10,3	10,0	-	-
Temp. differanse °C	20,1	20,1	-	-
Middeltemp. prøve °C	10,0	10,0	-	-

Tabell 3. Prøveresultater <sup>1)</sup>.

Prøvestykke nr.	1	2	3	4
Varmestrømstetthet: W/m <sup>2</sup>	7,43	7,47	-	-
Varmemotstand: m <sup>2</sup> K/W	2,71	2,69	-	-
<b>Varmekonduktivitet, λ : W/mK</b>	<b>0,0328</b>	<b>0,0328</b>	-	-

<sup>1)</sup> Prøveresultatene gjelder kun for de prøvestykkene det er målt på  
Målesikkerhet ± 1,9 % med dekningsfaktor k=2

# Varmekonduktivitet – Lettklinkerbetong



Prosjektnr: 102006738 Dato: 04.04.2014

Side 2 av 2

## Prøverapport Varmemotstand og Varmekonduktivitet

**Produsent:**

BMC

**Produktnavn:**

0

**Produkttype:**

Lettklinker vanger

**Dimensjoner på produkt, mm:**

**Produksjonssted og dato:**

**Prøveuttak sted og dato:**

**Prøvemottak:**

**Prøvedato:**

3-4 April 2014

**Prøvemetode:**

Prøvingen er gjennomført i henhold til gjeldende utgave av ISO 8301 og NS-EN 12667.

**Prøveapparat:**

Varmestrøms plateapparat, HFM, for et prøvestykke med kjøleplater 600 x 600 mm og symmetrisk plasserte varmemotstandsmålere med måleareal 300 x 300 mm. Vertikalt nedadrettet varmestrom.

**Kalibrering:**

Kalibrert 31.03.2014 med kalibreringsplate LA 78 fra National Physical Laboratory, NPL. Sertifikatnummer PP21/N98/001f datert 29.10.1998. Varmemotst. = 2,161 m<sup>2</sup>K/W ved middeltemp. 10 °C. NPL har kalibreringsnr. 0478 fra NAMAS. Referanseplatene recalibrert ved SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut 15.03.2010

**Kondisjonering:**

Tørket i varmeskap ved 105 °C

Tabell 1. Prøvestykke

Prøve nr.	1	2	3	4
Tykkelse mm	93,7	93,9	-	-
Densitet v/prøving kg/m <sup>3</sup>	688,2	694,1	-	-
Fukttinnhold kg/kg	-	-	-	-

Tabell 2. Prøvebetingelser.

Prøve nr.	1	2	3	4
Temperatur rom °C	9,9	10,0	-	-
Temp. differanse °C	14,3	14,9	-	-
Middeltemp. prøve °C	10,0	10,0	-	-

Tabell 3. Prøveresultater <sup>1)</sup>

Prøvestykke nr.	1	2	3	4
Varmestrømstetthet: W/m <sup>2</sup>	31,77	32,25	-	-
Varmemotstand: m <sup>2</sup> K/W	0,45	0,46	-	-
<b>Varmekonduktivitet, λ : W/mK</b>	<b>0,2079</b>	<b>0,2028</b>	-	-

<sup>1)</sup> Prøveresultatene gjelder kun for de prøvestykkene det er målt på  
Måleusikkerhet ± 1,9 % med dekningsfaktor k=2

## Vedlegg 4 – Varmetransport

### Varmegjennomgangskoeffisient

Varmegjennomgangskoeffisient, også kaldt U-verdi, viser hvor lett en bygningskomponent slipper gjennom varme. ”U-verdien angir hvor mye varme pr. tidsenhet, målt i watt [W], som kan strømme gjennom et areal på 1 m<sup>2</sup> ved en konstant temperaturforskjell på 1 K mellom omgivelsene på varm og kald side av konstruksjonen.” (SINTEF Byggforsk, 1998, s.1) Lav U-verdi kjennetegner derfor en godt isolert bygningsdel.

$$U = \frac{1}{R_T} + \Delta U \quad [W/m^2 K] \quad (5)$$

$R_T$  = total varmemotstand [m<sup>2</sup> K/W]

$\Delta U$  = ev. tillegg pga. utforming, utførelse m.m. [W/m<sup>2</sup> K]

U-verdien til en bygningsdel kan måles i laboratoriet ved hjelp av et varmestrømsapparat. Den kan også beregnes etter NS-EN ISO 6946 eller ved hjelp av simuleringprogram som THERM eller COMSOL Multiphysics.

Varmetransport i bygningsmaterialer foregår ved ledning, konveksjon og stråling. For å beskrive den totale varmetransporten er det allikevel vanlig å snakke om et materiales varmekonduktivitet (varmeledningsevne). ”Varmekonduktiviteten,  $\lambda$  [W/m K], til et materialet er den varmestrømmen [W] som går gjennom et tverrsnitt på 1 m<sup>2</sup> av et homogent materialsjikt av 1 m tykkelse når det er en temperaturforskjell på 1 K mellom materialoverflatene på de to siden”. (SINTEF Byggforsk, 1998, s.2)

Varmekonduktiviteten til et materiale kan bestemmes eksperimentelt med prøveapparaturl etter standardiserte metoder og dette er beskrevet i Kapittel 5.

### Varmemotstand

Forskjellige materialer har forskjellig motstand mot varmegjennomgang.

Varmemotstanden for et homogent materialsjikt er gitt av formelen

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [m^2 K/W] \quad (6)$$

$d$  = Materialsjiktets tykkelse

$\lambda$  = Varmekonduktiviteten til materialet [W/m K]

For å kunne beregne U-verdien til en bygningskomponent må man først beregne den totale varmemotstanden,  $R_T$ .

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad [m^2 K/W] \quad (7)$$

$R_{si}$  = Innvendig varmeovergangsmotstand (varmeovergangsmotstanden mellom luften og bygningsdelens innvendige overflate) [ $m^2 K/W$ ]

$R_{se}$  = Utvendig varmeovergangsmotstand (varmeovergangsmotstanden mellom luften og bygningsdelens utvendige overflate) [ $m^2 K/W$ ]

$R$  = Varmemotstand for sjiktene/feltene i bygningskomponenten [ $m^2 K/W$ ]

For beregning av U-verdi for konstruksjoner som består av sjikt som er sammensatt av flere materialer er det vanskeligere å gjøre nøyaktige beregninger.

## Vedlegg 5 – U-verdiberegninger

### Scan Isoblokk 35

	h [mm]	$f_i$
Blokkhøyde	250	0.96
Fugetykkelse	10	0.04

Øvre grenseverdi

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/m K]	$R'_a$ [m <sup>2</sup> K/W]	$R'_b$ [m <sup>2</sup> K/W]
Utv. overgsmotst.			0.040	0.040
Puss	10	1	0.010	0.010
Lettklinker betong	100	0.205	0.488	
EPS	150	0.033	4.545	
Lettklinker betong	100	0.205	0.488	
Mørtel	200	0.61		0.328
Laftestrimmel	150	0.037		4.054
Puss	10	1	0.010	0.010
Innv. overgsmotst.			0.130	0.130
			5.671	4.572
			$R'_T =$	5.619

Nedre grenseverdi

### Legering

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/m K]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Lettklinker betong	100	0.205	0.488
EPS	150	0.033	4.545
Lettklinker betong	100	0.205	0.488
			$R''_a =$ 5.521

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/m K]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Mørtel	200	0.61	0.328
Laftestrimmel	150	0.037	4.054
			$R''_b =$ 4.382

$$\text{Legering} = 1 / ((0,96/5,521) + (0,04/4,382)) = 5,466 \text{ m}^2 \text{ K/W} \quad ( 2 )$$

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/m K]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Utv. overgsmotst.			0.040
Puss	10	1	0.010
Legering			5.466
Puss	10	1	0.010
Innv. overgsmotst.			0.130
$R''_T =$			5.66

$$R_T = 5.638 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$U = \underline{\underline{0.177 \text{ W/m}^2 \text{ K}}}$$

## Scan Isoblokk 25

	h [mm]	$f_j$
Blokkhøyde	250	0.962
Fugetykkelse	10	0.038

### Øvre grenseverdi

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	$R'_a$ [m <sup>2</sup> K/W]	$R'_b$ [m <sup>2</sup> K/W]
Utv. overgsmotst.			0.040	0.040
Puss	10	1	0.010	0.010
Lettklinker betong	74	0.205	0.361	
EPS	102	0.033	3.091	
Lettklinker betong	74	0.205	0.361	
Mørtel	160	0.61		0.262
Laftestrimmel	90	0.037		2.432
Puss	10	1	0.010	0.010
Innv. overgsmotst.			0.130	0.130
			4.003	2.885
			$R'_T =$	3.944

### Nedre grenseverdi

#### Legering

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Lettklinker betong	74	0.205	0.361
EPS	102	0.033	3.091
Lettklinker betong	74	0.205	0.361
			$R''_a =$ 3.813

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Mørtel	160	0.61	0.262
Laftestrimmel	90	0.037	2.432
			$R''_b =$ 2.695

$$\text{Legering} = 1 / ((0,962/3,813) + (0,038/2,695)) = 3,753 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Utv. overgsmotst.			0.040
Puss	10	1	0.010
Legering			3.753
Puss	10	1	0.010
Innv. overgsmotst.			0.130
		$R''_T =$	3.943

$$R_T = 3.944 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$U = \underline{\underline{0.254 \text{ W/m}^2 \text{ K}}}$$



## Leca Isoblokk 35

	h [mm]	$f_i$
Blokkhøyde	190	0.95
Fugetykkelse	10	0.05

Øvre grenseverdi

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	$R'_a$ [m <sup>2</sup> K/W]	$R'_b$ [m <sup>2</sup> K/W]
Utv. overgsmotst.			0.040	0.040
Puss	10	1	0.010	0.010
Lettklinker betong	100	0.26	0.385	
PUR	150	0.024	6.250	
Lettklinker betong	100	0.26	0.385	
Mørtel	210	0.61		0.344
Laftestrimmel	140	0.037		3.784
Puss	10	1	0.010	0.010
Innv. overgsmotst.			0.130	0.130
			7.209	4.318
			$R'_T =$	6.976

Nedre grenseverdi

### Legering

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Lettklinker betong	100	0.26	0.385
PUR	150	0.024	6.250
Lettklinker betong	100	0.26	0.385
			$R''_a =$ 7.019

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Mørtel	210	0.61	0.344
Laftestrimmel	140	0.037	3.784
			$R''_b =$ 4.128

$$\text{Legering} = 1 / ((0,95/7,019) + (0,05/4,128)) = 6,782 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Utv. overgsmotst.			0.040
Puss	10	1	0.010
Legering			6.782
Puss	10	1	0.010
Innv. overgsmotst.			0.130
$R''_T =$			6.972

$$R_T = 6.974 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U = \underline{\underline{0.143 \text{ W/m}^2\text{K}}}$$

## Leca Isoblokk 30

	h [mm]	$f_i$
Blokkhøyde	248	0.961
Fugetykkelse	10	0.039

Øvre grenseverdi

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R' <sub>a</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	R' <sub>b</sub> [m <sup>2</sup> K/W]
Utv. overgsmotst.			0.040	0.040
Puss	10	1	0.010	0.010
Lettklinker betong	82	0.26	0.315	
PUR	135	0.024	5.625	
Lettklinker betong	82	0.26	0.315	
Mørtel	209	0.61		0.343
Laftestrimmel	90	0.037		2.432
Puss	10	1	0.010	0.010
Innv. overgsmotst.			0.130	0.130
			6.446	2.965
			R' <sub>T</sub> = 6.165	

Nedre grenseverdi

### Legering

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Lettklinker betong	82	0.26	0.315
PUR	135	0.024	5.625
Lettklinker betong	82	0.26	0.315
			R'' <sub>a</sub> = 6.256

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Mørtel	209	0.61	0.343
Laftestrimmel	90	0.037	2.432
			R'' <sub>b</sub> = 2.775

$$\text{Legering} = 1 / ((0,961/6,256) + (0,039/2,775)) = 5,966 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Utv. overgsmotst.			0.04
Puss	10	1	0.01
Legering			5.966
Puss	10	1	0.01
Innv. overgsmotst.			0.13
$R''_T =$			6.156

$$R_T = 6.160$$

$$U = \underline{\underline{0.162}}$$

## Leca Isoblokk 25

	h [mm]	$f_j$
Blokkhøyde	250	0.962
Fugetykkelse	10	0.038

### Øvre grenseverdi

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	$R'_a$ [m <sup>2</sup> K/W]	$R'_b$ [m <sup>2</sup> K/W]
Utv. overgsmotst.			0.040	0.040
Puss	10	1	0.010	0.010
Lettklinker betong	82	0.26	0.315	
PUR	85	0.024	3.542	
Lettklinker betong	82	0.26	0.315	
Mørtel	159	0.61		0.261
Laftestrimmel	90	0.037		2.432
Puss	10	1	0.010	0.010
Innv. overgsmotst.			0.130	0.130
			4.362	2.883
			$R'_T =$	4.278

### Nedre grenseverdi

#### Legering

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Lettklinker betong	82	0.26	0.315
PUR	85	0.024	3.542
Lettklinker betong	82	0.26	0.315
			$R''_a =$ 4.172

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Mørtel	159	0.61	0.261
Laftestrimmel	90	0.037	2.432
			$R''_b =$ 2.693

$$\text{Legering} = 1 / ((0,962/4,172) + (0,038/2,693)) = 4,086 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

Sjikt	d [mm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Utv. overgsmotst.			0.04
Puss	10	1	0.01
Legering			4.086
Puss	10	1	0.01
Innv. overgsmotst.			0.13
$R''_T =$			4.276

$$R_T = 4.277$$

$$U = \underline{\underline{0.234}}$$

## Vedlegg 6 – Stussfuger

### Scan Isoblokk 35

*Mye stussfuger (som veggfeltet målt i varemstrømsapparat)*

Stussfuge	Antall	Endring i U-verdi	
0	3	0.00 %	0.00 %
1	6	0.00 %	0.00 %
2	13	0.00 %	0.00 %
3	11	0.00 %	0.00 %
4	8	10.00 %	80.00 %
5	2	13.50 %	27.00 %
6	5	20.14 %	100.70 %
7	1	29.80 %	29.80 %
	49		237.50 %

**4.85 %**

*Få stussfuger*

Stussfuge	Antall	Endring i U-verdi	
0	18	0.00 %	0.00 %
1	11	0.00 %	0.00 %
2	5	0.00 %	0.00 %
3	7	0.00 %	0.00 %
4	1	10.00 %	10.00 %
5	1	13.50 %	13.50 %
6	1	20.14 %	20.14 %
7	0	29.80 %	0.00 %
	44		43.64 %

**0.99 %**

## Leca Isoblokk 35

### *Mye stussfuger*

Stussfuge	Antall	Endring i U-verdi	
0	3	0.00 %	0.00 %
1	6	0.00 %	0.00 %
2	13	0.00 %	0.00 %
3	11	0.00 %	0.00 %
4	8	10.00 %	80.00 %
5	2	29.34 %	58.67 %
6	5	55.02 %	275.08 %
7	1	84.71 %	84.71 %
	49		498.47 %

**10.17 %**

### *Få stussfuger*

Stussfuge	Antall	Endring i U-verdi	
0	18	0.00 %	0.00 %
1	11	0.00 %	0.00 %
2	5	0.00 %	0.00 %
3	7	0.00 %	0.00 %
4	1	10.00 %	10.00 %
5	1	29.34 %	29.34 %
6	1	55.02 %	55.02 %
7	0	84.71 %	0.00 %
	44		94.35 %

**2.14 %**



## Leca Isoblokk 35 – kun mellom isolasjon

### *Mye stussfuger*

Stussfuge	Antall	Endring i U-verdi	
0	3	0.00 %	0.00 %
1	6	0.00 %	0.00 %
2	13	0.00 %	0.00 %
3	11	0.00 %	0.00 %
4	8	2.42 %	19.39 %
5	2	6.58 %	13.16 %
6	5	11.31 %	56.57 %
7	1	15.71 %	15.71 %
	49		104.83 %

**2.14 %**

### *Få stussfuger*

Stussfuge	Antall	Endring i U-verdi	
0	18	0.00 %	0.00 %
1	11	0.00 %	0.00 %
2	5	0.00 %	0.00 %
3	7	0.00 %	0.00 %
4	1	2.42 %	2.42 %
5	1	6.58 %	6.58 %
6	1	11.31 %	11.31 %
7	0	15.71 %	0.00 %
	44		20.32 %

**0.46 %**