

## **Eksperimentell analyse av isolasjon i massivtrekonstruksjoner**

U-verditester for trefiber, glassull og steinull i ulike veggkonstruksjon ved hjelp av hotbox.

Åsmund Eik, Vemund Evensen og Tomas Lacis Pedersen.

### **VEILEDER**

Henrik Kofoed Nielsen

**Universitetet i Agder, 2025**

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for ingeniørvitenskap

[Document title]

(Denne siden holdes blank)

## Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1. Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen. ☒
2. Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen:
  - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. ☒
  - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt.
  - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt.
  - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten.
  - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse.
3. Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31. ☒
4. Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert. ☒
5. Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk. ☒
6. Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider. ☒

## Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Oppgaver som er unntatt offentlighet eller tausehetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

☐ JA    ☒ NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?

☐ JA    ☒ NEI

(Båndleggingsavtale må fylles ut)

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

☐ JA    ☐ NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

☐ JA    ☒ NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

## Forord

Denne bacheloroppgaven er utarbeidet ved Institutt for Ingeniørvitenskap som en del av bachelorprogrammet i Byggdesign ved Universitetet i Agder. Oppgaven markerer avslutningen på studiet og er gjennomført i det sjette og siste semesteret som en del av emnet BYG300 – Bacheloroppgave.

Arbeidet har tatt utgangspunkt i eksperimentell testing av varmeisolasjon i ulike massivtreveggkonstruksjoner ved bruk av en hotBox. Målet med oppgaven har vært å undersøke hvordan forskjellige isolasjonsmaterialer og veggoppbygginger påvirker varmetransporten, og å identifisere utfordringer og feilkilder knyttet til praktisk gjennomføring og målemetodikk.

Oppgaven er utarbeidet i samarbeid med bransjenettverket for trekonstruksjoner (BN3), etter invitasjon fra nettverket og deres tilknyttede aktører Massivtre, Woodcon og Splitcon. Dette samarbeidet har gitt oss muligheten til å jobbe med en aktuell og praksis nær problemstilling innen trebyggeri, og har gitt verdifull innsikt i bransjens behov og utfordringer.

Vi vil benytte anledningen til å takke alle som har bidratt med faglig støtte og praktisk hjelp gjennom oppgavens gang. En spesiell takk rettes til vår veileder, professor Henrik Kofoed Nielsen, for verdifull veiledning, innspill til rapportskriving og faglige beregninger.

Videre ønsker vi å takke Anette Heimdal, studieprogramleder og emneansvarlig, og Ingrid Lande for administrativ og faglig støtte gjennom studieløpet. Takk også til Jan Andreas Holm for teknisk bistand og drift av hotboxen, samt til Odin Kvam for veiledning i bruk av testutstyret. Vi vil også rette en takk til Steve Schading, overingeniør i elektroteknikk, for hjelp med montering og tilkobling av varmeelementet. Takk til Ragnhild Eik for korrekturlesning. Takk rettes også til Marcus Egil Nerland fra Rockwool for innsikt og bistand i forbindelse med RockWool sine produkter. Vi ønsker også å takke Tor Øystein Osa Michalsen for eksterne veiledning og til slutt Massivtre, Woodcon og Splitkon for problemstilling.

Til slutt ønsker vi å takke alle som på ulike måter har bidratt til at arbeidet lot seg gjennomføre innenfor de gitte rammer og tidsfrister.

## Summary

### English

This bachelor's thesis investigates the thermal insulation properties of various wall constructions, with cross-laminated timber (CLT) as the load-bearing element, through experimental testing using a hotbox. The aim has been to determine how exterior walls with CLT can be optimized in terms of both insulation type and stud design, in order to reduce total wall thickness while still meeting the U-value requirements in Tek 17.

Three different insulation materials have been tested: Glava Proff 34 (glass wool), Hunton Nativo (wood fiber insulation), and Rockwool REDAir Flex (stone wool). These were chosen to represent the most relevant alternatives in Norway. Furthermore, the study examined how the choice of stud design, such as I-studs, double layer, and solutions with continuous insulation, can help reduce thermal bridging and improve insulation performance. In addition, measured U-values from the hotbox tests were compared with theoretical values calculated according to current standards, in order to assess any discrepancies.

The tests were carried out using a guarded hotbox method combined with comparative plate method, as well as with a U-value meter and heat flux sensor. This provided a solid basis for analyzing and comparing different material combinations and construction principles under controlled conditions.

The results show that there is significant variation between calculated and measured values. There is also considerable variation between the different measurement methods, indicating that at least two of them give incorrect values. The guarded hotbox and comparative plate method give higher U-values than calculated, while the U-value meter gives lower values.

The conclusion emphasizes that the tested insulation solutions show little variation in U-value between them. This suggests that factors other than insulation performance should also be considered when choosing insulation material. The chosen measurement methods have many sources of error and therefore a high degree of uncertainty.

If the results from the guarded hotbox and comparative plate method are correct, the wall thickness must be increased. If the results from the U-value meter are correct, the wall thickness can be reduced.

## Norsk

Denne bacheloroppgaven undersøker varmeisolasjonsegenskapene til ulike veggkonstruksjoner, med massivtre som bærende element, gjennom eksperimentell testing ved bruk av en hotbox. Målet har vært å finne ut hvordan yttervegger med massivtre kan optimaliseres med tanke på både isolasjonstype og stenderutforming, for å redusere total veggtykkelse samtidig som kravene til U-verdi i byggt teknisk forskrift overholdes.

Det er testet tre forskjellige isolasjonsmaterialer: Glava Proff 34 (glassull), Hunton Nativo (trefiberisolasjon) og Rockwool REDAir Flex (steinull). Disse er valgt for å representere de mest relevante alternativene i Norge. Videre er det undersøkt hvordan valg av stenderutforming, som I-stendere, dobbelt sjikt og løsninger med kontinuerlig isolasjon, kan bidra til reduksjon av kuldebroer og forbedret isolasjonsevne. I tillegg sammenlignes målte U-verdier fra hotbox-testene med teoretiske verdier beregnet etter gjeldende standarder, for å vurdere eventuelle avvik.

Testene ble gjennomført ved hjelp av en beskyttet hotbox-metode kombinert med hjelpeplate-metoden, samt bruk av U-verdimåler og varmestromsensor (heat flux sensor). Dette ga et godt grunnlag for å analysere og sammenligne ulike materialkombinasjoner og konstruksjonsprinsipper under kontrollerte forhold.

Resultatene viser at det er stor variasjon mellom beregnede og målte verdier. Det er også stor variasjon mellom de forskjellige målemetodene, noe som tilsier at minst to av de gir feil verdier. Beskyttet hotbox og hjelpeplate metode gir høyere U-verdi enn beregnet og U-verdi måler gir lavere.

Konklusjonen understreker at de testede isolasjonsløsningene har liten variasjon av U-verdi mellom hverandre. Dette tilsier at andre faktorer enn isolasjonsevne også burde vurderes, for valg av isolasjonsmateriale. Valgte målemetoder har mange feilkilder og derfor høy usikkerhetsfaktor. Om resultatene fra Beskyttet hotbox og hjelpeplate metode er korrekt må veggtykkelsen økes. Om resultatene fra U-verdi måleren er kan veggtykkelsen reduseres.

## Innholdsfortegnelse

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....                                                                     | i   |
| Publiseringsavtale.....                                                                                             | ii  |
| Forord .....                                                                                                        | iii |
| Summary .....                                                                                                       | iv  |
| Innholdsfortegnelse .....                                                                                           | vi  |
| Figurliste .....                                                                                                    | x   |
| Tabelliste .....                                                                                                    | xii |
| 1. Innledning .....                                                                                                 | 1   |
| 2. Kunnskapsbakgrunn .....                                                                                          | 2   |
| 2.1. Isolasjon .....                                                                                                | 2   |
| 2.1.1. Mineralull (Steinull og glassull).....                                                                       | 2   |
| 2.1.2. Trefiber .....                                                                                               | 3   |
| 2.1.3. Vakuumisolasjon.....                                                                                         | 3   |
| 2.1.4. Alternative isolasjonstyper .....                                                                            | 4   |
| 2.2. Massivtre.....                                                                                                 | 4   |
| 2.3. Veggkonstruksjoner .....                                                                                       | 4   |
| 2.4. Varmeoverføring.....                                                                                           | 6   |
| 2.4.1. Varmeledning .....                                                                                           | 6   |
| 2.4.2. Stråling.....                                                                                                | 6   |
| 2.4.3. Konveksjon.....                                                                                              | 7   |
| 2.4.4. Kuldebro .....                                                                                               | 7   |
| 2.5. Utregning av U-verdi.....                                                                                      | 8   |
| 2.5.1. Justering av $R_{si}$ og $R_{se}$ .....                                                                      | 12  |
| 2.5.2. Justering av U-verdi fra lineær kuldebro .....                                                               | 13  |
| 2.5.3. Beregninger av varmeflyt .....                                                                               | 13  |
| 2.6. Forskrifter og standarder .....                                                                                | 14  |
| 2.6.1. Byggteknisk forskrift TEK17 .....                                                                            | 14  |
| 2.6.2. NS 3031:2014 Beregning av bygningers energiytelse – Metode og data.....                                      | 15  |
| 2.6.3. Kuldebroer i bygningskonstruksjon - Varmestrømmer og overflatetemperaturer -<br>Detaljerte beregninger ..... | 15  |

|        |                                                                                                                                |                                         |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 2.6.4. | NS-EN ISO 6964:2017 Bygningkomponenter og -elementer - Varmemotstand og Varmegjennomgangskoeffisient - Beregningsmetoder. .... | 15                                      |
| 2.7.   | Testutstyr .....                                                                                                               | 15                                      |
| 2.7.1. | Klimakammer: Hotbox.....                                                                                                       | 15                                      |
| 2.7.2. | Type K termoelement.....                                                                                                       | 16                                      |
| 2.7.3. | Lufthastighetssensor .....                                                                                                     | 16                                      |
| 2.7.4. | Kapasitiv fuktighetsmåler .....                                                                                                | 16                                      |
| 2.7.5. | Varmeflukssensor .....                                                                                                         | 17                                      |
| 2.7.6. | Varmekamera .....                                                                                                              | 17                                      |
| 2.8.   | U-verdi-målere.....                                                                                                            | 17                                      |
| 2.8.1. | Hjelpeplatemetoden.....                                                                                                        | 17                                      |
| 2.8.2. | Testo: 635 U-verdisett .....                                                                                                   | 18                                      |
| 2.8.3. | Håndtering av R .....                                                                                                          | <b>Feil! Bokmerke er ikke definert.</b> |
| 3.     | Forskerspørsmål.....                                                                                                           | 19                                      |
| 4.     | Metode.....                                                                                                                    | 20                                      |
| 4.1.   | Materiale og utstyrliste .....                                                                                                 | 20                                      |
| 4.2.   | Hotbox.....                                                                                                                    | 22                                      |
| 4.3.   | Testobjekter.....                                                                                                              | 25                                      |
| 4.3.1. | Test med XPS .....                                                                                                             | 25                                      |
| 4.3.2. | Konstruksjon av testkasse .....                                                                                                | 26                                      |
| 4.3.3. | Test med massivtre.....                                                                                                        | 27                                      |
| 4.4.   | Montering av veggkonstruksjon .....                                                                                            | 28                                      |
| 4.4.1. | RedAir Flex.....                                                                                                               | 28                                      |
| 4.4.2. | Trefiber dobbeltsjiktsløsning.....                                                                                             | 29                                      |
| 4.4.3. | Glava Proff med I-stendere .....                                                                                               | 32                                      |
| 4.5.   | Forsøksoppsett.....                                                                                                            | 34                                      |
| 4.5.1. | Instrumentering.....                                                                                                           | 34                                      |
| 4.6.   | Avriming .....                                                                                                                 | 38                                      |
| 4.7.   | Beskyttet hotbox (Guarded hotbox) .....                                                                                        | 38                                      |
| 4.7.1. | Varmetilførsel .....                                                                                                           | 39                                      |
| 4.7.2. | Teoretisk beregning .....                                                                                                      | 41                                      |
| 4.7.3. | Justering av varmetilførsel .....                                                                                              | 41                                      |
| 4.8.   | Hjelpeplatemetoden .....                                                                                                       | 41                                      |
| 4.8.1. | Gjennomføring av målinger.....                                                                                                 | 42                                      |

|        |                                                                           |    |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.8.2. | Beregninger av U-verdi, hjelpeplate metode .....                          | 42 |
| 4.8.3. | Beregninger av U-verdi, beskyttet hotbox metode .....                     | 42 |
| 4.9.   | Iterativ beregning av varmekonduktivitet og total veggtykkelse .....      | 43 |
| 4.10.  | U-verdimåler .....                                                        | 43 |
| 4.11.  | Flux .....                                                                | 43 |
| 4.12.  | Lufthastighet .....                                                       | 44 |
| 4.13.  | Fuktighet .....                                                           | 45 |
| 4.14.  | Målemetodikk .....                                                        | 45 |
| 4.15.  | Litteraturstudium som metode .....                                        | 47 |
| 4.16.  | Digitale hjelpemidler .....                                               | 47 |
| 5.     | Resultat og diskusjon .....                                               | 48 |
| 5.1.   | Fuktinnhold .....                                                         | 48 |
| 5.1.1. | Før testperiode .....                                                     | 48 |
| 5.1.2. | Etter testperiode .....                                                   | 49 |
| 5.2.   | Lufthastighet .....                                                       | 50 |
| 5.3.   | Teoretiske beregninger .....                                              | 50 |
| 5.3.1. | Justering av $R_{si}$ og $R_{se}$ .....                                   | 50 |
| 5.3.2. | Rockwool .....                                                            | 53 |
| 5.3.3. | Trefiber .....                                                            | 55 |
| 5.3.4. | Glava .....                                                               | 59 |
| 5.3.5. | Vakuum panel .....                                                        | 64 |
| 5.4.   | Korreksjoner .....                                                        | 66 |
| 5.4.1. | Korreksjon for varmeflyt gjennom veggene til beskyttet kammer. ....       | 66 |
| 5.4.2. | Korreksjon for lineær kuldebro .....                                      | 68 |
| 5.4.3. | Beregning av U-verdi med Beskyttet hotbox metode .....                    | 69 |
| 5.4.4. | Resultater fra hjelpeplatemetoden .....                                   | 70 |
| 5.5.   | Resultat fra alle testveggene .....                                       | 71 |
| 5.6.   | Resultater fra test av vegg med Rockwool .....                            | 74 |
| 5.7.   | Resultater fra test av vegg med trefiberisolasjon og dobbeltstender. .... | 75 |
| 5.8.   | Resultater fra vegg med Glava og I-stender .....                          | 76 |
| 5.9.   | Rockwool Iterative kalkulasjon veggtykkelse .....                         | 78 |
| 5.10.  | Trefiber Iterative kalkulasjon veggtykkelse .....                         | 79 |
| 5.11.  | Glava Iterative kalkulasjon veggtykkelse .....                            | 80 |
| 5.12.  | Diskusjon .....                                                           | 81 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 5.13. Feilkilder.....  | 83 |
| 6. Konklusjon.....     | 85 |
| 6.1. Anbefalinger..... | 86 |
| Referanser .....       | 87 |
| 7. Referanser .....    | 87 |
| Vedlegg.....           | 90 |

## Figurliste

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 2.1: Vanlig stenderverk [12].....                            | 5  |
| Fig. 2.2: Dobbelt stenderverk [14].....                           | 6  |
| Fig. 2.3: Hjelpeplate [13] .....                                  | 18 |
| Fig. 4.1: Plantegning hotbox.....                                 | 23 |
| Fig. 4.2: Snittegning beskyttet kammer .....                      | 23 |
| Fig. 4.3: Kjøleanlegg utenfor boksen .....                        | 24 |
| Fig. 4.4: Beskyttet kammer.....                                   | 24 |
| Fig. 4.5: Fordamper .....                                         | 25 |
| Fig. 4.6: Plassering av termoelement .....                        | 25 |
| Fig. 4.7: grunnkasse .....                                        | 26 |
| Fig. 4.8: Skrueplassering.....                                    | 26 |
| Fig. 4.9: Grunnkasse plassert i hotbox .....                      | 27 |
| Fig. 4.10: RockWool .....                                         | 28 |
| Fig. 4.11: Snitt.....                                             | 29 |
| Fig. 4.12: Innerste lag med trefiberisolasjon.....                | 30 |
| Fig. 4.13: Andre lag trefiberisolasjon og stendere .....          | 30 |
| Fig. 4.14: Asfalt med teip over skjøter .....                     | 31 |
| Fig. 4.15: Trefiberløsning sett ovenfra .....                     | 31 |
| Fig. 4.16: Snitt.....                                             | 31 |
| Fig. 4.17: I-stender.....                                         | 32 |
| Fig. 4.18: Snitt av I-stender.....                                | 32 |
| Fig. 4.19: Glava med i-stendere.....                              | 33 |
| Fig. 4.20: Asfaltplater teipet i skjøtene .....                   | 33 |
| Fig. 4.21: Snitt.....                                             | 34 |
| Fig. 4.22: Sensorer på varm side .....                            | 35 |
| Fig. 4.23: Lufttemperatursensor.....                              | 35 |
| Fig. 4.24: Lufthastighetssensor.....                              | 36 |
| Fig. 4.25: Plantegning av sensorplasseringer .....                | 36 |
| Fig. 4.26: Snittegning av sensorplasseringer .....                | 37 |
| Fig. 4.27: Avriming ved bruk av vifteovn .....                    | 38 |
| Fig. 4.28: Strømforsyning og tilhørende utstyr .....              | 39 |
| Fig. 4.29: 45 W varmeelement .....                                | 40 |
| Fig. 4.30: Aluminiumsfolie foran varmeelement.....                | 40 |
| Fig. 4.31: Plassering av MDF-plate .....                          | 41 |
| Fig. 4.32: U-verdimåler og temperatursensor med radiosender ..... | 43 |
| Fig. 4.33: Varmestrømsensor montert med termisk pasta .....       | 44 |
| Fig. 4.34: Varmetrådanemometer.....                               | 44 |
| Fig. 4.35: Fuktmåler.....                                         | 45 |
| Fig. 4.36: Dataloggere og tilkoblingspunkter .....                | 46 |
| Fig. 4.37: Lapper for å ha kontroll på avlesninger .....          | 47 |
| Fig. 5.1: Lufthastighet, kald side.....                           | 50 |
| Fig. 5.2: Snitt, konstruksjon med Rockwool .....                  | 53 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 5.3: Snitt, konstruksjon med trefiber.....                                           | 55 |
| Fig. 5.4: Snitt, konstruksjon med Glava.....                                              | 59 |
| Fig. 5.5: U-verdi fra U-verdimåler.....                                                   | 71 |
| Fig. 5.6: U-verdi fra Guarded hotbox.....                                                 | 72 |
| Fig. 5.7 U-verdi fra Hjelpeplatemetoden, kombinert.....                                   | 73 |
| Fig. 5.8: Resultater fra U-verdimåler, Rockwool .....                                     | 74 |
| Fig. 5.9: Resultater fra beskyttet hot-box og Hjelpeplatemetoden, Rockwool.....           | 74 |
| Fig. 5.10: Resultater fra U-verdimåler, Trefiber .....                                    | 75 |
| Fig. 5.11: Resultater fra Beskyttet hot-box og Hjelpeplatemetoden, Trefiber .....         | 75 |
| Fig. 5.12 Resultater fra U-verdimåler, Glava .....                                        | 76 |
| Fig. 5.13: Resultater fra Beskyttet hot-box og Hjelpeplatemetoden, Glava .....            | 76 |
| Fig. 5.14 Iterative beregning av $\lambda$ til Rockwool .....                             | 78 |
| Fig. 5.15 Iterative beregning av veggtykkelser med iterative $\lambda$ med Rockwool.....  | 78 |
| Fig. 5.16 Iterative beregning av $\lambda$ til trefiber.....                              | 79 |
| Fig. 5.17 Iterative beregning av veggtykkelser med iterative $\lambda$ med trefiber ..... | 79 |
| Fig. 5.18 Iterative beregning av $\lambda$ til Glava .....                                | 80 |
| Fig. 5.19 Iterative beregning av veggtykkelser med iterative $\lambda$ med Glava .....    | 80 |

## Tabelliste

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabell 2.1: Egenskapene til Mineralull [2] [3].....                                              | 2  |
| Tabell 2.2: Egenskapene til trefiber [2] [3].....                                                | 3  |
| Tabell 2.3: Egenskapene til vakuumisolasjon [2] [3] .....                                        | 3  |
| Tabell 2.4: Betegnelser .....                                                                    | 8  |
| Tabell 2.5: Betegnelser til lineær kuldebro .....                                                | 13 |
| Tabell 2.6: betegnelser .....                                                                    | 13 |
| Tabell 4.1: Testkasse (basisramme) – (1200x1200x280) mm .....                                    | 20 |
| Tabell 4.2: Varme (isolasjon og materialer) .....                                                | 20 |
| Tabell 4.3: Vegg 1 – Rockwool (RedAir).....                                                      | 20 |
| Tabell 4.4: Vegg 2 – Trefiber.....                                                               | 21 |
| Tabell 4.5: Vegg 3 – Glava .....                                                                 | 21 |
| Tabell 4.6: Verktøy til bygging og montering .....                                               | 21 |
| Tabell 4.7: Måleinstrumenter.....                                                                | 22 |
| Tabell 4.8: Programvare .....                                                                    | 22 |
| Tabell 4.9: Forklaring av sensorer .....                                                         | 37 |
| Tabell 5.1: Fuktinnhold.....                                                                     | 48 |
| Tabell 5.2: Fuktinnhold.....                                                                     | 48 |
| Tabell 5.3: Fuktinnhold.....                                                                     | 49 |
| Tabell 5.4: Fuktinnhold.....                                                                     | 49 |
| Tabell 5.5: Verdier brukt i justering av $R_{si}$ og $R_{se}$ .....                              | 50 |
| Tabell 5.6: Luft og overflate -temperatur.....                                                   | 51 |
| Tabell 5.7: Resultat for beregning av $R_{si}$ og $R_{se}$ .....                                 | 52 |
| Tabell 5.8: Verdier, konstruksjon med Rockwool.....                                              | 53 |
| Tabell 5.9: Verdier, konstruksjon med trefiber .....                                             | 55 |
| Tabell 5.10: Verdier, konstruksjon med Glava .....                                               | 59 |
| Tabell 5.11 Verdier, teoretisk konstruksjon med Vakuumisolasjonspanel .....                      | 64 |
| Tabell 5.12 Korreksjon for varmemflyt.....                                                       | 66 |
| Tabell 5.13 Gjennomsnitt, maksimum og minimum U-verdi (58-64 timer), U-verdi måler.....          | 72 |
| Tabell 5.14 Gjennomsnitt U-verdi (etter 64 timer), Guarded hotbox metode .....                   | 73 |
| Tabell 5.15: Gjennomsnitt U-verdi (etter 64 timer), Hjelpeplatemetode.....                       | 73 |
| Tabell 5.16 Resultat av iterativ kalkulasjon for veggtykkelse med kontinuerlig Rockwool .....    | 78 |
| Tabell 5.17 Resultat av iterativ kalkulasjon for veggtykkelse med trefiber og dobbeltsjikt. .... | 79 |
| Tabell 5.18 Resultat av iterativ kalkulasjon for veggtykkelse med trefiber og dobbeltsjikt. .... | 81 |



## 1. Innledning

Energieffektivitet, arealutnyttelse og miljøpåvirkning får stadig større oppmerksomhet. Dette har ført til en utvikling av veggkonstruksjoner, hvor balansen mellom god varmeisolasjon og minimale konstruksjonsdimensjoner er viktig. Samtidig som kravene til energieffektivitet blir strengere, stilles det også krav til bygningens totale areal og ressursbruk.

Krysslaminert tre (KLT) eller bare massivtre har fått økt oppmerksomhet som et bærekraftig og klimavennlig byggemateriale. Som bærende element gir det både strukturell styrke og bidrar til å redusere bygningers klimagassutslipp. Samtidig har massivtre en utfordring når det gjelder varmeisolasjon, da det alene ikke tilfredsstiller dagens U-verdi krav. For å kompensere for dette benyttes derfor ulike former for isolasjon.

Det er derfor relevant å undersøke hvordan massivtre kan kombineres med ulike isolasjonsløsninger og utforminger for å oppnå ønsket varmeisolering og samtidig god arealutnyttelse. Er det mulig å utvikle veggkonstruksjoner som er tynne, godt isolerte og som oppfyller kravene i byggteknisk forskrift TEK17?

For å undersøke dette nærmere, er det nødvendig å analysere hvordan ulike materialvalg og konstruksjoner påvirker varmetransporten. Det er også viktig å vurdere hvordan de eksperimentelle resultatene samsvarer med teoretiske beregninger. Ved bruk av målinger fra hot-boxen åpnes det for å evaluere ulike veggkonstruksjoner, med mål om å identifisere løsninger som gir en god balanse mellom tykkelse og isolasjonsevne.

## 2. Kunnskapsbakgrunn

### 2.1. Isolasjon

Isolasjon brukes i bygninger for å redusere varmetap, forbedre energieffektiviteten og øke komforten. Den fungerer ved å begrense varmetransport gjennom vegger, tak og gulv, noe som bidrar til å holde varmen inne om vinteren og ute om sommeren. Isolasjonsmaterialer varierer fra eksempelvis steinull, glassull og trefiber til mer avanserte løsninger som vakuumpaneler og aerogel [1]. Valg av isolasjon avhenger av faktorer som varmeledningsevne, densitet, brannmotstand, fuktbestandighet og miljøpåvirkning. Riktig isolasjon kan redusere energikostnader og bidra til mer bærekraftige bygg. For hver isolasjonstype vi skal teste, beskrives produktet og hvordan det fremstilles. I tillegg angis typiske verdier for de ulike bygningsfysiske egenskapene.

#### 2.1.1. Mineralull (Steinull og glassull)

Mineralull er et isolasjonsmateriale fremstilt ved å omdanne stein eller glass til fibre ved 1400-1600 °C [1] [2]. Deretter benyttes bindingsmidler som stivelse, oljer eller harpikser til å forme matter eller plater. I tillegg kan mineralullen brukes i løs form som blåseisolasjon. Stein- og glassull blir produsert ved samme prinsipp, men steinull blir som navnet tilsier produsert av steintyper som dolomitt, basalt og diabas. Glassull lages i hovedsak av resirkulert glass og sand. Mineralull, i form av både glassull og steinull blir etter bruk enten resirkulert eller deponert. Normale verdier for mineralulls egenskaper vises i Tabell .

Tabell 2.1: Egenskapene til Mineralull [2] [3]

| Egenskap                                     | Normale verdier |
|----------------------------------------------|-----------------|
| Varmeledningsevne ( $\lambda$ -verdi) (W/mK) | 0,030 – 0,040   |
| Densitet (kg/ m <sup>3</sup> )               | 30 - 200        |
| Spesifikk varmekapasitet (kJ/kgK)            | 0,8 – 1,0       |
| Vanndampdiffusjonsmotstandsfaktor ( $\mu$ )  | 1               |
| Brannklasse                                  | A1 – A2         |

Det finnes som nevnt flere varianter av steinull, eksempelvis kompakte plater, ruller og blåseisolasjon. En variant er REDAir Flex-systemet fra Rockwool. Dette systemet består av kompakte steinullplater som festes til for eksempel en massivtrevegg ved bruk av gjennomgående skruer og lekter. Poenget med disse platene er å ha et selv bærende lag med isolasjon på utsiden av en strukturelt bærende vegg. Dette skal gi en fleksibel og effektiv oppføring av både isolasjon og fasade i tillegg til at varmetap gjennom stendere unngås. Rockwool hevder også at vindsperre ikke er nødvendig ved bruk av RedAir isolasjon [4].

### 2.1.2. Trefiber

Trefiberisolasjon er et naturlig og bærekraftig isolasjonsmateriale laget av trefiber fra fornybare kilder. Materialet lages ofte av treverk som ikke holder høy nok kvalitet til å brukes strukturelt eller av biprodukter fra sagbruk [3]. Det finnes to ulike produksjonsmetoder [3] [5]. Begge metodene omfatter damping og mekanisk behandling for å bryte tre ned til mindre fibre. Videre tørkes fibre og tilsettes bindingsmiddel for så å forme elementer. Dette er den vanligste produksjonsmetoden da elementene blir lettere og kan være tykkere enn om elementene produseres uten å tørke fibre. Ved den andre metoden formes elementene mens trefiberene fremdeles er fuktige. Dette utnytter treets naturlige egenskaper og eliminerer behovet for eksterne bindemidler, noe som gagner miljøet [5]. Normale verdier for trefibers egenskaper vises i Tabell .

Tabell 2.2: Egenskapene til trefiber [2] [3]

| Egenskap                                    | Normale verdier |
|---------------------------------------------|-----------------|
| Varmedningsevne ( $\lambda$ -verdi)         | 0,038 – 0,046   |
| Densitet (kg/ m <sup>3</sup> )              | 150 – 300       |
| Spesifikk varmekapasitet (kJ/kgK)           | 1,9 – 2,1       |
| Vanndampdiffusjonsmotstandsfaktor ( $\mu$ ) | 1-5             |
| Brannklasse                                 | E               |

En egenskap som skiller trefiberisolasjon fra for eksempel mineralull, er evnen til å lagre og avgi fukt til og fra luften rundt [3]. Den kan også ta opp mindre mengder fukt i form av væske og avgi den ved fordamping om konstruksjonsmetoden tillater det. Det finnes i likhet med mineralull flere varianter, eksempelvis isolasjonsplater i ulike hardheter og blåseisolasjon.

### 2.1.3. Vakuumisolasjon

Vakuumisolasjonspaneler (VIP) er et høyteknologisk isolasjonsmateriale som har en porøs kjerne innkapslet i et luftforseglet ytterskall [1] [3]. Kjernen kan bestå av microsilika, aerogel eller glassfiber, men andre materialer kan også benyttes. Som ytterskall brukes folier i flere lag av blant annet aluminium, plastikk eller rustfritt stål. Vakuumisolasjonspaneler kan ha lang levetid, men er utsatt for punktering. Ved lekkasje vil store deler av effekten avta. Normale verdier for egenskapene til vakuumisolasjonspanel vises i Tabell .

Tabell 2.3: Egenskapene til vakuumisolasjon [2] [3]

| Egenskap                                    | Normale verdier |
|---------------------------------------------|-----------------|
| Varmedningsevne ( $\lambda$ -verdi)         | 0,004 – 0,010   |
| Densitet (kg/ m <sup>3</sup> )              | 160 – 230       |
| Spesifikk varmekapasitet (kJ/kgK)           | 0,8             |
| Vanndampdiffusjonsmotstandsfaktor ( $\mu$ ) | «lufttett»      |
| Brannklasse                                 | E               |

#### 2.1.4. Alternative isolasjonstyper

De tre isolasjonsmaterialene som ble valgt, representerer de mest relevante alternativene i Norge. Andre organiske materialer, som ålegress, hamp og lin kan ha lignende egenskaper, men benyttes sjeldent i praksis.

### 2.2. Massivtre

Massivtre har fått økt oppmerksomhet i byggebransjen de siste tiårene som et bærekraftig alternativ til tradisjonelle byggematerialer som betong og stål [6] [7] [8]. Bruken av massivtre reduserer klimagassutslipp, har kortere byggetid og bidrar til et godt inneklima [9] [10]. Denne delen av oppgaven vil belyse massivtreets egenskaper, fordeler og utfordringer med utgangspunkt i relevant forskning og litteratur.

Massivtre er et konstruksjonsmateriale bestående av trelameller (planker) som er limt, plugget eller skrudd sammen i kryssende retninger for å øke styrken og stabiliteten [10]. Disse konstruksjonsmaterialene omtales ofte som massivtreelementer, krysslaminert tre (KLT) eller på engelsk, Cross Laminated Timber (CLT).

Sammenlignet med betong og stål har treverk lavere klimagassutslipp og er et mer bærekraftig materiale [8]. Massivtre er et fornybart materiale som binder karbon gjennom hele sin livssyklus. Produksjonen av massivtre krever også mindre energi enn produksjonen av betong og stål, noe som gir lavere CO<sub>2</sub>-utslipp [8] [11]. I tillegg er det ofte snakk om utbredte trearter som gran og furu, som vi har store ressurser av i Norge. Tre er også et materiale med lav vekt i forhold til styrke [8] [9]. Dette gjør at det egner seg godt i konstruksjoner der lav vekt er en viktig faktor. Massivtreelementer er normalt prefabrikkerte, det vil si at de produseres på fabrikk og fraktes ferdige med riktige dimensjoner og utskjæringer til byggeplassen [10]. Dette medfører raskere oppføring og lavere kostnader på byggeplass.

Konstruksjonsteknikken og den gode strukturelle bæreevnen til massivtre gjør det mulig å bygge uten tradisjonelle stendere i veggene [6]. Dette gir rom for alternative isolasjonsmetoder som kan forbedre lufttetthet og redusere både varmetransport og kuldebroer.

### 2.3. Veggkonstruksjoner

Det finnes flere metoder for oppbygging av yttervegger i trekonstruksjoner. Valg av metode påvirker byggets isolasjonsevne, energieffektivitet og total varmemotstand. Under presenteres relevante konstruksjonsprinsipper med fokus på varmeisolasjon, basert på informasjon fra blant annet Byggforskserien og TEK17.

Vanlig konstruksjon av vegger i trehus i Norge beskrives på følgende måte i byggforsk [12]: Veggens består av bindingsverk med mellomliggende isolasjon. På innvendig side (innside av stendere) monteres dampsperre med innvendig påforing (lekter) på minimum 36 mm tykkelse og 48 mm bredde i vertikal eller horisontal retning. Mellom påforingenene kan man isolere med inntil  $\frac{1}{4}$  av veggens totale isolasjonstykkelse. Utenpå påforingene monteres eksempelvis trepanel eller gipsplater. På utvendig side settes stendere med senteravstand 600 mm, og isolasjon i sjiktene mellom. På utsiden av stendere monteres en vindsperre og utlektet horisontal eller vertikal kledning. I Fig. 2.1 kan man se et eksempel på et bindingsverk med vindsperre, stendere og isolasjon, dampsperre og vertikal påforing innvendig. Ytterligere og mer detaljert informasjon om standard konstruksjonsprinsipp finnes i Byggforskserien: Byggdetaljer 523.255.

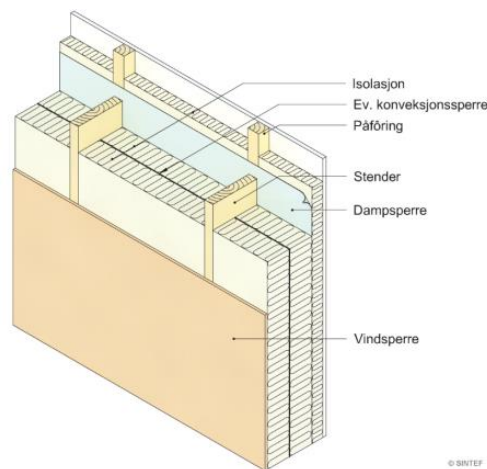


Fig. 2.1: Vanlig stenderverk [12]

Problemet med denne typen veggkonstruksjoner er at veggens består av avskilte sjikt med isolasjon og stender. Da vil kulde kunne spre seg direkte gjennom stenderne, da varmemotstanden der er mindre enn gjennom isolasjonen [13].

Et alternativ til vanlige stendere er I-stendere. De er konstruert slik at man i midterste delen av veggens vil kunne ha mer isolasjon enn om man hadde brukt vanlige stendere. I prinsippet er konstruksjonsmetoden lik. Men det vil være mindre rom for varmeoverføring i stendersjiktet da den midterste delen av stenderne er smalere. Det er også mulig å bruke dobbelsjikt (dobbelstender) bindingsverk der stenderne ikke er kontinuerlige gjennom isolasjonssjiktet, Fig. 2.2 viser et eksempel på dette. Et tredje alternativ er å bruke mer kompakt isolasjon som er strukturelt sterk nok til å bære en fasade. Da vil man kunne bygge uten stendere i isolasjonssjiktet.

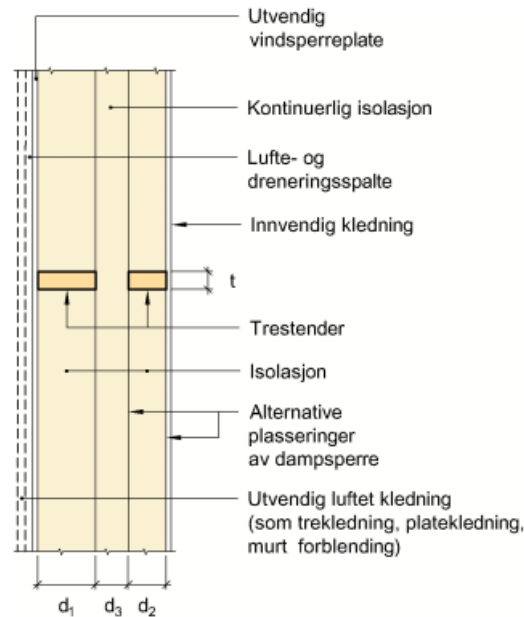


Fig. 2.2: Dobbelt stenderverk [14]

## 2.4. Varmeoverføring

Når det er en temperaturforskjell mellom to sider av en konstruksjon, vil varme alltid transporteres fra den varme til den kalde siden [15]. Denne varmetransporten skjer normalt på tre måter i vegger; varmeledning, stråling og konveksjon.

### 2.4.1. Varmeledning

Varmeledning skjer når varmeenergi beveger seg gjennom et materiale ved at molekyler og elektroner kolliderer og overfører energi [15]. Varmeledningsevnen til et materiale beskrives ved den termiske konduktiviteten,  $\lambda$  (lambda) og måles i W/mK. For treverk påvirkes varmeledningsevnen av ulike faktorer. En økning av temperatur fører til økt varmeledningsevne, grunnet mer intense molekylbevegelser. Fuktinnholdet i materialet har også en betydning. Høyere fuktighet øker varmeledningsevnen, da vann leder varme bedre enn tørr luft. I tillegg er treverk anisotropt og varmeledningsevnen er større langs fiberretningen enn på tvers av fibre. For konstruksjonstrevirke er  $\lambda$ -verdien normalt mellom 0,12 og 0,18 W/mK på tvers av fiberretningen, avhengig av treslag og densitet [16].

### 2.4.2. Stråling

Varmestråling skjer ved infrarød stråling fra en overflate til en annen [15]. Denne typen varmetransport blir dominant ved høye temperaturer og i hulrom med stillestående luft, grunnet begrenset varmeledning og konveksjon. I en trekonstruksjon vil stråling ha størst betydning i isolasjonsmateriale, hvor varme overføres gjennom hulrom av stillestående luft. En overflates evne til å avgi varmemstråling påvirkes av emisjonsevnen, da lyse og reflekterende overflater har lavere utstråling enn mørke og matte.

### 2.4.3. Konveksjon

Konveksjon er en form for varmeoverføring som skjer gjennom bevegelse av luft eller væske, og kan være naturlig eller tvunget [3] [13]. Naturlig konveksjon oppstår når temperaturforskjeller fører til at varm luft stiger og kald luft synker, som skaper en sirkulasjon. Tvunget konveksjon skjer når en kraft, som vind eller vifter, driver luftstrømmen. Luftlekkasjer inn i den isolerte delen av en trekonstruksjon fører til varmetap gjennom tvungen konveksjon, mens luftrom i isolasjonssjiktet kan føre til varmetap ved naturlig konveksjon. Isolasjonsmaterialer fungerer best når luften står stille, slik at varmetap gjennom konveksjon minimeres.

### 2.4.4. Kuldebro

En kuldebro er en del av en bygningskonstruksjon som isolerer dårligere enn i resten av konstruksjonen, noe som medfører økt varmetap for disse delene [15]. Kuldebroer deles inn i to hovedtyper, geometrisk og konstruktive kuldebroer [17]. Geometriske kuldebroer oppstår i konstruksjonsdeler med vinkler eller brudd i bygningsgeometrien, som ved indre og ytre hjørner.

Konstruktive kuldebroer dannes der materialer med høy varmeledningsevne, som stål og betong bryter isolasjonssjiktet, for eksempel utkragede balkonger eller gjennomgående bolter [17]. Trebindingsverk er en kuldebro, fordi det har høyere varmeledningsevne enn isolasjonsmaterialer rundt, men beregnes normalt med egen metode.

## 2.5. Utregning av U-verdi

Dette kapittelet inneholder en gjennomgang av metoden for beregning av U-verdi i henhold til NS-EN ISO 6946:2017, samt forklaring av begrep [18]. Tabell viser forklaring av betegnelse brukte i forbindelse med utregning av U-verdi.

Tabell 2.4: Betegnelser

| Betegnelse    | Enhet             | Beskrivelse                                                 |
|---------------|-------------------|-------------------------------------------------------------|
| U             | $\frac{W}{m^2 K}$ | Varmegjennomgangskoeffisient                                |
| R             | $\frac{m^2 K}{W}$ | Varmemotstand                                               |
| $\lambda$     | $\frac{W}{m K}$   | Varmekonduktivitet                                          |
| $R_n$         | $\frac{m^2 K}{W}$ | Varmemotstanden til et sjikt                                |
| $R_{se}$      | $\frac{m^2 K}{W}$ | Varmemotstanden til den ytre overflaten til en bygningsdel  |
| $R_{si}$      | $\frac{m^2 K}{W}$ | Varmemotstanden til den indre overflaten til en bygningsdel |
| $R_{total}$   | $\frac{m^2 K}{W}$ | Total varmemotstand til en bygningsdel                      |
| e             | %                 | Feilmargin for total varmegjennomgangskoeffisient           |
| $R_c$         | $\frac{m^2 K}{W}$ | Termisk motstand                                            |
| f             | %                 | Arealandel av en bygningsdel                                |
| d             | m                 | Tykkelsen på et sjikt i en bygningsdel                      |
| $\chi$        | $\frac{W}{K}$     | Punktvis varmegjennomgangskoeffisient                       |
| $\Delta U_g$  | $\frac{W}{m^2 K}$ | Korreksjon av U-verdi for luftrom                           |
| $\Delta U_f$  | $\frac{W}{m^2 K}$ | Korreksjon av U-verdi for mekaniske festemidler             |
| $R_S$         | $\frac{m^2 K}{W}$ | Varmemotstanden til overflaten til en bygningsdel           |
| $h_c$         | $\frac{W}{m^2 K}$ | Konvektiv varmeovergangskoeffisient                         |
| $h_r$         | $\frac{W}{m^2 K}$ | Strålingskoeffisient                                        |
| $\varepsilon$ | -                 | Halvkuleformet emissivitet                                  |

**U-verdi** eller varmegjennomgangskoeffisient angir hvor mye varme som strømmer gjennom en bygningsdel per kvadratmeter ved gitt temperaturforskjell, i kelvin, mellom innsiden og utsiden [18].

**Varmemotstand**, også kalt R-verdi, er den inverse av U-verdien og uttrykker en bygningsdel evne til å motstå varmeoverføring, målt i  $\text{m}^2\text{K/W}$  [19].

**Varmekonduktivitet** er et mål på et materiales evne til å lede varme. Den kan finnes enten ved å utføre målinger og beregninger i henhold til ISO 10456, eller ved å bruke tabellverdier fra denne samme standarden [19].

U-verdien til en bygningsdel beregnes ved å først finne den totale varmemotstanden, deretter tas den inverse av denne, som vist i formel (2.1) her, som er formel (1) i kapittel 6.5.2 av NS 6947:2017 [18].

$$U = \frac{1}{R_{total}} \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \quad (2.1)$$

Alternativt kan formelen for total varmemotstand settes direkte inn i (2.1) for å få formel (2.2), som vist i formel 4.51 i boken Byggnadsfysik [13].

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}} \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \quad (2.2)$$

For å beregne varmemotstanden til et sjikt trengs tykkelsen på sjiktet og varmekonduktiviteten til materialet sjiktet består av, i henhold til formel (2.3), som er 6.7.1.1(3), fra standarden [1].

$$R = \frac{d}{\lambda} \left( \frac{m^2 K}{W} \right) \quad (2.3)$$

Varmemotstanden til ytre og indre overflate representerer motstanden mot varmeoverføring fra luften på innsiden og utsiden til det faste materialet [18]. For horisontal varmeflyt kan  $R_{se}$  0,04  $\text{m}^2\text{K/W}$  og  $R_{si}$  0,13  $\text{m}^2\text{K/W}$  benyttes.  $R_{si}$  er 0,10  $\text{m}^2\text{K/W}$  for varmeflyt oppover og 0,17  $\text{m}^2\text{K/W}$ , for varmeflyt nedover. I appendikset til standarden finnes alternative formler for å beregne disse verdiene. I en bygningsdel med et godt ventilert sjikt kan verdien til  $R_{se}$  også brukes for  $R_{si}$ . Varmemotstanden til et sjikt på utsiden av et ventilert sjikt skal ikke inkluderes i beregningen av total varmemotstand til en bygningsdel. Et godt ventilert sjikt defineres etter standarden som en spalte på over 1500mm<sup>2</sup> per meter åpning til fri luft. Et eksempel på dette er luftsijktet mellom kledning og vindspærre i en yttervegg. Her kan  $R_{se}$  økes, men varmemotstanden til kledningen skal ikke tas med.

Beregning av den totale varmemotstanden til en bygningsdel, der hele sjiktene består av det samme materialet, gjøres ved å summere varmemotstanden til sjiktene og overflatene, som vist i formel (2.4) som er formel 6.7.1.2(4) i standarden [18].

$$R_{total} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \left( \frac{m^2 K}{W} \right) \quad (2.4)$$

Alternativt kan formelen for  $R_{total}$  skrives som formel (2.5), som vist i formel 4.49 i [13].

$$R_{total} = R_{si} + \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se} \left( \frac{m^2 K}{W} \right) \quad (2.5)$$

Beregning av den totale varmemotstanden til en bygningsdel der ett eller flere sjikt består av ulike materialer, gjøres ved å beregne en øvre og en nedre grenseverdi, og deretter kalkuleres gjennomsnittet av disse [18]. En ordinær bindingsverksvegg er et eksempel på en slik bygningsdel, der det i deler av veggen er isolasjon, og i andre deler er stendere.

I beregningen av nedre grenseverdi antas det at alle sjiktene er parallelt med overflaten, og at alle komponentene har isoterme overflater [18]. Disse verdiene legges deretter sammen på samme måte som for total varmemotstand med homogene sjikt som i formel(2.4). Dette er vist i formel (2.6), som er formel 6.7.2.3(7) i standarden.

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}} \left( \frac{W}{m^2} \cdot K \right) \quad (2.6)$$

Alternativt til (2.6) kan formlene (2.7) og (2.8), som er formel 6.7.2.3(8) og (9), fra standarden [18]. Formelen gir samme resultat.

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_{ekv;j}} \quad (2.7)$$

$$\lambda_{ekv;j} = \lambda_{aj} \cdot f_a + \lambda_{bj} \cdot f_b + \dots + \lambda_{qj} \cdot f_q \quad (2.8)$$

Ved beregning av den øvre grenseverdi antas vinkelrett varmemflyt i en retning. Dette gjøres ved å bruke arealfraksjonen som hvert materialene opptar, samt deres individuelle varmemotstand. Dette er vist i formel(2.9), som er formel 6.7.2.3(6) i standarden.

$$\frac{1}{R_{tot;øvre}} = \frac{f_a}{R_{tot;a}} + \frac{f_b}{R_{tot;b}} + \dots + \frac{f_q}{R_{tot;q}} \left( \frac{W}{m^2} \cdot K \right) \quad (2.9)$$

Formel (2.10) er en omskriving av formel (2.9) for å få  $R_{tot;øvre}$  istedenfor invers av denne verdien.

$$R_{tot;øvre} = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{tot;a}} + \frac{f_b}{R_{tot;b}} + \dots + \frac{f_q}{R_{tot;q}}} \quad (2.10)$$

Formel(2.11) gir gjennomsnittet av de to grenseverdiene, som er formel 6.7.2.2(5) i standarden.

$$R_{tot} = \frac{R_{tot;øvre} + R_{tot;nedre}}{2} \quad (2.11)$$

Ved å bruke metoden med øvre og nedre grenseverdier blir den en feilmargen på resultatet. Denne beregnes ved å ta gjennomsnittet av de to grenseverdiene. Dette er formel (2.12), som er formel 6.7.2.4(10) i standarden.

$$e = \frac{R_{tot;øvre} - R_{tot;nedre}}{2 \cdot R_{tot}} \quad (2.12)$$

I appendiks F av standarden er det tre korreksjoner av U-verdi [18]. Det er korreksjon for luftrom, mekaniske festemidler og omvendte tak. Korreksjon for omvendte tak går vi ikke gjennom i denne rapporten, da den ikke er relevant for vegger. Korreksjon for luftrom er en korreksjon for ikke planlagte luftrom, som en konsekvens av størrelse og planhetstoleranser. Korreksjon for mekaniske festemidler er en korreksjon for kuldebroene som blir skapt av festemidler som går delvis eller helt gjennom isolerte lag av konstruksjonen.

I formel (2.13), korreksjon for luftrom, brukes tre verdier [18].  $\Delta U''$  er en tabellverdi som bestemmes ut fra om det er luft som beveger seg fra den varme til den kalde siden av isolasjonen, samt om det er luftbevegelse innenfor isolasjonslaget. Verdien finnes i tabell F.1 i standarden med eksempler i kapittel F.2.3.  $R_1$  er varmemotstanden for laget med luftrommene og skal beregnes med formel(2.3).  $R_{total}$  er totalvarmemotstand som beregnet i formel (2.4). Formel (2.13) er formel (F.3) i standarden.

$$\Delta U_g = \Delta U'' \cdot \left( \frac{R_1}{R_{total}} \right)^2 \quad (2.13)$$

Korreksjon for mekaniske festemidler kan beregnes med to forskjellige formler (2.14) og (2.15) [18]. (2.14) er en presis metode som bruker festepunkter per kvadratmeter  $n_f$  og ISO 10211 brukes til å finne punktvis varmegjennomgangskoeffisient,  $\chi$ . Formel (2.14) er formel (F.4) i standarden.

$$\Delta U_f = n_f \cdot \chi \quad (2.14)$$

Formel (2.15) er formelen for tilnærmet beregning av korreksjon for mekaniske festemidler [18].  $\alpha$  settes til 0,8 om festemiddelet går helt gjennom isolasjonslaget. I tilfeller der festemiddelet begynner delvis inn i isolasjonen, beregnes  $\alpha$  med formel (2.16). Variabelen  $n_f$  er antall festepunkter per kvadratmeter,  $A_f$  er tverrsnittetsarealeet til et festemiddel, og  $\lambda_f$  er den termiske konduktiviteten til festemiddelet. I både (2.15) og (2.16) er  $d_1$  lengden festemiddelet går inn i isolasjonen, og  $d_0$  er tykkelsen til isolasjonslaget.

$$\Delta U_f = \alpha \cdot \frac{\lambda_f \cdot A_f \cdot n_f}{d_1} \cdot \left( \frac{R_1}{R_{total}} \right)^2 \quad (2.15)$$

$$\alpha = 0,8 \cdot \frac{d_1}{d_0} \quad (2.16)$$

Formel (2.17) er en summering av de forskjellige korreksjonene, fra (2.15), (2.13) og korreksjon for omvendt tak.

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (2.17)$$

Formel (2.18) er en summering av korreksjonen fra (2.17) og  $U$ -verdi fra (2.1). Denne gir korrigert  $U$ -verdi.

$$U_c = U + \Delta U \quad (2.18)$$

### 2.5.1. Justering av $R_{si}$ og $R_{se}$

I appendiks C av NS-EN ISO 6926:2017 er det formel for beregninger av termisk overflatemotstand [18]. Formlene (C.1), (C.2) og (C.3), i standarden referert til som (2.19), (2.20) og (2.21), brukes til å finne både  $R_{si}$  og  $R_{se}$ . Formel (2.19) gir overflatemotstand basert på konvektiv varmeovergangskoeffisient og strålingskoeffisient. Formel (2.20) og (2.21) gir strålingskoeffisient fra temperatur i kelvin, Stefan-Boltzmanns konstant og halvkuleformet emissivitet. Halvkuleformet emissivitet kan ifølge standarden som regel settes som 0,9 for bygningsmaterialer.

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (2.19)$$

$$h_r = \varepsilon \cdot h_{r0} \quad (2.20)$$

$$h_{r0} = 4 \cdot \sigma \cdot T_{mn}^3 \quad (2.21)$$

Konvektiv varmeovergangskoeffisient for indre termisk overflatemotstand ( $R_{si}$ ), er gitt i tabell C.1 av NS-EN ISO 6946:2017 [18]. Denne velges etter retningen på varmeflyten, og for horisontal varmeflyt settes denne til  $2,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ .

$$h_c = h_{ci} \quad (2.22)$$

Konvektiv varmeovergangskoeffisient for ytre termisk overflatemotstand ( $R_{se}$ ), beregnes ved å bruke lufthastigheten ( $v$ ) på overflaten i m/s [18]. Formlene som brukes til dette, er (2.23) og (2.24), som er formel (C.5) og (C.6) fra standarden.

$$h_c = h_{ce} \quad (2.23)$$

$$h_{ce} = 4 + 4 \cdot v \quad (2.24)$$

### 2.5.2. Justering av U-verdi fra lineær kuldebro

Tabell 2.5: Betegnelser til lineær kuldebro

| Betegnelse | Enhet             | Beskrivelse                                          |
|------------|-------------------|------------------------------------------------------|
| $l_k$      | $\frac{W}{m^2 K}$ | Varmegjennomgangskoeffisient                         |
| $\psi_k$   | $\frac{m^2 K}{W}$ | Varmegjennomgangskoeffisient for lineære kuldebroder |

Formel (2.25), korrigerer U-verdi for lineære og punktformede kuldebroder den er hentet fra formel (7.59) i TILLÄMPAD BYGGNADSFYSIK [20]. I denne boken oppgis det også at  $\psi_k = 0,02 \frac{W}{mK}$  er en rimelig verdi å bruke for dører og vinduer i veggekonstruksjoner med bindingsverk av tre. I dette forsøket blir den brukt til å korrigerer for kuldebroen som oppstår langs ytterkanten av testkassen. Tabell 2.5 gir forklaring på betegnelser.

$$U_m = \frac{\sum U_{c,i} \cdot A_i + \sum \psi_k \cdot l_k + \sum \chi_j}{A_{om}} \quad (2.25)$$

### 2.5.3. Beregninger av varmemflyt

Tabell viser forklaring av betegnelser brukt i dette kapittelet.

Tabell 2.6: betegnelser

| Betegnelse | Enhet          | Beskrivelse        |
|------------|----------------|--------------------|
| Q          | W              | Varmeflyt          |
| $\lambda$  | $\frac{W}{mK}$ | Varmekonduktivitet |
| A          | $m^2$          | Areal              |
| T          | K              | Temperatur         |
| d          | m              | Tykkelse veggsjikt |

Formel (2.26) for endimensjonal stasjonær varmeledning fra formel (4.8) i [13].

$$Q = \frac{\lambda_1 \cdot A(T_A - T_{12})}{d_1} = \frac{\lambda_2 \cdot A(T_{12} - T_{23})}{d_2} = \frac{\lambda_3 \cdot A(T_{23} - T_B)}{d_1} \quad (W) \quad (2.26)$$

Den kan også skrives om til å bruke R istedenfor  $\lambda$  og  $d$ , som vist i formel (2.27) fra formel (4.9) i [13].

$$Q = \frac{A(T_A - T_{12})}{R_1} = \frac{A(T_{12} - T_{23})}{R_2} = \frac{A(T_{23} - T_B)}{R_3} \quad (2.27)$$

I tilfeller med to sjikt, der temperaturen på overflatene og mellom sjiktene er kjent, samt R-verdien til det ene sjiktet, kan likheten mellom varmeflyten brukes til å skrive om formel(2.27) til formel(2.28).

$$R_2 = \frac{(T_{12} - T_B) \cdot R_1}{(T_A - T_{12})} \quad (2.28)$$

Når Q er kjent, kan formel (2.27) skrives om til formel (2.29) for å finne R-verdien til en vegg.

$$R = \frac{A(T_A - T_B)}{Q} \quad (2.29)$$

## 2.6. Forskrifter og standarder

Dette kapittelet inneholder informasjon om de mest relevante forskrifter og standarder

### 2.6.1. Byggteknisk forskrift TEK17

I følge §1-1 av forskriften er formålet til forskriften at «*Forskriften skal sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres ut fra hensyn til god visuell kvalitet, universell utforming og slik at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi.*» [21]. I dette prosjektet er det Kapittel 14-Energi som er fokuset.

I §14-2 er det to forskjellige krav til energieffektivitet som kan brukes [21]. Det ene er energirammer; her oppgis det i en tabell som viser maksimum total netto energibehov i kWh/m<sup>2</sup> med oppvarmet bruksareal (BRA) per år for forskjellige bygningskategorier. Det andre alternativet, som kun kan brukes til boligbygg, er å benytte tabellen Energiltak. Dette er en tabell med 9 punkter som kan oppfylles som alternativ til energibehov. Et av disse punktene er U-verdi for yttervegg, som er satt til en maks verdi på 0,18 W/m<sup>2</sup>K. Uansett hvilken av disse metodene som velges, settes det i §14-3 en maks grense for U-verdi til yttervegger på 0,22 W/m<sup>2</sup>K. Eneste unntaket for dette er bolig og fritidsbolig med laftede yttervegger.

Forskriften bestemmer at beregninger av energibehov og varmetapstall skal utføres i henhold til NS3031:2014.

### 2.6.2. NS 3031:2014 Beregning av bygningers energiytelse – Metode og data

NS 3031 ble trukket tilbake 1. februar 2018, fordi den ikke passet overens med den nye europeiske standarden EN-ISO 52000-1 [22]. I mars 2025 kom det en ny utgave NS3031:2025 [23]. Byggteknisk forskrift er ikke oppdatert etter dette og viser til beregningsmetoder i NS 3031:2014. Denne standarden er derfor fortsatt i bruk i dag [22].

### 2.6.3. Kuldebroer i bygningskonstruksjon - Varmestrømmer og overflatetemperaturer - Detaljerte beregninger

ISO 10211 er en standard som viser hvordan geometriske modeller kan settes opp for beregning av varmetapet til bygninger og minimum temperatur for å unngå kondens [24]. Standarden tar to forbehold: at egenskapene til materialene er uavhengige av temperatur, og at det ikke er varmekilder i elementene.

### 2.6.4. NS-EN ISO 6964:2017 Bygningkomponenter og -elementer - Varmemotstand og Varmegjennomgangskoeffisient - Beregningsmetoder.

NS-EN 6964:2017 er en standard for utregning av termisk konduktivitet. Den er ikke beregnet for bygningsdeler som inneholder glassplater eller deler som luft strømmer igjennom [18]. Den inneholder metoder for å utføre beregninger på elementer med homogene lag og tilnærmede beregninger på elementer med heterogene lag.

## 2.7. Testutstyr

### 2.7.1. Klimakammer: Hotbox

Hotbox-metoden er en testmetode for å måle termiske egenskapene til bygningsmaterialer og konstruksjoner [25]. Den brukes ofte til å se varmeisolasjonsevnen til vegger, tak, gulv, vinduer og dører. Metoden gir nøyaktige målinger under kontrollerte forhold og brukes i forskning og produktutvikling.

Hotbox-metoden består av to separate kamre der testmaterialet blir plassert mellom disse, hvor det ene simulerer innendørsforhold, og det andre simulerer utendørsforhold [25]. Det ene kammeret (varm side) har en kontrollert temperatur som representerer inneklimate, mens det andre kammeret (kald side) benytter et kjølesystem for å representere utendørsforhold. For å skape en temperaturforskjell mellom de to kamrene benyttes både varme- og kjølesystemer. Den termiske motstanden til testmaterialet bestemmes ved å måle varmemstrømmen mellom varm og kald side, samt temperaturforskjellen mellom de to sidene. Denne metoden passer godt ved vurdering av kuldebroer, siden den gir nøyaktige målinger av varmetap gjennom konstruksjoner. Varmestrømmen som passerer direkte gjennom testmaterialet, tilsvarer mengden varme som kreves for å opprettholde en konstant temperatur i målekammeret. Samtidig tas det hensyn til varmetap gjennom veggene og panelene i testapparatet, slik at resultatene blir presise.

Det finnes to typer hotbox, kalibrert og beskyttet [26]. Begge brukes til å måle termiske egenskaper til materialer, men de skiller seg i hvordan de håndterer varmetap under testen. I en kalibrert hotbox kompenseres varmetapet gjennom en forhåndskalibrering, hvor varmetapet i kamrene kartlegges under målingen. Denne metoden egner seg godt for testing av store og komplekse bygningsdeler, men krever en nøyaktig kalibreringsprosess for å få pålitelige resultater. En beskyttet hotbox reduserer varmetapet ved å fysisk isolere målekammeret på den varme siden [26]. Dette er en enklere metode som krever mer plass, men fjerner behovet for forhåndskalibrering, noe som gjør den mer praktisk i enkelte situasjoner.

### 2.7.2. Type K termoelement

Et termoelement utnytter temperaturavhengige spenninger som oppstår mellom to ulike metaller [13]. Dette utgjør grunnprinsippet bak termoelementer. Når to ulike metaller er skjøtet sammen i en lukket krets, vil det oppstå en elektrisk spenning (EMF, elektromotorisk kraft) mellom kontaktpunktene dersom det er temperaturforskjell mellom dem. Denne spenningen er proporsjonal med temperaturdifferansen mellom målepunktet og et referansepunkt med kjent temperatur.

Type K-termoelement er blant de mest brukte i bygningsfysikk på grunn av sitt brede målområde, fra omtrent  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  til  $+1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  [13]. Sensorene kan produseres som fleksible tråder, folier eller sonder, og loddessammen i spissen for å danne målepunktet. På grunn av sin enkle oppbygning egner termoelementer seg godt til punktmålinger av temperatur både på overflater og inne i konstruksjoner.

### 2.7.3. Lufthastighetssensor

Et hetetrådsanemometer (hot-wire) brukes ofte til måling av lave lufthastigheter [27]. Prinsippet går ut på at en tynn metalltråd varmes opp ved at det går elektrisk strøm gjennom den. Når luft strømmer forbi tråden, blir den nedkjølt, og mengden varme som føres bort, er avhengig av lufthastigheten. I anemometeret justeres strømmen kontinuerlig for å holde tråden på en konstant temperatur. Det elektriske effektforbruket som kreves for å opprettholde temperaturen, blir da et mål for strømningshastigheten.

### 2.7.4. Kapasitiv fuktighetsmåler

Vann har en evne til å påvirke elektriske felt i mye større grad enn luft [27]. Denne egenskapen gjør at man kan bruke vanninnholdet i luft til å påvirke elektriske målinger. Kapasitive fuktighetssensorer benytter seg av dette ved å bruke en tynn plastfilm som kan trekke til seg fuktighet fra luften. På overflaten av denne filmen er det plassert to tynne elektroder, slik at hele oppsettet fungerer som en kondensator.

Når luftfuktigheten rundt sensoren øker, trekker plastfilmen til seg mer vann, og dette vannet endrer hvordan det elektriske feltet oppfører seg mellom elektrodene [27]. Dette fører til at mengden ladning som kan lagres i kondensatoren, også endres. Ved å måle endringene i ladningen, kan sensoren regne ut hvor fuktig luften er. Resultatet blir et direkte mål for den relative luftfuktigheten i rommet.

### 2.7.5. Varmeflukssensor

En varmekullssensor er et instrument som brukes til å måle varmestruømtetthet, det vil si hvor mye varmeenergi som overføres per arealenhet ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) gjennom et materiale [28]. Sensoren fungerer som en omformer (transducer), som omdanner varmeflyt til et elektrisk signal, vanligvis i form av en spenning. Signalstyrken er proporsjonal med mengden varme som passerer gjennom sensoren, og ved hjelp av en kalibreringskonstant kan spenningen konverteres til en verdi for varmestruømtetthet.

Sensoren har en definert positiv og negativ side, og kan som regel benyttes i begge retninger [29]. Avhengig av hvilken vei varmeenergien strømmes gjennom sensoren, vil man få enten positive eller negative måleverdier. Disse verdiene kan registreres ved hjelp av et presist voltmeter eller en digital datalogger med tilstrekkelig oppløsning.

Varmeflukssensorer er spesielt nyttige i eksperimentelle målinger hvor både ledning, konveksjon og stråling kan bidra til den totale varmeoverføringen, og der nøyaktige materialdata som termisk ledningsevne ikke er kjent [28]. Ved direkte måling unngår man usikkerheter forbundet med indirekte beregninger basert på temperaturforskjeller og materialegenskaper.

### 2.7.6. Varmekamera

Kameraet registrerer infrarød stråling fra overflater og konvertere dette til et termografisk bilde som viser temperaturforskjeller, som gjør det mulig å identifisere svake punkter i isolasjonen, kuldebroer og varmefordeling [30] [13]. Termografi gir en visuell fremstilling av hvor varmetapet foregår. Varmekamera er et viktig verktøy for å analysere varmefordeling og varmetap i en hotbox-test.

## 2.8. U-verdi-målere

### 2.8.1. Hjelpeplatemetoden

Hjelpeplatemetoden er en metode for å bestemme varmestruøm og U-verdi gjennom en konstruksjon [13]. Prinsippet tar i bruk en homogen plate, en såkalt hjelpeplate, med kjent varmeledningsevne og tykkelse, som plasseres inntil den konstruksjonen man ønsker å undersøke (Fig. 2.3).

Ved å måle temperaturforskjellen mellom fremsiden og baksiden av hjelpeplaten, og platens varmeledningsevne, kan varmestruømmen gjennom platen beregnes. Siden hjelpeplaten ligger i kontakt med konstruksjonen, vil det si at samme varmestruøm også passerer gjennom veggen bak. Ved å sammenligne varmestruømmen gjennom hjelpeplaten med temperaturforskjellen mellom innsiden og utsiden, kan man beregne U-verdien.

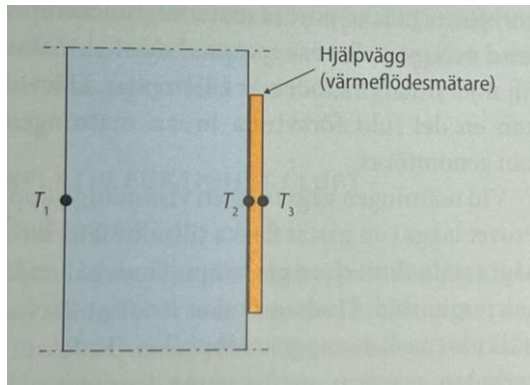


Fig. 2.3: Hjelpeplate [13]

### 2.8.2. Testo: 635 U-verdisett

Testo 635 er et måleinstrument for registrering av bygningsfysiske parametere som temperatur, luftfuktighet, duggpunkt og materialfukt [31]. Instrumentet kan kobles til ulike sensorer og prober for innsamling av relevante data for termiske analyser.

I denne sammenhengen benyttes et U-verdimålesett som inkluderer Testo 635-instrumentet, en trådløs radiomodul for dataoverføring og en tredobbel temperaturføler. Målingen gjennomføres ved å registrere tre temperaturpunkter:

- Innendørs lufttemperatur (varm side)
- Innvendig overflatetemperatur (testveggs overflate på varm side)
- Utendørs lufttemperatur (kald side)

Basert på disse målingene beregner instrumentet veggens U-verdi uten behov for inngrep i konstruksjonen. Under stabile værforhold kan metoden benyttes uten bruk av varmekssensor. Testo 635 støtter imidlertid tilkobling av slike sensorer, noe som muliggjør direkte måling av varmestrøm ved behov for høyere nøyaktighet i fremtidige tester.

### 2.8.3. Varmemotstand i kalkulasjon

Ved bruk av hjelpeplatemetoden benyttes varmeledningsegenskapene til hjelpeplaten, for å beregne varmestrømmen [13]. Når tykkelsen og varmeledningsevnen til platen er kjent, kan man ut fra temperaturforskjellen på platen finne varmestrømmen som går gjennom vegg. Deretter kan man beregne U-verdien til vegg ved å bruke målte temperaturforskjeller mellom varm og kald side og kjenne til varmefluksen. Her brukes en beregnet termisk motstand (R-verdi) for selve hjelpeplaten som en del av utregningen.

I motsetning til dette benytter U-verdisettet fra Testo standardiserte R-verdier for overgangsmotstandene på varm og kald side av vegg ( $R_{si}$  og  $R_{se}$ ), som er forhåndsdefinerte i instrumentet. Disse verdiene legges til automatisk i beregningen, og det må ikke gjøres egne beregninger for veggens materialer eller tykkelser. Varmefluksen blir da beregnet basert på de tre målte temperaturene og de forhåndsbestemte R-verdiene.

### 3. Forskerspørsmål

Hvor mye kan tykkelsen av isolasjonslaget til en massivtrevegg reduseres, samtidig som U-verdi-kravene i TEK 17 blir oppfylt?

Underspørsmål:

1. Hvordan påvirker alternative stender- og isolasjonskombinasjoner veggens U-verdi?
2. Hvordan avviker målte U-verdier i hotbox fra beregnet U-verdi etter gjeldende standard?

Avgrensninger

- Det ble valgt å bruke  $U \leq 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ , fra Energiltak i Tek 17.
- Det ble valgt tre vanlige isolasjonsmateriale og passende stender utforminger.
  - o Glassull med I-stender
  - o Kontinuerlig kompakt steinull
  - o Trefiber isolasjon med dobbelt sikt.
- Beregninger av U-verdi ble valg å gjøre i henhold til NS 6946, med de forenklinger den tillater.

## 4. Metode

Denne studien benyttet et eksperimentelt design for å undersøke varmeisolasjonsegenskaper ved ulike veggkonstruksjoner og isolasjonsmaterialer. Hensikten var å finne ut av hvor godt forskjellige konstruksjoner reduserer varmetap under kontrollerte forhold, og sammenligne dette med teoretiske beregnede verdier.

### 4.1. Materiale og utstysliste

*Tabell 4.1: Testkasse (basisramme) – (1200x1200x280) mm*

| Materiale        | Antall | Dimensjoner (mm) | Kommentar        |
|------------------|--------|------------------|------------------|
| Treplater        | 4 stk  | 1180 x 280 x 20  | Sider til kassen |
| Massivtreelement | 1 stk  | 1160 x 1160 x 80 | Hovedplate       |
| Treskruer        | 36 stk | 4,8 x 75         | Til sammenføring |

*Tabell 4.2: Varme (isolasjon og materialer)*

| Type                                   | Tykkelse | Varmeledningsevne ( $\lambda$ ) (W/mK) |
|----------------------------------------|----------|----------------------------------------|
| RockWool RedAIR flex plater            | 200 mm   | 0,033                                  |
| Glava Proff 34 plater                  | 200 mm   | 0,034                                  |
| Hunton Nativo trefiberisolasjon plater | 100 mm   | 0,038                                  |
| Hunton Nativo Asfaltplate              | 12 mm    | 0,049                                  |
| Massivtreelement fra KLH               | 80mm     | 0,12                                   |
| RedAir skruer                          | Ø8mm     | 30                                     |

*Tabell 4.3: Vegg 1 – Rockwool (RedAir)*

| Materiale     | Antall | Dimensjoner (mm) | Kommentar          |
|---------------|--------|------------------|--------------------|
| RedAir plate  | 1 stk  | 600 x 1000 x 200 | REDAir Plate 200mm |
| RedAir plate  | 1 stk  | 560 x 1000 x 200 | REDAir Plate 200mm |
| RedAir plate  | 1 stk  | 600 x 160 x 200  | REDAir Plate 200mm |
| RedAir plate  | 1 stk  | 560 x 160 x 200  | REDAir Plate 200mm |
| RedAir skruer | 2 stk  | 8,0 x 260        | FLEX W200          |
| RedAir disk   | 2 stk  | -                | REDAir Flex Disc   |

Tabell 4.4: Vegg 2 – Trefiber

| Materiale               | Antall | Dimensjoner (mm) | Kommentar                              |
|-------------------------|--------|------------------|----------------------------------------|
| Trefiberplate           | 2 stk  | 565 x 1160 x 100 | Hunton Nativo® Trefiberisolasjon Plate |
| Trefiberplate           | 1 stk  | 30 x 1160 x 100  | Hunton Nativo® Trefiberisolasjon Plate |
| Trefiberplate           | 2 stk  | 256 x 1160 x 100 | Hunton Nativo® Trefiberisolasjon Plate |
| Trestender              | 2 stk  | 48 x 98 x 1160   | Gran                                   |
| Asfaltplate             | 2 stk  | 300 x 1200 x 12  | Hunton Nativo                          |
| Asfaltplate             | 1 stk  | 600 x 1200 x 12  | Hunton Nativo                          |
| Lufttettingsteip (Siga) | -      | ca. 2400 mm      | SIGA 20/40 60 mm                       |
| Trelekt                 | 2 stk  | 36 x 48 x 1200   | Gran                                   |
| Treskruer               | 8 stk  | 4,8 x 75         | ESSVE Classic Trallskrut A2            |
| Treskruer               | 32 stk | 4,0 x 30         | ESSVE ESSDRIVE Wood screw C3           |

Tabell 4.5: Vegg 3 – Glava

| Materiale               | Antall | Dimensjoner (mm) | Kommentar                    |
|-------------------------|--------|------------------|------------------------------|
| Glavaplate              | 2 stk  | 295 x 1160 x 200 | Glava Proff 34 Plate         |
| Glavaplate              | 1 stk  | 570 x 1160 x 200 | Glava Proff 34 Plate         |
| Trelekt                 | 4 stk  | 48 x 48 x 1160   | Gran                         |
| Trelekt                 | 2 stk  | 36 x 48 x 1200   | Gran                         |
| MDF-plate               | 2 stk  | 152 x 1160 x 6   | Regina GDS – MDF             |
| Asfaltplate             | 2 stk  | 318 x 1160 x 12  | Hunton Nativo                |
| Asfaltplate             | 1 stk  | 564 x 1160 x 12  | Hunton Nativo                |
| Lufttettingsteip (Siga) | -      | ca. 2400 mm      | SIGA 20/40 60 mm             |
| Trelin                  | -      | -                | Til i-stender                |
| Treskruer               | 8 stk  | 4,8 x 75         | ESSVE Classic Trallskrut A2  |
| Treskruer               | 32 stk | 4,0 x 30         | ESSVE ESSDRIVE Wood screw C3 |

Tabell 4.6: Verktøy til bygging og montering

| Verktøy               | Kommentar                                       |
|-----------------------|-------------------------------------------------|
| Drill og bitser       | For 8,0, 4,0 og 4,8 mm skruer (t20 og t40 bits) |
| Sirkelsag             | Til kapping av tre og plater                    |
| Glava-kniv            | Til isolasjonskutting                           |
| Rockwool-kniv         | For RedAir, Rockwool-materiale                  |
| Målebånd              | For all oppmåling                               |
| Justeringsbrikker     | 1,2,3 og 4mm PELD                               |
| Byggskum              | ESSVE Fogskum Expand                            |
| Aluminiumsteip        | 48mm x 50m Etab                                 |
| Termisk blandingsfett | MX-4 Artic thermal compound                     |

Tabell 4.7: Måleinstrumenter

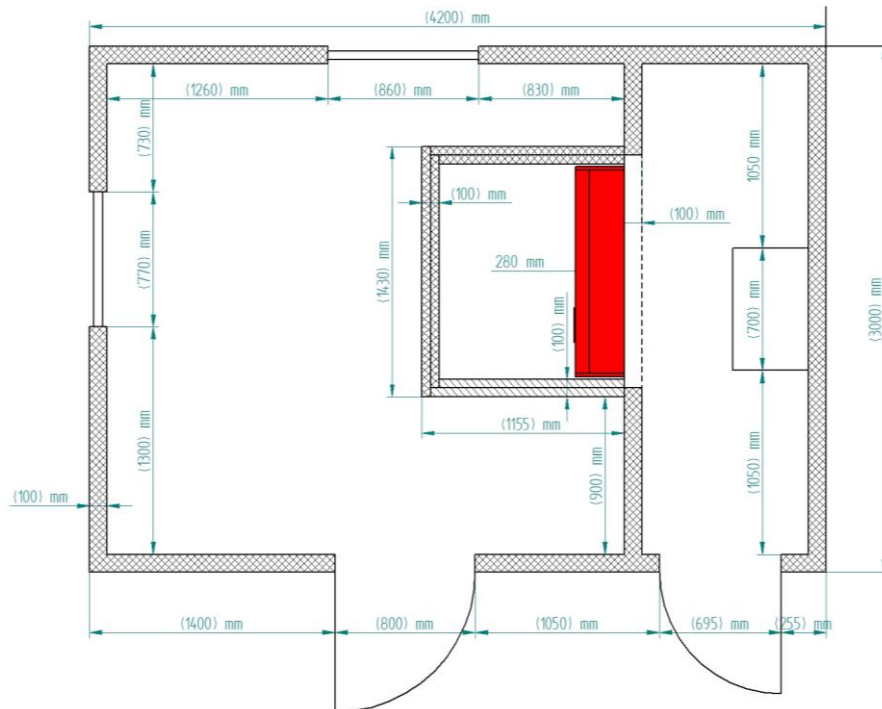
| Type            | Navn           | Produsent    |
|-----------------|----------------|--------------|
| Måleinstrument  | Testo 635      | Testo        |
| Måleinstrument  | Testo 435      | Testo        |
| Fuktighetsmåler | Tramex ME5     | Tramex       |
| Varmekamera     | BCAM           | FLIR Systems |
| Datalogger      | Voltcraft K202 | Voltcraft    |
| Multimeter      | Fluke 287      | Fluke        |
| Effektmåler     | Metrix PX 120  | Metrix       |

Tabell 4.8: Programvare

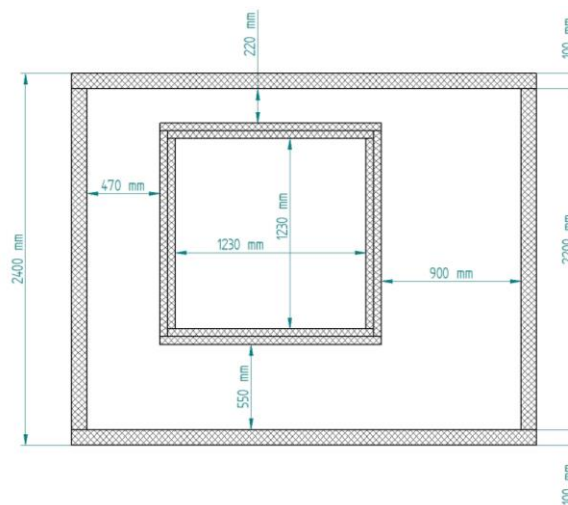
| Type             | Produsent |
|------------------|-----------|
| Regneart (Excel) | Microsoft |
| SolideEdge       | Simens    |
| AutoCad          | AutoDesk  |

## 4.2. Hotbox

Forsøkene ble gjennomført ved bruk av en hotbox, som fungerte som testkammer for å simulere temperaturforskjeller mellom varm og kald side av en testvegg. Hotboxen hadde mål som vist i Fig. 4.1 og Fig. 4.2, og var utformet slik at testobjektene kunne plasseres tett i åpningen mellom de to kamrene.



*Fig. 4.1: Plantegning hotbox*



*Fig. 4.2: Snittegning beskyttet kammer*

Den varme siden ble holdt på tilnærmet romtemperatur ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ) gjennom hele forsøket, mens den kalde siden ble nedkjølt ved hjelp av en integrert fordampereenhet. Temperaturen på kald side ble satt til  $-20^\circ\text{C}$  for å simulere vinterklima og skape en tydelig temperaturgradient gjennom testobjektene.

Hotboxen muliggjorde måling av varmetransport under kontrollerte og repeterbare forhold. Den var utstyrt med flere koblingspunkter for type K termoelement plassert på ulike posisjoner. Disse tillot tilkobling av ledninger til sensorer som målte både lufttemperatur og overflatetemperaturer.

Sensorene kunne kobles til og avleses fra utsiden, noe som gjorde det mulig å lese av temperaturer uten å åpne hotboxen.

På varm side, inne i hovedboksen, var det i tillegg plassert en mindre, isolert måleboks konstruert av 50 mm XPS-plater. Denne boksen hadde mål som vist i Fig. 4.1 og Fig. 4.2, og kunne åpnes og lukkes. Den mindre boksen ble benyttet som en del av beskyttet hotbox-metoden. Fig. 4.3 viser kjøleanlegget utenfor boksen, Fig. 4.4 viser det beskyttede kammer og Fig. 4.5 viser fordamperen.



*Fig. 4.3: Kjøleanlegg utenfor boksen*



*Fig. 4.4: Beskyttet kammer*

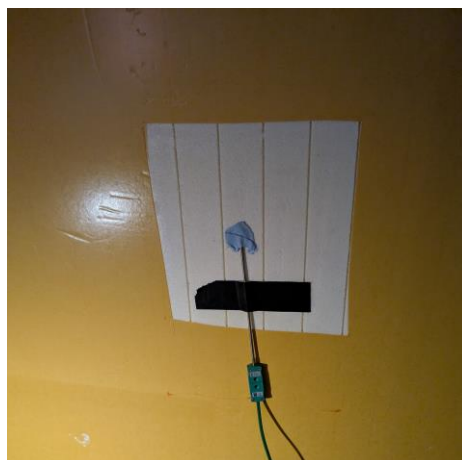


*Fig. 4.5: Fordamper*

### 4.3. Testobjekter

#### 4.3.1. Test med XPS

Før veggprøvene ble testet, ble det utført en test på en 40mm XPS plate. Dette ble gjort for å teste metodikken med et kjent homogent materiale. Hjelpeplatemetoden ble utført med en MDF- og en aluminiumsplate. MDF-platen ble valgt fordi den hadde en varmeledningsevne som var lav nok til å få en temperaturdifferanse på de to sidene av platen. Aluminium ble valgt fordi det har kjente stabile termiske egenskaper. For beskyttet hotbox ble samme prinsipp brukt som på veggprøvene. Eneste forskjellen var at her ble et 45W varmeelement brukt inne i boksen, fordi varreflyten var forventet å være større enn på de tykkere veggelementene vi testet senere. Vi valgte å ikke bruke aluminiumsplaten videre, grunnet at vi ikke hadde måleinstrumenter med høy nok oppløsning. Fig. 4.6, viser plassering av type K termoelement plassert på kald side av XPS platen.



*Fig. 4.6: Plassering av termoelement*

#### 4.3.2. Konstruksjon av testkasse

Det ble konstruert en grunnkasse med utvendige mål på  $1200 \times 1200$  mm. Kassen bestod av fire plater (20 mm tykkelse) med dimensjoner  $1180 \times 280$  mm, samt et trelags massivtreelement av gran med målene  $1160 \times 1160 \times 80$  mm. Sammen dannet disse en boks med en åpning i den ene siden som vist på Fig. 4.7. Åpningen hadde målene  $1160 \times 1160$  mm og en dybde på 200 mm.



Fig. 4.7: grunnkasse

Platene ble festet til massivtreelementet med fem treskruer ( $4,8 \times 75$  mm) gjennom hver plate og inn i elementets sidekanter, som vist på Fig. 4.8. I hvert hjørne ble platene skrudd sammen med tre skruer (samme dimensjon) for å sikre stabilitet i konstruksjonen og forhindre bevegelser.



Fig. 4.8: Skruel plassering

Testkassen ble plassert i åpningen mellom den varme og kalde siden av hotboxen, med massivtre-siden vendt mot den varme siden og kassens åpning mot den kalde siden. Kassen ble deretter justert både vertikalt og horisontalt slik at den sto sentrert i åpningen, ved hjelp av plastbaserte justeringsbrikker.

Når kassen var korrekt posisjonert, ble det lagt byggsaum rundt hele kanten av kassen i spalten mellom testkassen og åpningen i hotboxen, som vist på Fig. 4.9. Dette ble gjort på både varm og kald side. Skummet ble påført fra ytterkanten av kassen og cirka 50 mm inn i spalten for å sikre lufttetting og forhindre varmetap. Skummet som ble brukt, hadde svært lavt isocyanatinnhold ( $<0,1\%$ ), som vil si at det ikke er krav til opplæring ved bruk. Alle materialer som ble brukt til bygging og montering av testkassen, vises i Tabell 4.1: Testkasse (basisramme) – ( $1200 \times 1200 \times 280$ ) mm. Tabell viser verktøy brukt til bygging og montering av kassen.



*Fig. 4.9: Grunnkasse plassert i hotbox*

Etter at skummet var påført, ble hotboxen skrudd på, og temperaturen på kald side ble satt til  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Når temperaturen hadde stabilisert seg, ble et varmekamera benyttet på varm side for å inspisere langs skumfugene og avdekke lekkasjer i tettingen. Dersom det ble observert kalde områder i overgangen mellom kasse og hotbox, ble det lagt på mer byggsaum på disse punktene. Prosessen ble gjentatt til varmekameraet ikke lenger viste tegn til lekkasje eller temperaturavvik i fugene.

#### 4.3.3. Test med massivtre

Det ble gjennomført en måling for å beregne U-verdien til 80 mm massivtre uten isolasjonsmateriale på kald side. Målet med testen var å etablere et sammenligningsgrunnlag for målingene med isolasjon. Det ble benyttet hjelpeplatemetoden, der en MDF-platte ble brukt som referanse for varmestrøm. MDF-platen og tilhørende temperatursensorer fulgte samme metode som senere beskrevet i 4.5.1.

På tidspunktet for denne testen var justerbar strømforsyning ikke tilgjengelig. I stedet ble det benyttet et elektrisk varmeelement med fast effekt på 45 watt. Elementet ble plassert i senter mellom sideveggene og 600 mm fra massivtreet på varm side av boksen. For å redusere lokal stråling mot testveggen ble det benyttet en skjerm av aluminiumsfolie 50mm foran varmeelementet. Temperaturmålingene ble logget med Voltcraft K202 datalogger, og følgende sensorplassering ble brukt:

1. Overflate av MDF (varm side)
2. Mellom MDF og massivtre (varm side)
3. Overflate av massivtre (kald side)

I denne testen ble temperatursensoren på kald side festet med heftemasse, uten bruk av teip. Dette ble vurdert å gi god kontakt. Testen ble startet etter at boksen var lukket og forseglet, og målingene ble avlest manuelt når systemet var i likevekt. Temperaturdataene ble benyttet til å beregne varmeflukt og estimert U-verdi for massivtreet alene.

## 4.4. Montering av veggkonstruksjon

### 4.4.1. RedAir Flex

Når testkassen var montert i hotboxen, ble neste steg å installere den første veggkonstruksjonen. Denne benyttet seg av Rockwool sitt RedAir Flex-system som isolasjonsløsning. I denne testen ble 200 mm REDAir plater brukt. Disse oppgis å ha en varmeledningsevne på 0,033 W/mK [4]. Denne verdien og andre  $\lambda$ -verdier for materialer det regnes på, finnes i Tabell

RedAir Flex-platene hadde opprinnelig dimensjoner på 1000 × 600 mm med en tykkelse på 200 mm. Platene ble forhåndskuttet slik at de passet nøyaktig inn i åpningen på testkassen. For å redusere antall kutt, ble én plate beholdt i full størrelse (1000 × 600 mm), mens den neste ble tilpasset til 1000 × 560 mm for å få plass ved siden av den første.

Videre ble det kuttet til to mindre plater med målene 160 × 600 mm og 160 × 560 mm, som ble plassert over de to første for å fylle hele åpningen.

Til slutt ble det installert én RedAir Flex-skrue (8,0 × 260 mm) med tilhørende RedAir Flex-disc i midten av hver av de to største isolasjonsplatene for å sikre dem, som vist i Fig. 4.10. Fig. 4.11 viser horisontalt og vertikalt snitt av testobjektet. Det ble etter fabrikantens anvisning ikke benyttet vindsperre på denne veggkonstruksjonen. Alle materialer brukt i denne veggkonstruksjonen vises i Tabell .



Fig. 4.10: RockWool

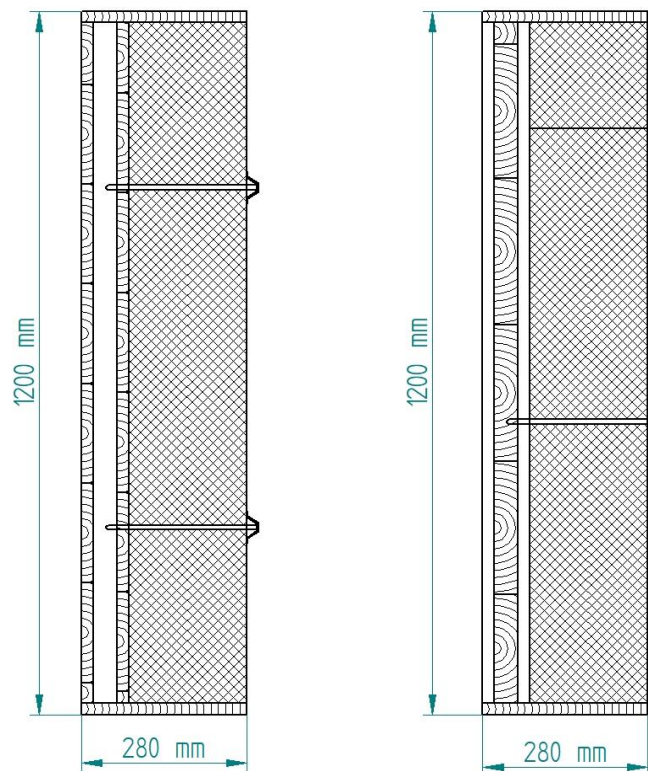


Fig. 4.11: Snitt

#### 4.4.2. Trefiber dobbeltsjiktsløsning

Etter ferdigstilt testing av RedAir Flex-systemet ble isolasjonen demontert, og neste veggkonstruksjon kunne monteres. Denne bestod av en dobbeltsjiktsløsning med trefiberplater. Det ble brukt Hunton Nativo trefiberisolasjon plater (100mm) som oppgis å ha en varmeledningsevne på 0,038 W/mK [32].

Først ble et innvendig isolasjonslag med 100 mm tykk trefiberisolasjon plassert innerst i åpningen av testkassen. Isolasjonsplatene hadde opprinnelige mål på 565 × 1220 mm. Platene ble kuttet til 565 × 1160 mm for å passe i åpningen, og en tilleggsstripe på 30 mm bredde ble kuttet og lagt inn for å fylle åpningen helt ut. Det innerste laget ble montert horisontalt som vist på Fig. 4.12.



*Fig. 4.12: Innerste lag med trefiberisolasjon*

Deretter ble det plassert to stender i dimensjon  $48 \times 98$  mm på utsiden av det innerste laget, i flukt med testkassens ytterside. Stenderne ble plassert med senteravstand 600 mm, som er standard for bindingsverk, og med lik avstand fra hver av sidene på testkassen.

Mellom stenderne ble det deretter montert et andre lag med 100 mm trefiberisolasjon, som vist på Fig. 4.13. Isolasjonsplatene ble kuttet til  $1160 \times 565$  mm for midtfeltet, og  $1160 \times 256$  mm for feltene mellom stenderne og kassens sidekanter.



*Fig. 4.13: Andre lag trefiberisolasjon og stender*

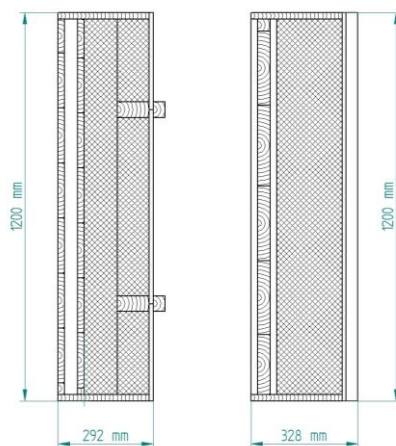
Til slutt ble det montert asfaltplater på utsiden av konstruksjonen, det vil si utenpå stenderne og delvis over kantene på testkassen. Platene ble kuttet, tilpasset og teipet (Siga teip til vindtetting) over stenderne i henhold til vanlig byggeskikk som vist på Fig. 4.14. Det ble benyttet tre asfaltplater, en med dimensjon  $1200 \times 600$  mm og to med dimensjon  $1200 \times 300$  mm. På utsiden av asfaltplatene, over stenderne, ble det i tillegg montert lekter ( $48 \times 36$  mm) for å holde platene på plass. Fig. 4.15 viser vegg sett ovenfra uten sideplate. Fig. 4.16 viser horisontalt og vertikalt snitt av testobjektet. Alle materialer brukt i denne veggkonstruksjonen vises i Tabell



*Fig. 4.14: Asfalt med teip over skjøter*



*Fig. 4.15: Trefiberløsning sett ovenfra*



*Fig. 4.16: Snitt*

#### 4.4.3. Glava Proff med I-stendere

Etter fullført testing av trefiberløsningen ble konstruksjonen demontert, og den siste veggkonstruksjonen kunne monteres. Denne bestod av Glava Proff 34 isolasjonsmatter kombinert med spesialbygde I-stendere som vist i Fig. 4.17. Glava Proff 34 plater (200mm) oppgis å ha en varmeledningsevne på 0,034 W/mK [33]. I-stenderne ble konstruert med to lekter i dimensjon 48 × 48 mm som flens og 6 mm MDF-plate som steg. De ferdige I-stenderne hadde målene 1160 × 48 × 200 mm. Flensene var 48 mm dype, og steget strakte seg 104 mm i bredden. Flensene var i tillegg senket 24 mm inn i stegene som vist på Fig. 4.18.



Fig. 4.17: I-stender

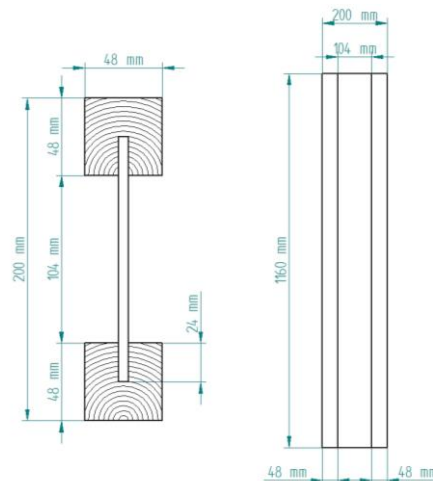


Fig. 4.18: Snitt av I-stender

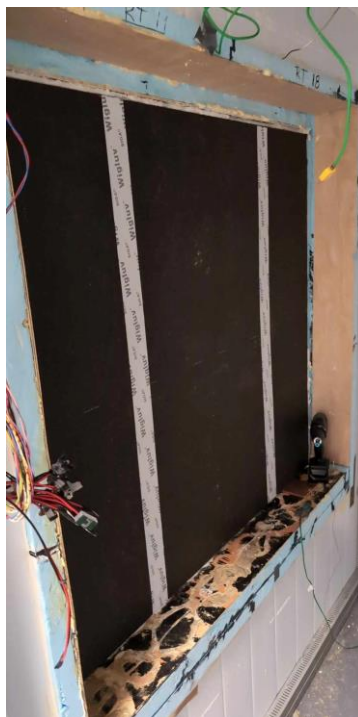
Stenderne ble plassert vertikalt med senteravstand 565 mm og lik avstand fra hver av testkassens sider. Mellom stenderne ble det montert 200 mm Glava Proff 34 isolasjonsmatter. Platene hadde opprinnelig mål på 1200 × 570 × 200 mm og ble tilpasset til 1160 × 570 mm for midtseksjonen, samt 1160 × 295 mm for feltene nær kassens sidekanter.

Isolasjonsmattene ble også tilskåret langs kantene slik at de passet inn i I-stenderne, for å unngå hulrom og sikre full isolasjonstykkelse i hele konstruksjonen. Fig. 4.19 viser Glava og I-stender montert i testkassa.

Til slutt ble det montert vindtetting i form av asfaltplater på samme måte som for trefiberløsningen – det vil si utenpå stenderne og delvis over kantene på testkassen som vist på Fig. 4.20. Platene ble tilpasset og teipet i henhold til vanlig byggeskikk. Fig. 4.21 viser horisontalt og vertikalt snitt av testobjektet. Alle materialer brukt i denne veggkonstruksjonen vises i Tabell .



*Fig. 4.19: Glava med i-stendere*



*Fig. 4.20: Asfaltplater teipet i skjøtene*

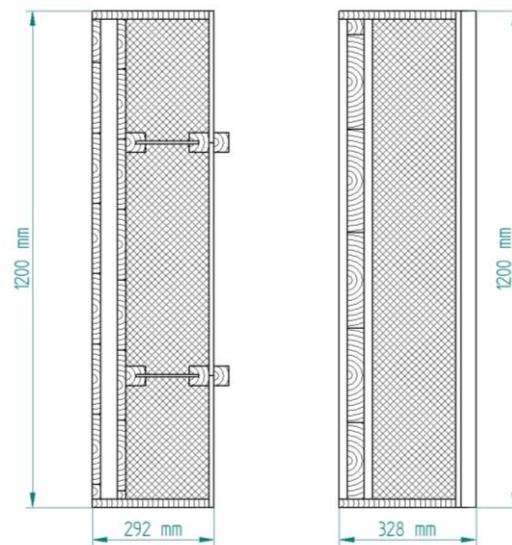


Fig. 4.21: Snitt

## 4.5. Forsøksoppsett

Denne delen beskriver montering og plassering av sensorer og måleutstyr på varm og kald side av testveggen. Det forklares hvordan temperatursensorer og luftstrømsmålere ble montert og hvordan sensorplasseringene var tilpasset både beskyttet hotbox-metode og hjelpeplatemetoden. Tabell viser måleapparatene som blir brukt.

### 4.5.1. Instrumentering

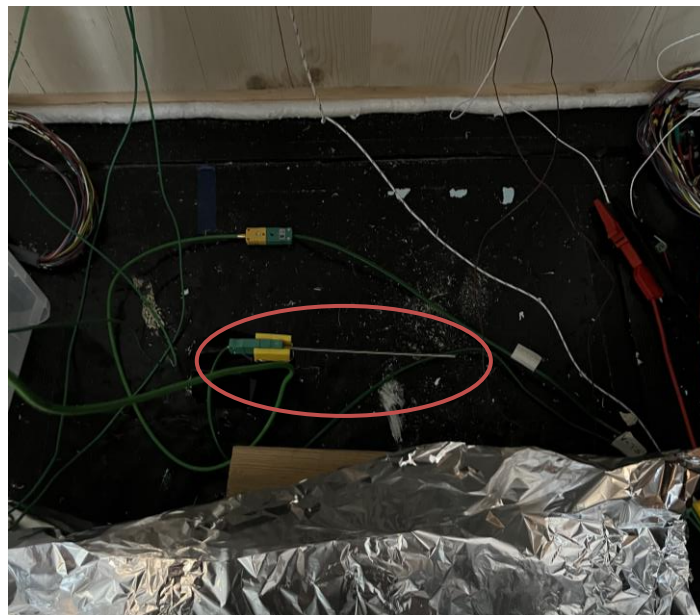
For å sikre stabile måleforhold ble alle sensorer og måleutstyr montert permanent, med unntak av en sensor på kald side som måtte fjernes og plasseres på nytt ved bytte av isolasjon. Monteringen startet på varm side, hvor både sensorene tilknyttet beskyttet hotbox- og hjelpeplatemetoden ble plassert. Plassering av alle sensorene vises på Fig. 4.25 og Fig. 4.26 med forklaring i Tabell .

På varm side ble en type K termoelement plassert i senter av testveggen på overflaten av massivtreet. For gjennomføring av hjelpeplatemetoden ble det frest et ca. 1 mm dypt spor i massivtreet. En type K termoelement ble lagt inn i dette sporet, før MDF- platen med tykkelse 6 mm ble festet. Platen ble festet med teip rundt hele omkretsen for å unngå luftlekkasje og sikre god kontakt mot massivtreet. I tillegg ble det montert en tredje temperatursensor på overflaten av MDF-platen, Fig. 4.22 viser temperatursensorene på varm side.



*Fig. 4.22: Sensorer på varm side*

For å måle lufttemperaturen i den beskyttede boksen ble det montert to type K termoelement i rommet – en 310 mm fra taket og en 54 mm fra gulvet som vist i Fig. 4.23. Alle sensorene på varm side hadde kabler som ble trukket gjennom en kabelgjennomføring i veggen, slik at data kunne logges uten behov for å åpne den varme siden under forsøket.



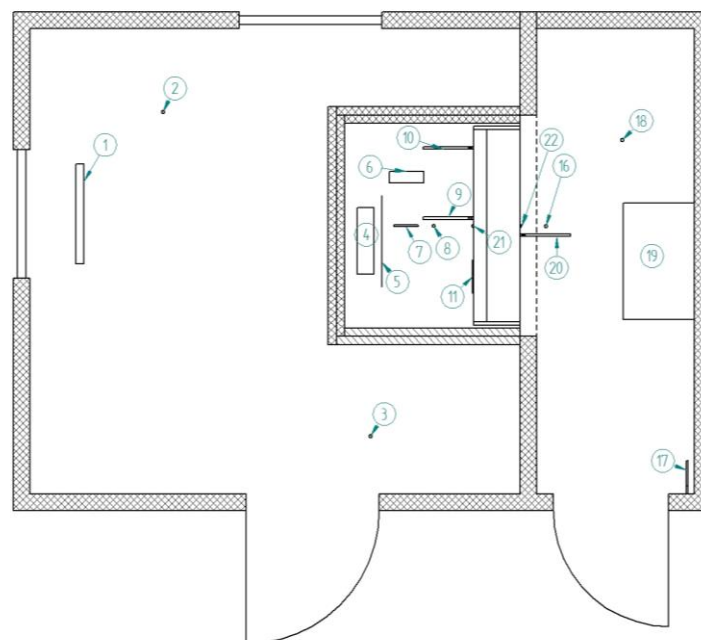
*Fig. 4.23: Lufttemperatursensor*

Etter at måleoppsettet på varm side var klart, ble montering fullført på kald side. Her ble en type K termoelement plassert i senter av testveggen, direkte på overflaten av testveggen. Sensoren ble festet med heftemasse og teip. Den ble fjernet og montert på nytt ved hver bytting av isolasjon. En Testo-varmetrådlufthastighetssensor ble montert ca. 10 cm ved siden av temperatursensoren som vist på Fig. 4.24. Denne ble brukt til å registrere eventuell luftbevegelse, for å kunne korrigere varmeovergangstallet i forhold til standardverdien for  $R_{se}$ . Sensoren hang i en snor fra taket, uten kontakt med omkringliggende flater, og bidro til å gi informasjon om forholdene i det kalde

kammeret. En type K termoelement med radiosender tilkoblet en Testo 635 ble montert 10 cm fra overflaten til veggen. For å opprettholde en fast posisjon og avstand ble sensoren ført via en plastplate som fungerte som et støtteoppheng.



*Fig. 4.24: Lufthastighetssensor*



*Fig. 4.25: Plantegning av sensorplasseringer*

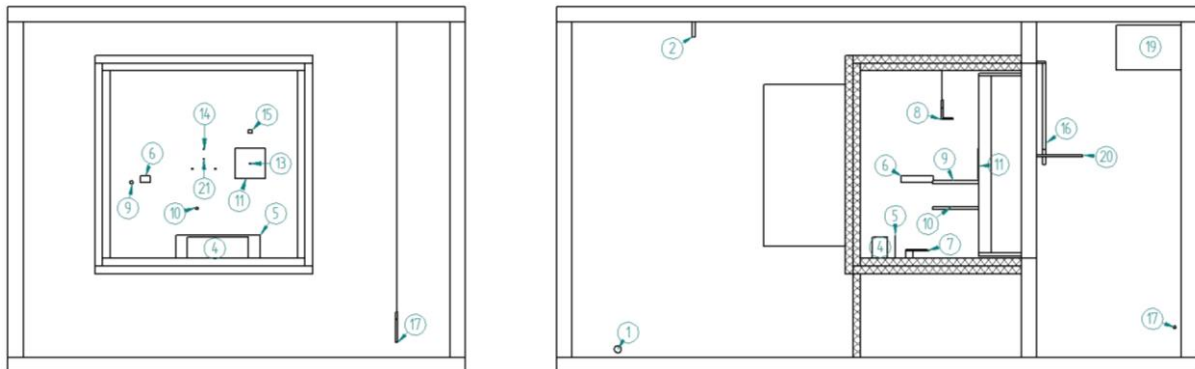


Fig. 4.26: Snittegning av sensorplasseringer

Tabell 4.9: Forklaring av sensorer

| Nr | Beskrivelse                         | Plassering                |
|----|-------------------------------------|---------------------------|
| 1  | Varmeelement                        | Utenfor beskyttet kammer  |
| 2  | Temperaturføler luft tak            | Utenfor beskyttet kammer  |
| 3  | Temperaturføler luft gulv           | Utenfor beskyttet kammer  |
| 4  | Varmeelement                        | Innenfor beskyttet kammer |
| 5  | Aluminiumsfolie                     | Innenfor beskyttet kammer |
| 6  | Logger                              | Innenfor beskyttet kammer |
| 7  | Temperaturføler luft gulv           | Innenfor beskyttet kammer |
| 8  | Temperaturføler luft tak            | Innenfor beskyttet kammer |
| 9  | Lufthastighet sensor                | Innenfor beskyttet kammer |
| 10 | Lufthastighet sensor<br>(Varmetråd) | Innenfor beskyttet kammer |
| 11 | MDF                                 | Innenfor beskyttet kammer |
| 12 | Temperturføler bak MDF              | Innenfor beskyttet kammer |
| 13 | Temperturføler overflate MDF        | Innenfor beskyttet kammer |
| 14 | 3 x Temperturfølere overflate       | Innenfor beskyttet kammer |
| 15 | Flux-måler                          | Innenfor beskyttet kammer |
| 16 | Temperaturføler luft midt           | Kald side                 |
| 17 | Temperaturføler luft gulv           | Kald side                 |
| 18 | Temperaturføler luft tak            | Kald side                 |
| 19 | Fordamper                           | Kald side                 |
| 20 | Lufthastighet sensor<br>(Varmetråd) | Kald side                 |
| 21 | Temperaturføler overflate           | Innenfor beskyttet kammer |
| 22 | Temperaturføler overflate           | Kald side                 |

#### 4.6. Avriming

Fordamperen i hotboxen er i utgangspunktet utstyrt med en automatisk elektrisk avriming. Denne funksjonen innebærer at maskinen slår seg av og på med varierende intervaller for å hindre isdannelse på kjølerillene i fronten av enheten. Etter første test dannet det seg også is andre steder i maskinen og på ulike områder på kald side. Det dannet seg ikke is på eller i testveggen.

For å sikre sammenlignbare og kontrollerte forhold, ble hotboxen avrimet manuelt før hver test. Avrimingen ble gjennomført ved å åpne den kalde siden og benytte en vifteovn som vist på Fig. 4.27 til å varme opp rommet til isen var smeltet. For å håndtere smeltevannet ble det plassert en bøtte under fordamperen. I tillegg ble kondens som hadde samlet seg på vegger og tak, tørket manuelt.

Når det ikke lenger rant vann fra fordamperen, og all synlig fuktighet var fjernet fra overflatene, ble luftfuktigheten på den kalde siden målt. Først når denne var redusert til et tilfredsstillende nivå (under 30% RF), ble ny veggkonstruksjon montert, døren lukket, og anlegget satt i drift med kjøling på nytt.



Fig. 4.27: Avriming ved bruk av vifteovn

#### 4.7. Beskyttet hotbox (Guarded hotbox)

U-verdiene til tre ulike veggoppbygninger ble målt ved bruk av beskyttet hotbox. Metoden gir kontrollerte forhold ved varmeoverføringsmålinger og gjør det mulig å beregne U-verdi av veggene under stabile forhold.

#### 4.7.1. Varmetilførsel

Inne i testkammeret ble det plassert et elektrisk motstandselement med motstand  $33\ \Omega$  som fungerte som varmekilde. Elementet hadde en lengde på 400mm og ble plassert i senter mellom sideveggene og 600mm fra massivtreet som vist i Fig. 4.25 og Fig. 4.26. Motstandselementet ble tilkoblet en justerbar strømforsyning (Iskra Type HSN 0203) som gjorde det mulig å regulere spenningen. For å oppnå en effekt på 8 watt ble spenningen satt til 16,4 V. Strømmen som gikk gjennom motstanden, var 0,487 A, ut ifra spenningen og motstanden. Strømmen, spenningen og effekten ble lest av ved å bruke et multimeter (Metrix PX 120).

Strømforsyningen og tilhørende utstyr ble plassert utenfor den varme boksen i hovedrommet på varm side som vist på Fig. 4.28. Dette rommet ble holdt ved en konstant temperatur på ca.  $22\pm 1\ ^\circ\text{C}$  ved hjelp av et 45 W varmeelement som vist i Fig. 4.29. Motstandselementet inne i boksen ble koblet til strømforsyningen via kabler som var ført gjennom boksens vegg, slik at kun varmeelementet befant seg inne i det lukkede kammeret. Når ønsket effekt på 8 W var innstilt, ble boksen lukket og forseglet med teip langs alle skjøter. Dette ble gjort for å minimere varmetap og sikre stabil temperatur.

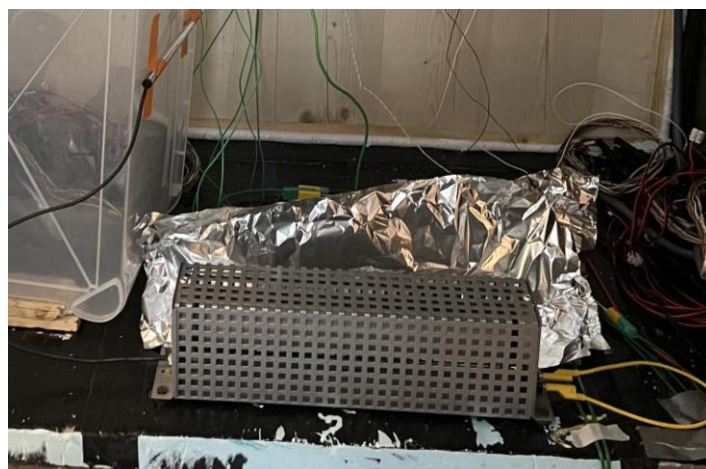


Fig. 4.28: Strømforsyning og tilhørende utstyr



*Fig. 4.29: 45 W varmeelement*

For å unngå oppvarming av stråling, ble det montert en skjerm av aluminiumsfolie med tykkelse på 0,05mm mellom varmekilden og massivtreet. Skjermen dekket et område på 550mm x 200mm, og ble plassert ca. 10cm foran varmeelementet som vist på Fig. 4.30. Temperaturer ble målt på varm og kald side med to type K termoelement, en plassert på overflaten på varm side og en plassert på overflaten av isolasjonen på kald side.



*Fig. 4.30: Aluminiumsfolie foran varmeelement*

#### 4.7.2. Teoretisk beregning

Det ble utført teoretisk beregning av U-verdi for veggkonstruksjonene, som beskrevet i kapittel 2.5.

#### 4.7.3. Justering av varmetilførsel

For å kompensere for varmetilførselen inn i testkammeret gjennom XPS-platene, ble det utført en forenklet beregning av varmeflyten. Det ble bare beregnet flyt gjennom plane flater og lineære kuldebroer fra kanter og hjørner ble ignorert. Standard verdi for  $R_{si}$  ble brukt til  $R_{si}$  og  $R_{se}$  for varmemotstanden til XPS, da begge sider er innendørs. Formel XX, ble brukt til å utføre denne beregningen.

### 4.8. Hjelpeplatemetoden

Det ble gjennomført én måling på hver isolasjonstype med hjelpeplatemetoden. Hjelpeplaten som ble brukt, hadde en tykkelse på 6 mm og et areal på 200mm x 200mm og var av typen MDF. Platen ble plassert på overflaten av massivtreet på den varme siden, ca. 600mm fra gulvet og 800 mm fra venstre side. (vist på Fig. 4.31). Sensoroppsett og montering av MDF-platen er nærmere beskrevet i 4.5.1. Ved å plassere MDF-platen på varm side, kunne den forbli montert under hele forsøksperioden uten behov for demontering ved bytte av isolasjonsmateriale.



*Fig. 4.31: Plassering av MDF-plate*

#### 4.8.1. Gjennomføring av målinger

I denne metoden ble det logget temperatur på tre punkter:

1. På overflate av MDF (varm side)
2. Mellom MDF og massivtre (varm side)
3. På overflate av isolasjon (kald side)

Temperaturforskjellen ble deretter beregnet ved å se på forskjellen i temperaturmålingene mellom varm og kald side. Ved bruk av den teoretiske varmeledningsevnen til MDF og den målte temperaturforskjellen, ble varmekraft beregnet. Til slutt ble U-verdien beregnet ved å bruke verdiene for varmekraft, arealet av MDF-plate og temperaturforskjellen mellom varm og kald side.

#### 4.8.2. Beregninger av U-verdi, hjelpeplate metode

Til hjelpeplate metoden ble U-verdien for hver isolasjonsløsning ble beregnet ved hjelp av MDF-platen som referansemateriale. Med kjent varmeledningsevne for MDF,  $\lambda = 0,15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , hentet fra standard NS-EN ISO 10456: 2007 [16] og tykkelse,  $d = 0,006\text{m}$ . Dette ble sammen med målte temperaturer over platen, under platen og på overflaten på kald side brukt i (2.28) til å finne R verdien til veggkonstruksjonene. Formel (2.3) og (2.1) ble så brukt til å finne U-verdi. Metode beskrevet i kapittel 2.5.1 ble brukt til å finne overflatemotstandene.

#### 4.8.3. Beregninger av U-verdi, beskyttet hotbox metode

Formel (2.9), ble brukt til å beregne U-verdi, for beskyttet hotbox metode. Formel (2.26) ble brukt til å justere varmeflyt gjennom det beskyttet testkammeret på grunn av temperatur differanse mellom innen og utenfor kammeret. Formel (2.3) og (2.1) ble så brukt til å finne U-verdi. Metode beskrevet i kapittel 2.5.1 ble brukt til å finne overflatemotstandene. Lineær kuldebro ble justert for som beskrevet i kapittel 2.5.2.

Q: Tilført varme i watt

$T_A$  : Temperatur overflate varm side av testkonstruksjon

$T_B$  : Temperatur overflate kald side av testkonstruksjon

#### 4.9. Iterativ beregning av varmekonduktivitet og total veggtykkelse

Etter alle målinger var utført ble det utført iterative kalkulasjoner av U-verdi for konstruksjonene. I disse kalkulasjonene ble varmekonduktiviteten økt eller senket med 0,01 per beregning frem til den resulterende U-verdien ble det samme som målt U-verdi. De resulterende varmekonduktivitets verdien ble deretter brukt til å gjøre iterative kalkulasjoner der hoved isolasjonssjiktene til veggkonstruksjonene ble økt eller senke med 0,01meter frem til resulterende U-verdi ble 0,180W/m<sup>2</sup>K.

#### 4.10. U-verdimåler

For å måle U-verdi ble måleinstrumentet Testo 635 benyttet. Denne var utstyrt med en tredelt sensor, og en radiosender med en temperaturføler av type K termoelement som vist på Fig. 4.32. Denne radiosenderen ble plassert 10 cm fra veggflate på kald side.

På den varme siden ble de tre temperaturfølerne festet direkte på veggoverflaten med festemasse. Følerne ble plassert i trekantformasjon, med 10–15 cm avstand mellom hver, midt på veggen. Måleinstrumentet ble plassert på en plastkasse omtrent 30 cm fra veggen.

Radiosenderen ble paret med måleinstrumentet for trådløs dataoverføring. På Testo 635 ble materialtypen «Soft Wood Lumber» valgt som underlag, siden det var snakk om massivtre av gran. Instrumentet ble konfigurert til å registrere én måling per minutt. De innsamlede måledataene ble deretter eksportert til et regneark.

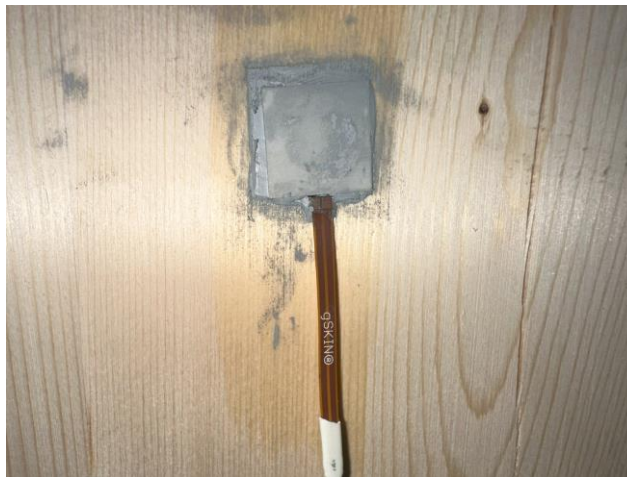


Fig. 4.32: U-verdimåler og temperatursensor med radiosender

#### 4.11. Flux

Én av testene ble utført ved hjelp av en gSKIN® Heat Flux Sensor. Denne ble benyttet til å måle varmekraften gjennom veggkonstruksjonene. Sensoren er flat og kvadratisk, med en positiv og en negativ side, og har to tilhørende ledninger for tilkobling.

I forsøket ble sensoren festet direkte på massivtreveggen, på varm side av hotboxen, ved hjelp av termisk pasta for å sikre god kontakt og redusere kontaktmotstand (Fig. 4.33). Ledningene fra sensoren ble forlenget slik at de kunne føres ut av hotboxen og tilkoblet et voltmeter for avlesning.



*Fig. 4.33: Varmestrømsensor montert med termisk pasta*

Voltmeteret ga utslag i millivolt (mV). Disse verdiene kunne videre bli konvertert til varmekraft i  $\text{W/m}^2$  ved hjelp av sensorens kalibreringsfaktor, som er spesifisert av produsenten. Denne metoden gjorde det mulig å måle faktisk varmetransport i sanntid under kontrollerte forhold.

#### 4.12. Lufthastighet

Lufthastigheten ble målt med to Testo 435-måleinstrumenter utstyrt med varmetrådanemometre. Instrumentene ble montert mot veggen på varm og kald side, med føleren orientert horisontalt for å registrere vertikal lufthastighet langs overflatene, vist i Fig. 4.34. Måledata ble logget hvert minutt og deretter eksportert til et regneark for videre analyse.



*Fig. 4.34: Varmetrådanemometer*

#### 4.13. Fuktighet

Det brukt en Tramex ME5 fuktmåler for å kontrollere fukt i massivtreet gjennom forsøksperioden, vist på Fig. 4.35. Den hadde som formål å avdekke endringer av fuktinnholdet i massivtreet, som kunne påvirke varmeledning og dermed beregnet U-verdi.

Instrumentet benytter elektrisk impedans til å måle fuktinnhold i materialer uten å skade overflaten. Det ble plassert mot overflaten uten trykk, i henhold til produsentens anbefalinger. Målingene ble utført på begge sider av testpanelet. På hver side ble det målt fem faste punkter, ett i hvert hjørne og ett i senter av testflaten. Målingene ble gjennomført ved oppstart og avslutning for å sjekke at fuktigheten holdt seg stabil.



Fig. 4.35: Fuktmåler

#### 4.14. Målemetodikk

For registrering av temperaturer fra type K termoelementene ble det benyttet tre dataloggere av typen Voltcraft K202, som hver har mulighet til å lese av to sensorer samtidig. Dette ga mulighet for å måle på maksimalt seks punkter om gangen. Totalt ble det installert ti temperatursensorer, og det var derfor nødvendig å rotere mellom målepunktene under forsøket. Fig. 4.36 viser dataloggerne og tilkoblingspunktene til temperatursensorene.

Målingene ble gjort manuelt ved å lese av temperaturene på dataloggerne og ta bilder av displayet. Det ble målt på et fast måleintervall hvert tredje minutt, der det ble tatt fem bilder for å dekke alle sensorene. Manuelle avlesninger ble først gjennomført etter at systemet hadde oppnådd termisk likevekt, og U-verdimåleren hadde fullført sin målesyklus. Dette gjaldt både for målingene tilknyttet beskyttet hotbox- og hjelpeplatemetoden. Bildene ble etter forsøket manuelt overført til Excel for videre behandling.

Sensorene ble fordelt på varm og kald side som følger:

Kald side:

- KT1: Lufttemperatur nært gulv
- KT2: Overflatetemperatur på isolasjon
- KT3: Lufttemperatur nært tak

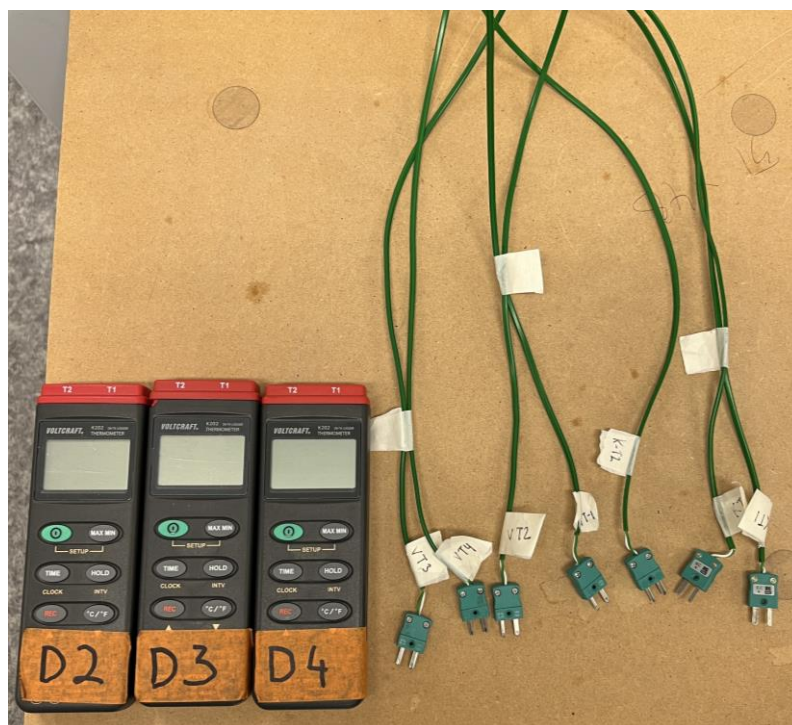
**Varm side:**

- VT1: Lufttemperatur nært tak (utenfor hotbox)
- VT2: Lufttemperatur nært gulv (utenfor hotbox)
- VT3: Temperatur bak MDF-platen (mellom MDF og massivtre)
- VT4: Temperatur på overflaten av MDF-platen
- VT5: Lufttemperatur nært gulv (inne i hotbox)
- VT6: Lufttemperatur nært tak (inne i hotbox)
- VT7: Overflatetemperatur på massivtre

For å gjøre alle sensorer tilgjengelige fra utsiden av hotboxen, ble noen av kablene fra varm side trukket ut gjennom døra. Dette gjorde det mulig å lese av alle temperaturer uten å forstyrre måleoppsettet. I tillegg ble det printet ut noen lapper for å holde styr på hvilke sensorer som hører til hvilke kanaler på dataloggeren, dette vises på Fig. 4.37.

Sensorene ble målt i følgende rekkefølge:

1. Måling 1: VT1 og VT2
2. Måling 2: KT1 og KT3
3. Måling 3: VT3 og VT4
4. Måling 4: KT2
5. Måling 5: VT5, VT6 og VT7 (her ble loggerne byttet underveis for å dekke tre sensorer)



*Fig. 4.36: Dataloggere og tilkoblingspunkter*

|                       |     |      |
|-----------------------|-----|------|
| Måling 1              |     |      |
| Varm luft TAK         | VT1 | D2T1 |
| Varm luft GULV        | VT2 | D2T2 |
| Måling 2              |     |      |
| Kald luft GULV        | KT1 | D2T1 |
| Kald luft TAK         | KT3 | D2T2 |
| Måling 3              |     |      |
| Under MDF             | VT3 | D2T1 |
| Over MDF              | VT4 | D2T2 |
| Måling 4              |     |      |
| Overflate kald        | KT2 | D2T1 |
| Måling 5              |     |      |
| Varm luft gulv i boks | VT5 | D4T1 |
| Varm luft tak i boks  | VT6 | D4T2 |
| Overflate varm        | VT7 | D3T2 |

Fig. 4.37: Lapper for å ha kontroll på avlesninger

#### 4.15. Litteraturstudium som metode

I arbeidet med oppgaven er det gjennomført et litteraturstudium for å hente inn relevant fagkunnskap om isolasjonsmaterialer og metoder for beregning og testing av U-verdier. Litteraturstudiet har dannet grunnlaget for teoridelen av oppgaven.

Kildene er hovedsakelig hentet fra Google Scholar, Scopus og SINTEF Byggforsk. Det er lagt vekt på å bruke fagfelleverderte artikler, tekniske rapporter og anerkjente bransjekilder for å sikre faglig kvalitet og relevans. Litteraturen er valgt ut på bakgrunn av tematisk relevans og aktualitet, og er ikke basert på en systematisk søkestrategi.

Litteraturstudiet er dermed brukt som et målrettet, teoretisk verktøy for å støtte opp under oppgavens problemstilling og sikre en solid faglig forankring.

#### 4.16. Digitale hjelpemidler

I prosessen med å skrive og forbedre teksten i oppgaven er språkmodellen ChatGPT fra OpenAI benyttet som et digitalt verktøy. Modellen har blitt brukt til å foreslå alternative formuleringer, forbedre språkflyt og bidra til klarere akademisk språkføring. Innholdet i oppgaven er imidlertid utformet og faglig vurdert av forfatterne selv. ChatGPT er ikke brukt til å generere faglig innhold eller trekke konklusjoner, men kun som støtte for språklig utforming og strukturering.

## 5. Resultat og diskusjon

### 5.1. Fuktinnhold

Det ble gjennomført fuktmålinger i massivtre elementet både før og etter testperioden, ved bruk av fuktmåleren Tramex ME5. Målingene ble utført mens testveggen var montert i hotboxen. Før teststart ble det målt et gjennomsnittlig fuktinnhold på 9,3 % på varm side og 11,8 % på kald side. Ved avslutning av testperioden hadde dette sunket til 8,6 % og 9,8 %.

Endringene tyder på en uttørking av massivtreet gjennom testperioden, noe som skyldes det kontrollerte klimaet og temperaturforskjellen veggen ble utsatt for. Fuktinnholdet sank på både varm og kald side, med størst reduksjonen på kald side. Det tyder ikke på at det har foregått fukttransport fra varm til kald side gjennom elementet. Resultatene viser at begge sider av massivtreet har avgitt fukt til omgivelsesluften, og nærmet seg et likevektspunkt der materialet verken tar opp eller avgir fukt.

#### 5.1.1. Før testperiode

Tabell 5.1: Fuktinnhold

| Sted                | Fuktinnhold (%) |
|---------------------|-----------------|
| Oppe venstre hjørne | 9.1             |
| Oppe høyre hjørne   | 9.6             |
| Senter              | 9.2             |
| Nede venstre hjørne | 9.8             |
| Nede høyre hjørne   | 8.8             |

**Feil! Fant ikke referansekilden.** viser fuktinnhold i massivtre elementet av varm side før testperiode. Ved å ta gjennomsnitt av verdiene blir fuktinnholdet 9.3%.

Tabell 5.2: Fuktinnhold

| Sted                | Fuktinnhold (%) |
|---------------------|-----------------|
| Oppe venstre hjørne | 13              |
| Oppe høyre hjørne   | 13              |
| Senter              | 11              |
| Nede venstre hjørne | 11              |
| Nede høyre hjørne   | 11              |

Tabell viser fuktinnhold i massivtre elementet av kald side før testperiode. Ved å ta gjennomsnitt av verdiene blir fuktinnholdet 11.8%.

## 5.1.2. Etter testperiode

Tabell 5.3: Fuktinnhold

| Sted                | Fuktinnhold (%) |
|---------------------|-----------------|
| Oppe venstre hjørne | 8               |
| Oppe høyre hjørne   | 8.6             |
| Senter              | 8.7             |
| Nede venstre hjørne | 9.1             |
| Nede høyre hjørne   | 8.7             |

Tabell viser fuktinnhold i massivtre elementet av varm side etter testperiode. Ved å ta gjennomsnitt av verdiene blir fuktinnholdet 8.6%.

Tabell 5.4: Fuktinnhold

| Sted                | Fuktinnhold (%) |
|---------------------|-----------------|
| Oppe venstre hjørne | 10              |
| Oppe høyre hjørne   | 9.7             |
| Senter              | 8.2             |
| Nede venstre hjørne | 10              |
| Nede høyre hjørne   | 11.1            |

Tabell viser fuktinnhold i massivtre elementet av kald side etter testperiode. Ved å ta gjennomsnitt av verdiene blir fuktinnholdet 9.8%.

## 5.2. Lufthastighet

Vertikal lufthastighet, langs testveggen, i testkammeret på varm side ble mål til å være i gjennomsnitt under 0,1m/s, etter at kammer var luket.

Fig. 5.1, viser lufthastighet langs overflaten på kald side av testveggen, vist ved de forskjellige målingene. Gjennomsnitt lufthastighet fra 4 timer og frem til målingen ble avsluttet, var 0,507m/s.

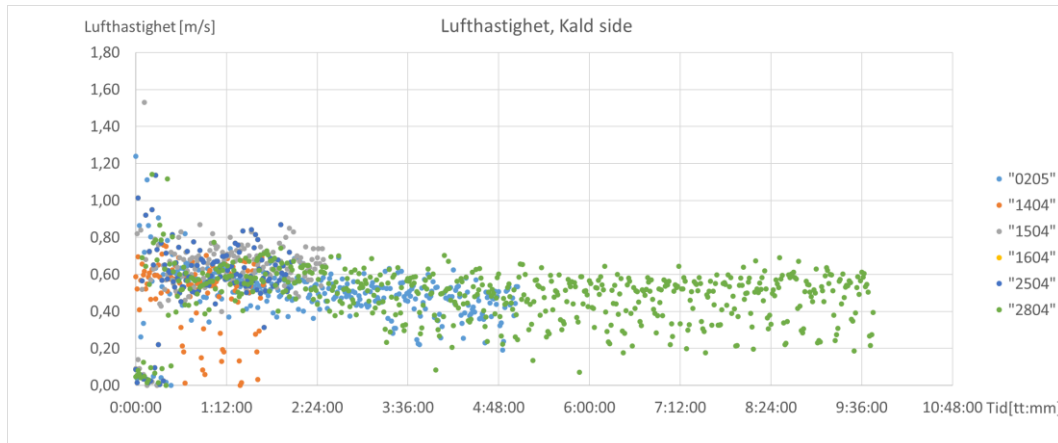


Fig. 5.1: Lufthastighet, kald side

## 5.3. Teoretiske beregninger

I dette kapittelet presenteres mellomregninger og resultat, for de teoretiske beregningene utført for å finne U-verdien til prøveveggen.

### 5.3.1. Justering av $R_{si}$ og $R_{se}$

Tabell 5.5: Verdier brukt i justering av  $R_{si}$  og  $R_{se}$

| Symbol        | Enhet                                        | Beskrivelse                                  |
|---------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| $\sigma$      | $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ | Stefan-Boltzmann konstant                    |
| $\varepsilon$ | 0,9                                          | Halvkuleformet emissivitet                   |
| $v$           | 0,507m/s                                     | Gjennomsnittlig lufthastighet kald overflate |
| $h_c$         | $2,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$                  |                                              |

Tabell 5.6 viser en oversikt over gjennomsnitt lufttemperaturer under de manuelle målingene. Lufttemperaturene er gjennomsnittstemperaturer fra en sensor ved tak og en sensor ved gulv.  $T_m$  er gjennomsnitt av overflatene og luften rundt dem.

Tabell 5.6: Luft og overflate -temperatur

|                 | Rockwool | Trefiber | Glava   | Sensor   |
|-----------------|----------|----------|---------|----------|
| Luft, Varm      | 19,3°C   | 21,4°C   | 19,6°C  | 2 og 3   |
| Luft, Kammer    | 16,5°C   | 19,3°C   | 17,2°C  | 7 og 8   |
| Luft, Kald      | -17,4°C  | -15,1°C  | -16,8°C | 17 og 18 |
| Overflate, Varm | 16,2°C   | 19,0°C   | 16,9°C  | 21       |
| Overflate, Kald | -18,4°C  | -16,9°C  | -18,1°C | 22       |
| $T_{mn,varm}$   | 289,5K   | 292,3K   | 290,2K  | -        |
| $T_{mn,kald}$   | 255,2K   | 257,2K   | 255,7K  | -        |

$h_{r0}$  kalkulert med Steffan boltzmanns konstant og  $T_{mn,varm}$ , med formel (2.21), for verdier fra rockwool målingen. Stefan-Boltzmanns konstant, Halvkuleformet emissivitet, Gjennomsnittlig lufthastighet kald overflate og  $h_c$  er oppgitt i Tabell 5.5. Videre presenteres utregningen av  $R_{si}$  og  $R_{se}$ , for testen med rockwool i vegg. Utregning for de andre materialene er tilgjengelig i vedlagt i vedlegg 1. Resultat fra utregningen er presentert i Tabell 5.7

$$h_{r0,varm} = 4 \cdot \sigma \cdot T_{mn}^3 \quad (2.21)$$

$$h_{r0,varm} = 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 289,5K = 5,505 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.21)$$

$h_{r0}$  og emissivitet er brukt til å finne  $h_r$  i formel (2.20)

$$h_{r,varm} = \varepsilon \cdot h_{r0} \quad (2.20)51$$

$$h_{r,varm} = 0,9 \cdot \frac{5,505W}{m^2 \cdot K} \quad (2.20)$$

$h_c$  er valgt satt til  $2,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  for horisontal varmeklyt i henhold til standarden, og lik  $h_{ci}$ .

$$h_c = h_{ci} \quad (2.22)$$

$$2,5 \frac{W}{m^2 \cdot K} = h_{ci} \quad (2.22)$$

Under vises utregning av  $R_{si}$  med formel(2.19) og resultater fra (2.22) og (2.20)

$$R_{si} = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (2.19)$$

$$R_{si} = \frac{1}{2,5 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 5,505 \frac{W}{m^2 \cdot K}} = 0,134 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.19)$$

Resultat fra (2.21) med  $T_{mn,kald}$

$$h_{r0kald} = 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 255,2K = 3,772 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.21)$$

Utrekning av (2.20) , med resultat fra (2.21) for kald side.

$$h_r = 0,9 \cdot 5,714 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 3,394 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.20)$$

Utrekning av (2.24) med gjennomsnittlig lufthastighet etter 4 timer, fra manuell måling.

$$h_{ce} = (4 + 4 \cdot 0,507) \frac{W}{m^2 \cdot K} = 6,029 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.24)$$

Uterning av  $h_c$  med formel (2.23) med resultat fra formel (2.24)

$$h_c = 6,029 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.23)$$

Utrekning av  $R_{se}$  i formel (2.19) med resultater fra (2.20) og (2.24).

$$R_{se} = \frac{1}{6,029 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 3,394 \frac{W}{m^2 \cdot K}} = 0,106 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.19)$$

Resultat for beregning av  $R_{si}$  og  $R_{se}$ , med observert temperaturer og lufthastighet.

Tabell 5.7: Resultat for beregning av  $R_{si}$  og  $R_{se}$

| Isolasjonstype | $R_{si}$                      | $R_{se}$                      |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Rockwool       | $0,134 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ | $0,106 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ |
| Trefiber       | $0,132 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ | $0,105 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ |
| Glava          | $0,134 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ | $0,106 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ |

### 5.3.2. Rockwool

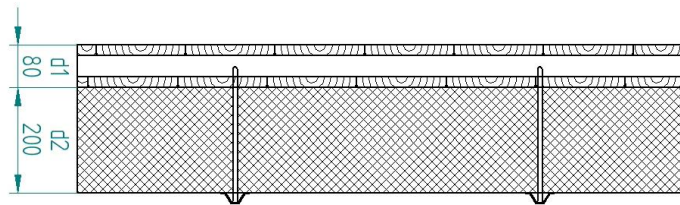


Fig. 5.2: Snitt, konstruksjon med Rockwool

Fig. 5.2 viser et snitt av testvegg med Rockwool, der  $d_1$  viser tykkelsen på massivtreelementet og  $d_2$  viser tykkelsen på isolasjonen.

Tabell 5.8: Verdier, konstruksjon med Rockwool

| Enhet                 | Verdi                      | Beskrivelse                 |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|
| $\lambda_{massivtre}$ | $0,12 \frac{W}{m \cdot K}$ | Varmeledningsevne massivtre |
| $\lambda_{rockwool}$  | $0,33 \frac{W}{m \cdot K}$ | Varmeledningsevne Rockwool  |
| $\lambda_{skrue}$     | $30 \frac{W}{m \cdot K}$   | Varmeledningsevne skrue     |
| $d_1$                 | $0,08m$                    | Tykkelse massivtre          |
| $d_2$                 | $0,2m$                     | Tykkelse Rockwool           |
| $n_f$                 | 2                          | Antall skruer               |
| $d_0$                 | $0,2m$                     | Penetreringsdybde skrue     |
| $A_f$                 | $5,027 \cdot 10^{-6} m^2$  | Tverrsnittsarealet skrue    |

$R_1$  regnes ut ved bruk av formel (2.3), der  $d_1$  og  $\lambda_{massivtre}$  hentes fra Tabell 5.8.

$$R_1 = \frac{d_1}{\lambda_{massivtre}} \quad (2.3)$$

$$R_1 = \frac{0,08m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} = 0,667 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.3)$$

$R_2$  regnes ut ved bruk av formel (2.3), der  $d_2$  og  $\lambda_{rockwool}$  hentes fra Tabell 5.8.

$$R_2 = \frac{d_2}{\lambda_{rockwool}} \quad (2.3)$$

$$R_2 = \frac{0,2m}{0,033 \frac{W}{m \cdot K}} = 6,061 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.3)$$

$R_{total}$  regnes ut ved bruk av formel (2.4), der  $R_{si}$  og  $R_{se}$  hentes fra Tabell 5.7.

$$R_{total} = R_{si} + R_1 + R_2 + R_{se} \quad (2.4)$$

$$R_{total} = (0,134 + 0,667 + 6,061 + 0,106) \frac{m^2 \cdot K}{W} = 6,967 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.4)$$

$U$  regnes ut ved bruk av formel (2.1).

$$U = \frac{1}{R_{total}} \left( \frac{W}{m^2} \cdot K \right) \quad (2.1)$$

$$U = \frac{1}{6,966 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 0,144 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.1)$$

Justering for mekaniske festemiddel,  $\Delta U_f$ , regnes ut ved bruk av formel (2.15).  $\lambda_f$  hentes fra Tabell 4.2.  $A_f$  og  $n_f$  hentes fra Tabell 5.8.

$$\Delta U_f = \alpha \cdot \frac{\lambda_f \cdot A_f \cdot n_f}{d_1} \cdot \left( \frac{R_1}{R_{total}} \right)^2 \quad (2.15)52$$

$$\Delta U_f = 0,8 \cdot \left( \frac{30 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 5,027 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 2}{0,2} \right) \cdot \left( \frac{6,061}{6,967} \right)^2 = 0,00913 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.15)$$

Justering av U-verdi for ikke planlagte luftrom,  $\Delta U_g$ , regnes ut ved hjelp av (2.13).  $\Delta U'' = 0,01$  grunnet ett lag isolasjon.

$$\Delta U_g = \Delta U'' \cdot \left( \frac{R_1}{R_{total}} \right)^2 \quad (2.13)53$$

$$\Delta U_g = 0,01 \cdot \left( \frac{6,061}{6,967} \right)^2 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 0,00757 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.13)$$

Korrigert U-verdi,  $U_c$ , regnes ved hjelp av en kombinasjon av (2.17) og (2.18).

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (2.17)54$$

$$U_c = U + \Delta U \quad (2.18)55$$

$$U_c = 0,144 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 0,00913 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 0,00757 \frac{W}{m^2 \cdot K} = \mathbf{0,160} \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.18)$$

### 5.3.3. Trefiber

Tabell 5.9: Verdier, konstruksjon med trefiber

| Enhet                 | Verdi                       |
|-----------------------|-----------------------------|
| $\lambda_{trefiber}$  | $0,038 \frac{W}{m \cdot K}$ |
| $\lambda_{asfalt}$    | $0,05 \frac{W}{m \cdot K}$  |
| $\lambda_{massivtre}$ | $0,12 \frac{W}{m \cdot K}$  |
| $\lambda_{stender}$   | $0,12 \frac{W}{m \cdot K}$  |
| $d_1$                 | 0,08m                       |
| $d_2$                 | 0,1m                        |
| $d_3$                 | 0,1m                        |
| $d_4$                 | 0,012m                      |
| $b_{total}$           | 1,160m                      |
| $b_{stender}$         | 0,048m                      |
| $n_{stender}$         | 2                           |

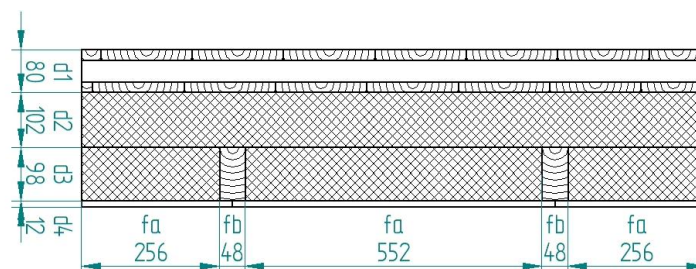


Fig. 5.3: Snitt, konstruksjon med trefiber

Fig. 5.3 viser et snitt av testvegg med Trefiber, der  $f_a$  og  $f_b$  er arealandeler, med utregninger under.  $d_1 - d_4$  er tykkelsen på materialene.

$$f_a = \frac{b_{total} - (n_{stender} \cdot b_{stender})}{b_{total}}$$

$$f_a = \frac{1,16m - (2 \cdot 0,048m)}{1,16m} = 0,917$$

$$f_b = \frac{b_{stender} \cdot n_{stender}}{b_{total}}$$

$$f_b = \frac{0,048m \cdot 2}{1,16m} = 0,083$$

$R_{total,fa}$  og  $R_{total,fb}$  regnes ut ved formel (2.5). Der  $d_1 - d_4$  og  $\lambda$  – verdiene er hentet fra Tabell 5.9.  $R_{si}$  og  $R_{se}$  er hentet fra Tabell 5.7.

$$R_{total,fa} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{massivtre}} + \frac{d_2 + d_3}{\lambda_{trefiber}} + \frac{d_4}{\lambda_{asfalt}} + R_{se} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} R_{total,fa} &= 0,132 \frac{W}{m \cdot K} + \frac{0,08m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,1m + 0,1m}{0,038 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,012m}{0,05 \frac{W}{m \cdot K}} + 0,105 \frac{W}{m \cdot K} \\ &= 6,407 \frac{m^2 \cdot K}{W} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$R_{total,fb} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{massivtre}} + \frac{d_2}{\lambda_{trefiber}} + \frac{d_3}{\lambda_{stender}} + \frac{d_4}{\lambda_{asfalt}} + R_{se} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} R_{total,fb} &= 0,132 \frac{W}{m \cdot K} + \frac{0,08}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,1m}{0,038 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,1m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,012m}{0,05 \frac{W}{m \cdot K}} \\ &+ 0,105 \frac{W}{m \cdot K} = 4,609 \frac{m^2 \cdot K}{W} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Øvre grense,  $R_{total,\overline{v}}$ , regnes ut ved formel (2.10). der  $f_a$ ,  $f_b$ ,  $R_{total,fa}$  og  $R_{total,fb}$  kommer fra utregningene over.

$$R_{total,\overline{v}} = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{total,fa}} + \frac{f_b}{R_{total,fb}}} \quad (2.10)$$

$$R_{total,\overline{v}} = \frac{1}{\frac{0,917}{6,407 \frac{m^2 \cdot K}{W}} + \frac{0,083}{4,609 \frac{m^2 \cdot K}{W}}} = 6,206 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.10)$$

Varmekonduktivitetene  $\lambda_{ekv,1} - \lambda_{ekv,4}$  regnes ut ved formel (2.8). Kjente  $\lambda$  – verdier er hentet fra Tabell 5.9 og  $f_a$  og  $f_b$  er arealandelene vist på Fig. 5.3.

$$\lambda_{ekv,1} = \lambda_{massivtre} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,1} = 0,12 \frac{W}{m \cdot K} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,2} = \lambda_{trefiber} \cdot f_a + \lambda_{stender} \cdot f_b \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,2} = 0,038 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 0,917 + 0,12 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 0,083 = 0,045 \frac{W}{m \cdot K} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,3} = \lambda_{trefiber} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,3} = 0,038 \frac{W}{m \cdot K} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,4} = \lambda_{asfalt} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,4} = 0,05 \frac{W}{m \cdot K} \quad (2.8)$$

$R_{1,nedre} - R_{4,nedre}$  regnes ut ved formel (2.7), der  $\lambda_{ekv,1} - \lambda_{ekv,4}$  kommer fra utregningene over og  $d_1 - d_4$  er hentet fra Tabell 5.9.

$$R_{1,nedre} = \frac{d_1}{\lambda_{ekv,1}} \quad (2.7)$$

$$R_{1,nedre} = \frac{0,08m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} = 0,667 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.7)$$

$$R_{2,nedre} = \frac{d_2}{\lambda_{ekv,1}} \quad (2.7)$$

$$R_{2,nedre} = \frac{0,1}{0,049 \frac{W}{m \cdot K}} = 2,23 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.7)$$

$$R_{3,nedre} = \frac{d_3}{\lambda_{ekv,3}} \quad (2.7)$$

$$R_{3,nedre} = \frac{0,1m}{0,038 \frac{W}{m \cdot K}} = 2,63 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.7)$$

$$R_{4,nedre} = \frac{d_4}{\lambda_{ekv,4}} \quad (2.7)$$

$$R_{4,nedre} = \frac{0,012m}{0,05 \frac{W}{m \cdot K}} = 0,24 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.7)$$

Nedre grense,  $R_{total,nedre}$ , regnes ut ved formel (2.4), der  $R_{1,nedre} - R_{4,nedre}$  kommer fra utregningene over og  $R_{si}$  og  $R_{se}$  er hentet fra Tabell 5.7.

$$R_{total,nedre} = R_{se} + R_{1,nedre} + R_{2,nedre} + R_{3,nedre} + R_{4,nedre} + R_{si} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} R_{total,nedre} &= 0,105 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 0,667 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 2,23 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 2,63 \frac{m^2 \cdot K}{W} \\ &+ 0,24 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 0,132 \frac{m^2 \cdot K}{W} = 6,008 \frac{m^2 \cdot K}{W} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Total termisk motstand,  $R_{total}$ , regnes ut ved formel (2.11), der  $R_{total,øvre}$  og  $R_{total,nedre}$  kommer fra utregningene over.

$$R_{total} = \frac{R_{total,øvre} + R_{total,nedre}}{2} \quad (2.11)$$

$$R_{total} = \frac{6,206 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 6,008 \frac{m^2 \cdot K}{W}}{2} = 6,107 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.11)$$

U-verdi,  $U_{vegg,trefiber}$ , regnes ut ved formel (2.1), der  $R_{total}$  kommer fra utregningene over.

$$U_{vegg,trefiber} = \frac{1}{R_{total}} \quad (2.1)$$

$$U_{vegg,trefiber} = \frac{1}{6,107 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 0,164 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.1)$$

Feilmargin for total varmegjennomgangskoeffisient,  $e$ , regnes ut ved formel (2.12).

$$e = \frac{R_{total,øvre} - R_{total,nedre}}{2 \cdot R_{total}} \quad (2.12)$$

$$e = \frac{6,206 \frac{m^2 \cdot K}{W} - 6,008 \frac{m^2 \cdot K}{W}}{2 \cdot 6,108 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 1,62\% \quad (2.12)$$

### 5.3.4. Glava

Tabell 5.10: Verdier, konstruksjon med Glava

| Enhet                 | Verdi                       |
|-----------------------|-----------------------------|
| $\lambda_{Glava}$     | $0,034 \frac{W}{m \cdot K}$ |
| $\lambda_{asfalt}$    | $0,05 \frac{W}{m \cdot K}$  |
| $\lambda_{massivtre}$ | $0,12 \frac{W}{m \cdot K}$  |
| $\lambda_{stender}$   | $0,12 \frac{W}{m \cdot K}$  |
| $b_{flens}$           | $0,048m$                    |
| $b_{steg}$            | $0,001m$                    |
| $n_{stender}$         | 2                           |
| $d_1$                 | $0,080m$                    |
| $d_2$                 | $0,048m$                    |
| $d_3$                 | $0,104m$                    |
| $d_4$                 | $0,048m$                    |
| $d_5$                 | $0,012m$                    |

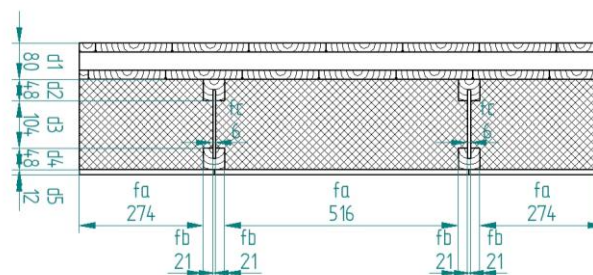


Fig. 5.4: Snitt, konstruksjon med Glava

Fig. 5.4 viser et snitt av testvegg med Trefiber, der  $f_a$ ,  $f_b$  og  $f_c$  er arealandeler, med utregninger vist under.  $d_1 - d_5$  er tykkelsen på materialene.

$$f_a = \frac{b_{total} - n_{stender} \cdot b_{flens}}{b_{total}} = \frac{1,160m - 2 \cdot 0,048m}{1,160m} = 0,917$$

$$f_b = \frac{(b_{flens} - b_{steg}) \cdot n_{stender}}{b_{total}} = \frac{(0,048m - 0,006m) \cdot 2}{1,160m} = 0,072$$

$$f_c = \frac{b_{steg} \cdot n_{stender}}{b_{total}} = \frac{0,006m \cdot 2}{1,160m} = 0,01$$

Utgangspunkt av øvre grense

$R_{total,fa}$ ,  $R_{total,fb}$  og  $R_{total,fc}$  regnes ut ved formel (2.5). Der  $d_1 - d_5$  og  $\lambda$  – verdiene er hentet fra Tabell 5.10.  $R_{si}$  og  $R_{se}$  er hentet fra Tabell 5.7.

$$R_{total,fa} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{massivtre}} + \frac{d_2 + d_3 + d_4}{\lambda_{glava}} + \frac{d_5}{\lambda_{asfalt}} + R_{se} \quad (2.5)$$

$$R_{total,fa} = 0,134 \frac{m^2 \cdot K}{W} + \frac{0,08m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,048m + 0,104m + 0,048m}{0,034 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,012m}{0,05 \frac{W}{m \cdot K}} + 0,106 \frac{m^2 \cdot K}{W} = 7,027 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.5)$$

$$R_{total,fb} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{massivtre}} + \frac{d_2}{\lambda_{I,felns}} + \frac{d_3}{\lambda_{glava}} + \frac{d_4}{\lambda_{I,felns}} + \frac{d_5}{\lambda_{asfalt}} + R_{se} \quad (2.5)$$

$$R_{total,fb} = 0,134 \frac{m^2 \cdot K}{W} + \frac{0,08m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,048m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,104m}{0,034 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,048m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,012m}{0,05 \frac{W}{m \cdot K}} + 0,106 \frac{m^2 \cdot K}{W} = 5,005 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.5)$$

$$R_{total,fc} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{massivtre}} + \frac{d_2}{\lambda_{I,felns}} + \frac{d_3}{\lambda_{I,steg}} + \frac{d_4}{\lambda_{I,felns}} + \frac{d_5}{\lambda_{asfalt}} + R_{se} \quad (2.5)$$

$$R_{total,fc} = 0,134 \frac{m^2 \cdot K}{W} + \frac{0,08m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,048m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,104m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,048m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,012m}{0,05 \frac{W}{m \cdot K}} + 0,106 \frac{m^2 \cdot K}{W} = 2,813 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.5)$$

Øvre grense,  $R_{total,\overline{v}}$ , regnes ut ved formel (2.10). Der  $f_a$ ,  $f_b$ ,  $f_c$ ,  $R_{total,fa}$ ,  $R_{total,fb}$  og  $R_{total,fc}$  kommer fra utregningene over.

$$R_{total,\overline{v}} = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{total,fa}} + \frac{f_b}{R_{total,fb}} + \frac{f_c}{R_{total,fc}}} \quad (2.10)$$

$$R_{total,\overline{v}} = \frac{1}{\frac{0,917}{7,029 \frac{m^2 \cdot K}{W}} + \frac{0,072}{5,005 \frac{m^2 \cdot K}{W}} + \frac{0,01}{2,813 \frac{m^2 \cdot K}{W}}} = 6,728 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.10)$$

Varmekonduktivitetene  $\lambda_{ekv,1} - \lambda_{ekv,5}$  regnes ut ved formel (2.8). Kjente  $\lambda$  – verdier er hentet fra *Tabell 5.10* og  $f_a$ ,  $f_b$  og  $f_c$  er arealandelene vist på Fig. 5.4.

$$\lambda_{ekv,1} = \lambda_{massivtre} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,1} = 0,12 \frac{W}{m \cdot K} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,2} = \lambda_{glava} \cdot f_a + \lambda_{I,flens} \cdot (f_b + f_c) \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,2} = 0,034 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 0,917 + 0,12 \frac{W}{m \cdot K} \cdot (0,072 + 0,010) = 0,041 \frac{W}{m \cdot K} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,3} = \lambda_{glava} \cdot (f_a + f_b) + \lambda_{I,steg} \cdot f_c \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,3} = 0,034 \frac{W}{m \cdot K} \cdot (0,917 + 0,072) + 0,12 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 0,010 = 0,035 \frac{W}{m \cdot K} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,4} = \lambda_{glava} \cdot f_a + \lambda_{I,flens} \cdot (f_b + f_c) \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,4} = 0,034 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 0,917 + 0,12 \frac{W}{m \cdot K} \cdot (0,072 + 0,010) = 0,041 \frac{W}{m \cdot K} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,5} = \lambda_{asfalt} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ekv,5} = 0,05 \frac{W}{m \cdot K} \quad (2.8)$$

$R_{1,nedre} - R_{5,nedre}$  regnes ut ved formel (2.7), der  $\lambda_{ekv,1} - \lambda_{ekv,5}$  kommer fra utregningene over og  $d_1 - d_5$  er hentet fra *Tabell 5.10*.

$$R_{1,nedre} = \frac{d_1}{\lambda_{ekv,1}} \quad (2.7)$$

$$R_{1,nedre} = \frac{0,08m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} = 0,667 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.7)$$

$$R_{2,nedre} = \frac{d_2}{\lambda_{ekv,2}} \quad (2.7)$$

$$R_{2,nedre} = \frac{0,048m}{0,041 \frac{W}{m \cdot K}} = 1,17 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.7)$$

$$R_{3,nedre} = \frac{d_3}{\lambda_{ekv,3}} \quad (2.7)$$

$$R_{3,nedre} = \frac{0,104m}{0,035 \frac{W}{m \cdot K}} = 2,98 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.7)$$

$$R_{4,nedre} = \frac{d_4}{\lambda_{ekv,4}} \quad (2.7)$$

$$R_{4,nedre} = \frac{0,048m}{0,041 \frac{W}{m \cdot K}} = 1,17 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.7)$$

$$R_{5,nedre} = \frac{d_5}{\lambda_{ekv,5}} \quad (2.7)$$

$$R_{5,nedre} = \frac{0,012m}{0,05 \frac{W}{m \cdot K}} = 0,24 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.7)$$

Nedre grense,  $R_{total,nedre}$ , regnes ut ved formel (2.4), der  $R_{1,nedre} - R_{5,nedre}$  kommer fra utregningene over og  $R_{si}$  og  $R_{se}$  er hentet fra Tabell 5.7.

$$R_{total,nedre} = R_{si} + R_{1,nedre} + R_{2,nedre} + R_{3,nedre} + R_{4,nedre} + R_{5,nedre} + R_{se} \quad (2.4)$$

$$R_{total,nedre} = 0,134 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 0,667 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 1,17 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 2,98 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 1,17 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 0,24 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 0,106 \frac{m^2 \cdot K}{W} = 6,462 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.4)$$

Total termisk motstand,  $R_{total}$ , regnes ut ved formel (2.11), der  $R_{total,\overline{v}}re$  og  $R_{total,nedre}$  kommer fra utregningen over.

$$R_{total} = \frac{R_{total,\overline{v}}re + R_{total,nedre}}{2} \quad (2.11)$$

$$R_{total} = \frac{6,728 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 6,462 \frac{m^2 \cdot K}{W}}{2} = 6,595 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.11)$$

U-verdi,  $U_{vegg,glava}$ , regnes ut ved formel (2.1), der  $R_{total}$  kommer fra utregningene over.

$$U_{vegg,glava} = \frac{1}{R_{total}} \quad (2.1)$$

$$U_{vegg,glava} = \frac{1}{6,595 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 0,152 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.1)$$

Feilmargin for total varmegjennomgangskoeffisient,  $e$ , regnes ut ved formel (2.12)

$$e = \frac{R_{total,\overline{v}}re - R_{total,nedre}}{2 \cdot R_{total}} \quad (2.12)$$

$$e = \frac{6,726 \frac{m^2 \cdot K}{W} - 6,462 \frac{m^2 \cdot K}{W}}{2 \cdot 6,595 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 2,01\% \quad (2.12)$$

Justering av U-verdi for ikke planlagte luftrom,  $\Delta U_g$ , regnes ut ved hjelp av formel (2.13).  $\Delta U'' = 0,01$  grunnet et lag isolasjon.

$$\Delta U_g = \Delta U'' \cdot \left( \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_{total}} \right)^2 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.13)$$

$$\Delta U_g = 0,01 \cdot \left( \frac{1,17 + 2,98 + 1,17}{6,595} \right)^2 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 0,0065 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.13)$$

Korrigert U-verdi,  $U_c$ , regnes ved hjelp av en kombinasjon av (2.17) og (2.18).

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (2.17)56$$

$$U_c = U + \Delta U \quad (2.18)57$$

$$U_c = 0,152 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 0,0065 \frac{W}{m^2 \cdot K} = \mathbf{0,158} \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.18)$$

### 5.3.5. Vakuum panel

*Tabell 5.11 Verdier, teoretisk konstruksjon med Vakuumisolasjonspanel*

| Enhet                 | Verdi                       | Beskrivelse                    |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| $\lambda_{massivtre}$ | $0,12 \frac{W}{m \cdot K}$  | Varmekonduktivitet massivtre   |
| $\lambda_{vakuum}$    | $0,008 \frac{W}{m \cdot K}$ | Varmekonduktivitet vakuumpanel |
| $d_1$                 | $0,08m$                     | Tykkelse massivtre             |
| $d_2$                 | $0,04m$                     | Tykkelse Vakuumpanel           |

$R_1$  regnes ut ved formel (2.3), der  $d_1$  og  $\lambda_{massivtre}$  hentes fra Tabell 5.11

$$R_1 = \frac{d_1}{\lambda_{massivtre}} \quad (2.3)$$

$$R_1 = \frac{0,08m}{0,12 \frac{W}{m \cdot K}} = 0,667 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.3)$$

$R_2$  regnes ut ved formel (2.3), der  $d_2$  og  $\lambda_{vakuum}$  hentes fra Tabell 5.11

$$R_2 = \frac{d_2}{\lambda_{vakuum}} \quad (2.3)$$

$$R_2 = \frac{0,04m}{0,008 \frac{W}{m \cdot K}} = 5,000 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.3)$$

$R_{total}$  regnes ut ved bruk av formel (2.4), der  $R_{si}$  og  $R_{se}$  hentes fra Tabell 5.11

$$R_{total} = R_{si} + R_1 + R_2 + R_{se} \quad (2.4)$$

$$R_{total} = (0,134 + 0,667 + 5,000 + 0,106) \frac{m^2 \cdot K}{W} = 5,907 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.4)$$

$U$  regnes ut ved bruk av (2.1).

$$U = \frac{1}{R_{total}} \left( \frac{W}{m^2} \cdot K \right) \quad (2.1)$$

$$U = \frac{1}{5,907 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 0,169 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.1)$$

Justering av  $U$ -verdi for ikke planlagte luftrom,  $\Delta U_g$ , regnes ut ved hjelp av (2.13).  $\Delta U'' = 0,01$  grunnet et lag isolasjon.

$$\Delta U_g = \Delta U'' \cdot \left( \frac{R_1}{R_{total}} \right)^2 \quad (2.13)$$

$$\Delta U_g = 0,01 \cdot \left( \frac{5,000}{5,907} \right)^2 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 0,00717 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.13)$$

Korrigert  $U$ -verdi,  $U_c$ , regnes ved hjelp av en kombinasjon av (2.17) og (2.18).

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (2.17)$$

$$U_c = U + \Delta U \quad (2.18)58$$

$$U_c = 0,169 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 0,00717 \frac{W}{m^2 \cdot K} = \mathbf{0,176 \frac{W}{m^2 \cdot K}} \quad (2.18)$$

## 5.4. Korreksjoner

### 5.4.1. Korreksjon for varmeflyt gjennom veggene til beskyttet kammer.

Tabell 5.12 Korreksjon for varmeflyt

| Symbol                | Verdi                        | Beskrivelse                               |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| $d_{xps}$             | 0,1m                         | Tykkelse vegg, tak og gulv                |
| $\lambda_{xps}$       | $0,0285 \frac{W}{m \cdot K}$ | Varmedningsevne xps                       |
| $A_{sidevegg}$        | $1,298m^2$                   | Areal sidevegg                            |
| $A_{front}$           | $1,513m^2$                   | Areal front                               |
| $A_{tak}$             | $1,298m^2$                   | Areal tak                                 |
| $A_{gulv}$            | $1,298m^2$                   | Areal gulv                                |
| $\Delta_{t,rockwool}$ | 2,8K                         | Temperaturdifferanse Rockwool             |
| $\Delta_{t,trefiber}$ | 2,7K                         | Temperaturdifferanse Trefiber             |
| $\Delta_{t,glava}$    | 2,4K                         | Temperaturdifferanse Glava                |
| $R_{si,hor}$          | $0,13m^2K/W$                 | Innvendig overgangsmotstand horisontal    |
| $R_{si,vert,opp}$     | $0,10m^2K/W$                 | Innvendig overgangsmotstand vertikal, opp |
| $R_{si,vert,ned}$     | $0,17m^2K/W$                 | Innvendig overgangsmotstand vertikal, ned |

Disse utregningen viser korreksjon for en måling, det er gjentatt for alle målinger i vedlegg 1.

$R_{xps}$ , regnes ut ved bruk av formel (2.3), der  $d_{xps}$  og  $\lambda_{xps}$  er hentet fra Tabell 5.12.

$$R_{xps} = \frac{d_{xps}}{\lambda_{xps}} \left( \frac{W}{m \cdot K} \right) \quad (2.3)$$

$$R_{xps} = \frac{0,1m}{0,0285 \frac{W}{m \cdot K}} = 3,509 \frac{W}{m \cdot K} \quad (2.3)$$

$R_{total,hor}$ , regnes ut ved bruk av formel (2.4), der  $R_{si,hor}$  og  $R_{si,hor}$  er hentet fra Tabell 5.12.

$$R_{total,hor} = R_{si,hor} + R_{xps} + R_{si,hor} \left( \frac{m^2K}{W} \right) \quad (2.4)$$

$$R_{total,hor} = 0,13 \frac{m^2K}{W} + 3,509 \frac{m^2K}{W} + 0,13 \frac{m^2K}{W} = 3,769 \frac{m^2K}{W} \quad (2.4)$$

$R_{total,vert}$ , regnes ut ved bruk av formel (2.4), der  $R_{si,vert,opp}$  og  $R_{si,vert,ned}$  er hentet fra Tabell 5.12.

$$R_{\text{total,vert}} = R_{\text{si,vert,opp}} + R_{\text{xps}} + R_{\text{si,vert,ned}} \left( \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) \quad (2.4)$$

$$R_{\text{total,vert}} = 0,10 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 3,509 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 0,17 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 3,779 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (2.4)$$

$Q_{\text{vegg}}$ , regnes ut ved bruk av formel (2.27). der arealene og  $\Delta_{t,\text{rockwool}}$  er hentet fra Tabell 5.12

$$Q_{\text{vegg}} = \frac{(A_{\text{sidevegg}} + A_{\text{sidevegg}} + A_{\text{front}})(\Delta_{t,\text{rockwool}})}{R_{\text{total,hor}}} (W) \quad (2.27)$$

$$Q_{\text{vegg}} = \frac{(1,359\text{m}^2 + 1,359\text{m}^2 + 1,513\text{m}^2)(2,8\text{K})}{3,779 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = 3,05\text{W} \quad (2.27)$$

$Q_{\text{tak,gulv}}$ , regnes ut ved bruk av formel (2.27). der arealene og  $\Delta_{t,\text{rockwool}}$  er hentet fra Tabell 5.12

$$Q_{\text{tak,gulv}} = \frac{(A_{\text{sidevegg}} + A_{\text{sidevegg}} + A_{\text{front}})(\Delta_{t,\text{rockwool}})}{R_{\text{total,vert}}} (W) \quad (2.27)$$

$$Q_{\text{tak,gulv}} = \frac{(1,359\text{m}^2 + 1,359\text{m}^2)(2,4\text{K})}{R_{\text{total,vert}}} = 1,92\text{W} \quad (2.27)$$

$Q_{\text{samlet}}$ , regnes ut ved å summere  $Q_{\text{vegg}}$  og  $Q_{\text{tak,gulv}}$ .

$$Q_{\text{samlet}} = 3,05\text{W} + 1,92\text{W} = \mathbf{4,97\text{W}}$$

Tabell 5.13 for under forsøk av de forskjellige veggkonstruksjonene.

Tabell 5.13 Total varmflyt inn i testkammer

| Isolasjon | $Q_{\text{samlet}}$ |
|-----------|---------------------|
| Rockwool  | 4,97W               |
| Trefiber  | 4,79W               |
| Glava     | 4,32W               |

#### 5.4.2. Korreksjon for lineær kuldebro

$U_m$ , regnes ut ved bruk av formel (2.25)., lengde av den lineære kuldeborden langs kanten på kassen, og  $\psi_k$  fra kapittel 2.5.2. Utregninger vist for Rockwool, utregning for de andre materialene er utført i vedlegg 1. Resultat fra utregninger er presentert i Tabell 5.14.

$$U_m = \frac{(U_c \cdot A_{testvegg}) + \psi_k \cdot l_k}{A_{om}} \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \quad (2.25)$$

$$U_m = \frac{\left( 0,160 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 1,16m \cdot 1,16m \right) + 0,02 \frac{W}{m \cdot K} \cdot (1,18m \cdot 4)}{1,2m \cdot 1,2m} \quad (2.25)$$

$$\Delta U_{lineær, kuldebro} = U_m - U_c \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

$$\Delta U_{lineær, kuldebro} = 0,215 \frac{W}{m^2 \cdot K} - 0,160 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 0,055 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Tabell 5.14 Lineære kuldebro

| Isolasjon | $\Delta U_{lineær, kuldebro}$ |
|-----------|-------------------------------|
| Rockwool  | $0,055 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |
| Trefiber  | $0,055 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |
| Glava     | $0,055 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |

### 5.4.3. Bergening av U-verdi med Beskyttet hotbox metode

Kalkulasjoner vist for Rockwool, resultat for resterende veggkonstruksjoner presenteres i Tabell 5.15

Effekt fra varmeelementet og fra temperatur differanse legges samme for å få total effekt inn i testkammeret.

$$Q_{tot} = Q_{samlet} + Q_{varmeelement} \quad (W)$$

$$Q_{tot} = 4,97W + 8W = 12,97W$$

$R_{vegg}$  kalkuleres med formel (2.9) og manuelt målte temperaturer.

$$R_{vegg} = \frac{A_{vegg}(T_{overflate, varm} - T_{overflate, kald})}{Q_{tot}} \quad (2.29)$$

$$R_{vegg} = \frac{1,16m \cdot 1,16m(16,2C - (-16,3C))}{12,97W} = 3,595 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2.29)$$

$$R_{total, vegg} = R_{si} + R_{vegg} + R_{se} \quad \left( \frac{m^2 K}{W} \right) \quad (2.4)$$

$$R_{total, vegg} = 0,134 \frac{m^2 K}{W} + 3,595 \frac{m^2 K}{W} + 0,106 \frac{m^2 K}{W} \quad (2.4)$$

$$U = \frac{1}{R_{total, vegg}} \quad \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \quad (2.1)$$

$$U = \frac{1}{3,60 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 0,261 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.1)$$

$$U_{Beskyttet} = U - \Delta U_{lineær, kuldebro} \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

$$U_{Beskyttet} = 0,261 \frac{W}{m^2 \cdot K} - 0,055 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 0,206 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Tabell 5.15 Resultat fra beskyttet hotbox metode

| Isolasjon | $U_{Beskyttet}$               |
|-----------|-------------------------------|
| Rockwool  | $0,206 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |
| Trefiber  | $0,195 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |
| Glava     | $0,191 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |

#### 5.4.4. Resultater fra hjelpeplatemetoden

Kalkulasjoner er vist for Rockwool, resultat for alle er presenter i Tabell 5.16.

$$R_{mdf} = \frac{d_{mdf}}{\lambda_{mdf}} \left( \frac{m^2 K}{W} \right) \quad (2.3)$$

$$R_{mdf} = \frac{0,006m}{0,15 \frac{W}{m \cdot K}} = 0,04 \frac{m^2 K}{W} \quad (2.3)$$

$$R_{vegg} = \frac{(T_{under,plate} - T_{overflate,kld}) \cdot R_{mdf}}{(T_{over,plate} - T_{under,plate})} \left( \frac{m^2 K}{W} \right) \quad (5.9)$$

$$R_{vegg} = \frac{(16,4 - (-18,4)) \cdot 0,04 \frac{m^2 K}{W}}{(16,9C - 16,4C)} = 3,306 \frac{m^2 K}{W} \quad (5.10)$$

$$R_{total,vegg} = R_{si} + R_{vegg} + R_{se} \left( \frac{m^2 K}{W} \right) \quad (2.4)$$

$$R_{total,vegg} = 0,134 \frac{m^2 K}{W} + 3,306 \frac{m^2 K}{W} + 0,106 \frac{m^2 K}{W} \quad (2.4)$$

$$U_{hjelpeplate} = \frac{1}{R_{total}} \left( \frac{W}{m^2} \cdot K \right) \quad (2.1)$$

$$U_{hjelpeplate} = \frac{1}{3,546 \cdot \frac{m^2 K}{W}} = 0,288 \frac{W}{m^2} \cdot K \quad (2.1)$$

Tabell 5.16 Resultat fra hjelpeplate metode

| Isolasjon               | $U_{hjelpeplate}$             |
|-------------------------|-------------------------------|
| Rockwool, Kontinuerlig  | $0,288 \frac{W}{m^2} \cdot K$ |
| Trefiber, Dobbelt sjikt | $0,277 \frac{W}{m^2} \cdot K$ |
| Glava, I-stender        | $0,275 \frac{W}{m^2} \cdot K$ |

## 5.5. Resultat fra alle testveggene

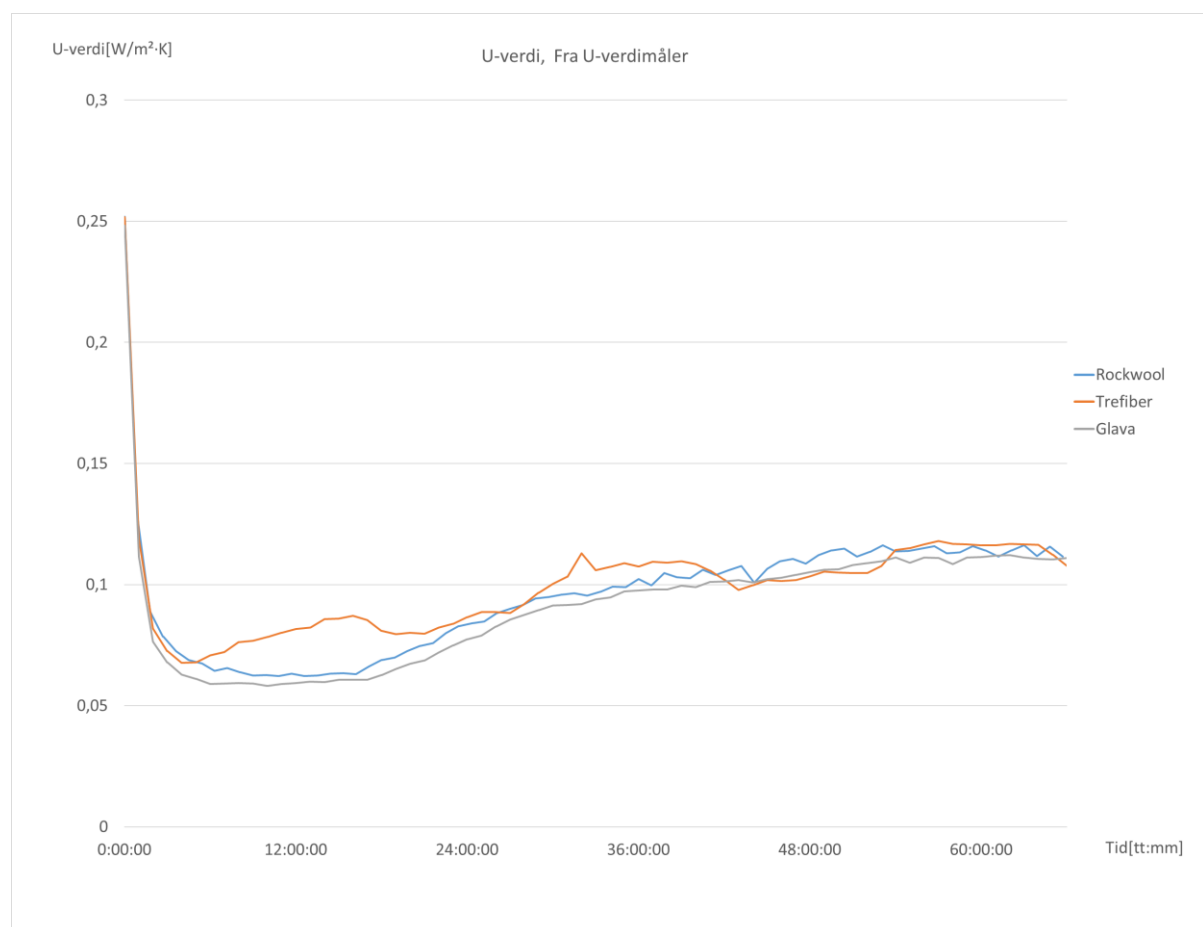


Fig. 5.5: U-verdi fra U-verdimåler

U-verdimåleren ga mulighet til å logge U-verdi over lengere tid. Fig. 5.5 viser de tre testveggene over en periode på rundt 72 timer. Grafen viser at de har brukt lang tid på å stabilisere seg, men at alle har en tendens til å først gå kraftig ned for så å ha en jevn stigning. Grafen er startet når U-verdien passerte  $0,3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ . De individuelle punktene grafen er basert på er gjennom snitt av 15 målinger med et minutt mellom målingene. Tabell 5.17 viser U-verdi for de tre testkonstruksjonen etter U-verdien hadde stabilisert seg, det var etter 58 timer.

Tabell 5.17 Gjennomsnitt, maksimum og minimum U-verdi (58-64 timer), U-verdi måler

|              | Rockwool                      | Trefiber                      | Glava                         |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Gjennomsnitt | $0,114 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $0,117 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $0,111 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |
| Maksimum     | $0,137 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $0,132 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $0,126 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |
| Minimum      | $0,103 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $0,105 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $0,102 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |

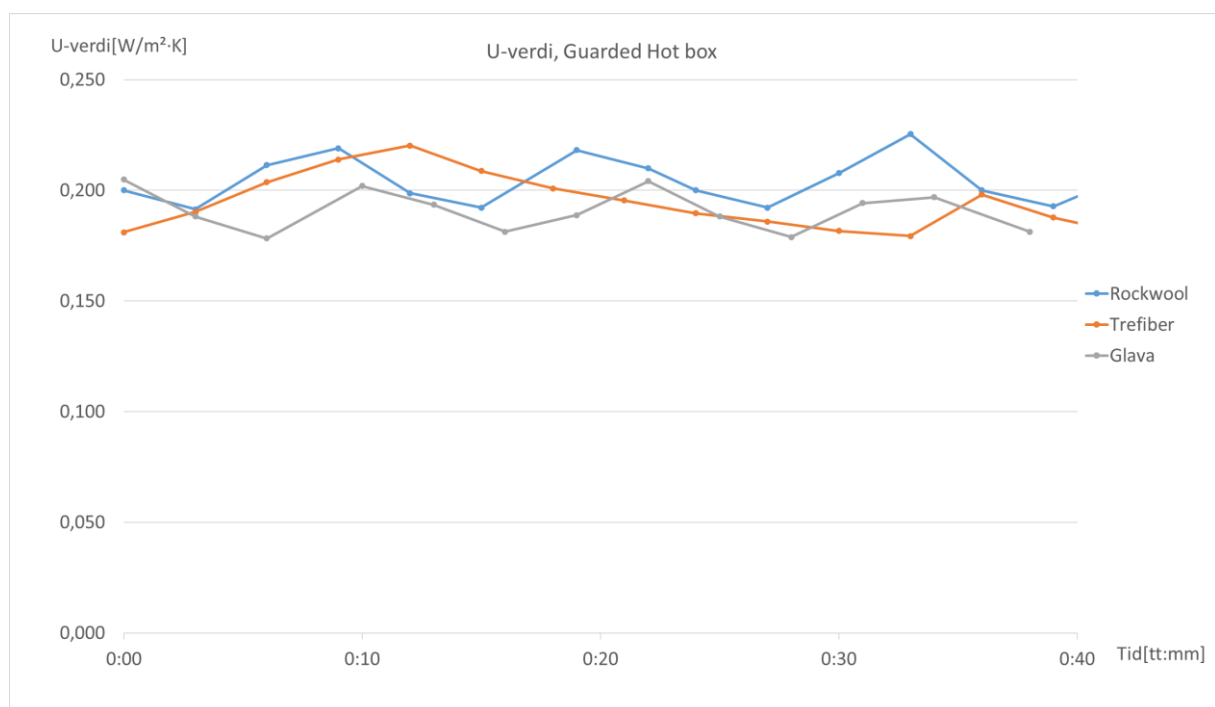


Fig. 5.6: U-verdi fra Guarded hotbox

Fig. 5.6, viser målinger fra Guarded hotbox metoden, som ble utført minimum 64 timer etter igangsetting av kjøleapparat. Grafen viser at det er små variasjoner mellom de ulike isolasjonsløsningene og at det varierer mye over kort tid. Målinger er utført over minimum en 40 minutters periode, med 3 minutters intervall. Tabell 5.18 Gjennomsnitt U-verdi (etter 64 timer), Guarded hotbox metode

Tabell 5.18 Gjennomsnitt U-verdi (etter 64 timer), Guarded hotbox metode

| Rockwool                      | Trefiber                      | Glava                         |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $0,206 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $0,194 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $0,191 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |

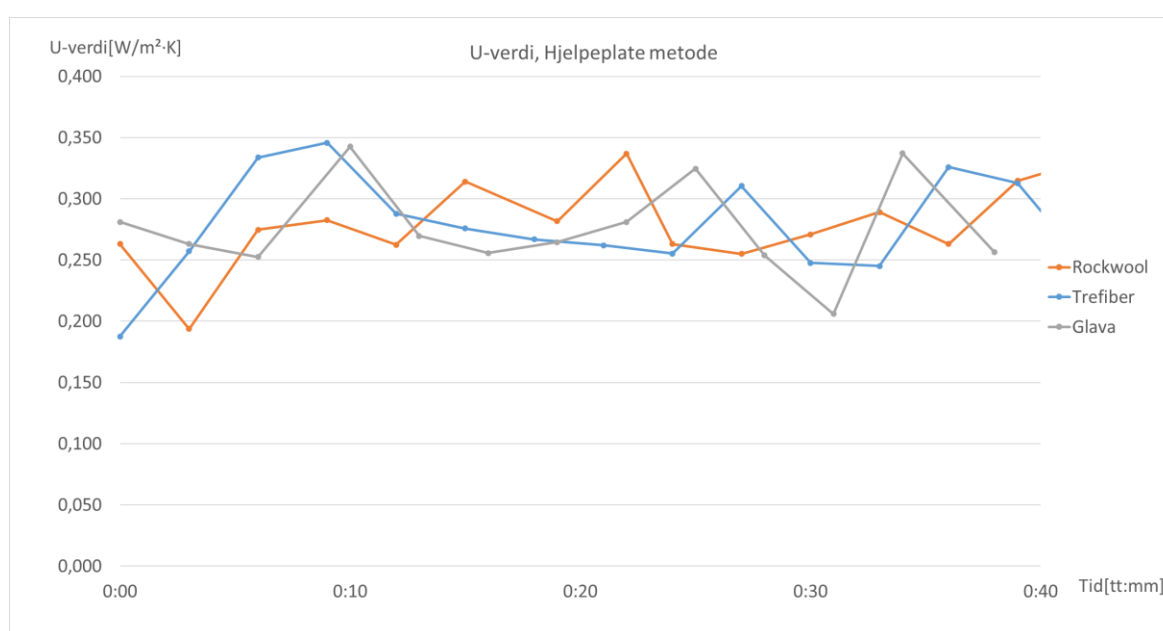


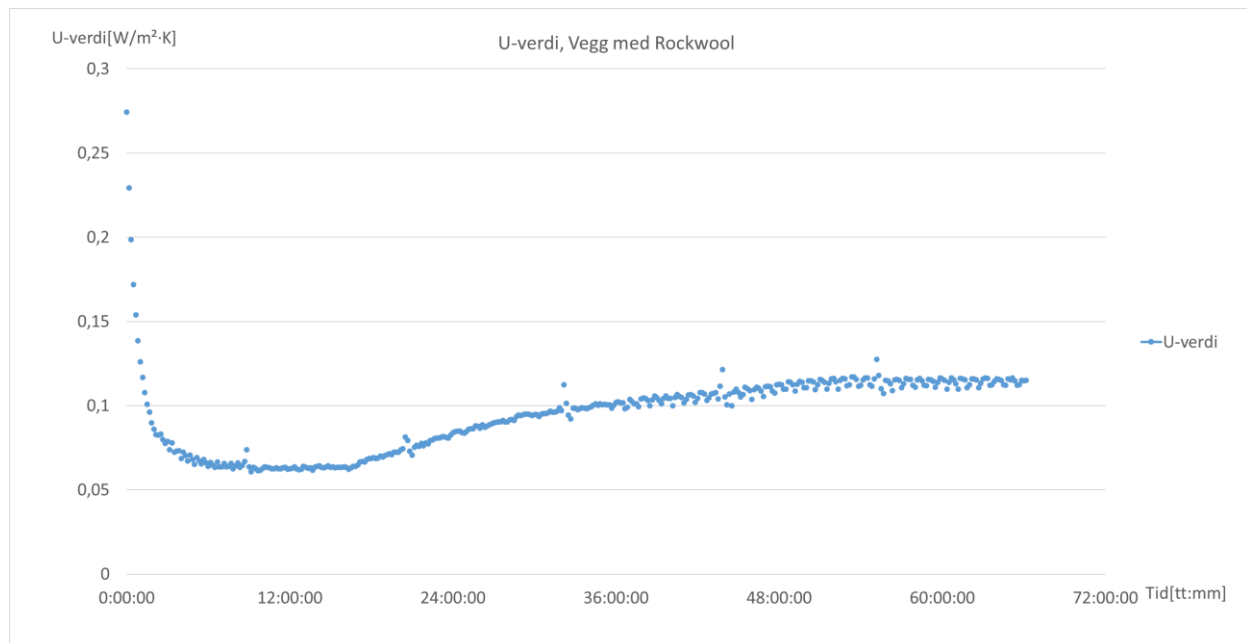
Fig. 5.7 U-verdi fra Hjelpelplatemetoden, kombinert

Fig. 5.7 viser målinger fra Hjelpelplate metoden, som ble utført minimum 64 timer etter igangsetting av kjøleapparat. Grafen viser at det er små variasjoner mellom de ulike isolasjonsløsningene og at det varierer mye over kort tid. Målinger er utført over minimum en 40 minutters periode, med 3 minutters intervall. Tabell 5.18 Gjennomsnitt U-verdi (etter 64 timer), Guarded hotbox metode

Tabell 5.19: Gjennomsnitt U-verdi (etter 64 timer), Hjelpelplatemetode

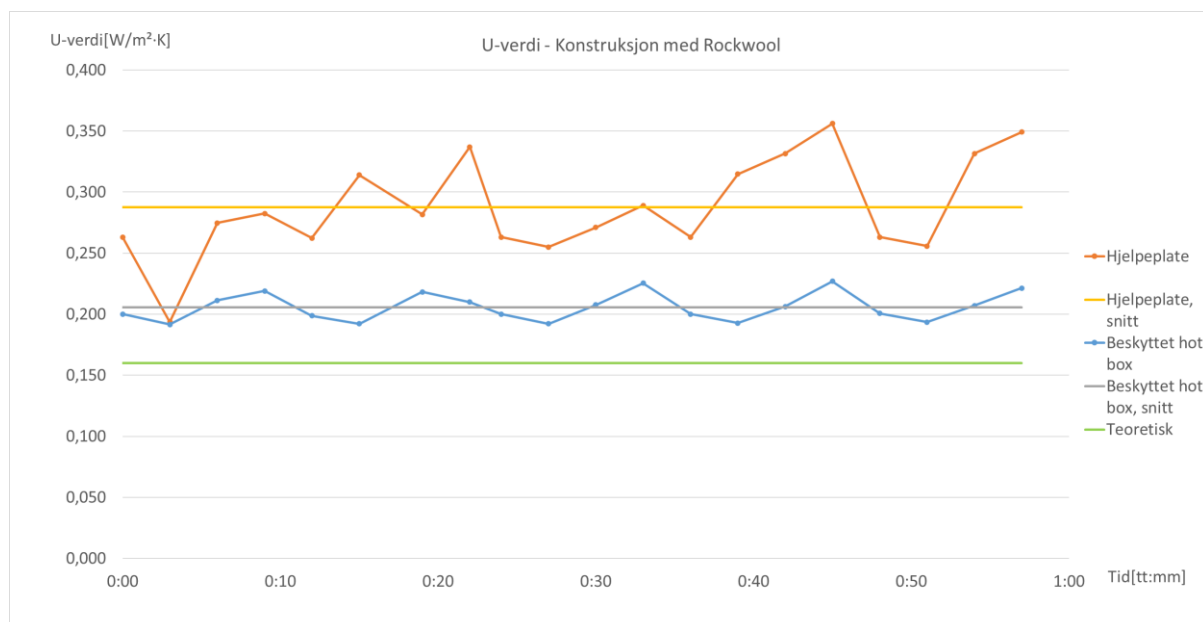
| Rockwool                      | Trefiber                      | Glava                         |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $0,288 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $0,277 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $0,275 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |

## 5.6. Resultater fra test av vegg med Rockwool



*Fig. 5.8: Resultater fra U-verdimåler, Rockwool*

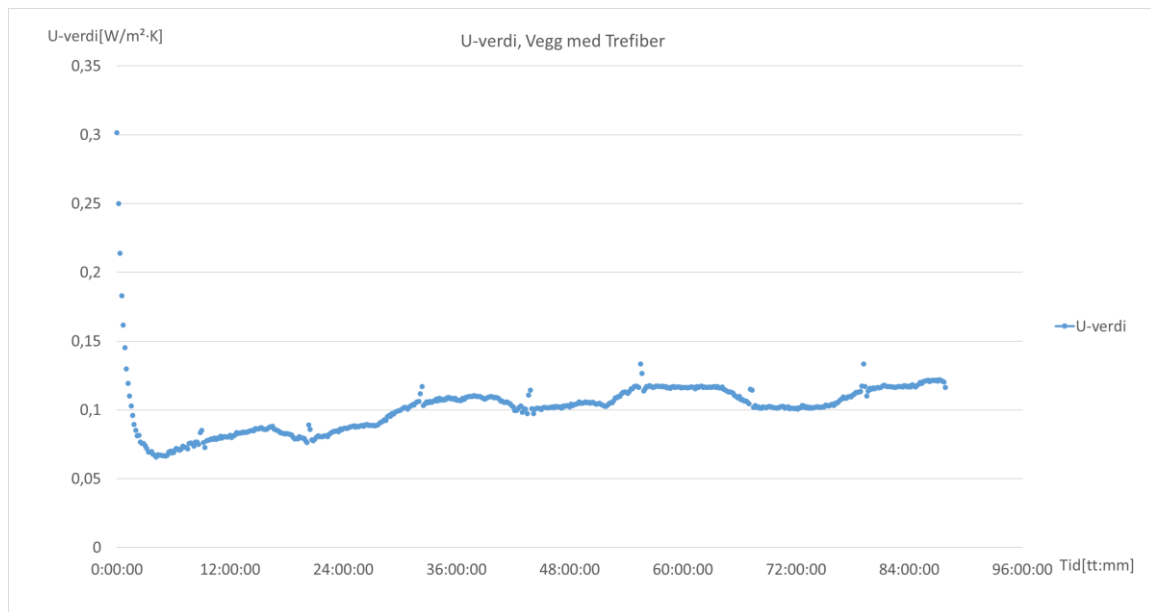
Fig. 5.8 viser U-verdi til testkonstruksjonen med kontinuerlig Rockwool Red Air plater. De avvikende punktene samsvarer med tidspunkt for lengre avrimingsperiode. Punktene er snitt av 15 målinger med et minutt intervall mellom målingene.



*Fig. 5.9: Resultater fra beskyttet hot-box og Hjelpeplatemetoden, Rockwool*

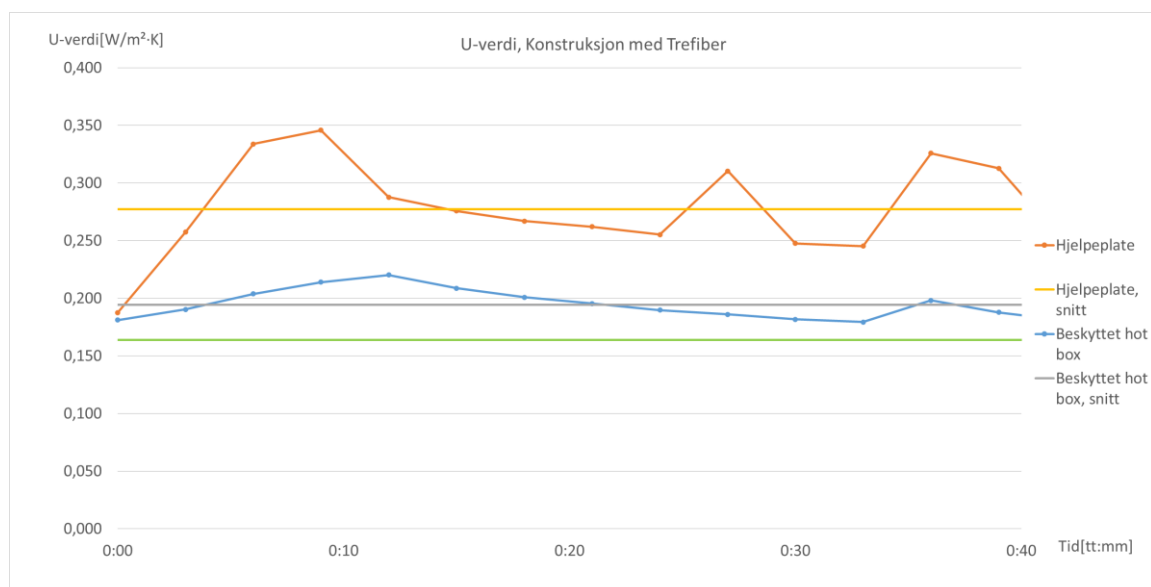
Fig. 5.9 viser resultat for hjelpeplatemetode og beskyttet hotbox metode samt snitt av disse resultatene og teoretisk beregnet verdi. Målingene ble tatt etter minimum 64 timer og varte i en time der det ble tatt måling hvert tredje minutt.

## 5.7. Resultater fra test av vegg med trefiberisolasjon og dobbeltstender.



*Fig. 5.10: Resultater fra U-verdimåler, Trefiber*

Fig. 5.10 viser U-verdi til testkonstruksjonen med trefiberplater og dobbeltsjikt konstruksjon. De avvikende punktene samsvarer med tidspunkt for lengre avrimingsperiode. Punktene er snitt av 15 målinger med et minutt intervall mellom målingene.



*Fig. 5.11: Resultater fra Beskyttet hot-box og Hjelpeplatemetoden, Trefiber*

Fig. 5.11 viser resultat for hjelpeplatemetode og beskyttet hotbox metode samt snitt av disse resultatene og teoretisk beregnet verdi. Målingene ble tatt etter minimum 64 timer og varte i 40 minutter der det ble tatt måling hvert tredje minutt.

## 5.8. Resultater fra vegg med Glava og I-stender

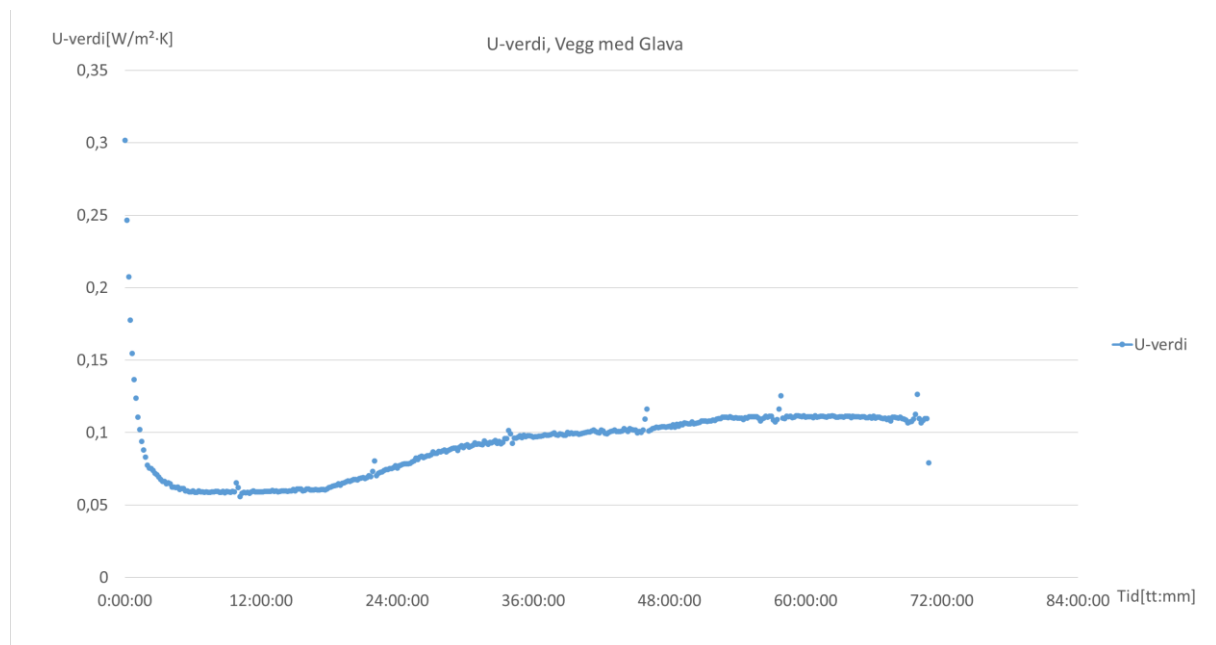


Fig. 5.12 Resultater fra U-verdimåler, Glava

Fig. 5.12 Resultater fra U-verdimåler, Glavaviser U-verdi til testkonstruksjonen med Glava isolasjon og I-stendere. De avvikende punktene samsvarer med tidspunkt for lengre avrimingsperiode. Punktene er snitt av 15 målinger med et minutt intervall mellom målingene.

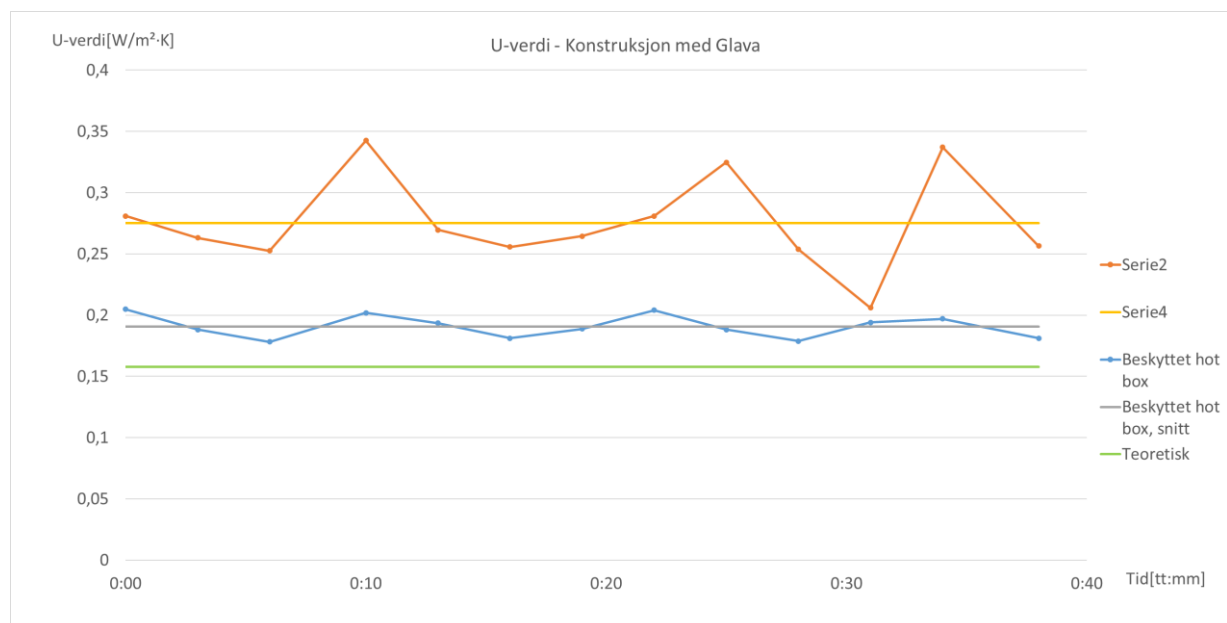


Fig. 5.13: Resultater fra Beskyttet hot-box og Hjelpeplatemetoden, Glava

Fig. 5.13 Fig. 5.9 viser resultat for hjelpeplatemetode og beskyttet hotbox metode samt snitt av disse resultatene og teoretisk beregnet verdi. Målingene ble tatt etter minimum 64 timer og varte i en time der det ble tatt måling hvert tredje minutt.

| Metode (Rockwool)                 | U-verdi          |
|-----------------------------------|------------------|
| Teoretisk utregning               | 0,160            |
| Beskyttet hot box (gjennomsnitt)  | 0,206 (+28,75 %) |
| Hjelpeplate metode (gjennomsnitt) | 0,288 (+80,00 %) |
| U-verdi måler (gjennomsnitt)      | 0,114 (−28,75 %) |

I snitt mellom de tre testene 45,83 % fra teoretisk utregning.

| Metode (Trefiber)                        | U-verdi          |
|------------------------------------------|------------------|
| Teoretisk utregning uten lineær kuldebro | 0,164            |
| Beskyttet hot box (gjennomsnitt)         | 0,194 (+18,29 %) |
| Hjelpeplate metode (gjennomsnitt)        | 0,277 (+68,90 %) |
| U-verdi måler (gjennomsnitt)             | 0,117 (−28,65 %) |

I snitt mellom de tre testene 38,61 % fra teoretisk utregning.

| Metode (Glava)                           | U-verdi          |
|------------------------------------------|------------------|
| Teoretisk utregning uten lineær kuldebro | 0,158            |
| Beskyttet hot box (gjennomsnitt)         | 0,191 (+20,89%)  |
| Hjelpeplate metode (gjennomsnitt)        | 0,275 (+74,05 %) |
| U-verdi måler (gjennomsnitt)             | 0,111 (−29,75 %) |

I snitt mellom de tre testene 41,56 % fra teoretisk utregning.

## 5.9. Rockwool Iterative kalkulasjon veggtykkelse

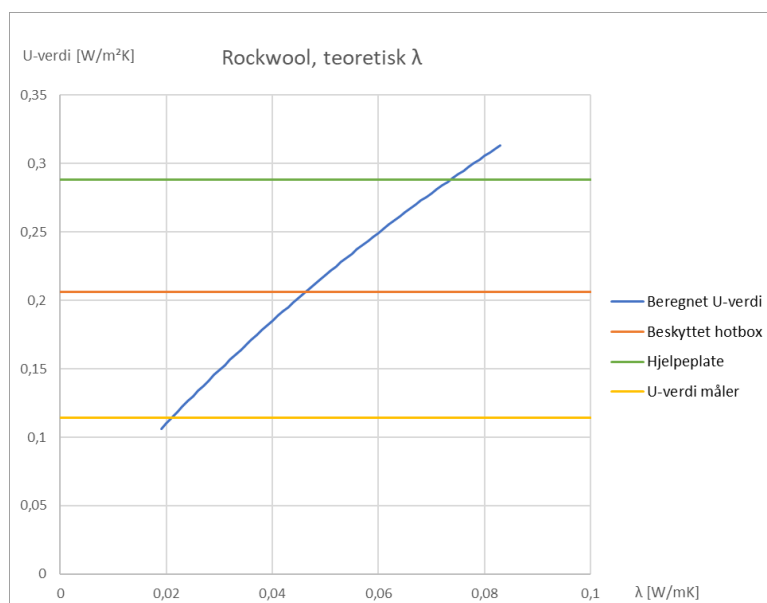


Fig. 5.14 Iterative beregning av  $\lambda$  til Rockwool

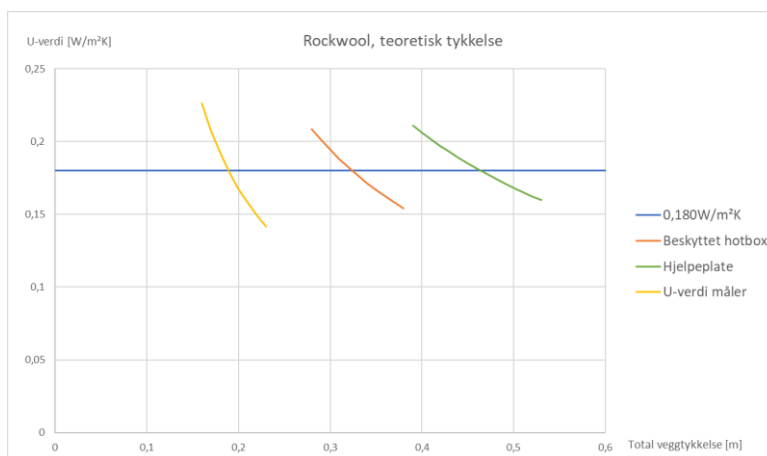


Fig. 5.15 Iterative beregning av veggtykkelse med iterative  $\lambda$  med Rockwool

Fig. 5.14 viser iterative beregning av hva verdi  $\lambda_{rockwool}$  må være om for at resultatet fra de forskjellige U-verdi målemetodene skal være korrekte, om resterende verdier antar å være korrekte. Fig. 5.15 viser iterative beregning av veggtykkelse for at U-verdien skal være minimum 0,180W/m²K. Resultatene fra disse kalkulasjonene er vist i Tabell 5.20.

Tabell 5.20 Resultat av iterativ kalkulasjon for veggtykkelse med kontinuerlig Rockwool

| Målemetode       | $\lambda$  | Total veggtykkelse |
|------------------|------------|--------------------|
| Beskyttet hotbox | 0,047 W/mK | 0,33m              |

|               |            |       |
|---------------|------------|-------|
| Hjelpeplate   | 0,074 W/mK | 0,47m |
| U-verdi måler | 0,021 W/mK | 0,20m |

### 5.10. Trefiber Iterative kalkulasjon veggtykkelse

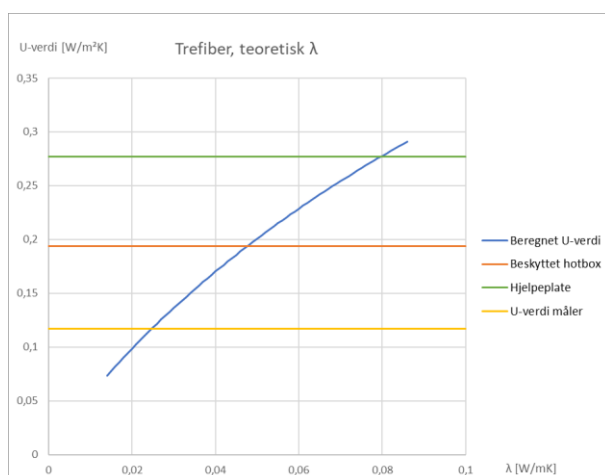


Fig. 5.16 Iterative beregning av  $\lambda$  til trefiber

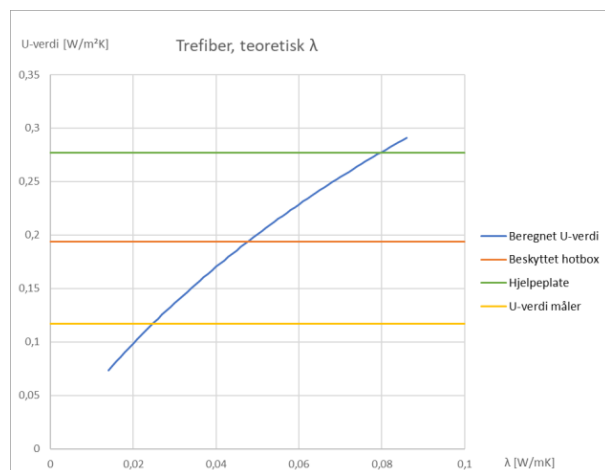


Fig. 5.17 Iterative beregning av veggtykkelser med iterative  $\lambda$  med trefiber

Fig. 5.16 viser iterative beregning av hva verdi  $\lambda_{trefiber}$  må være om for at resultatet fra de forskjellige U-verdi målemetodene skal være korrekt, om resterende verdier antar å være korrekte. Fig. 5.17 viser iterative beregning av veggtykkelse for at U-verdien skal være minimum 0,180W/m²K. Resultatene fra disse kalkulasjonene er vist i Tabell 5.21.

Tabell 5.21 Resultat av iterativ kalkulasjon for veggtykkelse med trefiber og dobbeltsjikt.

| Målemetode       | $\lambda$  | Total veggtykkelse |
|------------------|------------|--------------------|
| Beskyttet hotbox | 0,048 W/mK | 0,32m              |

|               |            |       |
|---------------|------------|-------|
| Hjelpeplate   | 0,080 W/mK | 0,45m |
| U-verdi måler | 0,024 W/mK | 0,21m |

### 5.11. Glava Iterative kalkulasjon veggtykkelse

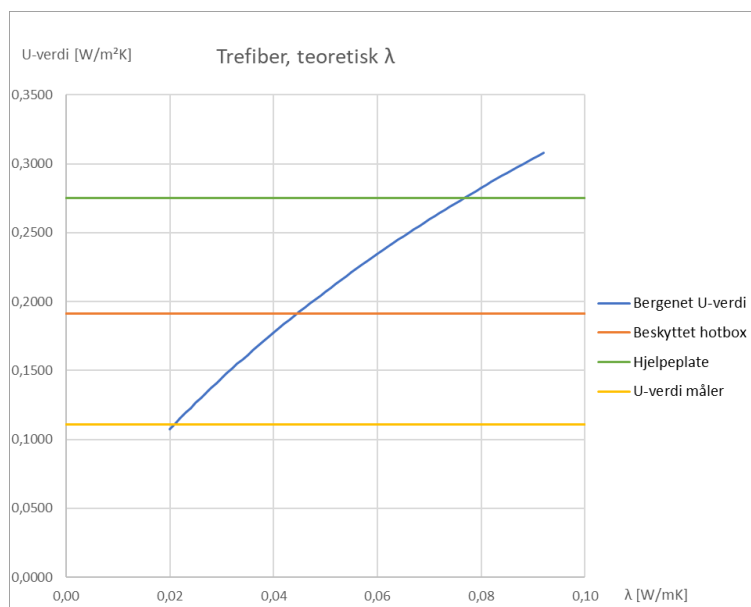


Fig. 5.18 Iterative beregning av  $\lambda$  til Glava

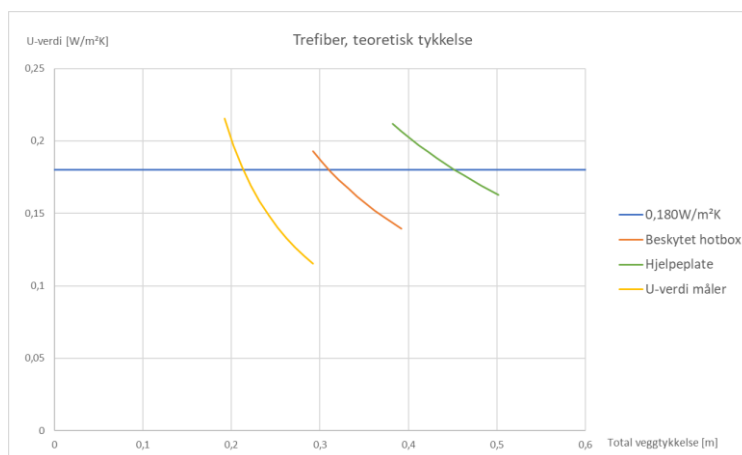


Fig. 5.19 Iterative beregning av veggtykkelser med iterative  $\lambda$  med Glava

Fig. 5.18 viser iterative beregning av hva verdi  $\lambda_{trefiber}$  må være om for at resultatet fra de forskjellige U-verdi målemetodene skal være korrekt, om resterende verdier antas å være korrekte. Fig. 5.19 viser iterative beregning av veggtykkelse for at U-verdien skal være minimum 0,180 W/m²K. Resultatene fra disse kalkulasjonene er vist i Tabell 5.22.

Tabell 5.22 Resultat av iterativ kalkulasjon for veggtykkelse med trefiber og dobbeltsjikt.

| Målemetode       | $\lambda$  | Total veggtykkelse |
|------------------|------------|--------------------|
| Beskyttet hotbox | 0,048 W/mK | 0,32m              |
| Hjelpeplate      | 0,080 W/mK | 0,45m              |
| U-verdi måler    | 0,024 W/mK | 0,21m              |

## 5.12. Diskusjon

Resultatene fra de eksperimentelle testene viste varierende avvik mellom teoretisk beregnet og målt U-verdi for veggkonstruksjonene. Målemetodene viste enten en over- eller underestimering sammenlignet med den beregnede U-verdien, basert på verdier oppgitt av produsentene og teoretiske beregninger utført i henhold til NS 6946. Disse avvikene varierer fra omtrent 18 % til 80 %, og tyder på at noen av resultatene ikke er reelle.

I gjennomsnitt var resultatene fra det beskyttede hotbox-metoden nærmest de teoretiske verdiene for alle tre materialene, med avvik mellom 18 og 21 %. Hjelpeplatemetoden gav de høyeste verdiene med avvik mellom 69 og 80%, mens U-verdimåleren konsekvent underestimerte U-verdiene med rundt 29 %. At målemetodene viser avvik i ulike retninger, det indikerer at hver metode kan ha sine egne, unike systematiske feilkilder. For å kunne trekke pålitelige konklusjoner må det derfor tas høyde for og korrigeres for slike metodespesifikke feil.

Gjennom de eksperimentelle testene ble flere feilkilder identifisert, knyttet både til hotboxens utforming, testkassenes konstruksjon og bruken av måleinstrumenter. Viktige utfordringer inkluderte mulige luftlekkasjer i det beskyttede kammeret, døren til den varme sonen sto åpen ved testen av trefiber, samt temperatursvingninger knyttet til kjølesystemets avrimingsfunksjon. I tillegg introduserte delvis manuell avlesning og logging av data mulighet for menneskelige feil.

Selve oppbyggingen av veggkonstruksjonene har også introdusert potensielle feilkilder. Innfesting av stendere med skruer gjennom sideveggene kan ha skapt lokale kuldebroer eller luftlekkasjer. Isolasjonens montering og håndtering åpnet for feilkilder som komprimering, gliper i skjøtene og eventuell slitasje ved gjentatt montering. Dette er særlig relevant for materialer som mineralull og trefiber, som er mer følsomme for fysisk deformasjon enn for eksempel hardere isolasjonstyper.

Videre avdekket bruken av varmeflukssensoren instrumentelle begrensninger. Sensoren ble koblet til et voltmeter med utilstrekkelig oppløsning og ble ikke kalibrert før bruk. Dette resulterte i ustabile avlesninger med betydelig variasjon over korte tidsperioder. Variasjonen i måleverdiene var for stor til at de kunne benyttes videre i analysene. Samtidig er varmeflukssensorer under normale forhold svært nyttige i eksperimentelle målinger, da de kan fange opp den totale varmeoverføringen som inkluderer ledning, konveksjon og stråling [28]. For å oppnå pålitelige resultater kreves imidlertid presist måleutstyr og kalibrering.

På samme måte medførte hjelpeplatemetoden flere usikkerheter. Metoden benyttet en MDF-plate for å beregne varmeflukt. Den faktiske varmeledningsevnen til MDF kan variere, blant annet på grunn av fuktighetsnivå. I tillegg ble temperatursensoren plassert i et frest spor i platen, noe som kan ha skapt et lokalt hulrom som forstyrret temperaturmålingene. Videre ble det i dette prosjektet kun målt på én plassering med MDF-plate, noe som kan gjøre at lokale variasjoner i veggen ikke blir fanget opp. For eksempel, i en vegg med stendere bør MDF-plater monteres både over stendere og i områder med isolasjon for å gi et mer representativt bilde av varmefluksen.

Ved den iterative beregning var det kun varmeledningsevnen til isolasjonsmaterialet som ble variert. Det gav store avvik mellom den verdien denne prosessen kom frem til og de teoretiske verdiene for varmeledningsevne for alle materialene. Det viser også at resultatene er urealistiske, spesielt de fra hjelpeplate metoden. Samme prosessen kunne også blitt brukt til å undersøke hvilken effekt det har om de andre verdiene, som varmeledningsevnen til massivtre, eller korreksjonsverdier i standarden er feil. Endringer av disse verdien gir mindre utslag på den endelige U-verdi til veggkonstruksjonene, enn varmeledningsevnen til isolasjonene, som tilsier at de måtte vært enda mer feil.

U-verdi måleren var den eneste metoden som gav lavere U-verdi enn den teoretiske. Det er ikke urealistisk at oppgitt varmeledningsevne er noe konservativ, men ikke til den grad som resultatene fra U-verdi måleren tilsier. Den målte U-verdi hadde sannsynligvis blitt litt høyere om sensorene ble plassert ovenfor en stender, for veggkonstruksjonene med Glava og trefiber, istedenfor midt mellom. Det samme gjelder plassering i forhold til skruene i veggkonstruksjonen med Rockwool. Den oppgitte feilmarginen ( $\pm 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) fra instrument, gjør et stort utslag på målt U-verdi. Det er sannsynlig at en del av denne feilmarginen er grunnet at den er beregnet til å måle på eksisterende bygninger, der det kan være større variasjoner i temperatur og andre forstyrrelser. Det at den har tre målepunkter på overflaten, gjør det mindre sannsynlig at problemet kommer fra montering av sensorene.

Den store spredningen i resultater mellom målemetodene reiser spørsmål om påliteligheten til de ulike metodene. Forskjellen i U-verdi fra teoretisk verdi var i snitt over 45 % for Rockwool, nær 39 % for trefiber og 42 % for Glava. Dette viser at forbedring av eksisterende metoder og testing av alternative metoder er nødvendig for å oppnå pålitelige og sammenlignbare resultater. Samtidig illustrerer det hvor krevende det er å oppnå laboratorieforhold som gjenspeiler ideelle betingelser.

Disse observasjonene vil danne et viktig grunnlag for videre vurdering i konklusjonsdelen. Det er tydelig at hver målemetode har sine fordeler og begrensninger, og at eksperimentelle målinger av U-verdi krever nøyaktighet både i fysisk utførelse og datainnsamling. Like viktig er det å være bevisst på feilkildene og hvordan disse kan påvirke tolkningen av resultatene.

### 5.13. Feilkilder

Denne delen inneholder en kort oppsummering av feilkilder vi oppdaget under den eksperimentelle testingen.

Feilkilder knyttet til hotboxen:

- Manuell avriming med vifteovn kunne skape temperatursvingninger.
- Restfukt og varierende luftfuktighet kunne påvirke målinger.
- Mulige luftlekkasjer fra ventilasjonsrør og kabelgjennomføringer.
- Feil ved åpen dør i varm sone under én test.
- Manglende luftsirkulasjon førte til forskjellig temperatur langs gulv og tak.

Feilkilder ved bygging av testkassen:

- Små ujevnheter har større betydning i liten testflate enn i en stor testflate.
- Skruer gjennom sideveggene kunne skape kuldebroer og sprekker.

Feilkilder ved isolasjon og montering:

- Manuell kutting kunne føre til luftlommer.
- Komprimering av isolasjon kan redusere varmeisolasjonsytelse.
- Gjentatt demontering kan ha ført til deformasjoner i isolasjonen.

Feilkilder ved bruk av varmeflukssensor:

- Lav oppløsning på voltmeter ga ustabile måleverdier.
- Manglende kalibrering av sensor
- Manglende kontinuerlig datalogging påvirket nøyaktigheten.

Feilkilder ved hjelpeplatemetoden:

- Spor for temperatursensor kunne føre til hulrom og feilmålinger.
- Teoretisk varmeledningsevne for MDF kan ha avveket fra faktisk verdi.
- Fuktighet i MDF kan ha påvirket varmeledningsevnen.

Feilkilder ved beskyttet hotbox-metode:

- Usikker tetting av avtakbar side kan ha gitt luftlekkasjer.
- Ujevn stråling fra varmeelementet kunne gi ustabil temperatur.
- Variasjoner i strømforsyning ga mulig temperaturfluktuasjon.
- Usikkerhet rundt beregnede lineær kuldebro.

Feilkilder ved avlesning og logging:

- Manuell avlesning og overføring til Excel åpnet for menneskelige feil.
- Begrenset bruk av datalogger førte til lavere oppløsning og færre målepunkter.

Feilkilder ved temperatursensor:

- Sensorer festet med heftemasse kan ha hatt dårlig kontakt med overflaten.

Feilkilder ved U-verdi-måler:

- Feilmarginer på  $\pm 0,3$  °C (temperatur) og  $\pm 0,1$  (U-verdi).

Feilkilder ved måling av lufthastighet:

- Måleren på kald side sluttet å fungere under testen grunnet lav temperatur.

## 6. Konklusjon

**Hvor mye kan tykkelsen av isolasjonslaget til en massivtrevegg reduseres, samtidig som U-verdi-kravene i TEK 17 blir oppfylt?**

- Dersom testresultatene fra hjelpeplatemetoden stemmer må minimum total veggtykkelse være, for å få god nokk U-verdi
  - o 0,45m for kontinuerlig Rockwool
  - o 0,47m for trefiber med dobbelt sjikt
  - o 0,45m for Glava med I-stender
- Dersom testresultatene fra beskyttet hotbox stemmer må minimum total veggtykkelse være, for å få god nokk U-verdi
  - o 0,33m for kontinuerlig Rockwool
  - o 0,33m for trefiber med dobbelt sjikt
  - o 0,32m for Glava med I-stender
- Dersom testresultatene fra U-verdimåleren stemmer må minimum total veggtykkelse være, for å få god nokk U-verdi
  - o 0,20m for kontinuerlig Rockwool
  - o 0,21m for trefiber med dobbelt sjikt
  - o 0,20m for Glava med I-stender
- Dersom arealutnyttelse er hovedprioriteten vil et høyytelseisolasjonsmateriale som vakuumisolasjonspaneler være et bedre alternativ.

### Underspørsmål:

#### 1. Hvordan påvirker alternative stender- og isolasjonskombinasjoner veggens U-verdi?

- Resultatene fra testene viste at de alternative veggoppbygningene har relativt like U-verdier, gitt samme total veggtykkelse. Dersom dette stemmer, tyder resultatet på at selve materialvalget og stenderutformingen i mindre grad påvirker veggens U-verdi. Andre faktorer kan derfor bli mer avgjørende ved valg av løsning:
  - o Bærekraft: Enkelte konstruksjoner legger bedre til rette for bruk av miljøvennlige materialer og redusert klimagassutslipp.
  - o Montasjetid: Tradisjonelle løsninger kan være raskere å bygge, mens alternative metoder krever mer nøyaktighet.
  - o Brann og fukt: Ulike oppbygninger påvirker veggens motstand mot brann og fuktskader.
  - o Lyd og inneklima: Konstruksjoner med færre gjennomgående sjikt kan gi bedre lydisolasjon og fuktregulering.

## 2. Hvordan avviker målte U-verdier i hotbox fra beregnet U-verdi etter gjeldende standard?

- Resultatene fra målingene ble sammenlignet med teoretisk beregnede U-verdier basert på gjeldende standard. Avviket mellom målt og beregnet verdi varierte mellom de tre metodene:
  - **Hjelpeplate-metoden** ga de største avvikene, med målte U-verdier som i snitt var **74 % høyere** enn de teoretisk beregnede verdiene.
  - **Beskyttet hotbox-metode** ga mindre avvik, med målte verdier i snitt **23 % høyere** enn beregnet.
  - **U-verdimåler** viste målinger som i snitt var **29 % lavere** enn beregnet verdi.
- Gjennomsnitt av absolutt feil, mellom de tre metodene og beregnet verdi, var avvikene som følgende:
  - **Rockwool:** +45 %
  - **Trefiber:** +39 %
  - **Glava:** +42 %

Disse resultatene viser at det er betydelige forskjeller mellom målte og teoretisk beregnede U-verdier, og at målemetoden i stor grad påvirker utfallet.

### 6.1. Anbefalinger

- Måling av luftfuktighet gjennom hele eksperimentet burde inkluderes.
- Teste med hjørner og andre steder der lineær kuldebroder oppstår burde utføres.
- Vurder praktisk gjennomførbarhet og kostnader ved de mest energieffektive løsningene før eventuell implementering i reelle prosjekter.
- Tester burde inkludere flere sensorer for å avdekke variasjon, spesielt med tanke på stender og skrue plassering.

## Referanser

### 7. Referanser

- [1] H. M. Danaci og N. Akin, «Thermal insulation materials in architecture: a comparative test study with aerogel and rock wool,» *Environ Sci Pollut Res*, pp. 29, 72979–72990. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20927-2>, mai 2022.
- [2] S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi og F. Asdrubali, «Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. Vol. 62, 988-1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>, september 2016.
- [3] E. J. P. Hansen, B. Rasmussen, F. N. Rasmussen, G. Du, H. V. Andersen, J. Rose, M. Morelli, N. Feldt-Jensen, T. K. Hansen, M. Fredriksen, N. Hadrup og J. Munch-Andersen, *Varmeisoleringsmaterialer og deres anvendelse*, Akademisk Forlag, 2024.
- [4] Rockwool, «REDAir Plate,» Rockwool, 9 mai 2025. [Internett]. Available: <https://www.rockwool.com/no/produkter-og-konstruksjoner/produkter/byggisolasjon/redair-plate/>. [Funnet 9 mai 2025].
- [5] Steico, «Wood fibre: Nature's high-rech insulation material,» Steico, [Internett]. Available: <https://www.steico.com/uk/solutions/product-advantages/steico-insulation-materials>. [Funnet 9 mai 2025].
- [6] S. J. Chang, W. Seunghwan og S. Kim, «Thermal bridging analysis of connections in cross-laminated timber buildings based on ISO 10211,» *Construction and Building Materials*, pp. vol. 213, 709-722. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.009>, juli 2019.
- [7] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer og A. Thiel, «Cross laminated timber (CLT): overview and development,» *Eur. J. Wood Prod*, pp. 74, 331–351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>, januar 2016.
- [8] A. Younis og A. Doodoo, «Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle-assessment overview,» *Journal of Building Engineering*, p. Vol. 52. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104482>, juli 2022.
- [9] TreFokus, «Treveilederen,» 9 mai 2025. [Internett]. Available: <http://www.trefokus.no/treveilederen/temaer/styrke-og-materialegenskaper/god-styrke-i-forhold-til-vekt>. [Funnet 9 mai 2025].
- [10] Byggforsk, «Slik planlegger du bygging med massivtre,» 15 mai 2023. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/nyheter/2/slik\\_planlegger\\_du\\_bygging\\_med\\_massivtre/1659](https://www.byggforsk.no/nyheter/2/slik_planlegger_du_bygging_med_massivtre/1659). [Funnet 9 mai 2025].
- [11] B. Shin, S. J. Chang, S. Wi og S. Kim, «Estimation of energy demand and greenhouse gas emission reduction effect of cross-laminated timber (CLT) hybrid wall using life cycle

- assessment for urban residential planning,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. Vol. 185, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113604>, oktober 2023.
- [12 SINTEF Community, «Byggforskserien 523.255 Yttervegger av bindingsverk. Varmerisolerings og  
] tetting,» september 2020. [Internett]. Available:  
[https://www.byggforsk.no/dokument/361/yttervegger\\_av\\_bindingsverk\\_varmerisolerings\\_og\\_tetting](https://www.byggforsk.no/dokument/361/yttervegger_av_bindingsverk_varmerisolerings_og_tetting).
- [13 C.-E. Hagentoft og K. Sandin, Byggnadsfysik - Så fungerer hus, Lund: Studentlitteratur, 2017.  
]
- [14 SINTEF Community, «Byggforskserien 471.404 U-verdier. Vegger over terreng,» Desember  
] 2013. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/dokument/4099/u-verdier\\_vegger\\_over\\_terreng\\_dobbelt\\_bindingsverk\\_av\\_tre\\_med\\_kontinuerlig\\_isolasjon\\_imellom](https://www.byggforsk.no/dokument/4099/u-verdier_vegger_over_terreng_dobbelt_bindingsverk_av_tre_med_kontinuerlig_isolasjon_imellom). [Funnet 20 Mai 2025].
- [15 K. J. Espedal, Bygningsfysikk, Lillestrøm: Byggenæringens Forlag AS, 2012.  
]
- [16 «Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and  
] procedures for determining declared and design thermal values, NS-EN ISO 10456,» 2007.  
[Internett]. Available: <https://online.standard.no/nb/ns-en-iso-10456-2007>.
- [17 A. Gustavsen, J. V. Thue, P. Blom, A. Dalehaug, T. Aurlien, S. Grynning og S. Uvsløkk,  
] «Kuldebroer – Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk,» 2008. [Internett].  
Available: [sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2411724/Prosjektrapport25.pdf](http://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2411724/Prosjektrapport25.pdf). [Funnet 25 02 2025].
- [18 «Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance -  
] Calculation methods, NS-EN ISO 6946,» 2017. [Internett]. Available:  
<https://online.standard.no/nb/ns-en-iso-6946-2017>.
- [19 SINTEF Community, «Byggforskserien 471.008 Beregning av U-verdier etter NS-EN ISO 6946,»  
] September 2018. [Internett]. Available:  
[https://www.byggforsk.no/dokument/208?title=beregning\\_av\\_u-verdier\\_etter\\_ns-en\\_iso\\_6946](https://www.byggforsk.no/dokument/208?title=beregning_av_u-verdier_etter_ns-en_iso_6946). [Funnet 13 05 2025].
- [20 B. Å. Petersson, Tillämpad byggnadsfysik, Lund: Studentlitteratur, 2018.  
]
- [21 «Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift),» 01 07 2017. [Internett].  
] Available: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840>. [Funnet 13 Mai 2025].
- [22 B. Sølvi-Jensen og M. Sæter, «Ny Norsk Standard for bygningers energiytelse,» Norsk  
] Telegrambyrå, 05 05 2025. [Internett]. Available:  
<https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/18515004/ny-norsk-standard-for-bygningers-energiytelse?publisherId=89994&lang=no>. [Funnet 13 Mai 2025].
- [23 «Bygningers energiytelse - Beregning av energi- og effektbehov, NS 3031,» 25 Mars 2025.  
] [Internett]. Available: <https://lese.standard.no/product/2603481/nb>.
- [24 «Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed  
] calculations, ISO 10211,» 2017. [Internett]. Available: <https://online.standard.no/nb/ns-en-iso-10211-2017>.

- [25 A. M. M. Xinrui Lu, «Comparative study of Hot Box Test Method using laboratory evaluation of thermal properties of a given building envelope system type,» *Energy and Buildings*, pp. Vol. 178, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.044>, 11 2018.
- [26 G. B. F. Asdrubali, «Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches,» *Energy and Buildings*, pp. Vol. 43, Issue 7, 1618-1626. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.005>, 03 2011.
- [27 O. A. Olsen, *Instrumenteringsteknikk*, Trondheim: Tapir, 1994.
- [28 D. J. Rossouw, «Chapter 6 - Point Temperature Measurements,» *Application of Thermo-Fluidic Measurement Techniques*, pp. 169-190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809731-1.00006-X>, august 2016.
- [29 greenTEG, «Instruction Manual for gSKIN® Heat Flux Sensors,» greenTEG, 23 03 2022. [Internett]. Available: [greenteg.com/de/uploads/g\\_SKIN\\_Heat\\_Flux\\_Sensors\\_RD\\_Instructions\\_v3\\_bb15c14e4a.pdf](https://greenteg.com/de/uploads/g_SKIN_Heat_Flux_Sensors_RD_Instructions_v3_bb15c14e4a.pdf). [Funnet 20 05 2025].
- [30 L. E. Helseth, «termografi (avbildning),» Store norske leksikon, 21 02 2025. [Internett]. Available: [https://snl.no/termografi\\_-\\_avbildning](https://snl.no/termografi_-_avbildning). [Funnet 13 03 2025].
- [31 Testo SE & Co, «testo 635-2 U-value promo set - thermohygrometer set,» [Internett]. Available: <https://www.testo.com/no-NO/testo-635-2-u-value-promo-set/p/0563-6353>. [Funnet 20 05 2025].
- [32 Hunton, «Hunton Nativo® Trefiberisolasjon Plater,» Hunton, 9 mai 2025. [Internett]. Available: [https://www.hunton.no/produkter/vegg/hunton-nativo\\_trefiberisolasjon-plater/](https://www.hunton.no/produkter/vegg/hunton-nativo_trefiberisolasjon-plater/). [Funnet 9 mai 2025].
- [33 Glava, «Glava Proff 34 Plate,» Glava, 9 mai 2025. [Internett]. Available: <https://www.glava.no/produkter/glava-proff-34-plate#dokumentasjon>. [Funnet 9 mai 2025].
- [34 Store norske leksikon, «varmestrøm,» Store norske leksikon, 26 11 2024. [Internett]. Available: <https://snl.no/varmestrøm>. [Funnet 13 03 2025].
- [35 Astrup, «Datablad Astrup XPS plater,» Astrup, [astrup.no/content/download/11992/76216/version/1/file/Astrup+XPS+plater%2C+datablad.pdf](https://astrup.no/content/download/11992/76216/version/1/file/Astrup+XPS+plater%2C+datablad.pdf).
- [36 Sintef Certification, «Isola VIP Superisolasjon,» Sintef Certification, [sintefcertification.no/Product/Download/10631](https://sintefcertification.no/Product/Download/10631), 2023.

## Vedlegg

Vedlegg 1:Målte\_verdier.xlsx