



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2020 30 stp**  
Fakultet for realfag og teknologi

# **Ikke-destruktive Laboratoriemålinger av Fukt i Byggematerialer ved hjelp av Aktiv Termografering**

Non-destructive Laboratory Measurements of  
Moisture in Building Materials by Active  
Thermography

**Martine Antonsen**  
Master i Byggeteknikk og arkitektur



## Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på det femårige masterstudiet Byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, NMBU. Masteroppgaven er skrevet våren 2020 og omfatter 30 studiepoeng.

Å skrive masteroppgave har vært en utfordrende, men samtidig lærerik prosess. Oppgaven hadde ikke vært mulig uten hjelp og støtte underveis. Jeg vil derfor takke Mental Helse Ungdom som har vært utrolig forståelsesfulle og hjelpsomme, og som har gjort det mulig for meg å fortsette i vervet som Landsleder også i denne perioden. Jeg vil også takke medstudent Håkon Martiniussen Sylliaas for vårt samarbeid i perioden. Våre samtaler og drøftinger har bidratt til å løfte oppgaven, og ikke minst arbeidsmoralen og motivasjonen.

Videre vil jeg takke min veileder, Thomas Kringlebotn Thiis, for god, fleksibel og engasjerende veiledning. Og en ekstra takk for god omtanke og oppfølging i den krevende hjemmekontorperioden som oppsto grunnet korona epidemien.

De strengeste koronatiltakene ble innført i en essensiell periode for utviklingen av sorpsjonskurvene. Jeg ville nok ikke ha klart å levere en fullstendig kurve om det ikke hadde vært for samarbeidet med Thomas K. Thiis som i drøye 2 uker fungerte som mine øyne og armer på laboratoriet. Videre vil jeg takke NMBU for dispensasjon til å bruke laboratoriet slik at jeg fikk fullført dette arbeidet.

I tillegg vil jeg rette en stor takk til:

Elin Stoermann-Næss, Martine Næss Johansen, Astrid Neumann og mamma for korrekturlesing.

Og sist, men ikke minst venner og medstudenter for fem fantastiske år på Ås.

Ås, Mai 2020



---

Martine Antonsen



## Sammendrag

Denne oppgaven omhandler «*ikke-destruktive laboratoriemålinger av fukt i byggematerialer ved hjelp av aktiv termografering*». Fuktige konstruksjoner er et alvorlig problem som årlig medfører store økonomiske konsekvenser, samtidig har Norge en stor mengde historiske bygg som trenger rehabilitering. Derfor er det veldig aktuelt å utvikle en ikke-destruktiv målemetode for bruk på historiske og vernede bygninger. Målsetningen med oppgaven er å utvikle kalibreringskurver for termisk fuktfaktor i laboratorium til bruk i ikke-destruktive fuktmålinger ute i felt. Den termiske fuktfaktoren er et uttrykk for korrelasjonen mellom temperaturendring og fuktinnhold.

Oppgaven utvikler en prosedyre for ikke-destruktiv måling av termisk fuktfaktor ved aktiv termografering. Gjennom arbeidet med oppgaven utføres det målinger på teglstein fra den vernede bygningen St. Olavs Vold i Sarpsborg og tradisjonelt norsk granpanel. For begge materialene er termisk fuktfaktor målt og beregnet ved en rekke fuktinnhold. Videre utvikles det også sorpsjonskurver for St. Olavs Vold steinene og en mer moderne teglstein, for å øke kunnskapen om de historiske steinenes fuktegenskaper.

Hovedfunnene i oppgaven er at modellen med termisk fuktfaktor kan benyttes for ikke-destruktive fuktmålinger. Og at kalibreringskurvene utviklet i oppgaven kan benyttes til målinger av den verneverdige bygningen St. Olavs Vold i Sarpsborg, samt andre fasader med tradisjonelt norsk granpanel. Resultatene fra oppgaven vil gi ringvirkninger for mange av de historiske byggene i Norge, og vil kunne spare byggherrer for rehabiliterings-, og fuktskadekostnader. Videre bør det undersøkes hvordan en best kan tilpasse den målte kalibreringskurven fra laboratorium til bruk ute i felt.



## Abstract

This thesis deals with "*non-destructive laboratory measurements of moisture in building materials by active thermography*". Moist constructions are a serious problem that annually have major financial consequences, while at the same time Norway has a large amount of historic buildings that need rehabilitation. Therefore, it is very important to develop a non-destructive measurement method for use on historic and listed buildings. The aim of this thesis is to develop calibration curves for the thermal moisture factor in laboratory for use in non-destructive moisture measurements in field. The thermal moisture factor is an expression of the correlation between temperature change and moisture content.

The thesis develops a procedure for non-destructive measurement of the thermal moisture factor by active thermography. Through the work on the thesis, measurements are made on bricks from the listed building of St. Olavs Vold in Sarpsborg and traditional Norwegian spruce panel. For both materials, the thermal moisture factor is measured and calculated by a variety of moisture contents. Furthermore, sorption curves are also developed for the St. Olavs Vold bricks and a more modern brick, to increase the knowledge of the historic brick's moisture properties.

The main findings of the thesis are that the thermal moisture factor model can be used for non-destructive moisture measurements. And that the calibration curves developed in the thesis can be used for measurements of the listed building St. Olavs Vold in Sarpsborg, as well as other facades with traditional Norwegian spruce panel. The results of the thesis will have a ripple effect on many of the historic buildings in Norway and will save builders on rehabilitation and moisture damage costs. Furthermore, it should be studied how best to adjust the measured calibration curve from lab to field use.





## Innholdsfortegnelse

Forord .....	I
Sammendrag .....	III
Abstract .....	V
Innholdsfortegnelse .....	VII
Figur-liste .....	IX
Tabell-liste .....	XI
<b>1 Innledning.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstilling.....	1
1.2 Bakgrunn .....	1
1.3 Begrensninger.....	2
1.4 Symbolforklaring .....	2
<b>2 Teori.....</b>	<b>5</b>
2.1 Fukt i byggematerialer.....	5
2.1.1 Fuktopptak.....	5
2.1.2 Fuktmåling .....	6
2.1.3 Absolutt fuktinnhold.....	7
2.1.4 Fuktinnhold.....	7
2.1.5 Kritisk fuktnivå .....	8
2.2 Sorpsjonskurve .....	8
2.3 Varme .....	10
2.3.1 Varmetransport.....	10
2.3.2 Varmeegenskaper.....	11
2.3.3 Varmeovergang .....	12
2.4 Infrarød termografering .....	13
2.4.1 Emissivitet.....	14
2.4.2 Temperaturmåling.....	16
2.4.3 Aktiv termografering .....	18
2.4.4 Latent varme .....	18
2.4.5 Modell for måling av fuktighet. ....	19
2.5 Materialer .....	21
2.5.1 Teglstein .....	21
2.5.2 Tre.....	22
<b>3 Metode.....</b>	<b>25</b>
3.1 Valg av metode.....	25
3.2 Utstyr og materialer .....	25

3.2.1	Varmeelement.....	25
3.2.2	Kamera og programvare.....	26
3.2.3	Prøver .....	27
3.3	Kondisjonering.....	31
3.3.1	Sorpsjonskurve .....	32
3.4	Prosedyreutvikling.....	33
3.4.1	Varmeelementenes stråling .....	33
3.4.2	Oppvarming eller nedkjøling .....	34
3.4.3	Oppvar gstid .....	34
3.5	Forsøksoppsett.....	34
3.6	Datainnhenting.....	36
3.6.1	Fuktinnhold.....	36
3.6.2	Termografering.....	36
3.7	Databearbeidelse .....	37
3.7.1	Beregnet termisk fuktfaktor .....	38
4	Resultat.....	41
4.1	Prosedyreutvikling.....	42
4.1.1	Varmeelementenes stråling .....	42
4.1.2	Oppvarming eller nedkjøling .....	43
4.1.3	Oppvarmingstid .....	45
4.2	Termisk fuktfaktor .....	45
4.2.1	Granpanel.....	45
4.2.2	Teglsteiner .....	47
4.3	Sorpsjonskurve .....	48
5	Diskusjon .....	49
5.1	Prosedyreutvikling.....	49
5.1.1	Varmeelementenes stråling .....	49
5.1.2	Oppvarming eller nedkjøling .....	50
5.1.3	Oppvarmingstid .....	51
5.2	Målenøyaktighet .....	52
5.2.1	Underlag .....	52
5.2.2	IR-kamera .....	52
5.2.3	Inneklima .....	53
5.2.4	Fuktmåling.....	53
5.3	Målt termisk fuktfaktor .....	54
5.3.1	Granpanel.....	54

5.3.2	Teglsteiner .....	55
5.4	Beregnet termisk fuktfaktor .....	55
5.4.1	Materiallegenskaper.....	56
5.4.2	Varmeovergang .....	57
5.4.3	Overførbarheten til felt .....	57
5.5	Sorpsjonskurve .....	58
6	Konklusjon .....	60
6.1	Videre arbeid .....	61
7	Referanser .....	62
8	Vedlegg .....	A
8.1	Vedlegg A – Forsøkslogg .....	A
8.2	Vedlegg B – Tørrvekt .....	B
8.3	Vedlegg C – Sorpsjon .....	C
8.4	Vedlegg D – Script.....	D
8.5	Vedlegg E – Script b .....	F
8.6	Vedlegg F – Målt fuktinnhold .....	G

## Figur-liste

Figur 1.1: Fordeling av skadekilder for byggskader i perioden 1993-2002, gjengitt etter (Kvande & Lisø, 2010). .....	2
Figur 2.1: Eksempel på sorpsjonskurve. ....	9
Figur 2.2: Former for varmetransport i bygningsdel, fritt tilvirket etter (Edvardsen & Ramstad, 2014). .....	11
Figur 2.3: Strålingsenergien som utslipper fra legemer, fritt tilvirket etter (Çengel et al., 2015). .....	15
Figur 2.4: Illustrasjon av de 3 strålingskildene, med hver sine uttrykk, som mottas av IR-kamera. Fritt tilvirket etter (Usamentiaga et al., 2014). .....	17
Figur 2.5: Målte og beregnede termiske fuktfaktorer for furu og tegl, resultater hentet fra (Ludwig et al., 2004). .....	20
Figur 2.6: Målte og beregnede termiske fuktfaktorer for tre, resultater hentet fra (Madruga et al., 2020). .....	21
Figur 2.7: Sorpsjonskurve for historisk massivtegl fra 1500-tallet. Tilvirket med data fra (Fraunhofer Institut Bauphysik).....	22
Figur 2.8: Sorpsjonskurve for gran. Tilvirket med data fra (Fraunhofer Institut Bauphysik). .....	23

Figur 3.1: Foto av lampe 1, armatur og varmepære. ....	25
Figur 3.2: Bilde av lampe 2 hentet fra medfølgende produktbeskrivelse. ....	26
Figur 3.3: Skjemutklipp av PIX Connect under en termografering. ....	27
Figur 3.4: Foto av de fire historiske steinene, (f.v.) S1, S2, S3 og S4. ....	28
Figur 3.5: Termogram hentet fra forsøk Stein2, her er S1 og S2 betraktelig fuktigere enn S3 og S4. ..	28
Figur 3.6: Foto av prøve S1, viser puss på overflaten. ....	29
Figur 3.7: Foto av noen panel prøver i plassert i klimaskap. ....	29
Figur 3.8: Termogram av forsøk panel9, forsøk utført på 14 ganske tørre panel prøver. ....	30
Figur 3.9: Foto av oppsett til forsøk utført på 5 ALNA-tegl prøver. ....	30
Figur 3.10: Termogram fra forsøk utfør på 5 ALNA-tegl med varierende fuktighet. ....	31
Figur 3.11: Foto av forsøks oppsette som viser varmerigg, kamera og prøver på underlaget (under et forsøk). ....	35
Figur 3.12: Skisse av forsøksoppsettet fra siden. ....	35
Figur 3.13: Foto av en veiing. ....	36
Figur 4.1: Termogram av treplate etter 4,5 minutters oppvarming med lampe 1. ....	42
Figur 4.2: Termogram av treplate etter 3 minutters oppvarming med lampe 2, lampen ligger i overkant av termogrammet. ....	42
Figur 4.3: Termogram av treplate etter 3 minutters oppvarming med 2 stykk lampe 2 plassert 60 cm fra hverandre. ....	43
Figur 4.4: Målt termisk fuktfaktor over tid for prøver av granpanel (P) og ALNA-tegl (T), oppvarming med varmerigg. ....	44
Figur 4.5: Målt termisk fuktfaktor over tid for treplate (PI) og 2'4 plank (2'4), oppvarming med lampe 1. ....	44
Figur 4.6: ALNA-tegl etter 10 minutters oppvarming med varmerigg, den hvite linjene viser skillet mellom synlig tørr og synlig våt tegl. ....	45
Figur 4.7: Alle målte termiske fuktfaktorer for granpanel med uthevet gjennomsnitt og beregnet trend og standardavvik av disse. ....	46
Figur 4.8: Den beregnede termiske fuktfaktoren sammen med gjennomsnittene for målingene av granpanel prøvene. ....	46
Figur 4.9: Målt termisk fuktfaktor for St. Olavs Vold steinene etter 3 minutters nedkjøling. ....	47
Figur 4.10: Den beregnede termiske fuktfaktoren sammen med målte termiske fuktfaktorer for St. Olavs Vold steinene. ....	47
Figur 4.11: Utviklet sorpsjonskurve for prøvemateriale St. Olavs Vold stein. ....	48
Figur 4.12: Utviklet sorpsjonskurve for prøvemateriale ALNA-tegl. ....	48

## Tabell-liste

Tabell 1 inneholder symbolforklaringer. ....	2
Tabell 2 viser standardverdier av varmeovergangsmotstander (Thue, 2016). ....	12
Tabell 3: Forskjellige byggematerialers totale sfæriske emissivitet ved gitte temperaturer (Baehr & Stephan, 2011, s. 681; Çengel et al., 2015, s. 929-930). ....	15
Tabell 4 viser spesifikasjoner for Optris PI 640, IR-kameraet brukt i oppgaven (Optis GmbH). ....	26
Tabell 5 viser en oversikt over klimasonene brukt for kondisjonering av prøvene. Forhold markert likevekt er brukt i utarbeidelsen av sorpsjonskurvene. ....	32
Tabell 6 viser en oversikt over forsøk utført i forbindelse med kartlegging av strålingen fra varmeelementene. ....	33
Tabell 7 viser antatt emissivitet for materialene testet i oppgaven. ....	37
Tabell 8 viser materialegenskaper brukt i beregning av termisk fuktfaktor etter formel 25. ....	38
Tabell 9 viser valgte faktorer ved beregning av termisk fuktfaktor. ....	39
Tabell 10 viser hvilke prøver som er brukt, hva de ble brukt til og hvilke fuktinnhold de hadde. ....	41
Tabell 11 viser en oversikt over alle utførte forsøk med resultater omtalt i oppgaven. ....	A
Tabell 12 viser tørrvekten til alle prøvene, i gram. ....	B
Tabell 13 viser registrert vekt 1 og 2 for de 5 RF benyttet ved utvikling av sorpsjonskurvene. ....	C
Tabell 14 viser alle fuktighetene brukt i utviklingen av sorpsjonskurvene for St. Olavs Vold stein og ALNA-tegl. ....	C
Tabell 15 viser innholdet i ark PanelG som oppsummerer gjennomsnittlige verdier for fuktinnhold og målt termisk fuktfaktor. ....	F
Tabell 16 viser innholdet i ark Stein, dette er alle målte termiske fuktfaktorer for St. Olavs Vold steinene. ....	F
Tabell 17 viser fuktinnholdet til alle panelprøvene. ....	G
Tabell 18 viser fuktigheten til alle St. Olavs Vold prøvene. Forsøk 1 og 2 er utført før aktiv kondisjonering av prøvene. ....	G



# 1 Innledning

## 1.1 Problemstilling

Denne oppgaven omhandler «*ikke-destruktive laboratiemålinger av fukt i byggematerialer ved hjelp av aktiv termografering*».

Målsetningen med oppgaven er å utvikle kalibreringskurver for termisk fuktfaktor til bruk i ikke-destruktiv fuktmåling av byggematerialer.

Opgaven har videre som mål å utvikle en tidseffektiv prosedyre i laboratorium for utførelse av målingene som er overførbar til utendørs feltmålinger.

Metoden bygger på prinsippet om at det er en korrelasjon mellom temperaturendring og fuktinnhold i porøse byggematerialer.

Opgaven baserer seg på målinger utført i laboratorium med egendesignet måleoppsett som også egner seg for utendørs feltmålinger.

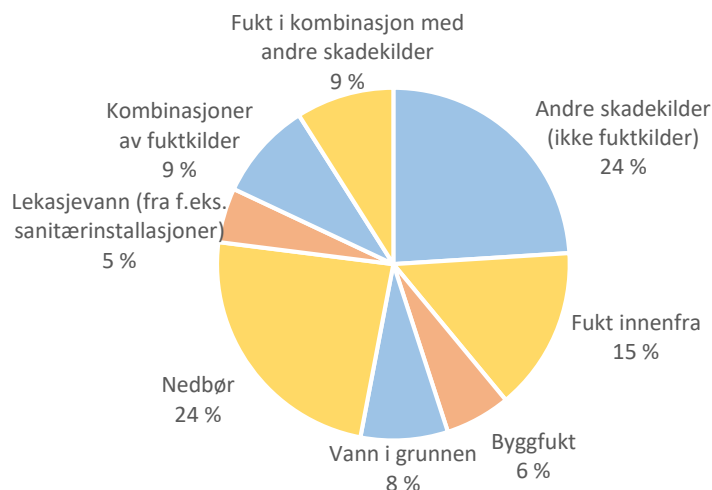
Prinsippet er tidligere publisert for enkelte byggematerialer og suppleres her med data om teglstein fra den verneverdige bygningen St. Olavs Vold i Sarpsborg og tradisjonelt norsk granpanel.

I oppgaven er det dessuten fremstilt sorpsjonskurver for noen aktuelle materialer.

## 1.2 Bakgrunn

Norge har en rekke historiske konstruksjoner hvor det er spesielt viktig å kunne sjekke fuktforholdene jevnlig for å forebygge alvorlige skader. Rehabilitering og gjenbruk av historiske materialer som tegl er sett på som et estetisk og miljømessig godt tiltak. Den store mengden historiske bygg i Norge trenger stadig rehabilitering. I den forbindelse er kunnskap om materialenes fuktegenskaper essensielle.

Fuktige konstruksjoner er et alvorlig problem som kan lede til råte, dårlige inneklime, svekket isoleringsevne, bæreevne og andre problemer ved konstruksjonen. Fuktige konstruksjoner medfører store økonomiske konsekvenser. Årlige utbedringer av bygningsskader koster omlag 5-6 milliarder kroner, og anslagsvis 60-75% av disse skadene skyldes fukt, se figur 1.1 (Kvande & Lisø, 2010).



Figur 1.1: Fordeling av skadekilder for byggskader i perioden 1993-2002, gjengitt etter (Kvande & Lisø, 2010).

En ikke-destruktiv metode for å måle fuktigheten vil ikke påføre noe skader under måling, derfor er det veldig aktuelt å utvikle en slik metode for bruk på historiske og vernede bygninger. Denne oppgaven ser nærmere på en ikke-destruktiv målemetode ved hjelp av termografering.

### 1.3 Begrensninger

Oppgaven begrenser seg til modellen med termisk fuktfaktor som er presentert av Ludwig et. al. Denne modellen benytter aktiv termografering som målemetode. Oppgaven går altså ikke inn på passiv termografering. Oppgaven vil heller ikke se nærmere på andre metoder for fuktmåling ved aktiv termografering. Videre baserer oppgaven seg bare på målinger utført i laboratorium, det er ikke i arbeidet med denne oppgaven utført målinger ute i felt.

Oppgaven er skrevet under de strengeste tiltakene i forbindelse med koronautbruddet våren 2020, dette har satt begrensninger på omfanget av målinger og muligheter for å gjennomføre gjentakende målinger.

### 1.4 Symbolforklaring

I tabell 1 følger en symbolforklaring til alle symbol benyttet i oppgaven.

Tabell 1 inneholder symbolforklaringer.

Symbol	Forklaring
$\varphi$	Relativ fuktighet (RF) [%]
$\omega$	Fuktinnhold, fuktmengde per volumenhet [ $kg/m^3$ ]



<b><i>u</i></b>	Fuktinnhold, vektprosent [%]
<b><i>W</i></b>	Absolutt fuktinnhold [%]
<b><i>ω<sub>cap</sub></i></b>	Fuktinnhold ved kapillær metning [ <i>kg/m<sup>3</sup></i> ]
<b><i>A</i></b>	Konstant tilpasset måledata ( <i>A &gt; 1</i> ) [-]
<b><i>k</i></b>	Termisk konduktivitet [ <i>W/mK</i> ]
<b><i>C</i></b>	Varmekapasitet [ <i>Ws/kgK</i> ]
<b><i>C<sub>p</sub></i></b>	Varmekapasitet ved konstant trykk [ <i>Ws/kgK</i> ]
<b><i>ρ</i></b>	Densitet [ <i>kg/m<sup>3</sup></i> ]
<b><i>α</i></b>	Termisk diffusivitet [ <i>m<sup>2</sup>/s</i> ]
<b><i>e</i></b>	Termisk effusivitet [ <i>W√s/m<sup>2</sup>K</i> ]
<b><i>R</i></b>	Varmeovergangsmotstand [ <i>m<sup>2</sup>K/W</i> ]
<b><i>R<sub>si</sub></i></b>	Innvendig varmeovergangsmotstand [ <i>m<sup>2</sup>K/W</i> ]
<b><i>R<sub>se</sub></i></b>	Utvendig varmeovergangsmotstand [ <i>m<sup>2</sup>K/W</i> ]
<b><i>h</i></b>	Varmeovergangstall [ <i>W/m<sup>2</sup>K</i> ]
<b><i>h<sub>i</sub></i></b>	Innvendig varmeovergangstall [ <i>W/m<sup>2</sup>K</i> ]
<b><i>Q</i></b>	Varmeovergang [ <i>W/m<sup>2</sup></i> ]
<b><i>q<sub>c</sub></i></b>	Varmeovergang ved konveksjon [ <i>W/m<sup>2</sup></i> ]
<b><i>q<sub>r</sub></i></b>	Varmeovergang fra refleksjon [ <i>W/m<sup>2</sup></i> ]
<b><i>ΔT<sub>wi</sub></i></b>	Temperaturdifferanse mellom vegg og innetemperatur [ <i>K</i> ]
<b><i>T<sub>obj</sub></i></b>	Temperatur på objekts overflate [ <i>K</i> ]
<b><i>T<sub>ref</sub></i></b>	Reflektert temperatur [ <i>K</i> ]
<b><i>ε</i></b>	Emissivitet [-]
<b><i>σ</i></b>	Stefan – Boltzmann konstant [ <i>5,68 * 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup></i> ]
<b><i>E<sub>b</sub></i></b>	Svarte legemers emisjonsintensitet [ <i>W/m<sup>2</sup></i> ]
<b><i>T</i></b>	Temperatur [ <i>K</i> ]
<b><i>E</i></b>	Strålingsintensitet [ <i>W/m<sup>2</sup></i> ]
<b><i>λ</i></b>	Strålingsbølgelengde [ <i>μm</i> ]
<b><i>θ, φ</i></b>	Strålingsretning [rad]
<b><i>α</i></b>	Absorbert strålingsenergi [-]
<b><i>ρ</i></b>	Reflektert strålingsenergi [-]
<b><i>τ</i></b>	Transmittert strålingsenergi [-]
<b><i>W<sub>tot</sub></i></b>	Total stråling målt av IR-kamera [ <i>W/m<sup>2</sup></i> ]
<b><i>E<sub>obj</sub></i></b>	Strålingsintensitet fra objekt [ <i>W/m<sup>2</sup></i> ]
<b><i>E<sub>ref</sub></i></b>	Strålingsintensitet reflektert fra omgivelsene [ <i>W/m<sup>2</sup></i> ]

$E_{atm}$	Strålingsintensitet fra atmosfæren [ $W/m^2$ ]
$\epsilon_{obj}$	Objektets emissivitet [-]
$\epsilon_{atm}$	Atmosfærens emissivitet [-]
$\tau_{atm}$	Transmittert strålings energi fra atmosfæren [-]
$\rho_{obj}$	Reflektert strålings energi fra objektet [-]
$T_{atm}$	Atmosfære temperatur [ $K$ ]
$m$	Termisk fuktfaktor [ $K/\sqrt{s}$ ]
$k_d$	Termisk konduktivitet til tørt materiale [ $W/mK$ ]
$k_w$	Termisk konduktivitet til vann [ $W/mK$ ]
$C_{p_d}$	Varmekapasitet til tørt materiale [ $Ws/kgK$ ]
$C_{p_w}$	Varmekapasitet til vann [ $Ws/kgK$ ]
$\rho_d$	Densitet av tørt materiale [ $kg/m^3$ ]
$T_0$	Initialtemperatur [ $K$ ]
$T(t)$	Temperatur ved gitt tid [ $K$ ]
$t$	Tid [ $s$ ]
$q_l$	Varmeovergang fra refleksjonen fra varmeelementene [ $W/m^2$ ]

## 2 Teori

Kapittelet som følger presenterer de fysiske prinsippene oppgaven bygger på. Først er konsepter rundt fuktighet i byggematerialer beskrevet. Videre er materialenes forskjellige varmeegenskaper og konsepter om varmeoverføring beskrevet. I kapittel 2.4 følger en nærmere beskrivelse av fysikken bak og praktisk utførelse av termografering. Til slutt, i kapittel 2.5, presenteres materialene som benyttes i oppgaven.

### 2.1 Fukt i byggematerialer

Fukt er et stort problem i byggebransjen. For å unngå fuktskader er det viktig å forstå hvordan fukt transporteres og lagres i byggematerialer (Edwardsen & Ramstad, 2014; Kvande & Lisø, 2010).

Samtidig er vi avhengig av gode metoder for å avdekke og måle fuktinnholdet i ulike materialer.

Byggematerialenes egenskaper og levetid påvirkes av fukten i lufta gjennom opptak og avgivelse av fukt mellom materialet og lufta. (Edwardsen & Ramstad, 2014). Fuktinnholdet i lufta angis ofte som relativ fuktighet, der relativ luftfuktighet (RF) er definert som luftfuktigheten relativ til metning ved den aktuelle temperaturen (Thue, 2016). Metning refererer til det vanninnholdet lufta kan holde på ved en gitt temperatur. Ved metning er vannet i lufta på grensen til faseovergang og temperaturen ved dette punktet kalles duggpunktstemperaturen (Dannevig et al., 2020).

#### 2.1.1 Fuktopptak

Det er avgjørende å kunne uttrykke hvor porøst et materiale er for å kunne si noe om materialets evne til opptak og transport av fukt. De fleste byggematerialer inneholder porer, er porøse, og betegnes som hygroroskopiske. Den mengden fukt som finnes i et materiale tas opp, bindes og transporteres gjennom materialets porer. De små porene transporterer ikke fukt like hurtig som de store porene (Thue, 2016).

Porene i et materiale vil variere i størrelse, form og fordeling. Det er vanskelig å kartlegge porene fordi poremengden er stor selv i en liten prøve, det er store variasjoner i fordelingen av porer innad i materialet og det er ofte de minste porene som har størst interesse (Thue, 2016).

Det er gjort mange undersøkelser for å oppnå et godt bilde av porestrukturen i de fleste byggematerialer. Likevel er det ennå ikke entydig gitt hvordan porøsiteten i et materiale skal beskrives, dette avhenger ofte av hensikt og synsvinkel (Thue, 2016). I denne oppgaven vil det være aktuelt å beskrive poresystemet ut fra materialtypene det forekommer i. Dette gir en grov inndeling,

men framhever tydelig skille mellom organiske materialer, som tre, og brente materialer, som tegl (Thue, 2016).

Tre er bygget opp av celler med varierende størrelse og form. Noen danner strukturen (fiber) mens andre danner kanaler som frakte treets næring. Disse cellene strekker seg i treets vekstretning og gir stor evne til fuktopptak i denne retningen. Brente materialer utvikles av ulike slags leire som formes, tørkes og brennes ved høye temperaturer. Dette driver vannet ut av leira og krymper massen. Porer dannes når hulrommene i leira som var fylt med vann ikke forsvinner. Ved høyere brenntemperatur blir porene færre og mer isolerte (Thue, 2016), dette fører til tegls dårlige fuktopptak.

### 2.1.2 Fuktmåling

Det kan defineres tre grupper av aktuelle målemetoder hvor det benyttes ulike instrumenttyper (Holøs, 2015):

- Indikering av forskjeller i absolutt fuktinnhold
- Måling av absolutt fuktinnhold
- Måling av luftas relative fuktighet

For indikasjon på forskjeller i absolutt fuktinnhold brukes en fuktindikator. Denne benyttes når en ikke vil eller kan skade overflatene. Fuktindikatorer bygger på prinsippet om at vann har mye høyere relativ permittivitet enn de fleste ikke-metalliske byggematerialer. Gjennom målinger av kapasitansen i materialer er det derfor mulig å si noe om fuktinnholdet i materialet. Denne metoden egner seg ved ensartede materialer under kontrollerte forhold (Holøs, 2015).

Måling av absolutt fuktinnhold kan enten utføres ved trøke/veie-metoden beskrevet i neste kapittel eller ved bruk av en trefuktmåler (Holøs, 2015). Disse målerne er utviklet for måling av elektrisk motstand i materialet. Det er kjent at de elektroniske egenskapene til materialet endres med fuktinnhold, så gjennom kalibrering mot forskjellige materialer kan fuktinnholdet finnes ut fra målerresultatene. Slik motstandsmåling blir gjennomført ved innføring av to elektroder i materialet med en gitt avstand (Thue, 2016). Disse målerne krever kalibreringskurve for det aktuelle materialet. Dersom denne mangler vil målingene bare indikere forskjeller slik som målinger fra en fuktindikator (Holøs, 2015). Denne målemetoden har mange mulige feilkilder, som elektrodeplassering, temperaturendring og dårlig kontakt mellom elektrodene og trevirket. Likevel gir trefuktmålere pålitelige resultater for gran og furu (Holøs, 2015; Thue, 2016).

For måling av luftas relative fuktighet benyttes en RF-måler. Ved å måle RF i enten romlufta eller hulrom i konstruksjonen kan en lese av riktige verdier etter bare noen minutter. Denne metoden kan

også benyttes til å måle likevektsfuktighet i porene i materialer som betong (Holøs, 2015). For denne typen måling av fukt utnyttes prinsippet om at et fuktig materiale, i en forseglet boks, etter en tid vil oppnå likevekt med lufta i boksen. Derfor vil luftas RF kunne si noe om materialets fuktighet.

Gjennom å borre hull i betongen og plassere en RF-måler med forsegling i hullet, vil en ved hjelp av materialets sorpsjonskurve kunne finne fuktinnholdet ut fra RF-målingene (Thue, 2016). Med denne metoden kan det ta flere dager å få riktige målinger siden en er avhengig av likevekt mellom materialet og sensoren. Videre er en også avhengig av stabile temperaturforhold (Holøs, 2015).

### 2.1.3 Absolutt fuktinnhold

Den mest nøyaktige metoden for fuktmåling er veiing av en del av materialet før og etter tørking.

Denne metoden er i mange tilfeller destruktiv og tidkrevende (Holøs, 2015). Prøven veies, deretter tørkes den ut i et tørkeskap til det ikke lengre er vektreduksjon i prøven, vektendring på mindre enn 1 % (Holøs, 2015; Thue, 2016). Normalt tar dette minst 24 timer ved en tørketemperatur på omtrent 105°C. Til sist veies prøven igjen i tørr tilstand og fuktinnholdet bestemmes, som prosent av tørr masse, ut fra vekten før og etter tørking, som vist i formel 1 (Holøs, 2015).

$$\text{Absolutt fuktinnhold} = \frac{\text{Vekt}_{\text{fuktig}} - \text{Vekt}_{\text{tørr}}}{\text{Vekt}_{\text{tørr}}} * 100\% \quad (1)$$

Ved tørking på så høye temperaturer vil også andre forbindelser enn vann kunne fordampe, for eksempel terpenener i trevirke (Holøs, 2015). Lavere tørketemperatur sikrer mot slike nedbrytninger og målefeil, videre vil også store prøver være med på å sikre mot målefeil (Holøs, 2015).

### 2.1.4 Fuktinnhold

Likevektsfuktighet er et begrep på fuktinnholdet i det hygroskopiske området. Dette tilsvarer fukten et materiale oppnår etter en lengere periode under konstant RF og temperatur (Thue, 2016).

Likevektsfuktighet er beskrevet videre i kap. 2.2 Sorpsjonskurve.

Kapillær metning er en høyere grad av fuktighet i materialet, ved fuktinnhold over det hygroskopiske området (Thue, 2016). Dette oppnås ved at tørt materiale senkes i vann i lengere tid. Materialet tas ut ved likevekt og overflatevann fjernes ved veiing (Geving & Thue, 2002). Kapillærsuging vil normalt ikke være nok for å oppnå full metning, da må all innesluttet luft drives ut. For å oppnå full metning må vakuumbehandling eller koking benyttes (Thue, 2016).

Mange av materialers egenskaper er direkte avhengig av fuktinnholdet i materialet, en av dem er densiteten. Densitet ( $\rho$ ) eller massetettheten er et mål på hvor mye masse det er per volum. For porøse materialer sier densiteten noe om hvor godt materialet er komprimert (Hofstad, 2019).

#### 2.1.5 Kritisk fuktnivå

Det kritiske fuktnivået kan defineres som en grenseverdi for fukt i materialet for å unngå fuktrelaterte problemer. Dette nivået vil variere fra materiale til materiale og ut fra hvor i konstruksjonen materialet brukes (Bøhlerengen, 2018). Kritisk fuktnivå må derfor defineres individuelt for hvert bruksområde, men det finnes noen standardverdier.

Kritisk fuktnivå for trevirke er ved lukking av konstruksjonen satt til 20 vektprosent. Det forutsettes at materialene er tilstrekkelig tør før konstruksjonen lukkes, derfor må trevirke ha en lavere vektprosent enn 20 før lukking (Standard Norge - NS 3512, 2014).

Etablering av råte og sopp i trevirke skjer bare når det er vann i materialet. Med et fuktinnhold på rundt 20 % er det risiko for vekst av sopp og ved 30-50 % trives denne veldig godt. Et eventuelt soppangrep kan stanses ved å redusere trevirkets fuktinnhold til 20 % eller mindre. Den aller beste beskyttelsen mot soppangrep er derfor tørre konstruksjoner (Magnussen, 2007).

Skade på tegl, puss og stein er ofte relatert til fukt i overflaten, mer spesifikk; en syklisk endring i denne (Ludwig et al., 2004). Den største utfordringen ved fukt i disse materialene er frostsprenging. Hovedmekanismen bak frostsprenging er vannets volumendring ved frysing. Når denne overstiger materialets bruddtøyning sprekker materialet. Dette kan oppstå i tegl som er utsatt for vann, regn eller høy luftfuktighet samtidig med temperaturer under 0°C. Det er ikke full klarhet i årsaken for frostsprenging, men en velkjent teori går ut på at iskrystaller dannes i de mellomstore porene til teglsteinen. Her spiller to faktorer inn. Den ene er at iskrystaller trekker til seg mer vann, som igjen fryser. Den andre er at vann utvides med cirka 9 % når det fryser (Geving & Thue, 2002; Jacobsen, 1999).

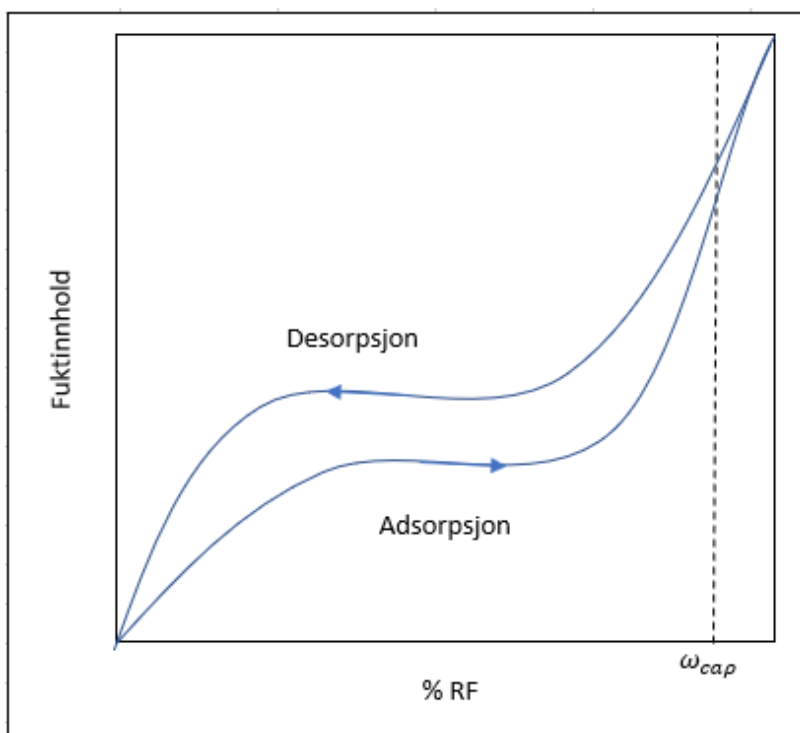
## 2.2 Sorpsjonskurve

Et materiale i konstant RF og konstant temperatur vil påvirkes av luftas fuktighet. Etter noe tid oppnås et balansert damptrykk i materialet lik rommets damptrykk. Heretter endres ikke vekten og heller ikke fuktinnholdet i materialet og materialet vil ha nådd sin likevektsfuktighet (Geving & Thue, 2002; Thue, 2016). Denne mekanismen utnyttes for å utvikle materialets sorpsjonskurve, som er en framstilling av materialets evne til fuktopptak (Thue, 2016).

En sorpsjonskurve kan utvikles ved å legge et materiale i en bestemt RF og temperatur til det oppnår likevekt, deretter endre RF og registrere ny likevekt gjentatte ganger. Ved veldig høy RF stiger fuktinnholdet kraftig, derfor definerer en vanligvis bare sorpsjonskurver opp til cirka 98 % RF (Geving & Thue, 2002; Thue, 2016).

Sorpsjonskurver skal alltid defineres eksperimentelt for det gitte materialet. Kurven kan variere en god del for samme materiale, dette skyldes blant annet densitet, porestruktur og produksjonsmåte. Dette medfører at for eksempel at en type tegl vil ha en annerledes kurve enn annen type tegl, derfor er generell bruk av slike kurver noe en må være forsiktig med (Geving & Thue, 2002). For å ha kontroll over RF og temperaturen under utviklingen av sorpsjonskurver er det mulig å benytte klimaskap for kondisjonering av materialene. Dette er metoden som benyttes ved utvikling av sorpsjonskurvene i denne oppgaven.

I tillegg til variasjon i sorpsjonskurvene grunnet materialet vil de også variere ut fra om de utvikles ved stigende ellers synkende RF. Dette illustreres i figur 2.1, hvor det kommer fram at materialet ved samme RF vil ha lavere fuktighet ved adsorpsjon (fuktopptak) enn ved desorpsjon (uttørking) (ASTM C1498 - 04b, 2016; Thue, 2016). For enkle og repeterbare målinger blir målinger for karakterisering av materialet utført ved adsorpsjon (ASTM C1498 - 04b, 2016).



Figur 2.1: Eksempel på sorpsjonskurve.

Denne variasjonen kalles hysteres. Hystereseffekten avhenger av materialets porestruktur og vil derfor variere fra materiale til materiale. Ved beregning ser en ofte bort fra denne effekten og bruker middelkurven av desorpsjon og adsorpsjon (Thue, 2016).

Generelt kan det sies at organiske materialer har en høyere likevektsfuktighet enn andre materialer. En annen ting som vil påvirke materialets sorpsjonskurve er mengden salt (NaCl). Salt kan forekomme i porene til teglstein i kystnære strøk og ved is fjerning med salt, dette gir store utslag i sorpsjonskurven (Geving & Thue, 2002; Thue, 2016).

Ofte ønskes det å beskrive sorpsjonskurvene analytisk. For mineralske bygningsmaterialer som tegl og sement kan dette gjøres ved å benytte formel 2. Her er  $\omega_{cap}$  [kg/m<sup>3</sup>] materialets fuktinnhold ved kapillær metning, mens  $A$  er en konstant ( $A > 1$ ) tilpasset måledata (Geving & Thue, 2002).

$$\omega = \omega_{cap} * \frac{(A - 1) * \varphi}{A - \varphi} \quad (2)$$

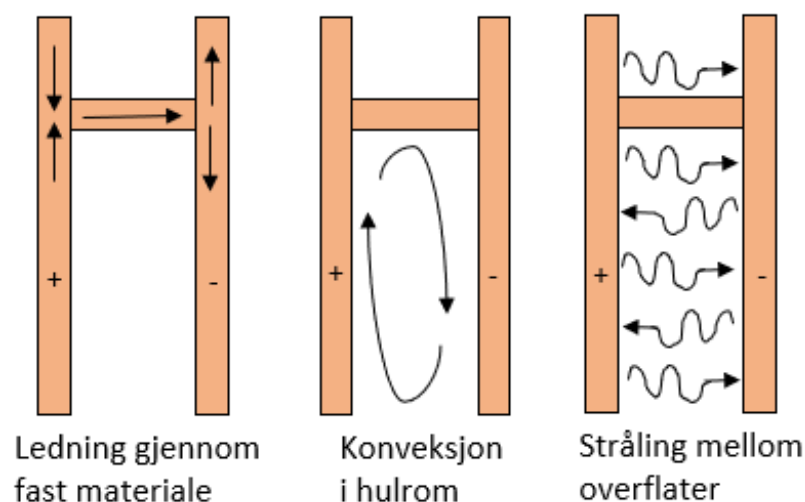
## 2.3 Varme

### 2.3.1 Varmetransport

Varme, «den formen for energi som kan bli overført fra et system til et annet som resultat av temperaturdifferanse» (Çengel et al., 2015). De tre formene for varmetransport som hovedsakelig skjer i bygningskonstruksjoner er beskrevet under og illustrert i figur 2.2 (Edwardsen & Ramstad, 2014).

- **Konduktivitet:** Konduktivitet er energi som overføres gjennom fysisk kontakt. Ved sammenstøt vil bevegelsesenergi overføres fra energirike til energifattige molekyler (Çengel et al., 2015; Edwardsen & Ramstad, 2014).
- **Konveksjon:** Konveksjon er en form for varmeoverføring mellom en solid overflate og en berørende gass eller veske der gass- og veskebevegelse transporterer varmen. (Çengel et al., 2015; Edwardsen & Ramstad, 2014).
- **Stråling:** Stråling er energien utsendt fra legemet som elektromagnetiske bølger, fører til en endring i atomene og molekylenele elektriske konfigurasjon (Çengel et al., 2015).





Figur 2.2: Former for varmetransport i bygningsdel, fritt tilvirket etter (Edvardsen & Ramstad, 2014).

Denne oppgaven vil se nærmere på varmetransport ved stråling og utnytte det faktum at alle materialer med temperatur over absolutt nullpunkt ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) vil avgi varmestråling (Çengel et al., 2015). Den delen av det elektromagnetiske strålingsfeltet som ligger rett over synlig lys, ( $0,4\ \mu\text{m}$  til  $0,76\ \mu\text{m}$ ), kalles infrarød. Denne delen av spekteret sprer seg fra  $0,76\ \mu\text{m}$  til  $100\ \mu\text{m}$  (Çengel et al., 2015), og kan deles i 5 underkategorier på bakgrunn av bølgelengde; nært-, kortbølget-, mellom-, langbølget- og fjernt infrarødt. Langbølget infrarødt har bølgelengder fra  $8\ \mu\text{m}$  til  $15\ \mu\text{m}$  og normalt sendes dette ut fra objekter med temperatur mellom  $90^{\circ}\text{C}$  og  $-80^{\circ}\text{C}$  (Holtebekk, 2019). Videre i oppgaven menes langbølget infrarødt når det refereres til infrarøde stråler, dersom ikke annet spesifiseres.

### 2.3.2 Varmeegenskaper

Termisk konduktivitet ( $k$ ) er et begrep på materialets varmeledningsevne. Den termiske konduktiviteten vil variere fra materiale til materiale ut fra densitet og struktur, konduktiviteten er også avhengig av temperatur og fuktinnhold (Edvardsen & Ramstad, 2014). Fouriers lov og Ohms lov har en formlikhet som viser til at termisk og elektrisk konduktivitet baserer seg på samme fysiske prinsipp. Derfor kan den termiske konduktiviteten uttrykkes etter analogi mellom termisk og elektrisk konduktivitet (Ludwig et al., 2004).

Temperaturrendring i et materiale oppstår ved at det tilføres eller avgis varme. Varmekapasiteten ( $C$ ) er et begrep på hvor mye varme, energi, som må tilføres for å heve temperaturen  $1^{\circ}\text{C}$  (Thue, 2016). Varmekapasiteten varierer for forskjellige materialer og mengden av dem, derfor brukes spesifikk varmekapasitet som uttrykk. Den spesifikke varmekapasitet er energien som kreves for å øke temperaturen til  $1\ \text{kg}$  masse av et materiale  $1^{\circ}\text{C}$  (Çengel et al., 2015).

Ved temperaturmålinger vil fuktinnholdet i overflaten endre registrert temperatur, grunnet vannets høye varmekapasitet. Dette kan benyttes til å finne fuktighet basert på temperaturmålinger, siden økt registrert overflatetemperatur på materialet indikerer lavere fuktinnhold (Schwarz et al., 2018).

Både varmekonduktiviteten og varmekapasiteten inngår sammen med densiteten ( $\rho$ ) i termisk diffusivitet (temperaturledningstall), formel 3, og termisk effusivitet ( $e$ ), formel 4. Termisk diffusivitet ( $\alpha$ ) er et mål på hvor fort et materiale tilpasser seg en temperaturendring eller hvor raskt temperaturendringen forplanter seg i materialet (Madsø, 2001; Thue, 2016).

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3)$$

Høy diffusivitet forteller oss at materialet raskt vil oppta eller avgi varme ved temperaturendringer i omgivelsene (Madsø, 2001). Termisk effusivitet (varmeopptaksevne eller varmebortledningstall) sier oss noe om størrelsen på varmestrømmen inn i materialet (Ludwig et al., 2004; Thue, 2016).

$$e = \sqrt{k\rho C_p} \quad (4)$$

### 2.3.3 Varmeovergang

Varmeovergang er begrepet på den totale varmetransporten mellom overflaten til et materiale og lufta rundt. En faktor som brukes til å definere varmeovergangen er varmeovergangstallet ( $h$ ) eller varmeovergangsmotstanden ( $R$ ) (Thue, 2016).

Varmeovergangstallet forteller oss noe om varmestrømstettheten mellom overflaten og lufta ved en gitt temperatur. Varmeovergangsmotstanden er den inverse av varmeovergangstallet, se formel 5 (Thue, 2016).

$$h = \frac{1}{R} \quad (5)$$

Varmeovergangsmotstanden vil variere ut fra sted på overflaten og med faktorer som temperatur og luftstrømmer. Ved de fleste praktiske anvendelser brukes derfor en antatt gjennomsnittsverdi for hele overflaten. Noen gjennomsnittlige standardverdier er listet opp i tabell 2 (Thue, 2016).

Tabell 2 viser standardverdier av varmeovergangsmotstander (Thue, 2016).

Overflate	Varmestrømsretning		
	Oppover	Horisontalt	Nedover
Innvendig, $R_{si}$	0.10	0.13	0.17
Utvendig, $R_{se}$	0.04	0.04	0.04

Varmeovergangstallet er en høyst variabel verdi, likevel vil ikke varmeovergangstallet inne ( $h_i$ ) bli påvirket av eksterne faktorer som vind og usikre temperaturer i like stor grad som utendørs. I laboratorium kan slike påvirkningskilder i mye større grad kontrolleres og elimineres (Bienvenido-Huertas et al., 2018). Dette oppnås blant annet gjennom å unngå tvungne luftstrømninger og ved å holde temperaturen konstant.

Valg av eksakt innvendig varmeovergangstall er vanskelig og kan gjøres på mange måter. Bienvenido-Huertas et. al. har sett nærmere på 45 forskjellige modeller for å finne det innvendige varmeovergangstallet for en vegg (2018). I oppgaven er det ikke benyttet noen av disse modellene for beregning av varmeovergangstallet, men det er en bevissthet om at denne verdien vil variere.

Varmeovergangen ( $Q$ ) er satt sammen av mer enn bare varmeovergangstallet, kort kan en si at den består av et konvektivt bidrag ( $q_c$ ) og et refleksivt bidrag ( $q_r$ ), se formel 6 (Bienvenido-Huertas et al., 2018; Forkaides & Kalogirou, 2011).

$$Q = q_c + q_r \quad (6)$$

Varmeovergangen ved konveksjon ( $q_c$ ) kan uttrykkes ved forholdet mellom det innvendige varmeovergangstallet ( $h_i$ ) og temperaturdifferansen mellom materialets overflate og lufttemperaturen ( $\Delta T_{wi}$ ), formel 7. Videre vil det refleksive bidraget, formel 8, avhenge av differansen mellom temperaturen på materialets overflate ( $T_{obj}$ ) og den refleksive temperaturen ( $T_{ref}$ ), samt et strålingsbidrag som er nærmere beskrevet i kapittel 2.4 (Forkaides & Kalogirou, 2011).

$$q_c = h_i \Delta T_{wi} \quad (7)$$

$$q_r = 4\varepsilon\sigma(T_{ref})^3 * (T_{obj} - T_{ref}) \quad (8)$$

Den totale varmeovergangen fra et materiale blir dermed:

$$Q = h_i(\Delta T_{wi}) + 4\varepsilon\sigma(T_{ref})^3 * (T_{obj} - T_{ref}) \quad (9)$$

## 2.4 Infrarød termografering

Infrarød termografering (IRT) er gjentatte ganger sett på som et godt verktøy for sivilingeniører (Bienvenido-Huertas et al., 2018; Maierhofer & Roellig, 2009). Det har vært en voldsom økning i bruk av IRT de siste tiårene, IRT er nå blant en av de mest populære verktøyene for ikke-destruktive fuktmålinger. (Forkaides & Kalogirou, 2011; Madruga et al., 2020).

Termografering er en kartlegging av overflatetemperaturen til et objekt og gjennom infrarød fotografering gjengis varmestrålingen fra objektet. IRT leverer altså fotografier som viser den kartlagte temperaturfordelingen på objektets overflate (Holtebekk, 2019).

Siden infrarøde (IR) kamera registrerer varmestrålingen og ikke lysrefleksjon slik som med vanlige kamera, kan IR-kamera brukes i mørke og en vil fremdeles kunne se objektet. Resultatet fra et IR-kamera kalles termogram. Dette er et falsk-farge bilde, hvor hver farge representerer et strålingsnivå (Usamentiaga et al., 2014).

#### 2.4.1 Emissivitet

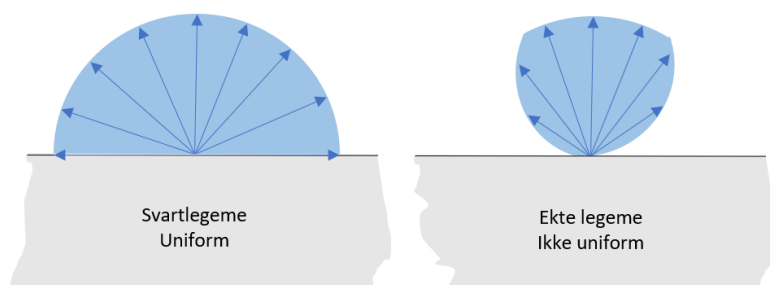
Som nevnt tidligere vil varmeovergangen avhenge av et strålingsbidrag, dette bidraget inneholder emissiviteten ( $\varepsilon$ ). For å komme fram til denne må en bruke teori om et svart legeme. Et objekt som perfekt absorberer og stråler kalles et svart legeme (Çengel et al., 2015). Et svart legeme vil derfor utstråle en maksimal mengde energi ved en satt bølgelengde og temperatur, ingen annet legeme vil utstråle mer energi (Çengel et al., 2015; Usamentiaga et al., 2014). Relasjonen mellom det svarte legemets emisjonsintensitet og dets overflatetemperatur kan uttrykkes gjennom Stefan-Boltzmann lov, se formel 10 (Çengel et al., 2015). Hvor  $\sigma$  er Stefan-Boltzmann konstant ( $5,68 * 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$ ) og  $E_b$  er det svarte legemets emisjonsintensitet.

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (10)$$

Siden svarte legemer ikke eksisterer må vi se på legemets emissivitet. Dette er strålingsevnen fra et ekte legeme i forhold til et svart legemet, i form av elektromagnetisk stråling. Et svart legeme vil derfor alltid ha en emissivitet  $\varepsilon = 1$  (Emissivitet, 2018). Emissiviteten ( $\varepsilon$ ) beskriver utstrålt energi fra et legeme og er en faktor som normalt ligger mellom 0 og 1. Faktoren vil variere med bølgelengde, retning og temperatur og er avhengig av legemets overflate. Det er vanlig for byggematerialer å ha en emissivitet mellom 0,85 og 1, med mindre det er blankpolerte flater. Da kan emissiviteten være så lav som 0,1 - 0,2. Variasjonen i emissiviteten kan skrives som funksjon av bølgelengde, strålingsretning og overflatetemperatur, se formel 11 (Çengel et al., 2015; Edvardsen & Ramstad, 2014).

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \varphi, T) = \frac{E(\lambda, \theta, \varphi, T)}{E_b(\lambda, T)} \quad (11)$$

Her er  $E(\lambda, \theta, \varphi, T)$  strålingsintensiteten til det virkelige legemet,  $\lambda$  er bølgelengden på strålingen utstrålt fra det virkelige og svarte legemet,  $\theta$  og  $\varphi$  refererer til strålingsretningen og T er temperaturen på det virkelige og svarte legemet (Çengel et al., 2015).



Figur 2.3: Strålingsenergien som utslipper fra legemer, fritt tilvirket etter (Çengel et al., 2015).

Emissiviteten varierer som sagt med bølgelengde, strålingsretning og overflatetemperatur, men ofte antas det gråe og diffuse legemer for utregninger av emissivitet. Dette medfører at emissiviteten blir konstant ved en gitt temperatur, siden gråe legemer har lik emissivitet ved alle bølgelengder og diffuse legemer er uniforme, de stråler like mye i alle retninger som vist i figur 2.3 (Çengel et al., 2015). Ved disse antagelsene oppnås den totale sfæriske emissiviteten for ulike materialer, se tabell 3.

Tabell 3: Forskjellige byggematerialers totale sfæriske emissivitet ved gitte temperaturer (Baehr & Stephan, 2011, s. 681; Çengel et al., 2015, s. 929-930).

Materiale	Temperatur [°C]	Emissivitet ( $\epsilon$ )
Tegl stein, rød	0 – 93	0.93 - 0.96
Tegl stein, rød	27	0.93
Hvit puss	0 – 200	0.91 - 0.93
Eik, høvlet	0 – 93	0.90
Tre	27	0.90
Rullet aluminium	27	0.049

En annen antagelse er at stråling er et overflatefenomen for ugjennomsiktige materialer, som tre og tegl. Dette vil si at absorpsjon og stråling bare skjer helt i overflaten av materialene. En annen viktig faktor med ugjennomsiktige materialer er at det ikke oppstår transmisjon gjennom dem (Çengel et al., 2015).

Siden energi ikke kan forsvinne, etter termodynamikkens første lov, vil strålingsenergien som treffer en overflate enten bli absorbert ( $\alpha$ ), reflektert ( $\rho$ ) eller transmittert ( $\tau$ ). Summen av disse må derfor bli 1, se formel 12 (Usamentiaga et al., 2014).

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (12)$$

Siden strålingen ikke transmitterer gjennom ugjennomsiktige materialer vil all energi enten absorberes eller reflekteres og formelen kan forenkles, som i formel 13 (Çengel et al., 2015).

$$\alpha + \rho = 1 \quad (13)$$

Dersom all stråling absorberes vil absorpsjonen være lik 1. Ved stabil temperatur vil all energi absorbert også måtte utstråles igjen og et slikt materiale vil ha emissivitet på 1, dette gjelder altså for svarte legemer. Generelt, etter Kirchhoffs lover, vil emissiviteten være lik absorpsjonen for et hvilket som helst materiale ved satt temperatur og bølgelengde, se formel 14 (Usamentiaga et al., 2014).

$$\alpha = \varepsilon \quad (14)$$

Fra formel 13 og 14 får vi formel 15 for ugjennomsiktige materialer (Usamentiaga et al., 2014).

$$\rho = 1 - \varepsilon \quad (15)$$

#### 2.4.2 Temperaturmåling

Siden termografering er en form for avstandsmåling av overflatetemperaturer vil også andre strålingskilder kunne påvirke målingene. For å finne den riktige temperaturen på objektet må derfor bidrag fra andre kilder, som omkringliggende objekter eller atmosfæren, fjernes fra målingene i konverteringen til temperatur (Usamentiaga et al., 2014).

Den totale strålingen målt av IR-kamera ( $W_{tot}$ ) kommer fra tre kilder: strålingen fra objektet ( $E_{obj}$ ) stråling fra omgivelsene reflektert av objektet ( $E_{ref}$ ) og stråling fra atmosfæren ( $E_{atm}$ ) (Usamentiaga et al., 2014). Dette kan uttrykkes slik:

$$W_{tot} = E_{obj} + E_{ref} + E_{atm} \quad (16)$$

Figur 2.4 illustrerer de tre kildene IR-kamera mottar stråling fra. Den første kilden er strålingen fra objektet, men all stråling fra objektet når ikke fram til kameraet. Noe vil absorberes av atmosfæren, dermed vil strålingen som når fram kunne uttrykkes som funksjon av atmosfærens transmisjon ( $\tau_{atm}$ ), se formel 17 (Usamentiaga et al., 2014).

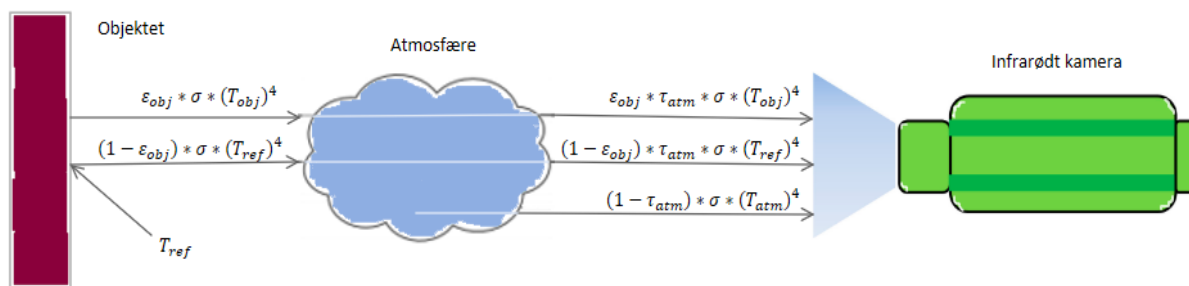
$$E_{obj} = \varepsilon_{obj} * \tau_{atm} * \sigma * (T_{obj})^4 \quad (17)$$

Den andre kilden som treffer kameraet relaterer seg til det objektet reflekterer fra omgivelsene. Dette bidraget blir også påvirket av atmosfæren på samme måte som objektets egen stråling. Som vist i formel 15 kan objektets refleksjon uttrykkes ved hjelp av objektets emissivitet. Denne andre kilden kan derfor uttrykkes som i formel 18 (Usamentiaga et al., 2014).

$$E_{ref} = \rho_{obj} * \tau_{atm} * \sigma * (T_{ref})^4 = (1 - \varepsilon_{obj}) * \tau_{atm} * \sigma * (T_{ref})^4 \quad (18)$$

Den tredje kilden er utstrålt strålingen fra atmosfæren. Ved antagelse om at atmosfæren ikke reflekterer noe stråling,  $\rho_{atm} = 0$ , får vi formel 19 for denne kilden (Usamentiaga et al., 2014).

$$E_{atm} = \varepsilon_{atm} * \sigma * (T_{atm})^4 = (1 - \tau_{atm}) * \sigma * (T_{atm})^4 \quad (19)$$



Figur 2.4: Illustrasjon av de 3 strålingskildene, med hver sine uttrykk, som mottas av IR-kamera. Fritt tilvirket etter (Usamentiaga et al., 2014).

Ved å sette inn for formel 17, 1918 og 19 i formel 16 og løse for objektets temperatur ( $T_{obj}$ ) utledes formel 20. For å finne denne temperaturen trengs følgende parametere: Objektets emissivitet ( $\varepsilon_{obj}$ ), den reflekterte temperaturen ( $T_{ref}$ ), samt atmosfærens transmisjon ( $\tau_{atm}$ ) og temperatur ( $T_{atm}$ ). Atmosfærens transmisjon vil i de fleste sammenhenger være tilnærmet 1, grunnet korte avstander, dette medfører at bidraget fra atmosfærens temperatur blir veldig lavt (Tran et al., 2017; Usamentiaga et al., 2014).

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{W_{tot} - (1 - \varepsilon_{obj}) * \tau_{atm} * \sigma * (T_{ref})^4 - (1 - \tau_{atm}) * \sigma * (T_{atm})^4}{\varepsilon_{obj} * \tau_{atm} * \sigma}} \quad (20)$$

Derimot har den reflekterte temperaturen og objektets emissivitet høy påvirkning på temperaturmålingen og må derfor måles veldig nøyaktig (Usamentiaga et al., 2014). I de fleste situasjoner kan refleksjonstemperaturen settes lik atmosfæretemperaturen for objekter med høy emissivitet (Tran et al., 2017).

Emissivitet er derfor den viktigste parameteren for å kalibrere temperaturmålingene ved IRT. Likevel vil en liten endring i valgt emissivitet ikke medføre store endringer i målt overflatetemperatur for materialer med høy emissivitet (Usamentiaga et al., 2014). Alle materialene brukt i denne oppgaven har relativt høy emissivitet, derfor vil emissiviteten ved målingene settes til lærebokverdiene som framkommer i tabell 3.

Det er også vanlig å bestemme emissiviteten og den refleksive temperaturen til forsøksobjektet ut fra kalibreringer. Gjennom å varme objektet til den temperaturen det vil ha under forsøk vil emissiviteten som kalibreres bli mest riktig. Ved å plassere et materiale med kjent emissivitet over deler av objektet og stille IR-kamera til denne emissiviteten vil kameraet måle den reelle temperaturen til objektet. Videre endrer en emissiviteten over forsøksobjektet til målt temperatur blir lik den reelle. Da har en funnet objektets emissivitet. Det er vanlig å bruke aluminiumsfolie som er rullet til en kule og rettet ut igjen til dette, om en ikke har emissivitetsteip eller lignende. Ved å

sette emissiviteten til 1 og avstanden til 0 over aluminiumsfolien vil også den reflekterte temperaturen fra objektet kunne måles. Det er viktig at materialet med kjent emissivitet er i termisk likevekt med objektet før kalibreringen begynner (Forkaides & Kalogirou, 2011; Usamentiaga et al., 2014).

#### 2.4.3 Aktiv termografering

I dag brukes det to hovedformer for infrarød termografering (IRT), passiv og aktiv. Passiv IRT ser på forsøksobjektet under normale forhold, mens aktiv IRT ser på forsøksobjektet under en ekstern energi kilde som skaper større kontrast i forsøksobjektets overflatetemperatur (Schwarz et al., 2018).

De viktigste fordelene med IRT er ikke-kontakts måling, trygghet for bruker og utstyr, direkte målinger, ikke skadelig stråling og ingen eller lav påvirkning på objektet. Videre er noen negative sider kostnaden for IR-kamera, det er vanskelig å tolke termogrammer og IRT avhengighet av arbeidsforhold, som varierende lufttemperatur, luftstrømmer eller fuktigheter (Usamentiaga et al., 2014). Gjennom tilførsel av ekstern energi, som ved aktiv termografering vil temperaturdifferansene øke og det vil bli bedre kontraster i termogrammene; dette vil gjøre dem enklere å tolke.

Aktiv termografering egner seg som metode for fuktmåling i tre, metoden er spesielt sensitiv ved høye fuktinnhold (Ludwig et al., 2004). Aktiv termografering kan brukes til fuktmåling basert på forsøksobjektene nedkjøling, materialer vil oppnå en lavere temperatur ved økt fuktinnhold (Grinzato et al., 2011). Dette skyldes blant annet endringene i spesifikk varmekapasitet for forsøksobjektet ved varierende fuktinnhold (Schwarz et al., 2018).

Aktiv termografering brukes også til undersøkelser av strukturelle og materielle skader. Overflateskader, opp til 10 cm dypt i fasader, kan registreres gjennom målrettet oppvarming av overflaten (Maierhofer & Roellig, 2009).

#### 2.4.4 Latent varme

Grinzato et. al. fikk i sitt arbeid (2011) resultater som framhever at latent varmemengde gir utfordringer i vurderinger av fuktinnhold i porøse materialer. Latent varme er den varmemengden som må til for at et stoff skal kunne gjennomgå en faseovergang, det vil si endre form mellom fast, flytende og gass (Geving & Thue, 2002). Den latente varmemengden er altså ikke direkte relatert til materialets fuktinnhold, men mer til vannets vekslings mellom væske - og gassform i og rundt materialet (Grinzato et al., 2011).



Det kan registreres en spontan latent varmekraft hos ikke-organiske materialer, som tegl, uten ekstern oppvarming. Derfor mener Grinzato et. al. at passiv termografering er å foretrekke for disse materialene (2011). Et annet problem er at en veldig høy latent varmekraft hos tegl og lignende materialer ved aktiv termografering vil påvirke temperaturmålingene. For tre baserte materialer vil den latente varmekraften ved fuktinnhold under 25 % være så lav (under  $10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) at effekten ikke påvirker temperaturmålingene (Ludwig et al., 2004). I arbeidet med denne oppgaven er det kun utført målinger på trematerialer som har fuktinnhold på 25 % og lavere.

Den latente varmekraften må være høyere enn  $2 * 10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{s}$  før den registreres ved IRT. Da vil denne kunne påvirke temperaturmålingen med 2-3 grader avhengig av materialets termiske egenskaper (Ludwig et al., 2004).

#### 2.4.5 Modell for måling av fuktighet.

Ludwig et. al. hevder, (2004), å ha funnet den mest adekvate modellen for å måle fuktinnhold i byggematerialer ved hjelp av IRT. Modellen baserer seg på en sammenlikning av temperaturendringer etter en gitt tid og presenterer en termisk fuktfaktor ( $m$ ) som vist i formel 25. Modellen er også i nyere tid benyttet av Madruga et. al. som i sin studie målte fuktigheten i prøver av tre (2020). Oppgaven vil i hovedsak se på denne modellen for noen utvalgte materialer.

Egenskaper som varmekapasitet ( $C_p$ ), varmekonduktivitet ( $k$ ) og densitet ( $\rho$ ) er alle direkte avhengig av materialets absolutte fuktinnhold ( $W$ ), avhengigheten kommer til syne i formel 21, 22 og 23 (Ludwig et al., 2004).

$$k = \frac{k_d + Wk_w}{1 + W} \quad (21)$$

$$C_p = \frac{C_{pd} + WC_{pw}}{1 + W} \quad (22)$$

$$\rho = \rho_d(1 + W) \quad (23)$$

Her er  $k_d$ ,  $C_{pd}$  og  $\rho_d$  materialets tørre egenskaper, mens  $k_w$  og  $C_{pw}$  er vanns varmeegenskaper. Denne avhengigheten vil medføre endringer i den termiske fuktfaktoren på bakgrunn av materialets fuktinnhold (Ludwig et al., 2004).

En viktig forutsetning for bruk av modellen er konstant varmekraft ( $Q$ ). Det er kjent at ved konstant varmekraft vil endringen i temperatur ( $T(t)$ ) fra en starttemperatur ( $T_0$ ) kunne uttrykkes ved formel 24 (Ludwig et al., 2004).

$$T(t) = T_0 + \frac{Q2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi k\rho C_p}} \quad (24)$$

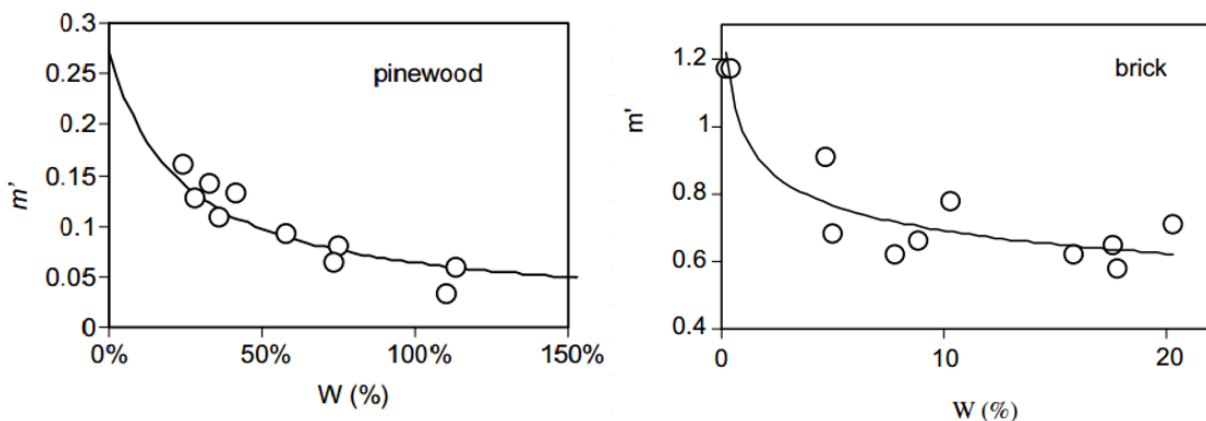
Ut fra denne sammenhengen kan den termiske fuktfaktoren utledes:

$$m = \frac{T(t) - T_0}{\sqrt{t}} = \frac{2Q}{e\sqrt{\pi}} \quad (25)$$

Her representerer  $e$  den termiske effusiviteten og  $t$  vil være tiden mellom de to temperaturene. Fra formelen framkommer en målt termisk fuktfaktor som bare avhenger av to temperaturmålinger og tiden mellom dem. Videre vil det også være mulig å beregne den termiske fuktfaktoren ved å benytte materialets termiske effusivitet og den totale konstante varmpåvirkningen. Den termiske effusiviteten er et uttrykk for materialets egenskaper og avhenger av prøvenes fuktinnhold. Denne avhengigheten kommer fram i formel 26, hvor fuktinnholdet ( $W$ ) er en viktig faktor. Formel 26 er uttrykket for termisk effusivitet, se formel 4, når det er satt inn for formel 21, 22 og 23 (Ludwig et al., 2004).

$$e = \frac{1}{1+W} \sqrt{(k_w\rho C_{pw})W^3 + (k_w\rho C_p + k\rho C_{pw} + k_w\rho C_{pw})W^2 + (k\rho C_p + k_w\rho C_p + k\rho C_{pw})W + k\rho C_p} \quad (26)$$

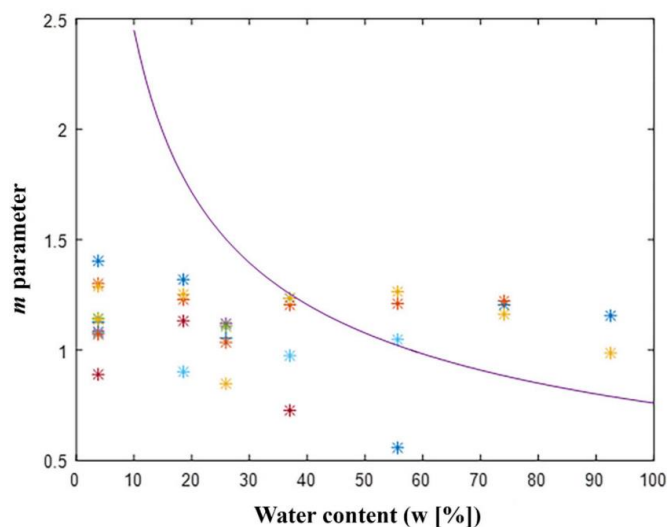
Ludwig et. al. fikk resultater som viser en sterk sammenheng mellom den beregnede termiske fuktfaktoren og de målte forsøksresultatene. Dette gjelder for både for furu og tegl, som var de testede materialene, se figur 2.5 (2004).



Figur 2.5: Målte og beregnede termiske fuktfaktorer for furu og tegl, resultater hentet fra (Ludwig et al., 2004).

Videre kan vi se av Madruga et. al. sine resultater, figur 2.6, at de ikke fant en slik sammenheng mellom de målte forsøksresultatene og den beregnede termiske fuktfaktoren, selv om de hadde tilnærmet samme utstyr og brukte de samme oppvarmingstidene (Madruga et al., 2020). Variasjonen

i disse resultatene kan tyde på at modellen er veldig avhengig av forsøksoppsettet og arbeidsforholdene. Oppgaven ønsker å kunne kvitte seg med noe av denne avhengigheten.



Figur 2.6: Målte og beregnede termiske fuktfaktorer for tre, resultater hentet fra (Madruga et al., 2020).

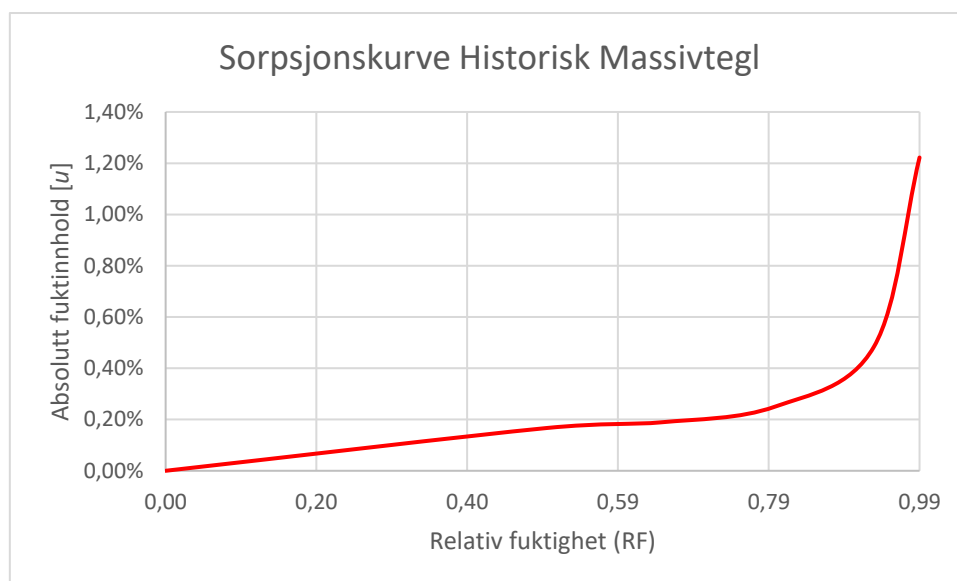
## 2.5 Materialer

### 2.5.1 Teglstein

I Norge stammer tradisjonene med bruk av teglstein tilbake til 1200-tallet, da var det primært kirker og klostre som ble bygget i tegl. Etter en rekke bybranner og flere bestemmelser om murtvang i byene ble det på midten av 1800-tallet mer utbredt å bygge i tegl. På denne tiden drev man med lokal framstilling av teglstein og Norge hadde cirka 300 teglverk spredt rundt i landet (Thue, 2016). Det anslås at nærmere 600 000 bygg i Norge er fra før 1900, og mange av disse har konstruksjoner av mur og teglverk (Edvardsen, 2017). Selv om murstein er et av de mest holdbare materialene vi har, trenger teglkonstruksjoner jevnlig vedlikehold. Skader som skyldes vannlekkasjer kan en gjøre noe med (Lampi, 2019). Derfor er det et stadig behov for ikke-destruktive metoder for evaluering av konstruksjoners tilstand, som fuktinnhold.

Teglstein utvikles av leire som formes, tørkes og brennes ved høye temperaturer (Thue, 2016). Det produseres to hovedtyper teglstein, hulltegl og massivtegl. Hulltegl er lettere i vekt og krever mindre material til produksjon. Massivtegl har ikke hull og er derfor mer fordelaktig ved oppnåelse av spesielle lyd-, og brannkrav. Begge typene tegl benyttes i fasader (Lampi, 2019).

Teglstein er et lite hygroskopisk materiale, det vil si at likevektsfuktigheten er veldig lav sammenliknet med andre byggematerialer (Madsø, 2001). Dette gjenspeiles i sorpsjonskurven for historisk massivtegl, som vist i figur 2.7, hvor fuktigheten er mye lavere enn den for gran som det framkommer i neste kapittel, figur 2.8.



Figur 2.7: Sorpsjonskurve for historisk massivtegl fra 1500-tallet. Tilvirket med data fra (Fraunhofer Institut Bauphysik).

Brenntemperaturen er med på å påvirke steinens egenskaper; for eksempel blir det færre porer ved høyere temperaturer. Dette fører til at steinen tar opp enda mindre fuktighet (Thue, 2016).

Framstillingen av tegl har vært et håndverk og hadde en viss karakter av dette helt fram til 1970-tallet. I nyere tid er produksjonen blitt en mekanisk og automatisert industri (Madsø, 2001). Etter denne mer moderne teglsteinsutviklingen blir steinene produsert under høyere temperaturer og det kan derfor antas lavere fuktopptak enn de historiske steinene som stammer fra før denne industrialiseringen.

### 2.5.2 Tre

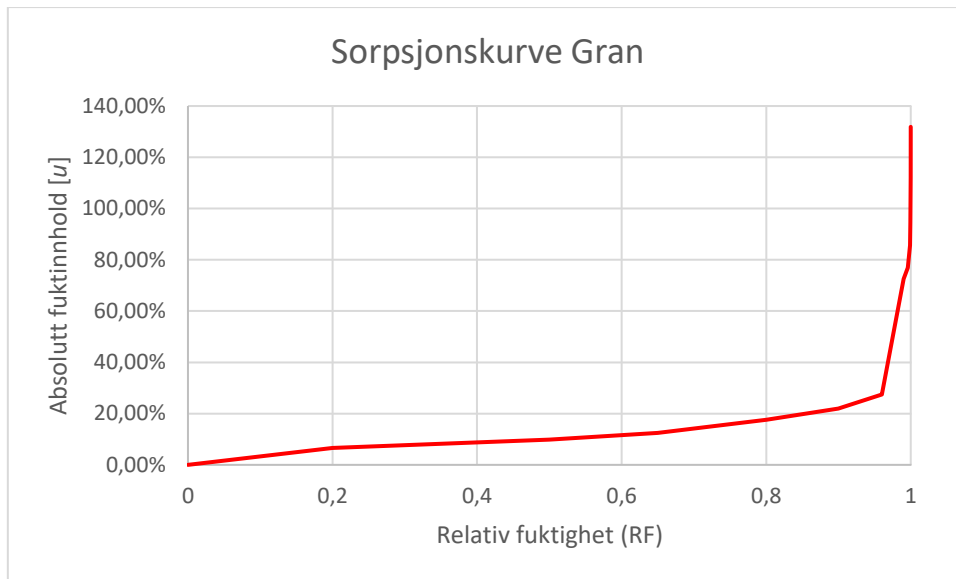
Tre har alltid dominert den norske byggestilen, mye grunnet den rikelige tilgangen på trevirke her i landet (Thue, 2016). Norge er et av landene i verden med størst andel trehus i forhold til resten av boligmassen. I Norge er der først og fremst gran og furu som benyttes ved husbygging (Edvardsen & Ramstad, 2014).

Bruken av tre som byggemateriale er også aktuelt grunnet de positive miljøeffektene. God skogdrift med bærekraftig høsting vil medføre CO<sub>2</sub> lagring i trevirket som senere benyttes som byggematerialer. I Norge drives over 75 % av skogen bærekraftig. Økt bruk av norsk tre som byggemateriale vil derfor bidra til reduksjon av CO<sub>2</sub> i atmosfæren (Savnæs, 2004).

Tre brukt til utvendig kledning er karakteristisk for Norge. Det er først og fremst granbord som benyttes til utvendig kledning (Edvardsen & Ramstad, 2014). Ofte impregneres og overflatebehandles dette trevirket for å forhindre nedbrytning fra sopp og skadeinsekter (Geving &

Thue, 2002). Maling er den mest varige overflatebehandlingen. Gran er bedre egnet som underlag til maling enn furuvirket. Kjerneved av furu derimot har en naturlig bestandighet og benyttes derfor som ubehandlet kledning (Edvardsen & Ramstad, 2014).

Tre er et veldig hygroskopisk materiale som tar opp og avgir fuktighet og varme avhengig av luftas fuktighet (RF) og temperatur (Edvardsen & Ramstad, 2014). Figur 2.8 er et eksempel på sammenhengen mellom RF og fuktinnholdet i gran.



Figur 2.8: Sorpsjonskurve for gran. Tilvirket med data fra (Fraunhofer Institut Bauphysik).



### 3 Metode

I dette kapitlet presenteres metoden som er benyttet for å finne svar på oppgavens problemstilling. Først presenteres utstyret som er brukt, samt prøvene som er testet gjennom arbeidet med oppgaven. I kapittel 3.3 følger en oversikt over kondisjoneringen av prøvene. Et mål med oppgaven var å utvikle en tidseffektiv forsøksprosedyre, arbeidet med utviklingen av denne og forsøksoppsettet er beskrevet i kapittel 3.4 og 3.5. Til slutt i kapitlet blir innhenting av data og bearbeidelsen av disse presentert.

#### 3.1 Valg av metode

Metoden brukt i denne oppgaven er aktiv termografering av forskjellige fasadematerialer. Aktiv termografering øker kontrastene i målingene og gjør det lettere å være sikker på at eventuelle variasjoner i resultatene skyldes varierende fuktinnhold. Oppgaven benytter modellen for termisk fuktfaktor og vil ut fra denne utvikle en prosedyre for ikke-destruktiv fuktmåling ved hjelp av termografering. Termografering og vektmålinger resultere i mengder data med som videre vil bearbeides for å svare på oppgavens problemstilling.

#### 3.2 Utstyr og materialer

##### 3.2.1 Varmeelement

Gjennom oppgaven er det benyttet to forskjellige varmeelementer. Lampe 1 er en varmelamparmatur for husdyroppdrett med en PHILIPS varmpære, av typen IR 250 RH IR2. Den har effekt på 250W, spenning 230-250V og armaturer måler 20 cm i diameter, se figur 3.1.



Figur 3.1: Foto av lampe 1, armatur og varmpære.

Lampe 2 er en infravarmner med varmeelement av rustfritt stål. Den har effekt på 1000W, spenning 230V ~ 50Hz og måler 115 x 7 x 6 cm, se figur 3.2.



Figur 3.2: Bilde av lampe 2 hentet fra medfølgende produktbeskrivelse.

### 3.2.2 Kamera og programvare

Kameraet som er brukt til termografering gjennom oppgaven er et Optris PI 640, tabell 4 oppsummerer kameraets spesifikasjoner. Optris PI 640 er et kompakt infrarødt (IR) kamera som kan ta opp både bilder og video. Under termografering registreres data med programmet Optris PIX Connect (Optis GmbH).

Tabell 4 viser spesifikasjoner for Optris PI 640, IR-kameraet brukt i oppgaven (Optis GmbH).

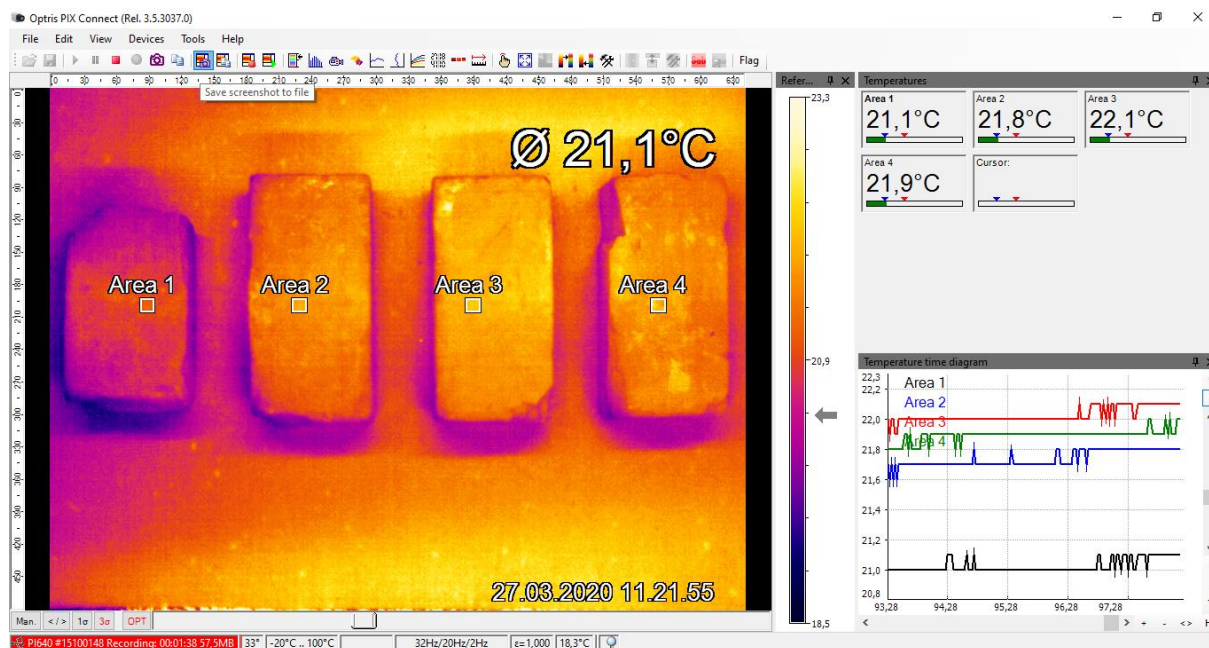
<b>Temperatur område</b>	-20 °C til 900 °C
<b>Spekter</b>	7,5 – 13 $\mu m$
<b>Frekvens</b>	32 Hz
<b>Optisk oppløsning</b>	640x480 piksler
<b>Termisk sensitivitet</b>	75 mK
<b>Nøyaktighet</b>	$\pm 2$ °C eller $\pm 2$ %
<b>Størrelse</b>	45x56x90 mm
<b>Vekt</b>	320 g

Programvaren PIX Connect behandler data fra alle IR-kamera levert av Optris. Programmet tillater høy individuell tilpasning, både på layout og mulig input. Programmet har blant annet en rekke valgbare fargemønstre som bidrar til en god optisk beskrivelse av termiske kontraster (Optis GmbH).

Områdene for måling registrerer data som kan eksporteres og behandles i programmer som Microsoft Excel. Områdene kan fritt defineres med både størrelse og form. Hvert område settes opp med sin egen beregningsmodell; minimum, maksimum eller gjennomsnittlig verdi. Områdene kan i tillegg tilpasses med individuelle emissiviteter (Optis GmbH). Dette gir gode muligheter for å skille på



resultatene fra mange forskjellige prøver og overflater. Figur 3.3 illustrerer programmet med definerte områder og tilhørende temperaturer og temperatur-tid graf.



Figur 3.3: Skjemutklipp av PIX Connect under en termografering.

Til databearbeidelsen er Microsoft Excel og Python brukt. Microsoft Excel er et dataprogram som baserer seg på regneark hvor en kan opprette tabeller, beregne og analysere data (Microsoft). Excel brukes til det meste av databearbeidelsen i oppgaven. Python er et programmeringsspråk som benyttes i bredt spekter for problemløsning. Python er velegnet for å utøve store beregninger og prosesser med få linjer kode (Anaconda). Python brukes i oppgaven til å finne og plote den beregnede termiske fukt faktoren.

### 3.2.3 Prøver

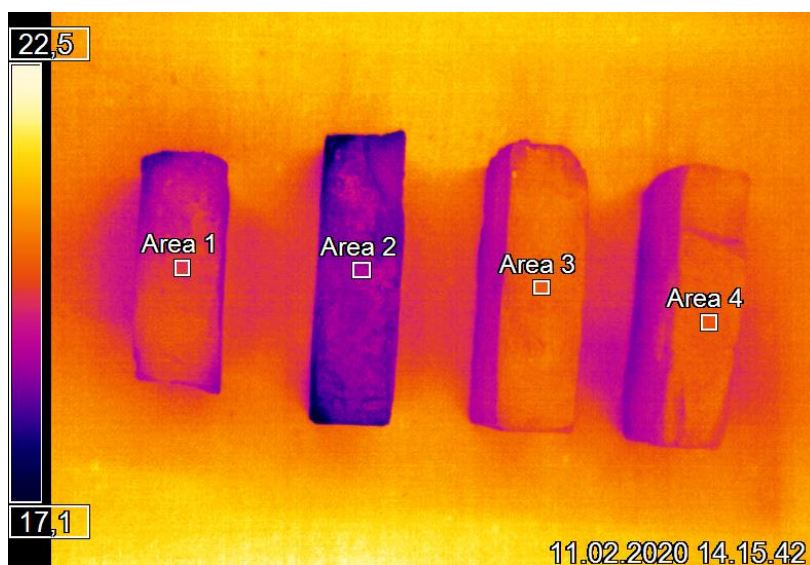
Gjennom arbeidet med oppgaven utføres det tester på 3 materialer, historisk massivtegl, granpanel og moderne hulltegl.

Den historiske massivteglen er anskaffet fra et vernet historisk bygg ved Borgarsyssel Museum i Sarpsborg (St. Olavs Vold). St. Olavs Vold steinene er anslått å være fra 1840 og de er lokalt utarbeidet i Østfold. Derfor er de eksakte varme-, og fukttegenskapene ukjente. Det å kunne si noe om egenskapene til denne steinen vil være verdifullt for de planlagte renoveringene av St. Olavs Vold. Kunnskap om egenskapene vil også kunne være overførbart til de fleste teglbygg fra denne tiden i Østfold.

Av de fire steinene som er anskaffet er tre nesten hele i standard massivtegl størrelse, mens en av steinen (S1) er noe mindre. Steinen har også varierende mengde rester av puss på overflaten, se figur 3.4.



Figur 3.4: Foto av de fire historiske steinene, (f.v.) S1, S2, S3 og S4.



Figur 3.5: Termogram hentet fra forsøk Stein2, her er S1 og S2 betraktelig fuktigere enn S3 og S4.

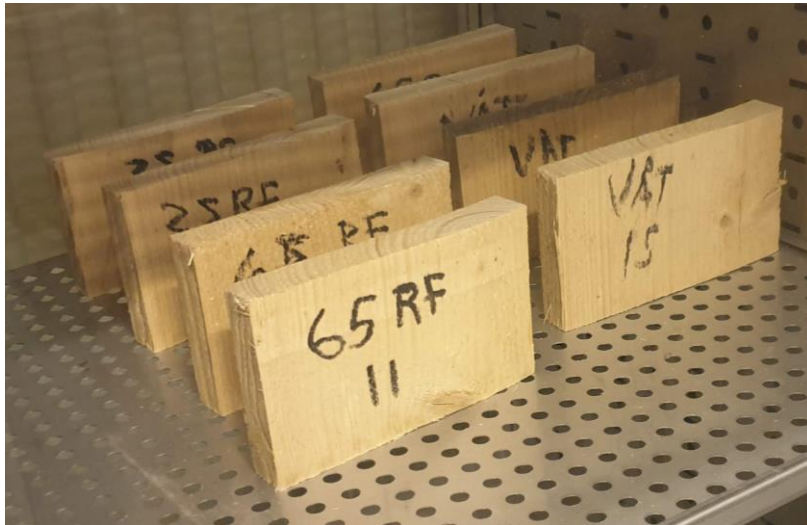
Det er utført en rengjøring av steinen før brukt i forsøkene. For den ene steinen, S1, var store deler av overflaten dekket av puss, se figur 3.6. Det ble derfor besluttet å forkaste alle resultater fra denne prøven. Av de historiske steinene fra St. Olavs Vold er det derfor bare benyttet 3 prøver.



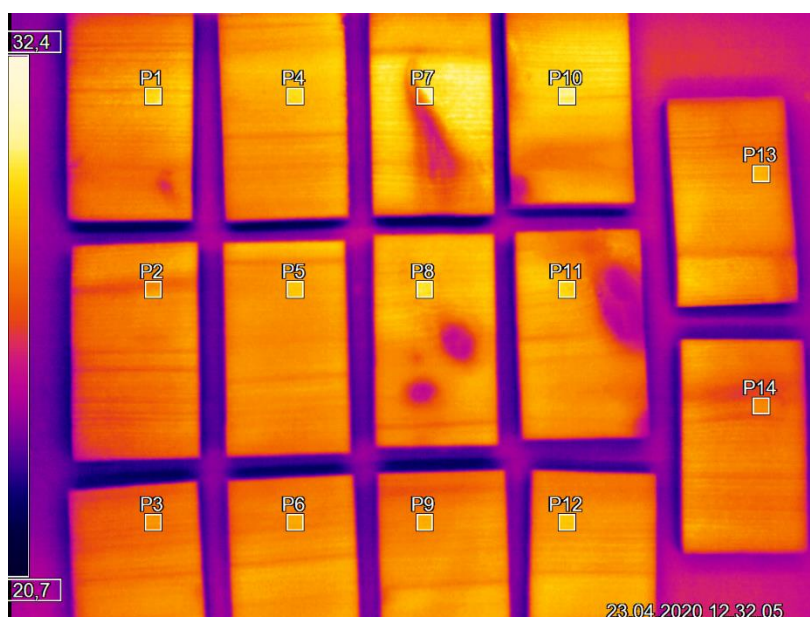
Figur 3.6: Foto av prøve S1, viser puss på overflaten.

Det neste prøvematerialet er granpanel. Granbord uten overflatebehandling er delt opp i prøver på 10,5 cm, se figur 3.7. Totalt er det utført tester på 18 forskjellige prøver fra to panelbord.

Termogrammet i figur 3.8 viser at granprøvene ikke er helt homogene, noen av dem har kvister og ujevnheter som vil gi andre resultater ved termografering. Dette er det tatt hensyn til ved at målområdene er definert cirka midt på prøven uten å være direkte over kvister.

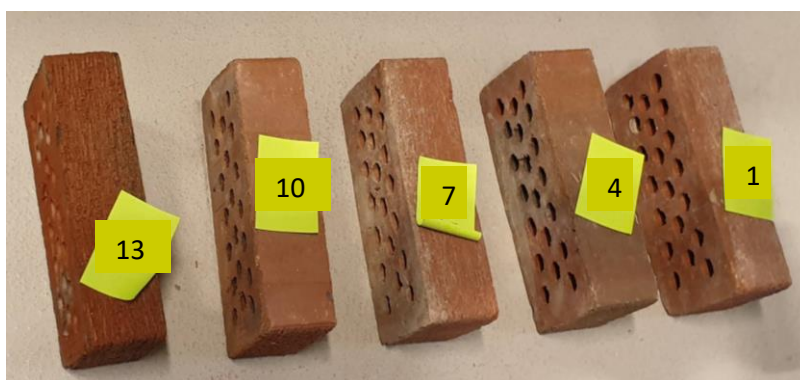


Figur 3.7: Foto av noen panel prøver i plassert i klimaskap.

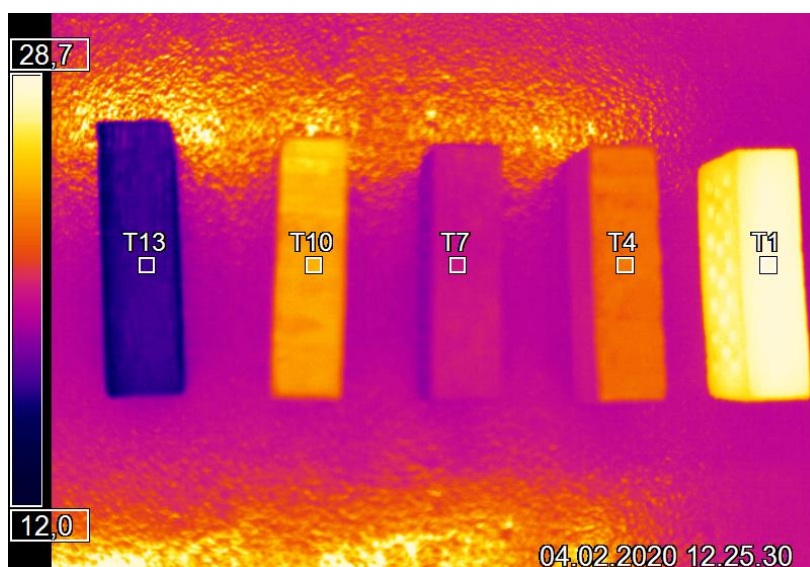


Figur 3.8: Termogram av forsøk panel9, forsøk utført på 14 ganske tørre panel prøver.

Det siste prøvematerialet i oppgaven er en mer moderne hulltegl fra ALNA teglverk. I 1966, etter en lang periode i Oslo, etablerte ALNA teglverk seg på Nes i Romerriket. Her var store deler av produksjonen industrialisert (Lampi, 2018). Dette medfører at ALNA-teglen er mer homogen og skal ha bedre fuktegenskaper enn den historiske St. Olavs Vold steinen. I denne oppgaven er derfor denne teglen benyttet som sammenlikningsgrunnlag for fuktegenskapene til moderne hulltegl. Videre er disse prøvene også benyttet i prosedyreutviklingen i oppgaven



Figur 3.9: Foto av oppsett til forsøk utført på 5 ALNA-tegl prøver.



Figur 3.10: Termogram fra forsøk utført på 5 ALNA-tegl med varierende fuktighet

Gulvet på laboratoriet består av betong, som vist på figur 3.9. Dette gir blant annet dårlige kontraster til tegl og en del refleksjon av lampene, som kommer fram på termogrammet i figur 3.10. For å unngå mest mulig påvirkning på forsøkene og forstyrrelser på termogrammene er det tatt i bruk et underlag av GU-gips. Dette underlaget er i bruk på figur 3.4, 3.5 og 3.8. På termogrammet i figur 3.5 er det både bedre kontraster til steinen og refleksjonen som kom fram i figur 3.10 er borte. Gjennom oppgaven er det unngått utførelse av forsøk rett etter hverandre blant annet for å unngå varierende startbetingelser grunnet lufttemperatur og varmelagring i underlaget.

### 3.3 Kondisjonering

En viktig faktor i forberedelsene av forsøkene er kondisjonering av prøvene. Her er det brukt en rekke forskjellige klimaforhold for å manipulere prøvenes fuktinnhold, se tabell 5. For de fleste kondisjoneringene er prøvene plassert i klimaskap som vist i figur 3.7.

Prøvene ble utsatt for en rekke ulike klima for å oppnå varierende fuktinnhold. Gjennom å velge hvilke fuktinnhold prøvene skulle ha under forsøkene kunne det produseres nok resultater på kritiske punkter til å kunne si noe godt begrunnet om modellens funksjonalitet rundt disse punktene.

Tabell 5 viser en oversikt over klimasonene brukt for kondisjonering av prøvene. Forhold markert likevekt er brukt i utarbeidelsen av sorpsjonskurvene.

Klima	Relativ fuktighet	Temperatur (°C)	Tid
<b>Helt tørt (tørkeskap)</b>	-	103/50	2-6 døgn (Tørr)
<b>Klimaskap 1</b>	15 %	20	07 døgn
<b>Klimaskap 7</b>	20 %	20	12 døgn (Likevekt)
<b>Lab (Ukontrollert)</b>	25 – 30 %	19-21	07 døgn
<b>Mastersal (Ukontrollert)</b>	25 – 30 %	22-24	07 døgn
<b>Trelab (Kontrollert)</b>	65 %	20	07 døgn
<b>Klimaskap 5</b>	65 %	20	14 døgn (Likevekt)
<b>Klimaskap 2</b>	80 %	20	05 døgn
<b>Klimaskap 6</b>	85 %	20	15 døgn (Likevekt)
<b>Klimaskap 3</b>	95 %	20	13 døgn (Likevekt)
<b>Klimaskap 4</b>	97 %	20	08 døgn (Likevekt)

Tørking av prøvene ble utført i tørkeskap de første 2 døgnene på 103°C, deretter ble skapets temperatur justert ned til 50°C hvor prøvene lå i ytterligere 2-4 døgn. Etter to påfølgende veiinger, med 24 timers mellomrom, hvor prøvenes vekt var uendret, ble prøvene tatt ut. Prøvenes tørrvekt er satt opp i *vedlegg B – Tørrvekt*. Denne tørrvekten er brukt som utgangspunkt for beregning av prøvenes absolutte fuktinnhold.

### 3.3.1 Sorpsjonskurve

Det var ønskelig å utarbeide en sorpsjonskurve for de historiske steinene siden St. Olavs Vold er tenkt renoverert. Ved en oppgradering av bygget vil kunnskap om veggens evne til å ta opp fukt være essensiell i valg av byggestil og materialer. Det er allment kjent at frostsprengning er et problem for teglvegger. Spesielt gjelder dette dersom det isoleres for mye på varm side av veggen samtidig som den kalde teglsiden kan holde på mye vann.

Derfor er det utviklet en sorpsjonskurve for de historiske steinene fra St. Olavs Vold. Det samme er gjort for den moderne ALNA-teglen, for å kunne se disse opp mot hverandre. Videre var det et ønske å kunne sjekke resultatene opp mot allerede gjeldene sorpsjonskurver for å se på gyldigheten av utviklingen.

Gjennom oppgaven utsettes St. Olavs Vold steinene for forskjellige klima for å manipulere fuktigheten i dem før termograferings forsøkene. Dette ble utnyttet til utvikling av steinens sorpsjonskurve gjennom å la steinen være i ett klima til de oppnådde likevekt i klimaet.

Det ble brukt et klimaskap på 20°C hvor steinene ble fuktet opp, så oppgaven ser nærmere på steinenes adsorpsjon (fuktopptak). Grunnet begrensninger i tid ble steinene satt i likevekt på 5 utvalgte RF; 20 %, 65 %, 85 %, 95 % og 97 %. Ved utvikling av denne sorpsjonskurven ble materialet definert i likevekt ved en vektøkning på maksimalt 0,01 % ved to påfølgende veiinger med 24 timers mellomrom. Videre ble det antatt at den moderne ALNA-teglen kom i likevekt raskere enn de historiske steinene. Derfor ble registreringen av likevektsfuktighet for begge materialene utført når de historiske steinene hadde oppnådd likevekt. Resultatene fra de to påfølgende veiingene er presentert i *vedlegg C – Sorpsjon*.

### 3.4 Prosedyreutvikling

For å utvikle prosedyren for forsøkene var det nødvendig å besvare 4 spørsmål:

- Hvordan er strålingen fra varmeelementene?
- Hvordan bør varmeelementet plasseres i forhold til hverandre og prøvene?
- Bør temperaturen måles i oppvarmings-, eller nedkjølingsfasen?
- Hvor lang tid med oppvarming og nedkjøling er nødvendig?

Dette kapitlet går inn på hvordan disse spørsmålene ble besvart.

#### 3.4.1 Varmeelementenes stråling

Undersøkelser av strålingen fra varmeelementene ble utført for å finne den mest optimale lampen til bruk i forsøkene. Det ble benyttet en kryssfinerplate som underlag ved disse undersøkelsene. Varme-, og fukttegenskapene for kryssfiner ligger på omentrent samme nivå som for gran (Geving & Thue, 2002). Platen er derfor lett påvirkelig og gir gode kontraster på termogrammene etter kort oppvarming.

*Tabell 6 viser en oversikt over forsøk utført i forbindelse med kartlegging av strålingen fra varmeelementene.*

Varmeelement	Oppsett	Avstand til plate	Test mål
Lampe 1	Håndholdt	50 og 100 cm	Jevnhet og rekkevidde
Lampe 1	Fastmontert	29, 48 og 100 cm	Jevnhet og rekkevidde
Lampe 2	Hviler mellom to bord	73 cm	Jevnhet og rekkevidde
2 stykk lampe 2	Hviler, 60cm fra hverandre	73 cm	Jevnhet

På bakgrunn av testene med lampe 1 ble 50 cm ansett som optimal avstand til platen. Dette samt praktiske hensyn la grunnlaget for avstanden i testene av strålingen fra lampe 2. Resultatene fra testene presentert i tabell 6, la grunnlag for varmeriggens design som er beskrevet i kapittel 3.5.

### 3.4.2 Oppvarming eller nedkjøling

I oppvarmingsfasen blir prøvene primært påvirket av varmeelementene. Nedkjølingsfasen foregår med naturlig konveksjon og drives primært av temperaturforskjellen mellom den oppvarmede prøven og laboratoriets lufttemperatur.

Ludwig et. al. og Madruga et. al. utførte målinger mens prøvene var i oppvarmingsfasen (2004; 2020). I denne oppgaven var det ønskelig å se på mulighetene for å eliminere den direkte påvirkningen fra varmeelementet, ved å utføre målinger i nedkjølingsfasen.

Det er utført to tester for å se nærmere på utviklingen av den termiske fukt faktoren over tid for de to fasene. Begge varmeelementene er benyttet i hver sin test. For begge testene er det varmet over en lengre periode, 8 – 10 minutter, for å se om termisk fukt faktor etter noe tid vil flate ut. Det er videre målt i en tilsvarende lang nedkjøling for hver test. Målingene er utført på både vått og tørt materiale samtidig. Resultatene fra testene ligger til grunn for når målingene utføres i forsøkene i oppgaven.

### 3.4.3 Oppvarmingstid

Det var ønskelig å unngå en for lang oppvarming, da oppgaven har som mål å utvikle en tidseffektiv prosedyre. For forsøkene i oppgaven er det definert at en oppvarming som medfører minimum 2°C temperaturøkning vil holde. Det er utført en test på to ALNA-tegl prøver for å finne oppvarmingstiden som medfører minimum 2°C temperaturøkning. Oppvarmingstiden i prosedyren ble vagt basert på denne testen. Nedkjølingstiden ble definert ut fra resultatene av den termiske fukt faktoren.

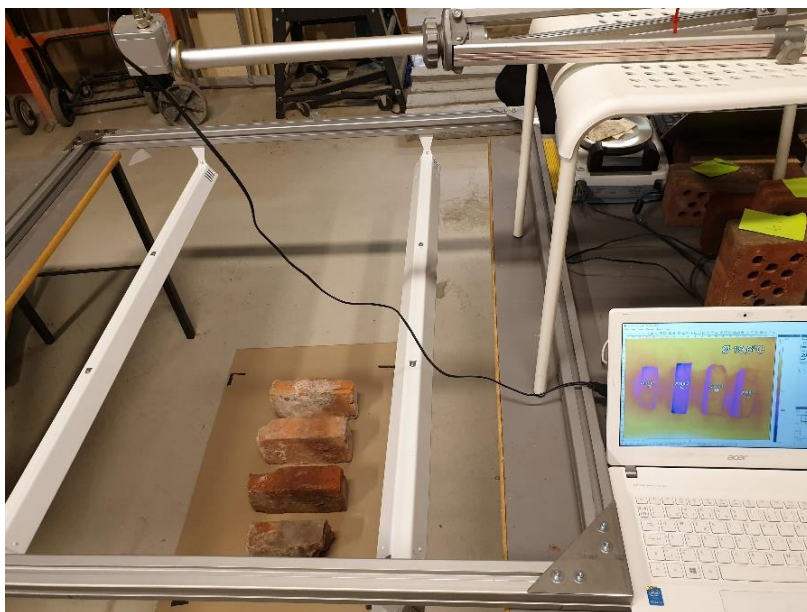
## 3.5 Forsøksoppsett

Dette kapitlet beskriver oppsettet for forsøkene og prosedyren som ble fulgt. En oversikt over alle forsøk som er utført i oppgaven finnes i *vedlegg A – Forsøkslogg*.

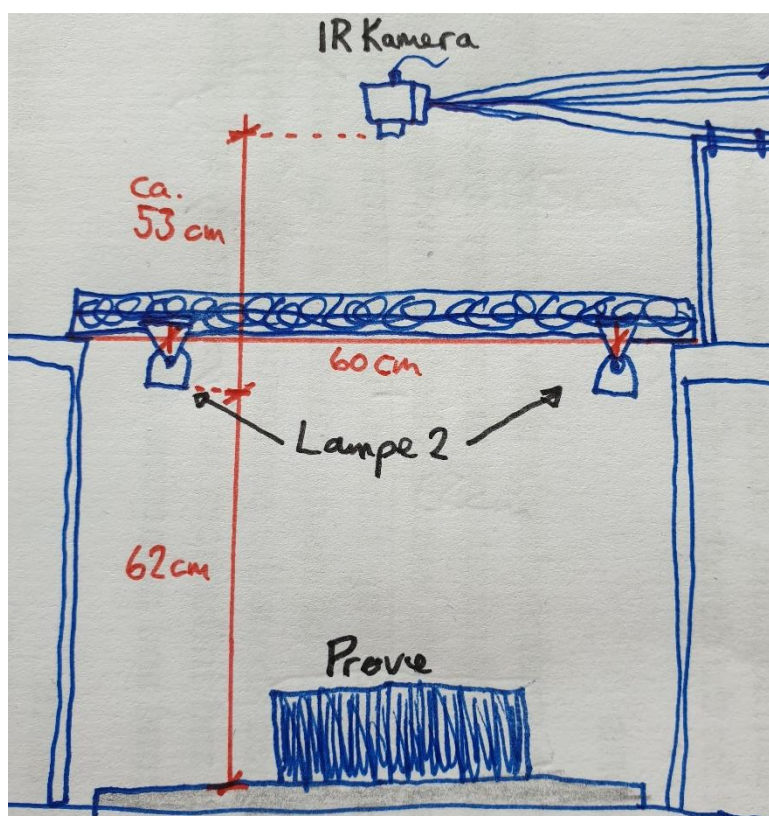
I arbeidet med oppgaven ble det designet en varmerigg som egner seg til bruk i laboratorium og ute i felt. Den består av to deler som kan kobles sammen. Den delen som benyttes i laboratoriet består av to 1000W varmelamper (lampe 2). Lampene er montert 60 cm fra hverandre på en ramme av aluminium. Varmeriggen ble plassert slik at lampene henger 62 cm fra testunderlaget ved utførelsen av forsøkene, se figur 3.11 og 3.12.

IR-kamera ble montert cirka 115 cm fra prøvene, se *vedlegg A – Forsøkslogg* for en oversikt over nøyaktig avstand i hvert forsøk. Siden prøvene i virkeligheten ikke er diffuse ble kameraet plassert mest mulig rett over prøvene for å fange opp riktig strålingsmengde.





Figur 3.11: Foto av forsøks oppsette som viser varmeriggen, kamera og prøver på underlaget (under et forsøk).



Figur 3.12: Skisse av forsøksoppsettet fra siden.

Før hvert forsøk ble prøvene veid, slik at fuktinnholdet ved forsøket kunne registreres. Prøvene ble plassert mellom lampene og innenfor kameraets synsfelt. Prøvene lå med cirka 1 cm avstand mellom hverandre for panelet, og 2-4 cm avstand for teglsteinen. I de fleste forsøkene ble prøvene plassert på underlaget beskrevet i kapittel 3.2.3. Forsøkene ble utført på ett og ett materiale om gangen.

Unntakene fra dette er forsøk *Panel2\_Tegl3* og forsøkene som er utført i forbindelse med metodeutviklingen.

Termograferingen er startet samtidig med lampene. Lampene fra varmeriggen var på og varmet prøvene i akkurat 2 minutter. Termograferingen fortsatte i ytterligere 7 minutter for å måle tilstrekkelig av nedkjølingsfasen. Ved endt forsøk ble prøvene klargjort til ny kondisjonering.

### 3.6 Datainnhenting

Det er brukt en VWR vekt, se figur 3.13 og et Optris PI 640 IR-kamera, som beskrevet i kapittel 3.2.2 til innhenting av data.

#### 3.6.1 Fuktinnhold

For å avgjøre fuktinnholdet til prøvene ved hvert forsøk ble vekten av prøvene målt rett før forsøkene startet. Ved hjelp av den tidligere registrerte tørrvekten ble absolutt fuktinnhold beregnet for hver prøve og senere paret med den målte termiske fuktfaktoren for den enkelte prøve.

Ved utvikling av sorpsjonskurve for tegl ble det utført enkelte vektmålinger uavhengig av forsøkene. Det ble utført 2 vektmålinger med 24 timers mellomrom, hvor det ikke skulle være en høyere vektendring enn 0,01 % før prøvene ble definert i likevekt. Under utviklingen av sorpsjonskurvene ble det ikke utført forsøk på teglprøvene før de hadde oppnådd likevekt.



Figur 3.13: Foto av en veiing.

#### 3.6.2 Termografering

Forsøkene er utført med aktiv termografering. Hensikten med å benytte aktiv termografering er å øke kontrastene i temperaturen (temperaturdifferansene), dette resulterer i data som er lettere å

tolke. Dessuten reduserer det usikkerheten fra andre faktorer som kan påvirke prøvenes temperaturer.

Ved registrering av data fra termograferingen ble programmet PIX Connect benyttet. Avstanden mellom kameraet og prøvene ble definert i programmet individuelt for hvert forsøk.

Ved hvert forsøk ble det også definert spesifikke områder for måling. I denne oppgaven brukes et kvadratisk område for måling som tilsvarer 1x1 cm per prøve. I programmet tilsvarer dette et område på 12x12 piksler ved beskrevet forsøksoppsett. Målområdene er plassert omtrent midt på prøven for å unngå randeffekter. Områdene ligger også på linje med varmeelementene, dette er for å måle områder som har mottatt så lik stråling som mulig. Områdene var satt til å måle gjennomsnittlig temperatur.

Emissiviteten er også definert individuelt for hvert område og avhenger av prøvematerialet, emissivitetene brukt ved innhenting av data er listet opp i tabell 7. Det er registrert data ved termografering i 1Hz gjennom hele forsøket.

Tabell 7 viser antatt emissivitet for materialene testet i oppgaven.

Materiale	Emissivitet
St. Olavs Vold tegl	0.93
Granpanel	0.90
Moderne ALNA-tegl	0.93

### 3.7 Databearbeidelse

I etterkant av forsøkene importeres alle målingene fra PIX Connect inn i Microsoft Excel. Videre benyttes Excel til å finne målt termisk fuktfaktor for hver prøve. For å finne den målte termiske fuktfaktoren, se formel 25, er initialtemperaturen ( $T_0$ ) hentet ut ved slukking av varmeelementet og temperaturen etter gitt tid ( $T(t)$ ) er hentet ut 180 sekunder etter slukking av varmeelementet.

Ut fra utviklingen av den termiske fuktfaktoren over tid kom det fram at faktoren etter en tid flatet ut for begge materialene, på samme måte som i figur 4.4. Dette skjedde litt før eller rundt 3 minutter etter slukking for våre forsøk. Det var ønskelig å utvikle en prosedyre som skulle være tidseffektiv, derfor ble det valgt å hente ut den målte termiske fuktfaktoren etter 180 sekunder nedkjøling.

Opgaven måler i nedkjølingsfasen, derfor vil initialtemperaturen være høyere enn temperaturen etter 180 sekunder. Modellen for termisk fuktfaktor ser på temperaturdifferansen. Av praktiske hensyn er det derfor valgt å skifte fortegn slik at temperaturdifferansen er positiv, se formel 27.

$$m = \frac{T_0 - T(t)}{\sqrt{t}} \quad (27)$$

Gjennom å plote de målte termiske fuktfaktorene sammen med de tilhørende fuktighetene er det ønskelig å se på trenden i målingene for å finne en kalibreringskurve som kan brukes til å finne fuktinnhold dersom man vet eller får målt den termiske fuktfaktoren.

### 3.7.1 Beregnet termisk fuktfaktor

Ved å benytte andre del av formel 25 er det også mulig å beregne den termiske fuktfaktoren ut fra prøvenes varmeegenskaper. Gjennom sammenlikning av den beregnede og den målte termiske fuktfaktoren for et gitt fuktinnhold, vil en kunne si noe om kvaliteten på målingene og hvorvidt dette er en god modell for bruk i ikke-destruktive fuktmålinger ved IRT.

Databehandlingsprogrammet Python er brukt for å beregne og plote linjen for den termiske fuktfaktoren sammen med de målte resultatene. For å beregne den termiske fuktfaktoren trengs varmeovergangen ( $Q$ ) og den termiske effusiviteten ( $e$ ). Den termiske effusiviteten er et uttrykk for materialets egenskaper og varierer med fuktinnhold. Materialelegenskapene som er brukt i beregningene er listet opp i tabell 8.

Tabell 8 viser materialelegenskaper brukt i beregning av termisk fuktfaktor etter formel 25.

Materiale	Egenskap		Benevning	Kilde
Historisk tegl	Densitet	1800	$kg/m^3$	(Fraunhofer Institut Bauphysik)
	Spesifikk varmekap.	850	$Ws/kgK$	(Fraunhofer Institut Bauphysik)
	Varmekonduktivitet	0.6	$W/mK$	(Fraunhofer Institut Bauphysik)
Panel	Densitet	500	$kg/m^3$	(Kilde, 2011)
	Spesifikk varmekap.	1900	$Ws/kgK$	(Kilde, 2011)
	Varmekonduktivitet	0.12	$W/mK$	(Kilde, 2011)
Vann	Spesifikk varmekap.	4180	$Ws/kgK$	(Universitetet i Oslo, 2018)
	Varmekonduktivitet	0.59	$W/mK$	(Universitetet i Oslo, 2018)

For å finne den konstante varmeovergangen ( $Q$ ) er det tatt i bruk kunnskapen om at en ved bruk av IR-kamera kan anta at varmestrålingen fra prøven til kameraet er satt sammen av termisk refleksjon ( $q_r$ ) og termisk konveksjon ( $q_c$ ), gitt ved formel 9 (Forkaides & Kalogirou, 2011). Dessuten må det tas høyde for tregheten i varmeelementene som medfører et tillegg i de termiske refleksjonene, i denne oppgaven er det valgt å kalle dette tillegget  $q_l$ . Med denne antagelsen kan den konstante varmeovergangen finnes ved formel 28.

$$Q = h_i(\Delta T_{wi}) + 4\varepsilon\sigma(T_{ref})^3 * (T_{obj} - T_{ref}) + q_l \quad (28)$$

Faktorene brukt i beregning av den konstante varmeovergangen er vist i tabell 9, samt tabell 7, valgt emissivitet.

Tabell 9 viser valgte faktorer ved beregning av termisk fuktfaktor.

Faktorer	Valgt verdi
$h_i$	10 W/m <sup>2</sup> K
$T_{ref}$	20 °C
$q_l$	30 W/m <sup>2</sup>
$T_{obj}$ - Panel	25.78 °C
$T_{obj}$ - Stein	22.921 °C

Innvendig varmeovergangsmotstand (R) er variabel, men for denne oppgaven er det valgt å bruke  $R_{si} = 0,1$ . Dette gir en  $h_i = 10$  for varmestruer oppover. Denne verdien er valgt på bakgrunn av forsøksoppsettet brukt i oppgaven. Ettersom alle materialene som skal testes i oppgaven har høy emissivitet kan den reflektive temperaturen ( $T_{ref}$ ) settes lik atmosfærens temperatur ( $T_{atm}$ ) ved beregning av termisk fuktfaktor (Tran et al., 2017). Restvarmestruen fra varmelementene ( $q_l$ ) antas å være 30 W. Denne antagelsen drøftes i kapittel 5.4.2. Temperaturen på prøvene ( $T_{obj}$ ) er satt til gjennomsnittlig temperatur for alle prøvene rett etter oppvarming. Denne temperaturen er beregnet separat for granpanelprøvene og St. Olavs Vold steinene.



## 4 Resultat

Kapittelet som følger presenterer resultatene av arbeidet med oppgaven. Først kommer noen resultater fra prosedyreutviklingen. I kapittel 4.2 er målt og beregnet termisk fuktfaktor presentert. Til slutt presenteres de utviklede sorpsjonskurvene. Resultatene som følger er utarbeidet på bakgrunn av prøveplanen i tabell 10.

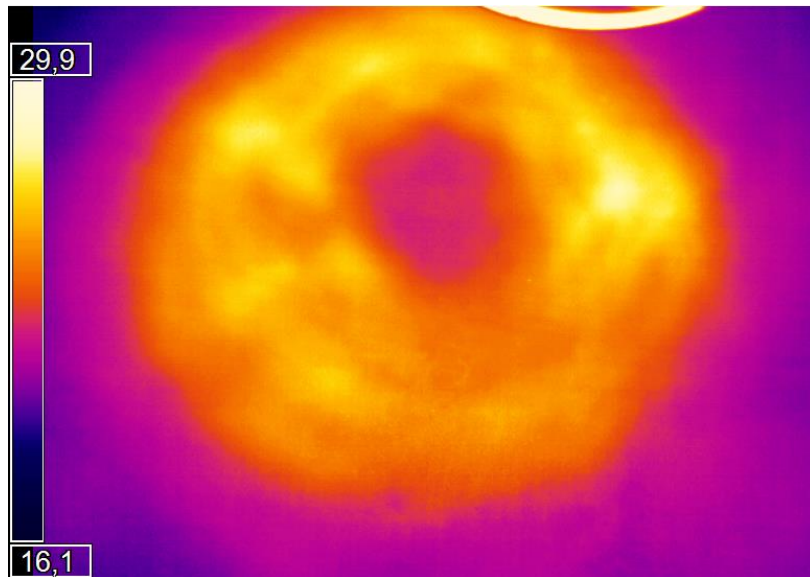
Tabell 10 viser hvilke prøver som er brukt, hva de ble brukt til og hvilke fuktinnhold de hadde.

Material	Fuktinnhold	Prøve	Analyse	Gjentak
Treplate	Normal	Plate	Prosedyreutvikling	-
2'4 plank	Våt – Kapillær metning	Planke	Prosedyreutvikling	-
Moderne tegl	-	2 stk ALNA-tegl	Prosedyreutvikling	-
Historisk Tegl	Normal - ukondisjonert	S3, S4	Termisk fuktfaktor	2x
Historisk Tegl	Våt - ukondisjonert	S1, S2	-	2x
Historisk Tegl	0.13 %	S2, S3, S4	Termisk fuktfaktor Sorpsjonskurve	-
Historisk Tegl	0.19 %	S2, S3, S4	Termisk fuktfaktor Sorpsjonskurve	-
Historisk Tegl	0.25 %	S2, S3, S4	Termisk fuktfaktor Sorpsjonskurve	-
Historisk Tegl	0.38 %	S2, S3, S4	Sorpsjonskurve	-
Historisk Tegl	0.63 %	S2, S3, S4	Termisk fuktfaktor Sorpsjonskurve	-
Granpanel	4.6 %	P1 – 13, P18	Termisk fuktfaktor	2x for P1-9
Granpanel	12.5 %	P1 – 15, P18	Termisk fuktfaktor	2x for P7-9, P13 3x for P10- 12
Granpanel	16.4 %	P1 – 13, P16 – 18	Termisk fuktfaktor	2x for P1- P13 3X for P18
Granpanel	20.7 %	P1 – 13, P18	Termisk fuktfaktor	-
Granpanel	23.2 %	P1 – 13, P18	Termisk fuktfaktor	-
Moderne tegl	0.007 %	T1 – T7	Sorpsjonskurve	-
Moderne tegl	0.011 %	T1 – T7	Sorpsjonskurve	-
Moderne tegl	0.015 %	T1 – T7	Sorpsjonskurve	-
Moderne tegl	0.026 %	T1 – T7	Sorpsjonskurve	-
Moderne tegl	0.042 %	T1 – T7	Sorpsjonskurve	-

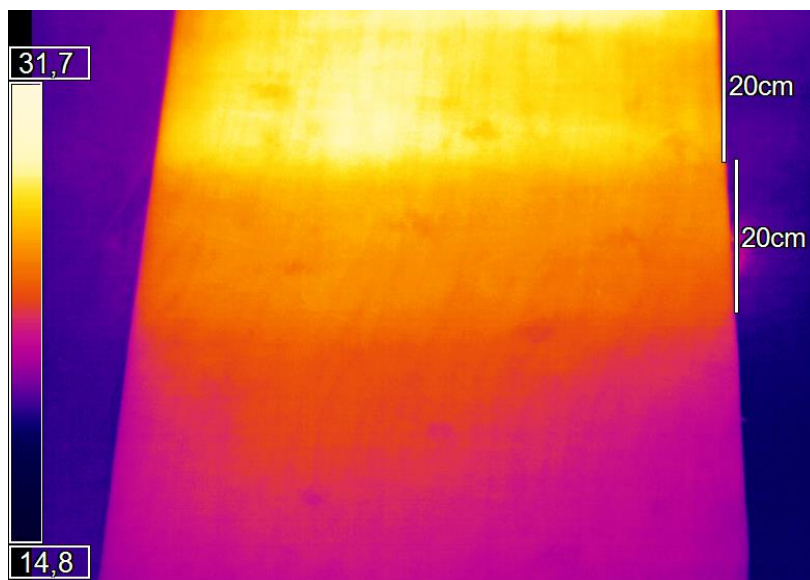
## 4.1 Prosedyreutvikling

### 4.1.1 Varmeelementenes stråling

Her presenteres resultatene fra undersøkelsene som ble utført for å finne lampeoppsettet til bruk i forsøkene. Først i figur 4.1 vises termogrammet etter 4,5 minutters oppvarming med lampe 1. Her er lampen fastmontert 50 cm over treplaten som blir varmet opp.



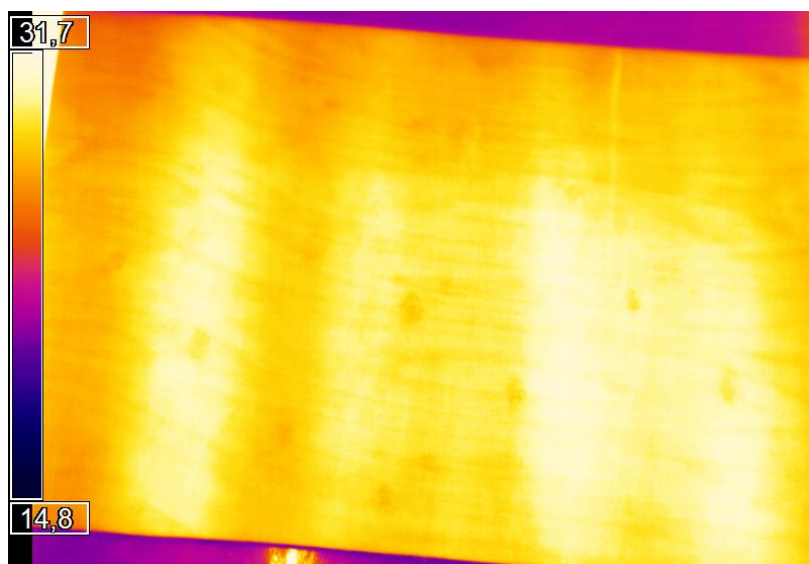
Figur 4.1: Termogram av treplate etter 4,5 minutters oppvarming med lampe 1.



Figur 4.2: Termogram av treplate etter 3 minutters oppvarming med lampe 2, lampen ligger i overkant av termogrammet.



Figur 4.2 og 4.3 er termogrammer fra oppvarming med lampe 2. Her ligger lampen mellom to bord, det ga en avstand på 73 cm til treplaten som ble varmet opp. For figur 4.2 ligger lampen horisontalt rett over termogrammet, så termogrammet viser halve strålingsrekkevidden til lampen. For figur 4.3 er det benyttet 2 like lamper. Disse er plassert vertikalt rett til venstre og høyre for termogrammet, 60 cm fra hverandre.

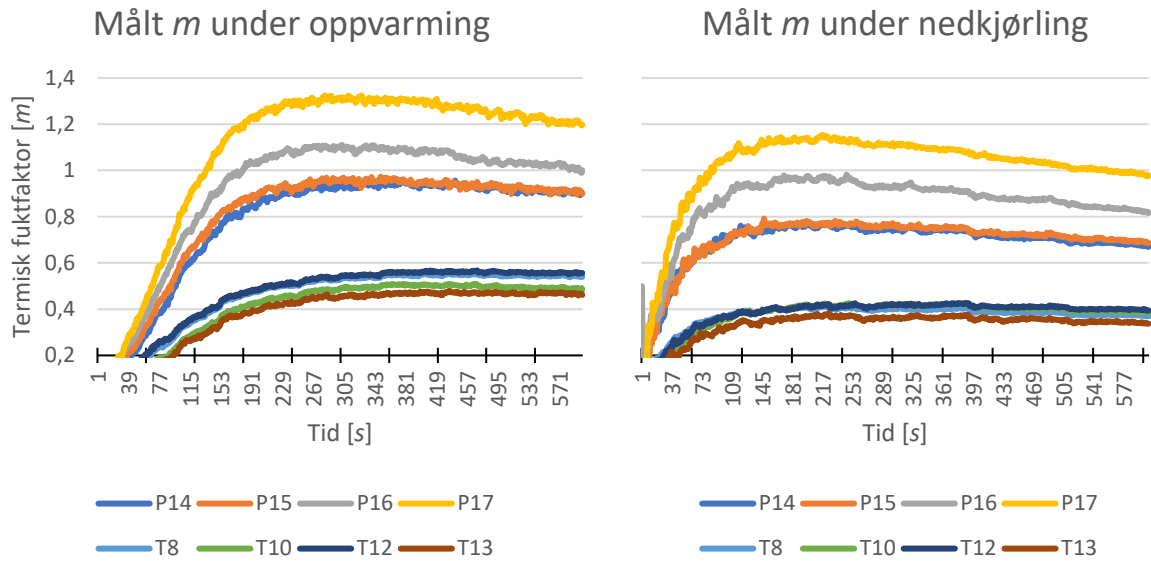


Figur 4.3: Termogram av treplate etter 3 minutters oppvarming med 2 stykk lampe 2 plassert 60 cm fra hverandre.

#### 4.1.2 Oppvarming eller nedkjøling

Det er utført to tester for å se nærmere på utviklingen av den termiske fukt faktoren over tid for oppvarmings-, og nedkjølingsfasen.

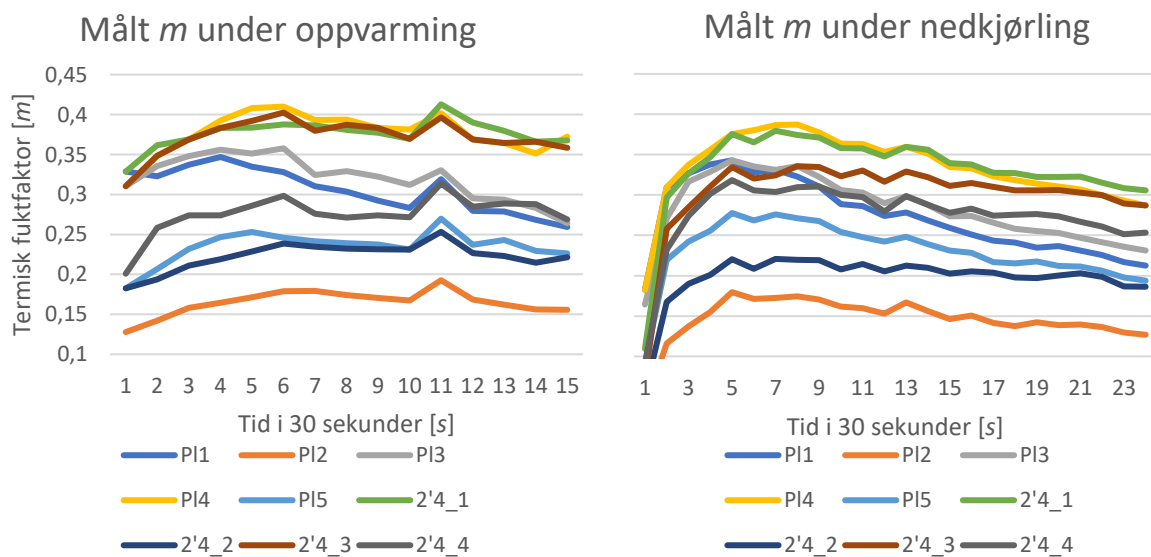
For både figur 4.4 og figur 4.5 er aksene for tid definert fra  $T_0$  for den enkelte fasen. For oppvarmingsfasen er  $T_0$  definert til temperaturen ved start av lampene, tidsaksen viser da antall sekunder fra lampestart. For nedkjølingsfasen er  $T_0$  definert til temperaturen ved slukking av lampene, tidsaksen viser da antall sekunder fra lampene ble slukket, altså antall sekunder nedkjøling.



Figur 4.4: Målt termisk fuktfaktor over tid for prøver av granpanel (P) og ALNA-tegl (T), oppvarming med varmerigg.

Figur 4.4 viser den målte termiske fukt faktoren over tid for oppvarmingsfasen (t.v.) og nedkjølingsfasen (t.h.) av test med varmeriggen. Prøvene som er brukt i denne testen er granpanel og ALNA-tegl. Av begge materialene er det brukt to tørre og to våte prøver.

Figur 4.5 viser den målte termiske fukt faktoren over tid for oppvarmingsfasen (t.v.) og nedkjølingsfasen (t.h.) av test med lampe 1. Prøvene som er brukt i denne testen er en treplate (PI1 til 5) fra laboratorieklima, altså relativt tørr. Og en 2'4 plank (2'4\_1 til 4) som har vært nedsunket i vann over lengre tid, altså relativt våt. Lampe 1 har varierende varmestråling på forskjellige områder, derfor er det brukt flere punkter på hver av prøvene.



Figur 4.5: Målt termisk fuktfaktor over tid for treplate (PI) og 2'4 plank (2'4), oppvarming med lampe 1.

Fra figur 4.4 framkom det en formlikhet på utviklingen av den termiske fuktfaktoren over tid for de to fasene. Denne formlikheten kommer ikke fram ved bruk av lampe 1, se figur 4.5. Derimot er det en synlig formlikhet på nedkjølingsfasene for de begge testene.

#### 4.1.3 Oppvarmingstid

Det er utført en test på to ALNA-tegl prøver for å finne oppvarmingstiden som medfører minimum 2°C temperaturøkning i oppsettet brukt til forsøkene i oppgaven. Denne testen viste at 2 minutters oppvarming var tilstrekkelig for å oppnå en temperaturøkning på 2°C på prøven.

Figur 4.6 viser en våt ALNA-tegl etter 10 minutters oppvarming med varmeriggen. Her framkommer det en tydelig uttørking av prøven. Den hvite linjen markerer hvor langt ned i overflaten teglen har tørket etter oppvarmingen.

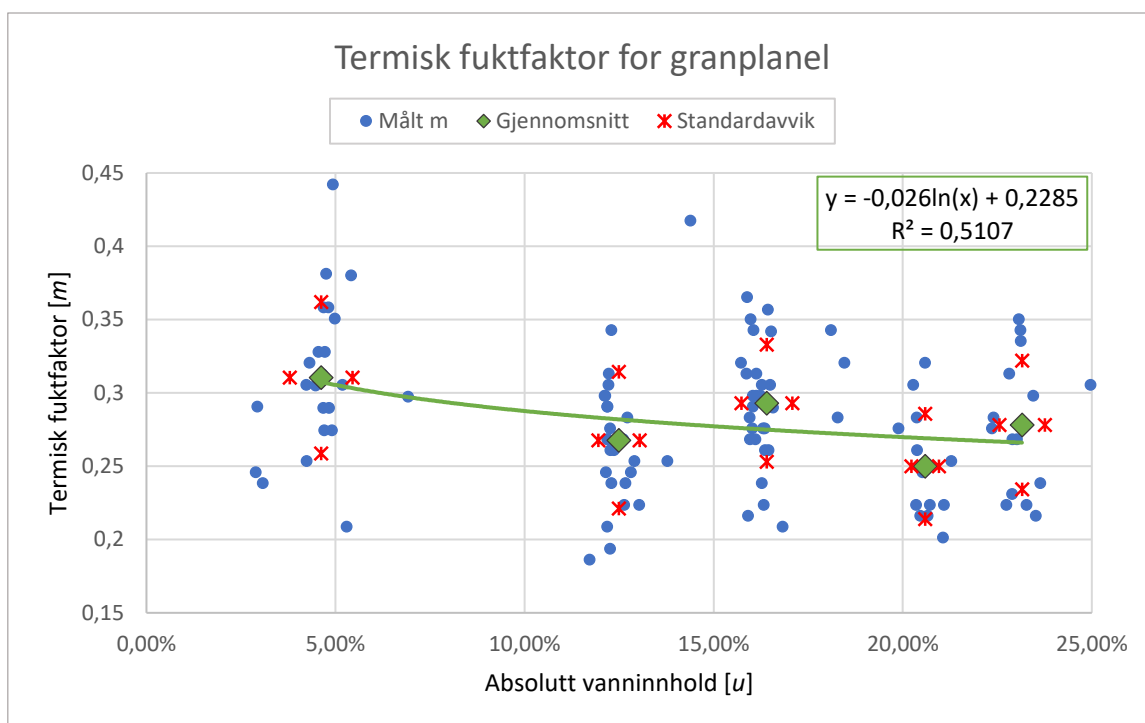


*Figur 4.6: ALNA-tegl etter 10 minutters oppvarming med varmerigg, den hvite linjene viser skillet mellom synlig tørr og synlig våt tegl.*

## 4.2 Termisk fuktfaktor

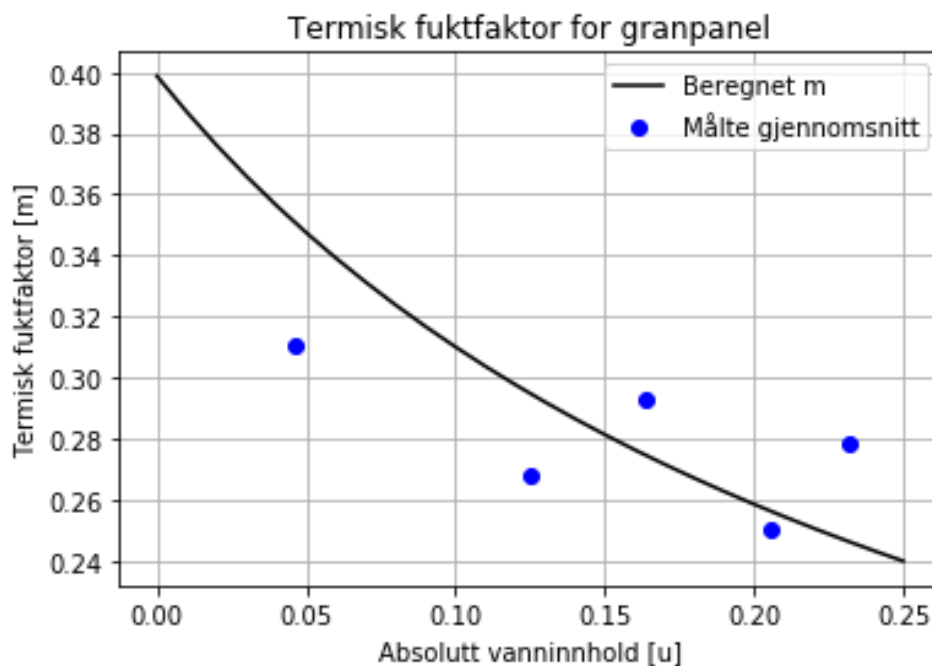
### 4.2.1 Granpanel

Figur 4.7 viser målt termisk fuktfaktor for granpanelprøvene etter 3 minutters nedkjøling. I figuren er alle forsøkene satt sammen, videre er det beregnet gjennomsnitt i utvalgte fuktområder. Figuren inneholder også en logaritmisk regresjonslinje som uttrykker trenden for gjennomsnittene. Gjennomsnittenes standardavvik er også markert. Det framkommer en svak nedadgående trend til tross for den veldige spredningen i måleresultatene. Videre kommer det fram at hele 51 % av variasjonen i de gjennomsnittlige termiske fuktfaktorene skyldes prøvenes fuktinnhold.



Figur 4.7: Alle målte termiske fuktfaktorer for granpanel med uthevet gjennomsnitt og beregnet trend og standardavvik av disse.

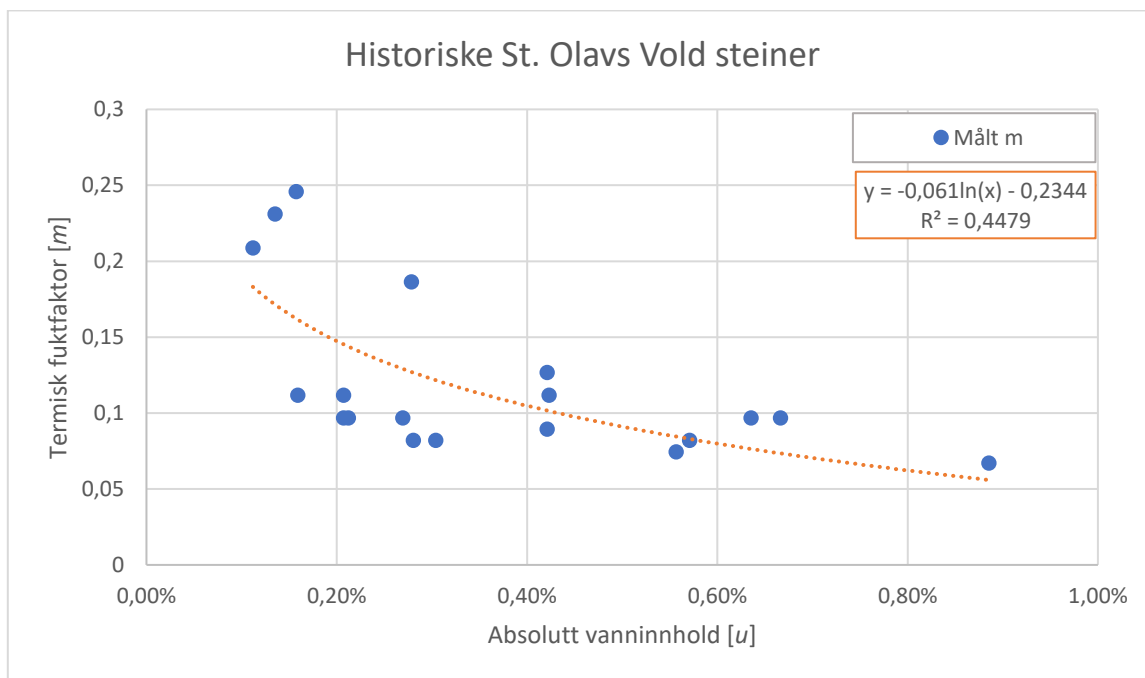
Gjennomsnittene fra figur 4.7 er plottet inn sammen med den beregnede termiske fuktfaktoren i figur 4.8. Her framkommer det en god sammenheng mellom trenden i måledataen og den beregnede termiske fuktfaktoren.



Figur 4.8: Den beregnede termiske fuktfaktoren sammen med gjennomsnittene for målingene av granpanel prøvene.

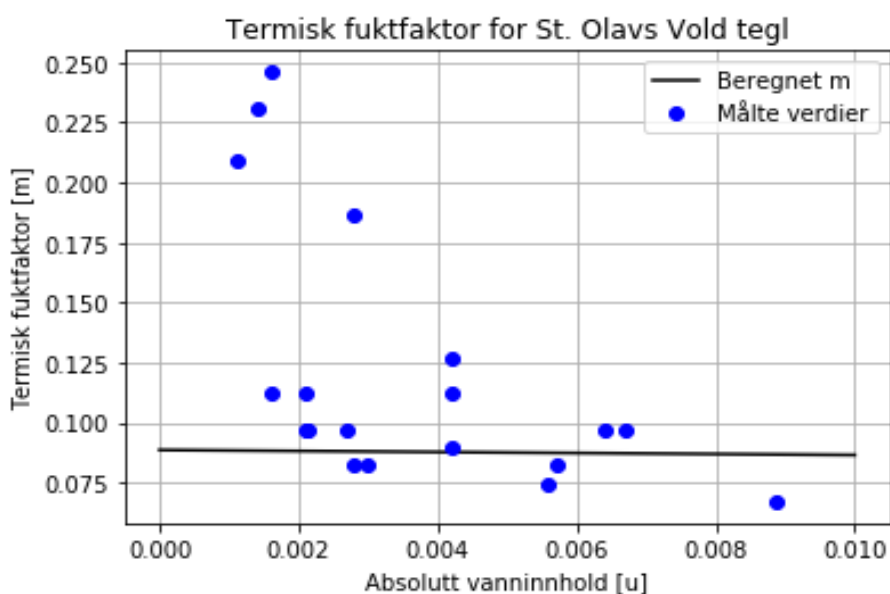
## 4.2.2 Teglsteiner

Figur 4.9 viser de målte termiske fuktfaktorene for St. Olavs Vold steinene ved 3 minutters nedkjøling. Her er alle forsøkene satt sammen, videre er det beregnet en logaritmisk regresjonslinje som uttrykker trenden i målingene. Nesten 45 % av variasjonen i termisk fuktfaktor skyldes prøvenes fuktinnhold.



Figur 4.9: Målt termisk fuktfaktor for St. Olavs Vold steinene etter 3 minutters nedkjøling.

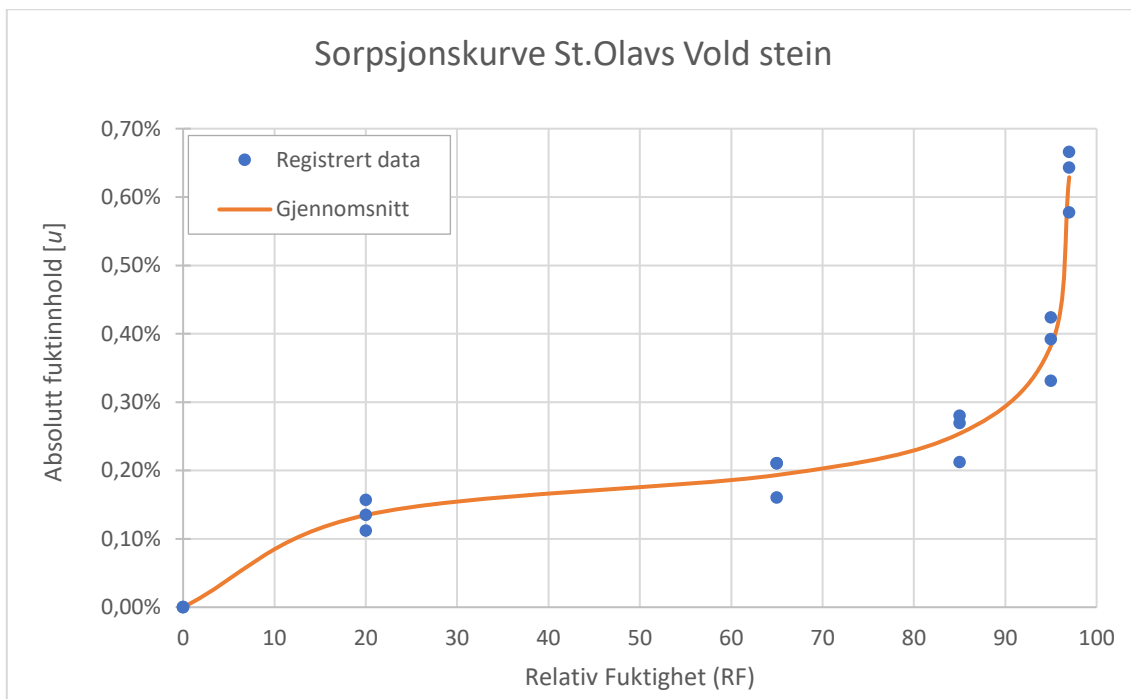
I figur 4.10 er alle målingene plottet opp mot den beregnede termiske fuktfaktoren for St. Olavs Vold steinene. For steinene har den beregnede termiske fuktfaktoren en flatere utvikling enn målingene.



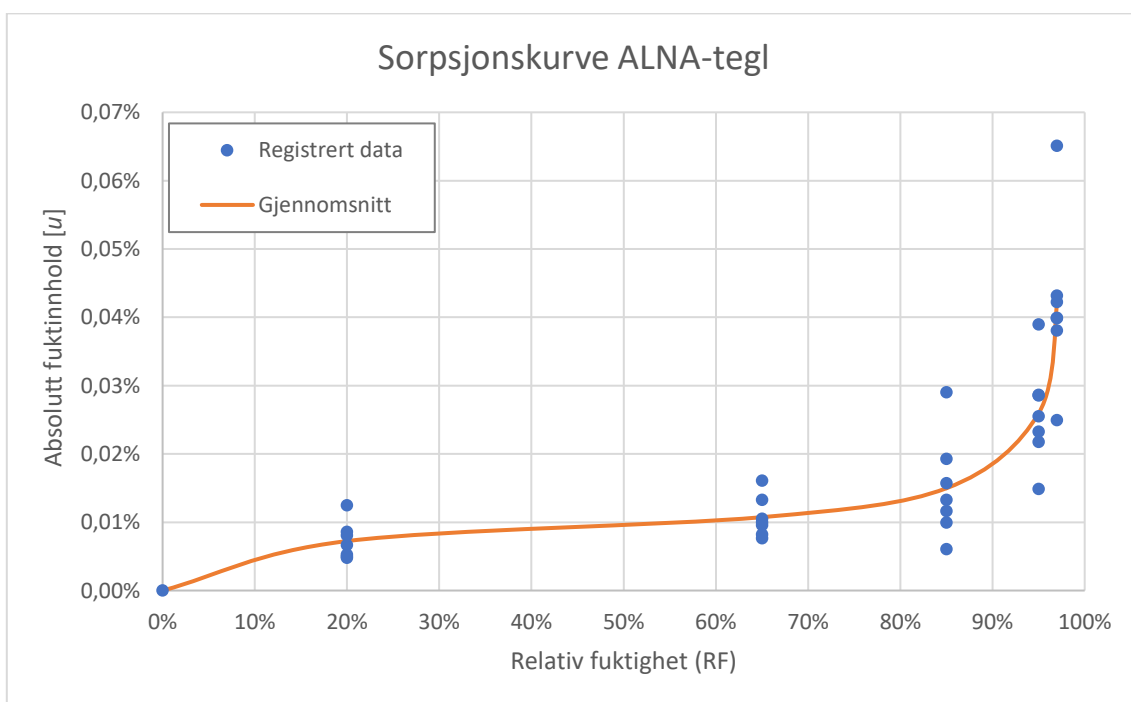
Figur 4.10: Den beregnede termiske fuktfaktoren sammen med målte termiske fuktfaktorer for St. Olavs Vold steinene.

### 4.3 Sorpsjonskurve

I arbeidet med oppgaven er det utviklet sorpsjonskurver for de to teglmateriale, disse er presentert i figur 4.11 og 4.12. Disse sorpsjonskurvene er utviklet med stigende RF, altså illustrerer de materialenes fuktopptak (adsorpsjon).



Figur 4.11: Utviklet sorpsjonskurve for prøvemateriale St. Olavs Vold stein.



Figur 4.12: Utviklet sorpsjonskurve for prøvemateriale ALNA-tegl.

## 5 Diskusjon

I dette kapitlet drøftes funnene fra resultatkapitlet. Først er prosedyren og utviklingen av denne drøftet. I kapittel 5.2 drøftes målenøyaktigheten. Deretter, i kapittel 5.3 og 5.4, drøftes resultatene for modellen med termisk fuktfaktor. Til slutt drøftes funnene i sorpsjonskurvene.

### 5.1 Prosedyreutvikling

Oppgaven hadde som mål å utvikle en tidseffektiv prosedyre i laboratorium for utførelse av målingene, som skulle være overførbare til utendørs feltmålinger. Dette kapitlet drøfter svarene på de fire spørsmålene det var nødvendig å besvare for utvikling av prosedyren for forsøkene.

- Hvordan er strålingen fra varmeelementene?
- Hvordan bør varmeelementet plasseres i forhold til hverandre og prøvene?
- Bør temperaturen måles i oppvarmings-, eller nedkjølingsfasen?
- Hvor lang tid med oppvarming og nedkjøling er nødvendig?

#### 5.1.1 Varmeelementenes stråling

Undersøkelsene av strålingen fra varmeelementene viser at lampe 1 har en veldig ujevn stråling, se figur 4.1. Dette egner seg ikke for forsøkene som skal utføres i oppgaven. Det vil være vanskelig å gjenta forsøkene eksakt nok ved bruk av lampe 1, spesielt når det kommer til plassering av prøver i strålingen. Strålingen fra denne lampen vil heller ikke være lik på hver prøve om en legger opp flere prøver under lampen samtidig. Videre har dette varmeelementet ikke høy nok strålingsintensitet til å være egnet for forsøk utendørs, som også er viktig for prosedyren som utvikles i oppgaven, fordi den helst skal kunne overføres til bruk ute i felt.

Videre kom det fram at lampe 2 har en rekkevidde på ca. 40 cm med relativt jevn stråling, 20 cm ut fra rett under lampen til hver side, se figur 4.2. Denne jevne strålingen vil være egnet for forsøkene i oppgaven. Det kan i tillegg se ut som om det er et område på 20 cm som mottar litt svakere stråling fra lampen, men dette området blir også tydelig påvirket.

Basert på dette ble det besluttet å montere lampene av denne typen 60 cm fra hverandre. Da vil strålingene fra lampene overlape, med litt mindre stråling fra hver på de midterste 20 cm av forsøksområdet. Figur 4.3 viser påvirkningen fra to slike lamper montert 60 cm fra hverandre. Strålingen er ikke helt jevn, dette kan være fordi strålingen fra lampene påvirker hverandre. Det midterste området blir likevel ikke mye mindre påvirket enn områdene nærmere lampene.

Ved å prøve ut flere forskjellige avstander ville det kanskje vært mulig å utbedre dette strålingsbildet, men strålingen ble definert som jevn nok til forsøkene i oppgaven. Siden oppgaven primært måler i nedkjølingsfasen vil ikke strålingene fra varmeelementene påvirke resultatene like direkte, eller i like stor grad som ved oppvarming.

- For varmeriggen som ble designet til bruk i forsøkene i denne oppgaven, samt ute i felt, er det derfor benyttet lampe 2 montert 60 cm fra hverandre.

### 5.1.2 Oppvarming eller nedkjøling

I oppgaven er det valgt å måle termisk fuktfaktor i nedkjølingen av prøvene. Ludwig et. al. og Madruga et. al. utførte sine målinger under oppvarming av prøvene (2004; 2020). Under oppvarming er temperaturutviklingen direkte avhengig av varmeelementets effekt og kvalitet. En viktig forutsetning for modellen er konstant varmepåvirkning, dette krever varmeelementer av god kvalitet dersom målingene utføres i oppvarmingsfasen. Varmepåvirkningen vil også variere med valg av varmeelement og forsøksoppsett. I denne oppgaven var det ønskelig å se på mulighetene for å eliminere påvirkningen fra varmeelementet ved å utføre målinger i nedkjølingsfasen. Dersom modellen viser seg gyldig for målinger i nedkjølingsfasen vil en kunne konkludere med at modellen er brukbar uavhengig av varmeelementets kvalitet.

Det er utført to tester for å se nærmere på utviklingen av den termiske fuktfaktoren over tid for oppvarmings-, og nedkjølingsfasen. Hensikten med testene var å se på utviklingen av termisk fuktfaktor over tid i begge fasene. Om faktoren på noe tidspunkt flatet ut og om det var store endringer i faktorens utvikling mellom oppvarming og nedkjøling. Det er også sett på utviklingen ved bruk av forskjellige varmeelement. Ludwig et. al. brukte to 250W lamper, kanskje lik vår lampe 1, derfor er det også utført en test med denne lampen.

Det kommer tydelig fram av figur 4.4 at oppvarming med varmeriggen ga lik form på utviklingen av den termiske fuktfaktoren over tid både i oppvarmings-, og nedkjølingsfasen. I begge fasene stiger verdien bratt før den etter noe tid flater ut. Videre viser det seg at den termiske fuktfaktoren flater ut ca. 0,1 høyere ved oppvarming enn ved nedkjøling for akkurat denne testen. Denne variasjonen kan skyldes at prøvene etter 10 minutters oppvarming hadde tørket ganske dypt i overflaten, se figur 4.6. Dette vil i praksis si at målingene i de to fasene er utført på prøver med forskjellig fuktighet og derfor ikke er helt sammenlignbare på verdi. Når det er sagt er formligheten et tegn på at det ikke vil utgjøre en veldig stor forskjell å måle under nedkjøling framfor oppvarming.



Ved bruk av lampe 1 framkommer ikke den samme formlikheten mellom de to fasene. For testen med lampe 1 er formen på utviklingen av den termiske fukt faktoren i oppvarmingsfasen nesten helt flat og veldig forskjellig fra nedkjølingsfasen, som vist i figur 4.5.

Etter testene med begge varmeelementene ble det klart at forskjellige varmeelementer kan gi en veldig ulik utvikling i termisk fukt faktor over tid. Derimot er det en formlikhet mellom nedkjølingsfasen for begge testene. Dette viser at målinger i nedkjølingsfasen vil være mindre avhengig av valgt varmeelement og kvaliteten på dette. Modellen kan derfor være anvendbar uavhengig av oppvarmingskilde dersom målingene utføres i nedkjølingsfasen.

- Utvikling av en prosedyre for måling i nedkjølingsfasen vil være mer overførbart til andre forsøksoppsett, derfor er det valgt å måle i nedkjølingsfasen i denne oppgaven.

### 5.1.3 Oppvarmingstid

Oppgaven hadde som mål å utvikle en tidseffektiv prosedyre. Samtidig viste det seg at prøvene tørket ganske dypt i overflaten etter 10 minutters oppvarming, se figur 4.6. En slik uttørking var ønskelig å unngå, da dette ville medføre at fukt målingene gjort før oppvarming ikke stemte med den reelle fuktigheten i nedkjølingsfasen, som er når målingene av den termiske fukt faktoren er utført. Derfor var det viktig å ikke ha en for lang oppvarmingstid i prosedyren. Det ble definert at en oppvarming som medførte minimum 2°C temperaturøkning ville holde for forsøkene i oppgaven. Videre er det kjent at tegl varmes tregere enn gran derfor ble det utført en test på to ALNA-tegl prøver for å avgjøre oppvarmingstiden for bruk i alle forsøkene i oppgaven. Denne testen viste at 2 minutters oppvarming var tilstrekkelig. Siden dette er relativt raskt ble det bestemt at prosedyren skulle ha 2 minutters oppvarming.

Det å sette lik oppvarmingstid for alle forsøk vil medføre noen forskjeller i maks-temperatur for prøvene – granpanelet vil naturlig bli varmere enn teglen. Dette er ikke ansett som et problem, da modellen tar hensyn til materialfaktorer i den beregnede termiske fukt faktoren. Dessuten er det mest anvendelig å utvikle en prosedyre som ikke må endres på bakgrunn av materialet som skal testes.

- Det ble bestemt at prosedyren utføres med 2 minutters oppvarming med varmeriggen.

## 5.2 Målenøyaktighet

Det må alltid påregnes noe usikkerhet ved ethvert forsøk grunnet menneskelige faktorer og måleutstyrets nøyaktighet. Ved å utføre målinger i laboratoriet kan likevel en del usikkerheter elimineres og samtidig ønskede forutsetninger settes.

### 5.2.1 Underlag

En ting det er verdt å merke seg med forsøksoppsettet er underlaget. Etter de første forsøkene kom det tydelig fram at det ikke var ideelt å utføre termograferingen rett mot betonggulvet på laboratoriet. Oppgaven avslørte tre hovedproblemer med betongen som underlag; refleksjon, kontrast og varmelagring. Refleksjonen av varmelampene i betongen rundt prøvene laget i noen tilfeller termogrammer med enorm spredning på temperaturskalaen. Dette minsket den visuelle effekten av temperaturforskjeller på prøvene. Kontrastproblemet grunnet i at betongen hadde omtrent lik varmeutvikling som teglprøvene. Dette førte til at vi mot slutten av nedkjølingsfasen ikke kunne identifisere prøvene på termogrammet, da det ikke var noen visuell kontrast mellom prøvene og underlaget. Disse problemene ble unngått ved bruk av GU-gips mellom gulvet og prøvene under forsøkene. Problemet med varmelagring var at betonggulvet trengte mye mer tid til å kjøle seg ned enn panelprøvene. Når prøvene var klare for en ny test, eller det skulle kjøres flere forskjellige tester etter hverandre, var gulvet fremdeles varmt og ville fungert som en ekstra varmekilde. Denne effekten ville også gjelde i nedkjølingsfasen. Gulvet var med på å gi forsøk nr. 2 i løpet av en dag helt andre forutsetninger enn forsøk nr. 1 samme dagen. Dette er ikke helt unngått med GU-gips som underlag, men effekten ble redusert. Derfor er det i tillegg, så langt det var mulig, bare utført ett forsøk per dag.

### 5.2.2 IR-kamera

Når det kommer til utstyrets nøyaktighet er det opplyst i IR-kameraets produktbeskrivelse at det har en målenøyaktighet på  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Målingene fra IR-kamera registreres for hver piksel som temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) med en desimal. En målenøyaktighet på  $2^{\circ}\text{C}$  er mye for forsøkene i oppgaven ettersom det er definert at en temperaturøkning på minimum  $2^{\circ}\text{C}$  holdt med tanke på oppvarming. Modellen som benyttes med termisk fuktfaktor tar utgangspunkt i temperaturdifferansen og ikke den faktiske temperaturen. Ettersom målingene er like nøyaktige eller unøyaktige gjennom hele forsøket vil ikke denne opplyste målenøyaktigheten påvirke resultatene.

Videre er det også viktig å sette riktig emissivitet for de enkelte materialene for at IR-kameraet skal måle riktig temperatur. Det er ikke utført kalibrering av emissiviteten til de enkelte materialene, her

er det bare antatt at standardverdiene som framkommer i tabell 3 vil være gyldige. Derfor er det knyttet noe usikkerhet til valgt emissivitet for de forskjellige materialene. Spesielt usikkert er det om St. Olavs Vold steinen og ALNA-teglen har samme emissivitet. Siden alle materialene har en relativt høy emissivitet vil ikke små justeringer gi merkbare utslag på resultatene, men det ville økt nøyaktigheten på målingene litt om emissiviteten hadde vært kalibrert nøyaktig.

### 5.2.3 Inneklima

For denne oppgaven er også registrert inneklima på laboratoriet, temperatur og relativ fuktighet (RF), et usikkerhetsmoment. Disse er antatt konstant selv om det ikke er et kontrollert konstant inneklima på laboratoriet. Det registrerte inneklimaet brukes til beregning av termisk fuktfaktor og påvirker måleresultatene siden temperaturforskjellene mellom inneklima og prøvene er en drivende faktor for nedkjølingen. Dersom det for eksempel var 1°C kaldere ved ett forsøk enn ved ett annet, ville prøvene bli litt raskere nedkjølt i det forsøket. Det er et relativt normalt inneklima på laboratoriet, og det er ikke registrert store avvik fra det antatte klimaet den tid arbeidet med oppgaven har pågått. Derfor er det ikke ansett som nødvendig å gjøre justeringer i måleresultatene basert på de eventuelle endringene som kan ha forekommet i inneklima underveis i arbeidet med oppgaven.

### 5.2.4 Fuktmåling

Til slutt er det verdt å merke seg målingene av prøvenes fuktinnhold. Ved alle forsøk er fuktinnholdet registrert med veiing av prøvene rett før forsøksstart. Senere er disse fuktinnholdene parett med den målte termiske fuktfaktoren for hver prøve. Det fuktinnholdet som registreres rett før forsøksstart er ikke nødvendigvis likt fuktinnholdet i nedkjølingsfasen, når den termiske fuktfaktoren måles. Spesielt for veldig tørre og veldig våte prøver vil luftfuktigheten på laboratoriet spille inn siden prøvene vil bevege seg mot en likevekt med denne. Dette er spesielt et problem for granpanelprøvene, siden gran er et veldig hygroskopt materiale vil endringene i fuktinnhold skje raskt. En annen mekanisme som vil påvirke det reelle fuktinnholdet ved nedkjølingen er selve oppvarmingsfasen, oppvarmingen vil kunne forårsake en uttørking i prøven. Dette er et problem som er forsøkt unngått gjennom å ha kort oppvarmingstid og ellers utføre forsøkene så effektivt som mulig. Det hadde økt nøyaktigheten av registret fuktinnhold noe dersom det var mulig å måle prøvenes vekt kontinuerlig gjennom forsøket. En annen løsning på dette problemet kunne vært å veie prøvene etter endt forsøk, for å kunne ta hensyn til eventuell fuktendring. Dette er ikke gjort i denne oppgaven.

### 5.3 Målt termisk fuktfaktor

Oppgaven har sett nærmere på modellen Ludwig et. al. presenterte (2004) for måling av fukt i byggematerialer. Forsøkene i oppgaven er utført på materialene granpanel og historisk massivtegl.

Gjennom å plote de målte termiske fuktfaktorene sammen med de tilhørende fuktighetene, er det ønskelig å se på trenden i målingene for å utvikle en kalibreringskurve som kan brukes til å finne fuktinnholdet ved å måle den termiske fuktfaktoren ute i felt.

Tidligere forskning viser at verdien på resultatene av de målte termiske fuktfaktorene varierer ut fra laboratorieoppsett og prosedyre. Derfor er det mer interessant å se på hvordan den termiske fuktfaktoren varierer med fuktinnhold, enn på de faktiske verdiene av faktoren.

#### 5.3.1 Granpanel

Som det kommer fram av figur 4.7 har oppgaven tatt for seg de tørreste verdiene for granpanel (0-25 %). Spesielt er det forsøkt å se på verdiene rundt kritisk fuktighet, 20 % og ganske tørre fuktverdier, for å prøve å identifisere en endring eller trend til endring i termisk fuktfaktor ved disse fuktighetene. Det var ønskelig å se om det var en merkbar forskjell i faktoren for relativt tørre prøver versus fuktige prøver. Denne forskjellen er ikke identifisert.

Av regresjonslinjen som uttrykker trenden for gjennomsnittsverdiene framkommer det en svak nedadgående trend ved økt fuktinnhold, til tross for den veldige spredningen i måleresultatene. Videre kommer det fram at hele 51 % av variasjonen i de gjennomsnittlige termiske fuktfaktorene skyldes prøvenes fuktinnhold.

Målingene har en veldig spredning i termisk fuktfaktor for alle fuktigheter og er ikke entydige. Denne spredningen kan skyldes en rekke faktorer. Noen av prøvene hadde en litt annen startetemperatur, dette gjelder spesielt prøvene kondisjonert i de ukontrollerte klimaene, se tabell 5. I de fleste forsøkene ble granpanelet plassert ut i tre rader parallelt med varmeelementene. Dette resulterte i at den midterste raden alltid oppnådde litt lavere påvirkning fra varmeriggen. Ettersom noen av prøvene mottok litt lavere varmestråling i oppvarmingsfasen ble de ikke like varm og hadde ikke like rask nedkjøling. Dette er nok den viktigste faktoren til spredningene i de målte termiske fuktfaktorene. Mengden målinger har likevel kunne resultere i gjennomsnittlige verdier som viser en nedadgående trend, men det ville vært veldig usikkert å skulle brukt denne trenden som en kalibreringskurve ute i felt. En måling av termisk fuktfaktor på for eksempel 0,3 vil etter trendlinjen gi en fuktighet litt over 5 %, men i målingene fra laboratoriet er denne verdien for termisk fuktfaktor oppnådd ved alle fuktinnhold testet.

### 5.3.2 Teglsteiner

Det var også for dette materialet ønskelig å se om det var en merkbar forskjell i den termiske fuktfaktoren for relativt tørre prøver versus fuktige prøver. Fra figur 4.9 framkommer det en klar trend i de målte verdiene. Av regresjonslinjen som uttrykker trenden kommer det fram at nesten 45 % av variasjonen i de termiske fuktfaktorene skyldes prøvenes fuktinnhold.

Denne trenden vil kunne brukes for å måle fuktinnholdet i dette materialet, som en kalibreringskurve kan denne trenden være godt egnet til å oversette feltmålte termiske fuktfaktorer til fuktinnhold.

Det er også en uforklart variasjon i måledataen og noe skyldes nok det samme som for granpanelet; variasjon i starttemperatur, samt noe variasjon i oppvarmingstiden. For dette materialet hadde vi bare 3 prøver som for alle testene ble plassert på linje, parallelt med varmeelementene. Dette medførte at alle mottok lik varmestråling, til forskjell fra forsøkene på granpanelet. Et annet problem kan være at en veldig høy latent varmefluks hos tegl og lignende materialer ved aktiv termografering vil påvirke temperaturmålingene. Slike faktorer som avhenger av materialet vil også påvirke målinger i felt på samme materialet og er derfor ikke ansett som et problem for denne oppgaven.

Det er også litt få målinger for dette materialet, som kan være uheldig. Men ettersom det framkom en tydelig trend etter så få målinger kan det tilsa at det likevel er mulig å utvikle en god kalibreringskurve raskt med kun få prøver. Dette er veldig positivt i en sammenheng der et historisk eller vernet bygg skal restaureres, og en vil unngå å måtte ta ut for mange materialprøver. Med bare 3-4 prøver kan man utvikle en slik kurve som vil gjelde for akkurat det testede materialet.

De moderne ALNA-steinene tok ikke opp fukt, noe som resulterte i veldig små forskjeller i fuktinnhold og igjen termisk fuktfaktor. Det var vanskelig å kunne utvikle en fornuftig kalibreringskurve for dette materialet. Med en RF så høy som 97 % hadde teglen et fuktinnhold på bare 0,04 %, se figur 4.12 (sorpsjonskurven). Den eneste kondisjoneringen som ga en reell økning i absolutt fuktinnhold var der steinene var nedsunket i vann over en viss tid. Men da var det den kapillære metningen som ble målt, ikke fuktigheten i det hygroskopiske området. En vil kunne oppnå et slik fuktnivå på en vegg rett etter mye nedbør, men dette fuktnivået er det ikke sett nærmere på i oppgaven. Derfor ble der besluttet tidlig i arbeidet med oppgaven, at det ikke skulle utvikles en kalibreringskurve for dette materialet.

## 5.4 Beregnet termisk fuktfaktor

Gjennom sammenligning av den beregnede og den målte termiske fuktfaktoren for et gitt fuktinnhold vil en kunne si noe om kvaliteten på målingene og hvorvidt dette er en god modell for bruk i ikke-destruktive fuktmålinger ved IRT. Ved perfekte forhold vil målingene fra laboratoriet se lik

ut som den beregnede termiske fuktfaktoren. Dersom det er en overensstemmelse kan linjene til den beregnede fuktfaktoren brukes til forenklete fuktmålinger på reelle bygg. I denne oppgaven var det derfor ønskelig å se på om de målte verdiene fra laboratoriet stemte overens med den beregnede termiske fuktfaktoren for de enkelte materialene.

For granpanelet er gjennomsnittene av målingene fra laboratoriet, figur 4.7, plottet inn sammen med den beregnede termiske fuktfaktoren i figur 4.8. Her framkommer det en god sammenheng mellom trenden i måledataen og den beregnede termiske fuktfaktoren. Den svake nedgangen i målingene og den beregnede termiske fuktfaktoren kommer også tydeligere fram i denne figuren. Den gode sammenhengen tilsier at målingene utført på laboratoriet stemmer, og at en for granpanel vil kunne bruke den beregnede termiske fuktfaktoren til å måle fuktinnholdet.

Fra resultatene av den beregnede termiske fuktfaktoren for St. Olavs Vold steinen, se figur 4.10, kan det virke som om modellen ikke er egnet for å måle fuktinnholdet i steinen. Den beregnede termiske fuktfaktoren har liten til ingen endring i verdi for fuktinnholdene som er aktuelle for denne steinen. Det kan se ut som man skulle fått en termisk fuktfaktor rundt 0,04 uansett hvilken fuktighet steinen har. Når det er sagt så har de målte dataene en nedadgående trend som ligner mer på den identifisert for granpanelet, bare sterkere. Denne trendlinjen vil egne seg til bruk i feltmålinger av fuktinnhold på St. Olavs Vold. Det er tilknyttet mange usikkerheter i beregningene av den termiske fuktfaktoren, spesielt for dette materialet hvor egenskapene til en viss grad er ukjente, dette drøftes i neste kapittel.

#### 5.4.1 Materialeegenskaper

Ved beregningen av termisk fuktfaktor er det brukt en rekke antagelser om prøvenes tørre materialeegenskaper. Det vil være en viss usikkerhet knyttet til disse antagelsene. De reelle egenskapene vil påvirke måleresultatene. Derfor vil avstanden mellom de antatte og de reelle egenskapene medvirke til avviket mellom den målte og den beregnede termiske fuktfaktoren. Spesielt gjelder dette for de historiske steinene, med lokalt håndverk kom det også store variasjoner i egenskaper. Det er derfor veldig tilfeldig om de antatte verdiene stemmer overens med de reelle egenskapene. Dette kan være noe av forklaringen på hvorfor måleresultatene ikke stemmer helt overens med den beregnede termiske fuktfaktoren for dette materialet. Kvaliteten på den beregnede termiske fuktfaktoren kan forbedres ved å måle den tørre densiteten, varmekapasiteten og konduktiviteten til det faktiske prøvematerialet.

#### 5.4.2 Varmeovergang

Varmeovergangen fra prøven til IR-kameraet i nedkjølingsfasen, som er benyttet i beregningene av termisk fuktfaktor, inneholder mange antagelser. Varmeovergangen er i denne oppgaven satt sammen av ett bidrag fra konveksjon og ett fra refleksjon fra omgivelsene og varmeriggen, formel 28.

Om en først tar for seg bidraget fra den termiske konveksjonen så avhenger denne av varmeovergangstallet ( $h_i$ ). Det er en veldig usikker verdi, i oppgaven er denne satt til en standardverdi for innvendig vegg. Forsøkene er utført på og mot gulv, dette kan medfører helt andre luftstrømmer enn om forsøkene hadde vært utført mot vegg. Denne verdien kan derfor være noe unøyaktig antatt.

Videre er varmeovergangen forårsaket av reflektert varme fra omgivelsene avhengig av valgt emissivitet, som er drøftet i kapittel 5.2.2, prøvens temperatur og innetemperatur. Derfor er dette bidraget beregnet relativt godt.

Den største usikkerheten i beregningen av varmeovergangen skyldes varmeriggens påvirkning i nedkjølingsfasen. Lampene vil fortsette å avgi varme en stund etter at de er slukket. Denne tregheten i varmeelementene vil påvirke resultatene noe, i beregningene av den termiske fukt faktoren er det derfor valgt å øke varmeovergangen.

Denne økningen er antatt basert på temperaturmålingene fra forsøkene. Det framkommet av disse at prøvene når sin toppetemperatur ca. 6 sekunder etter slukking av lampene. Dersom en antar at det ikke er varmestråling fra lampene etter disse 6 sekundene vil varmestrålingen kunne settes til 1000W i 6 sekunder. Gjennom å fordele dette over de 180 sekundene det måles i oppgaven, blir en antatt konstant varmetilførsel 33W over denne tiden. I oppgaven er det antatt et varmetillegg på 30W som kan virke sannsynlig ut fra dette resonnementet.

Ideelt sett skulle målingene i nedkjølingsfasen vært helt uavhengig av varmeelementene. Derfor skulle varmeriggen vært fjernet helt etter endt oppvarming for å ikke ha en påvirkning på varmeovergangen i nedkjølingsfasen.

#### 5.4.3 Overførbarheten til felt

Kalibreringskurven utviklet fra målingene for St. Olavs Vold steinene vil kunne brukes til ikke-destruktive fuktmålinger i felt. Den termiske fuktfaktoren vil ikke være direkte sammenlignbar ute i felt og inne, men etter en tilpassing av resultatene vil målinger gjort på laboratoriet kunne benyttes ute i felt.

Den viktigste forskjellen i målingene ute og inne er varmeovergangen fra veggen/prøvene til IR-kameraet. Ute vil solstråling og andre faktorer kunne påvirke den reflektive varmeovergangen, i tillegg vil varmeovergangstallet naturlig være forskjellig ute versus inne.

For å kunne bruke kurven utviklet fra målingene i laboratoriet til å finne fuktinnhold i utvendige fasader må derfor målingene tilpasses med en mellomfaktor som veier opp for denne forskjellen. Den beregnede fukt faktoren avhenger som kjent av den konstante varmpåvirkningen og effusiviteten, ved samme materiale vil effusiviteten være lik. Da kan forholdet mellom den konstante varmpåvirkningen i laboratoriet og ute i felt brukes for å tilpasse den målte kalibreringskurven fra laboratoriet. Undersøkelser av validiteten av en slik tilpassing vil være noe av det videre arbeidet knyttet til denne oppgaven.

Den beregnede fuktfaktoren kan brukes til forenklete fuktmålinger på reelle bygg. Med kunnskap om den konstante varmpåvirkningen og materialets tørre egenskaper vil en også kunne bruke den beregnede termiske fuktfaktoren direkte til å finne fuktinnholdet i målte punkter ute i felt. Gjennom dette vil en også relativt raskt kunne tegne opp et fuktkart over hele byggets fasade.

## 5.5 Sorpsjonskurve

I oppgaven var det ønskelig å få mer kunnskap om St. Olavs Vold steinenes fuktegenskaper. Det ble derfor utviklet en sorpsjonskurve for dette materialet.

Sorpsjonskurven for historisk massivtegl fra 1500-tallet, figur 2.7, stemmer veldig godt overens med sorpsjonskurven for St. Olavs Vold steinene utviklet i oppgaven. Disse to kurvene skal sannsynligvis være ganske like basert på utviklingsmetodene som ble benyttet for disse steinene. Den gode overensstemmelsen mellom disse to kurvene tilsier at utviklingen av sorpsjonskurven i denne oppgaven har vært god og at sorpsjonskurven for St. Olavs Vold steinene er pålitelig.

Kurvene er utviklet ved stigende RF, altså er det bare materialenes adsorpsjon (oppfukting) som er registrert. Det er kjent at fuktinnholdet vil være høyere ved desorpsjon enn ved absorpsjon, og at hystereseeffekten kan være stor for tegl. Altså kan det sies at kurvene presentert i kapittel 4.3 viser den minimale fukten ved gitt RF. En eventuell forbedring av forståelsen av materialenes fuktegenskaper i videre arbeid, vil være å måle de samme punktene for synkende RF. Slik kan det skapes et bedre bilde på helheten av steinenes fuktegenskaper.

Som vi kan se av sorpsjonskurven for St. Olavs Vold steinene, figur 4.11, har denne et relativt høyt fuktinnhold. Sammenliknet med den mer moderne ALNA-teglen, figur 4.12, er den historiske steinen



mellom 10 og 20 ganger så fuktig. Så de historiske steinene vil kunne holde på mye mer vann enn moderne teglstein. Dette kan medføre stor fare for frostsprengning i dette materialet.

Den utviklede sorpsjonskurven for St. Olavs Vold steinen vil derfor tilby veldig nyttig kunnskap i den planlagte reoveringen av St. Olavs Vold. Den vil også kunne si noe om materialegenskapene til mange andre bygg i området som er bygget av samme stein.

## 6 Konklusjon

Denne masteroppgaven omhandler ikke-destruktive laboratoriemålinger av fukt i byggematerialer ved hjelp av aktiv termografering. Basert på målinger utført i laboratorium med egendesignet måleoppsett, som også egner seg for utendørs feltmålinger, presenterer denne oppgaven kalibreringskurver for termisk fuktfaktor. Dessuten presenteres sorpsjonskurvene til en historisk og en moderne teglstein. I tillegg er det utviklet en prosedyre for ikke-destruktiv måling av termisk fuktfaktor ved aktiv termografering.

Hovedfunnene i denne oppgaven er at modellen med termisk fuktfaktor kan benyttes for ikke-destruktive fuktmålinger, men at det er noe usikkerhet som påvirker nøyaktigheten av målingene. Dette dreier seg i hovedsak om kvaliteten på utstyret, kunnskapen om materialegenskapene og når i forsøkene fuktmålingene utføres. Kalibreringskurvene utviklet i oppgaven kan benyttes til ikke-destruktiv fuktmåling av den verneverdige bygningen St. Olavs Vold i Sarpsborg, samt andre fasader med tradisjonelt norsk granpanel.

Prosedyren som er utviklet i oppgaven er som følger:

- Varmeriggen plasseres cirka 60 cm fra overflaten som skal måles
- Tilfør strålevarme i 2 minutter med varmeriggen
- Mål overflatetemperaturen ved endt oppvarming
- Vent i 3 minutter, mens prøvene nedkjøles naturlig
- Mål overflatetemperaturen igjen, etter 3 minutter nedkjøling

Nøyaktigheten av målingene vil øke dersom varmeriggen fjernes etter endt oppvarming.

Overførbarheten til bruk i felt, spesielt for St. Olavs Vold steinene er av høy verdi. Kurvene utviklet i oppgaven vil kunne brukes i forbindelse med den planlagte rehabiliteringen og tørkingen av bygget. Framfor å tørke hele bygget, kan en etter en relativt rask ikke-destruktiv kartlegging kunne sette inn målrettede tiltak for tørking av områdene med høy fuktighet. Dette vil kunne medføre kostnadsbesparelser i rehabiliteringen, og benyttes i fremtidige kontroller av bygget. Denne effekten vil også gi ringvirkninger for mange av de historiske byggene i Norge, og vil kunne spare byggherrer for rehabiliterings-, og fuktskadekostnader.

## 6.1 Videre arbeid

Denne oppgaven har sett på modellen med termisk fuktfaktor gjennom målinger utført i laboratorium. Videre arbeid innenfor temaet burde derfor fokusere på hvordan en best kan koble målingene fra laboratorium med målinger gjort ute i felt, for å finne fuktigheten av fasader med denne ikke-destruktive prosedyren.

Helt konkret bør det utføres undersøkelser av hvordan en best kan tilpasse den målte kalibreringskurven fra laboratorium til bruk ute i felt. Slik at en kan benytte et lite utvalg prøver i laboratoriestudier for å utvikle en kalibreringskurve, som igjen kan brukes til å oversette feltmålinger til fuktinnhold.

Det burde også undersøkes hvordan materialets tørre egenskaper kan bli funnet gjennom en ikke-destruktiv metode. Med denne kunnskapen kan en bruke den beregnede termiske fuktfaktoren direkte til å finne fuktinnholdet i målte punkter ute i felt. Videre kan det undersøkes om modellen med termisk fuktfaktor kan benyttes med punk oppvarming ved hjelp av laser framfor oppvarming av store områder. En fokusert laserstråle med riktig effekt vil kanskje kunne gjøre varmeriggen overflødig, og dermed redusere omfanget av nødvendig måleutstyr.

## 7 Referanser

- Anaconda. *Python*. Tilgjengelig fra: <https://anaconda.org/anaconda/python> (lest 10.05.2020).
- ASTM C1498 - 04b. (2016). Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials. *Book of Standards* 04.06.
- Baehr, H. D. & Stephan, K. (2011). *Heat and Mass Transfer*: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bienvenido-Huertas, D., Bermúdez, J., Moyano, J. J. & Marín, D. (2018). Influence of ICHTC correlations on the thermal characterization of facades using the quantitative internal infrared thermography method. *Building and Environment*, 149: 512-525. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.12.056.
- Bøhlerengen, T. (2018). 421.132 Fukt i bygninger. Teorigrunnlag. *SINTEF Byggforsk - Byggforskserien, Byggedetaljer*.
- Çengel, Y. A., Ghajar, A. J. & Kanoğlu, M. (2015). *Heat and mass transfer : fundamentals and applications*. 5th ed. in SI units. utg. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Dannevig, P., Harstveit, K. & Seter, K. (2020). *Luftfuktighet*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/luftfuktighet> (lest 08.04.2020).
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, T. Ø. (2014). *Trehus*. [10. utg.]. utg. SINTEF byggforsk håndbok (trykt utg.), b. 5. Oslo: SINTEF akademisk forl.
- Edvardsen, K. I. (2017). 770.115 Leire som byggemateriale. Muring, pussing og annen bruk. *SINTEF Byggforsk - Byggforskserien, Byggforvaltning*.
- Emissivitet*. (2018). Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/emissivitet> (lest 11.02.2020).
- Forkaides, P. A. & Kalogirou, S. A. (2011). Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Applied Energy*, 88 (12): 4358 - 4365. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.014>.
- Fraunhofer Institut Bauphysik. *WUFI Pro* (Versjon 4.1 IBP). Programvare (lest 03.04.2020).
- Geving, S. & Thue, J. V. (2002). *Fukt i bygninger*. Håndbok (Norges byggforskningsinstitutt : trykt utg.), b. 50. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Grinzato, E., Ludwig, N., Cadelano, G., Bertucci, M., Gargano, M. & Bison, P. (2011). Infrared Thermography for Moisture Detection: A Laboratory Study and In-situ Test. *Materials Evaluation*: 97-104.
- Hofstad, K. (2019). *Massetetthet*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/massetetthet> (lest 11.05.2020).

- Holtebekk, T. (2019). *Infrarød stråling*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/infrar%C3%B8d\\_str%C3%A5ling](https://snl.no/infrar%C3%B8d_str%C3%A5ling) (lest 04.02.2020).
- Holøs, S. (2015). 474.531 Fuktmåling i bygninger. Instrumenter og metoder. *SINTEF Byggforsk - Byggforskserien, Byggedetaljer*.
- Jacobsen, S. (1999). 520.067 Frostnedbrytning av betong og andre porøse byggematerialer. *SINTEF Byggforsk - Byggforskserien, Byggedetaljer*.
- Kilde, V. (2011). Gran. *FOKUS på tre*, 28.
- Kvande, T. & Lisø, K. R. (2010). 700.110 Byggeskader. Oversikt. *SINTEF Byggforsk - Byggforskserien, Byggforvaltning*.
- Lampi, C. (2018). *Alna teglverk (Nes-perioden)*. Tilgjengelig fra: <https://www.teglverk.no/teglverk/96-alna-teglverk-nes> (lest 18.05.20).
- Lampi, C. (2019). *Murstein av tegl*. Tilgjengelig fra: <https://www.byggogbevar.no/pusse-opp/mur/artikler/murstein-av-tegl> (lest 14.05.20).
- Ludwig, N., Redaelli, V., Rosina, E. & Augelli, F. (2004). Moisture detection in wood and plaster by IR thermography. *Infrared Physics & Technology*, 46: 161 - 166. doi: 10.1016/j.infrared.2004.03.020.
- Madruca, F. J., Sfarra, S., Perilli, S., Pivarciová, E. & López-Higuera, J. M. (2020). Measuring the Water Content in Wood Using Step-Heating Thermography and Speckle Patterns-Preliminary Results. *Sensors*. doi: doi:10.3390/s20010316.
- Madsø, F. E. (2001). *Tegl og teglmurverk, materialeegenskaper*. Murkatalogen 2001, anvisning M1. mur-senteret.no: murbransjens forsknings- og informasjonskontor.
- Magnussen, K. (2007). 720. 082 Råte- og fargeskadesopp. Skadetyper og utbedring. *SINTEF Byggforsk - Byggforskserien, Byggforvaltning*.
- Maierhofer, C. & Roellig, M. (2009). Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures.
- Microsoft. *Excel*. Tilgjengelig fra: <https://support.office.com/nb-no/excel> (lest 10.05.2020).
- Optis GmbH. Tilgjengelig fra: <https://www.optris.global/thermal-imager-optris-pi-640> (lest 16.01.19).
- Savnæs, J. (2004). Tre og miljø. *FOKUS på tre*.
- Schwarz, K., Heitkötter, J., Heil, J., Marschner, B. & Stumpe, B. (2018). The potential of active and passive infrared thermography for identifying dynamics of soil moisture and microbial activity at high spatial and temporal resolution. *Geoderma*, 372: 119-129. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.04.028.

Standard Norge - NS 3512. (2014). Måling av fukt i trekonstruksjoner.

Thue, J. V. (2016). *Bygningsfysikk : Grunnlag*. Bergen: Fagbokforlaget.

Tran, H., Han, D., Kang, C., Haldar, A. & Huh, J. (2017). Effects of Ambient Temperature and Relative Humidity on Subsurface Defect Detection in Concrete Structures by Active Thermal Imaging. *Sensors*, 17: 1718. doi: 10.3390/s17081718.

Universitetet i Oslo. (2018). *Konduksjon*. Tilgjengelig fra: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/k/konduksjon.html> (lest 11.03.2020).

Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J. & Bulnes, F. G. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, 14 (7): 12305-12348.

## 8 Vedlegg

### 8.1 Vedlegg A – Forsøkslogg

Vedlegget inneholder en oversikt over alle forsøkene utført i arbeidet med oppgaven. Om ikke annet er spesifisert er den egendesignede varmeriggen benyttet til 2 minutters oppvarming.

Tabell 11 viser en oversikt over alle utførte forsøk med resultater omtalt i oppgaven.

Dato	Forsøk	Prøver	Kamera avstand	Kommentar
13.01	Lampe Test	Treplate	95 cm	sjekk av rekkevidde og jevnhet for lampe 1
15.01	Jevnhet	Treplate	-	sjekk av rekkevidde og jevnhet for lampe 2
17.01	8X10	Treplate 2'4 plank	-	8 min og 20 s oppvarming med lampe 1, våt 2'4 plank og tørr treplate
29.01	Tegl0_Tid	2 x ALNA-tegl	130 cm	etter 2 min oppvarming har teglens temperatur økt med 2°C, uten underlag
31.01	Stein1	4 x St. Olavs Vold	147 cm	test på uendrede steiner, IR-kamera med liten vinkel, uten underlag
04.02	Tegl1	5 x ALNA-tegl	119 cm	2 min 24 s oppvarming, test på 5 forskjellige klima, uten underlag
05.02	Underlag1	XPS plate	119 cm	2 min oppvarming for å se effekten, spesielt i henhold til refleksjon.
06.02	Underlag2	GU-gips	119 cm	liten til ingen refleksjon ble registrert
06.02	Tegl2	10 x ALNA-tegl	117 cm	2 min og 44 s oppvarming, test på 5 forskjellige klima
06.02	Panel1	15 x Panel	117 cm	test på 5 forskjellige klima
11.02	Stein2	4 x St. Olavs Vold	117 cm	test på uendrede steiner
11.02	Panel2_Tegl3	3 x Panel 6 x ALNA-tegl	117 cm	tegl fra 4 forskjellige klima, panel fra samme klima
20.02	Panel3	8 x Panel	113 cm	alle prøver fra samme klima
21.02	10X10	4 x Panel 4 x ALNA-tegl	113 cm	10 min oppvarming, 2 våte og 2 tørre prøver av hvert materiale
03.03	Panel4	14 x Panel	113 cm	alle prøver fra samme klima
12.03	Stein3	4 x St. Olavs Vold	113 cm	alle prøver fra samme klima
13.03	Panel5	14 x Panel	113 cm	alle prøver fra samme klima
27.03	Stein4	4 x St. Olavs Vold	114 cm	alle prøver fra samme klima
27.03	Panel6	14 x Panel	114 cm	alle prøver fra samme klima
01.04	Panel7	14 x Panel	114 cm	alle prøver fra samme klima
11.04	Panel8	14 x Panel	114 cm	alle prøver fra samme klima
11.04	Stein5	4 x St. Olavs Vold	114 cm	alle prøver fra samme klima
23.04	Panel9	14 x Panel	114 cm	alle prøver fra samme klima
23.04	Stein6	4 x St. Olavs Vold	114 cm	3 min og 19 s oppvarming, alle prøver fra samme klima

## 8.2 Vedlegg B – Tørrvekt

Vedlegget inneholder en oversikt over tørrvekten til alle prøvene brukt i oppgaven.

*Tabell 12 viser tørrvekten til alle prøvene, i gram.*

<b>Prøve nr.</b>	<b>Granpanel</b>	<b>ALNA-tegl</b>	<b>St. Olavs Vold</b>
<b>1</b>	173.28	2313.93	2343.52
<b>2</b>	171.95	2482.35	3213.66
<b>3</b>	174.20	2336.13	3174.06
<b>4</b>	170.87	2410.46	2950.07
<b>5</b>	161.48	2487.08	-
<b>6</b>	166.71	2407.44	-
<b>7</b>	184.60	2488.69	-
<b>8</b>	175.58	2480.66	-
<b>9</b>	183.16	2448.72	-
<b>10</b>	182.04	2419.78	-
<b>11</b>	205.72	2404.00	-
<b>12</b>	176.44	2467.62	-
<b>13</b>	173.88	2419.11	-
<b>14</b>	176.42	2440.27	-
<b>15</b>	189.93	2491.49	-
<b>16</b>	166.38	2408.73	-
<b>17</b>	171.11	-	-
<b>18</b>	169.02	-	-



### 8.3 Vedlegg C – Sorpsjon

Vedlegget inneholder en oversikt over vektendringene ved likevekt og fuktighetene brukt i utviklingen av sorpsjonskurvene. Prøvene S2-4 er St. Olavs Vold steinene, T5-7 er ALNA-tegl. Det er 24 timer mellom målingene av vekt 1 og vekt 2.

Tabell 13 viser registrert vekt 1 og 2 for de 5 RF benyttet ved utvikling av sorpsjonskurvene.

Prøve	S2	S3	S4	T5	T6	T7
95%_vekt1	3226.91	3186.13	2959.47	2487.83	2408.09	2489.16
95%_vekt2	3227.29	3186.51	2959.84	2487.79	2408.00	2489.06
Endring	0.01%	0.01%	0.01%	-0.002%	-0.004%	-0.004%
97%_vekt1	3234.87	3193.83	2966.57	-	-	-
97%_vekt2	3235.07	3194.23	2966.91	2488.13	2408.40	2489.31
Endring	0.01%	0.01%	0.01%	-	-	-
65%_vekt1	3220.22	3180.52	2954.66	2487.42	2407.64	2488.85
65%_vekt2	3220.31	3180.63	2954.76	2487.48	2407.67	2488.88
Endring	0.003%	0.003%	0.003%	0.002%	0.001%	0.001%
85%_vekt1	3222.56	3182.47	2956.24	2487.41	2407.66	2488.81
85%_vekt2	3222.67	3182.61	2956.33	2487.47	2407.72	2488.84
Endring	0.003%	0.004%	0.003%	0.002%	0.002%	0.001%
20%_vekt1	3218.04	3179.08	2953.41	2487.40	2407.59	2488.81
20%_vekt2	3218.00	3179.05	2953.37	2487.39	2407.56	2488.82
Endring	-0.001%	-0.001%	-0.001%	-0.000%	-0,001%	0,000%

Det er utført 2 veiinger med 24 timers mellomrom på 3 av ALNA-teglen. Ved vekt 2 er totalt 7 ALNA-tegl prøver veid, disse utgjør grunnlaget for utviklingen av denne sorpsjonskurven. Tabell 14 viser alle fuktinnholdene brukt i utviklingen av begge sorpsjonskurvene.

Tabell 14 viser alle fuktighetene brukt i utviklingen av sorpsjonskurvene for St. Olavs Vold stein og ALNA-tegl.

RF	S2	S3	S4	T5	T6	T7	T1	T2	T3	T4
95%	0.42%	0.39%	0.33%	0.029%	0.023%	0.015%	0.025%	0.022%	0.039%	0.029%
97%	0.67%	0.64%	0.57%	0.042%	0.040%	0.025%	0.038%	0.040%	0.065%	0.043%
65%	0.21%	0.21%	0.16%	0.016%	0.010%	0.008%	0.008%	0.010%	0.013%	0.010%
85%	0.28%	0.27%	0.21%	0.016%	0.012%	0.006%	0.010%	0.029%	0.019%	0.013%
20%	0.14%	0.16%	0.11%	0.012%	0.005%	0.005%	0.005%	0.008%	0.009%	0.007%

## 8.4 Vedlegg D – Script

Vedlegget inneholder scriptet som er brukt for å framstille beregnet termisk fuktfaktor. Plottene er presentert i resultatkapittelet og det som importeres fra fil: Bok1.xlsx framkommer i *vedlegg E – Script b*.

```
# Termisk fuktfaktor, beregning og plott
import math
import pandas as pd
from matplotlib import pyplot as plt
pi = math.pi
%% Material konstanter:
# Historiske St.Olavs Voll steiner (massivtegl) - Kilde: Wufi
ROdS = 1800           #[kg/m3] Densitet
CpdS = 850           #[Ws/kgK] Spesifikk varmekapasitet
kdS = 0.6            #[W/mK] Varmekonduktivitet
# Granpanel - Kilde: Trefokus
ROdP = 500           #[kg/m3] Densitet
CpdP = 1900          #[Ws/kgK] Spesifikk varmekapasitet
kdP = 0.12           #[W/mK] Varmekonduktivitet
# Vann - Kilde: UiO
Cpw = 4180           #[Ws/kgK] Spesifikk varmekapasitet
kw = 0.59            #[W/mK] Varmekonduktivitet
%% Målte og antatte verdier:
TS = 22.921          #[*C] Gjennomsnittlig varm temperatur for steiner
eS = 0.93            # Emissiviteten til Tegl stein
TP = 25.78           #[*C] Gjennomsnittlig varm temperatur for panel
eP = 0.9             # Emissiviteten til panel
%% Beregning av konstant varmefluks, for det enkelte materialet:
def varmefluks(Tmax, e):
    # Denne funksjonen forutsetter høy emissivitet
    Tatm = 20         # Innetemperatur på lab
    R = 0.1           #[m2K/W] Innvendig overgangsmotstand
    Tw = Tmax + 273.15 # Konverterer til Kelvin
    Ti = Tatm + 273.15 # Konverterer til Kelvin
    Tr = Ti
    deltaT = Tw - Ti
    hi = 1/R
    Sigma = 5.67e-08
    qc = hi * deltaT
    qr = 4*Sigma*e*Tw*Tw*Tw*(Tw-Tr)
    ql = 30           # Antagelse grunnet varmeelementets treghet
    Q = qc + qr + ql
    return Q
QS = varmefluks(TS, eS)
QP = varmefluks(TP, eP)
%% Fuktinnhold:
W = []
for i in range(11): # 26 for panel, 11 for tegl
    W.append(0.001*i) # 0,01 for panel, 0,001 for tegl
%% Fuktige verdier
# Stein:
CpS = []
kS = []
ROS = []
```

```

for w in W:
    CpS.append((CpdS+(w*Cpw))/(1+w))
    kS.append((kdS+(w*kw))/(1+w))
    ROS.append(ROdS*(1+w))

# Ganger sammen listene til 1 som brukes i formelen for m (Cp*k*RO)
CpkRO_S = [CpS[i]*kS[i]*ROS[i] for i in range(len(CpS))]
# Panel:
CpP = []
kP = []
ROP = []

for w in W:
    CpP.append((CpdP+(w*Cpw))/(1+w))
    kP.append((kdP+(w*kw))/(1+w))
    ROP.append(ROdP*(1+w))

# Ganger sammen listene til 1 som brukes i formelen for m (Cp*k*RO)
CpkRO_P = [CpP[i]*kP[i]*ROP[i] for i in range(len(CpP))]
%% Teoretisk m
# Definerer en funksjon for m som tar inngangsparameterne
# Q og Cp,k,RO for det enkelte materialet
mS = []
for verdi in CpkRO_S:
    mS.append((2*QS)/(math.sqrt(pi*verdi)))
mP = []
for verdi in CpkRO_P:
    mP.append((2*QP)/(math.sqrt(pi*verdi)))
%% Importerer målte verdier
Data = pd.read_excel("C:/Users/marti/Desktop/Master/Bok1.xlsx","PanelG")
M_mP = Data["m' ved 180s"].values.tolist() # Målt m' for panel
M_WP = Data["Vanninnhold"].values.tolist() # Målt W for panel

Data = pd.read_excel("C:/Users/marti/Desktop/Master/Bok1.xlsx","Stein")
M_mS = Data["m' ved 180s"].values.tolist() # Målt m' for St.Olavs Voll stein
M_WS = Data["Vanninnhold"].values.tolist() # Målt W for St.Olavs Voll stein
%% Plotter grafene:
#Plotter vanninnhold (W) mot beregnet m for panel:
plt.figure(1)
plt.plot(W, mP, 'k', label = 'Beregnet m')
plt.xlabel('Absolutt vanninnhold [u]')
plt.ylabel('Termisk fuktfaktor [m]')
plt.title('Termisk fuktfaktor for Gran panel')
plt.grid(True)
# Plotter målte verdier inn i samme plott
plt.plot(M_WP, M_mP, 'bo', label = 'Målte gjennomsnitt')
plt.legend()
# Plotter vanninnhold (W) mot beregnet m for St. Olavs Vold steinene:
plt.figure(2)
plt.plot(W, mS, 'k', label = 'Beregnet m')
plt.xlabel('Absolutt vanninnhold [u]')
plt.ylabel('Termisk fuktfaktor [m]')
plt.title('Termisk fuktfaktor for St. Olavs Vold tegl')
plt.grid(True)
# Plotter målte verdier inn i samme plott
plt.plot(M_WS, M_mS, 'bo', label = 'Målte verdier')
plt.legend()

```

## 8.5 Vedlegg E – Script b

Vedlegget inneholder data fra filen Bok1.xlsx som importeres i scriptet vist i *vedlegg D – Script*.

*Tabell 15 viser innholdet i ark PanelG som oppsummerer gjennomsnittlige verdier for fuktinnhold og målt termisk fuktfaktor.*

<b>Vanninnhold</b>	<b>m' ved 180s</b>
4.61 %	0.31041
12.49 %	0.26780
16.40 %	0.29308
20.59 %	0.24998
23.15 %	0.27827

*Tabell 16 viser innholdet i ark Stein, dette er alle målte termiske fuktfaktorer for St. Olavs Vold steinene.*

<b>Vanninnhold</b>	<b>m' ved 180s</b>
0.42 %	0.12671052
0.42 %	0.11180340
0.42 %	0.08944272
0.30 %	0.08198916
0.67 %	0.09689628
0.64 %	0.09689628
0.57 %	0.08198916
0.56 %	0.07453560
0.21 %	0.09689628
0.21 %	0.11180340
0.16 %	0.11180340
0.89 %	0.06708204
0.28 %	0.08198916
0.27 %	0.09689628
0.21 %	0.09689628
0.28 %	0.18633900
0.14 %	0.23106036
0.16 %	0.24596748
0.11 %	0.20869968

## 8.6 Vedlegg F – Målt fuktinnhold

Vedlegget inneholder alle fuktinnholdene til prøvene ved alle forsøk utført i utviklingen av kalibreringskurvene for den termiske fuktfaktoren.

Tabell 17 viser fuktinnholdet til alle panelprøvene.

Fukt	Forsøk P1	Forsøk P2	Forsøk P3	Forsøk P4	Forsøk P5	Forsøk P6	Forsøk P7	Forsøk P8	Forsøk P9
P1	2.93%	-	-	20.38%	23.12%	12.29%	16.02%	16.35%	4.75%
P2	3.08%	-	-	20.37%	23.11%	12.22%	15.88%	16.24%	4.70%
P3	2.89%	-	-	20.35%	22.90%	12.30%	15.98%	16.27%	4.91%
P4	4.23%	-	-	21.06%	23.45%	12.20%	16.05%	16.49%	4.55%
P5	4.24%	-	-	21.09%	23.52%	12.19%	16.04%	16.45%	4.47%
P6	4.31%	-	-	21.28%	23.64%	12.22%	16.13%	18.28%	4.67%
P7	5.41%	-	-	20.28%	23.27%	12.36%	16.13%	13.78%	4.93%
P8	5.29%	-	12.81%	20.72%	23.07%	12.19%	15.96%	16.31%	4.68%
P9	5.18%	-	12.72%	20.66%	22.89%	12.26%	16.04%	16.36%	4.83%
P10	12.12%	-	12.61%	20.46%	23.02%	12.26%	15.95%	16.28%	4.81%
P11	12.15%	-	11.72%	19.89%	22.40%	12.19%	15.72%	16.10%	4.98%
P12	12.13%	-	12.63%	20.52%	22.74%	12.27%	15.91%	16.82%	4.72%
P13	-	-	13.03%	20.59%	22.82%	12.19%	15.87%	16.32%	4.65%
P14	-	-	12.90%	-	-	-	-	-	-
P15	-	-	12.67%	-	-	-	-	-	-
P16	-	16.52%	-	-	-	-	-	-	-
P17	-	16.57%	-	-	-	-	-	-	-
P18	-	16.43%	-	22.36%	24.97%	14.38%	18.10%	18.46%	6.92%

Tabell 18 viser fuktigheten til alle St. Olavs Vold prøvene. Forsøk 1 og 2 er utført før aktiv kondisjonering av prøvene.

Fukt	Forsøk 1	Forsøk 2	Forsøk 3	Forsøk 4	Forsøk 5	Forsøk 6
S1	16.02%	14.43%	2.78%	0.56%	0.89%	0.28%
S2	17.56%	15.69%	0.67%	0.21%	0.28%	0.14%
S3	0.42%	0.42%	0.64%	0.21%	0.27%	0.16%
S4	0.42%	0.30%	0.57%	0.16%	0.21%	0.11%



**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway