

Uttørking av Trehus under Oppvarming  
- En sammenlikning av simulering og måling

The Drying of a Wooden House by Heating  
- A comparison between simulation and measurements

Victoria Rygh Nordhagen

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP  
Institutt for Matematiske Realfag og Teknologi (IMT)  
Masteroppgave 30 stip. 2013



## Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på min studietid på UMB. Oppgaven omfatter 30 studiepoeng og ble utarbeidet våren og sommeren 2013.

Jeg hadde lyst til å jobbe med bygningsfysikk og energi i bygninger, nå og gjerne også med tanke på fremtidig arbeidssituasjon, så det passet meg utmerket da det ble foreslått at jeg kunne bli med i WEEE-prosjektet.

Å jobbe med dette prosjektet har vært utfordrende, men samtidig har jeg lært veldig mye om det å lage et forsøk og hvordan det er å jobbe i en større gruppe hvor man må forholde seg til mange forskjellige personer.

Jeg vil gjerne benytte anledningen til å takke mine veiledere Tormod Aurlien og Kristine Nore for alle gode råd på veien. Takk til Tom Ringstad for bistand i forbindelse med instrumentering. En spesielt stor takk til Dimitrios Kraniotis for all hjelp med WUFI og andre ting, det hadde vært meget vanskelig uten! Til sist, takk til alle som har bidratt med gjennomlesning og konstruktiv kritikk.

Ås, 9. august 2013

---

Victoria Rygh Nordhagen

## Sammendrag

Formålet med dette prosjektet var å finne ut hvor mye energi som krevdes for å tørke ut et forsøkshus bygget av massivtreelementer, og hvorvidt det var et betydelig bidrag i energiregnskapet. Samtidig ønsket man å bruke simuleringssystemet WUFI Plus til å simulere uttørkingsprosessen og se om det gikk an å bruke programmet til å simulere energiforbruket.

Testhuset ble instrumentert med kalibrerte termometer og en RF-/termometer, en varmeovn på 1 kW og et ventilasjonssystem. Oppsettet ble sentralt kontrollert gjennom styringssystemet LabView. Testhuset ble i tillegg utstyrt med to separate trefuktmålere på nord- og sørveggen. Uttørkingen foregikk fra 19. mars til 30. april. Etter forsøket ble data samlet inn for å finne ut hvor mye energi som hadde blitt tilført, hvor mye vann som hadde blitt ventilert ut av testhuset, og hvor mye energi som spesifikt hadde gått med til fordampning av trefukt (fordampningsvarme). Disse resultatene ble sammenliknet med tilsvarende resultater fra simuleringen.

Resultatene fra forsøket viser at det ble tørket ut 56 liter vann fra testhuset og 99 liter vann i simuleringen. Videre ble det tilført 978 kWh til testhuset, hvorav 41,6 kWh var fordampningsvarme (latent varme). I simuleringen ble det tilført 961 kWh, hvorav 72,4 kWh var fordampningsvarme (latent varme). Veggfuktmålingene viser en reduksjon fra 15,1% til 11,7 for nordveggen og likeledes en reduksjon fra 13,1% til 11,2% for sørveggen

Energimengden som har gått med til fordampning kan sies å være stor med tanke på at det har vært et stort varmetap ut av testhuset. Med dette som bakgrunn kan man anbefale eiere av kalde hytter å gå inn for oppfuktningsbremsende tiltak. Dette kan være skalking av luker ved avreise eller tetting av utettheter (som slipper inn fuktig luft) i bygningskroppen for å unngå lang ventetid ved oppvarming av hytter.

Man har forsøkt å komme så nær virkeligheten som mulig i simuleringen. På tross av dette registreres det et stort sprik mellom feltforsøket og simuleringen når det gjelder trefuktmålinger, antall liter ekstrahert vann og fordampningsvarme. Det gjorde at man

måtte konkludere med at simuleringsprogrammet muligens ikke egner seg til å forutsi energibehov ved uttørring av trehus.

## **Abstract**

The purpose of this project was to find out the energy supply demanded to dry a test house made of elements of massive wood, and if that contribution was considerable. The simulation tool WUFI Plus was also used to simulate the drying process. The intention was to see if the program was a suitable tool to calculate the energy consumption.

The test house was instrumented with calibrated temperature sensors and a RH/temperature sensor, an electric heater of 1 kW and a ventilation system. The setup was controlled centrally by a control system called LabView. In addition the test house was equipped with two separate wood moisture sensors with a total of six nodes on the northern and southern wall. The drying process lasted from March 19<sup>th</sup> to April 30<sup>th</sup>. At the end of the experiment, data was collected to see how much energy was supplied, the amount of the energy consumption that was used to evaporate water (heat of evaporation). The results of the field experiment were compared with the simulation results.

The results of the experiment show that a total of 56 liters of water was dried from the test house, against 99 liters in the simulation. Furthermore, the test house was supplied with an energy amount of 978 kWh, of which 41,6 kWh was heat of evaporation. In the simulation an energy amount of 961 kWh was supplied to the building, of which 72,4 kWh was heat of evaporation. The wood moisture measurements show a reduction from 15,1% to 11,7% on the northern wall and from 13,1% to 11,2% on the southern wall.

The heat of evaporation used in the test house is considerable. The results support arguments to advise cabin owners to do pre-emptive measures to prevent the inside environments from adsorbing unnecessary moisture. Examples of such measures are air proofing the building envelope and close eventual hatches when leaving the cabin.

It has been a goal to make the simulation as close to reality as possible. Despite the efforts, the comparison shows a large gap between the test house results and the simulation results. Therefore it cannot be said that the simulation program is a good tool for calculating the energy consumption during the drying of a wooden house.

# Innholdsfortegnelse

<b>FORORD</b> .....	<b>II</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>1 INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1 BAKGRUNN .....	1
1.2 OMFANG.....	1
1.3 PROBLEMSTILLING.....	1
1.4 HYPOTESER.....	1
<b>2 TEORI</b> .....	<b>3</b>
2.1 TREVIRKE - GRAN .....	3
2.1.1 Oppbygging .....	3
2.1.2 Energimessige fordeler med innvendig trebruk.....	6
2.1.3 Massivtreelementer .....	6
2.2 LUFT .....	6
2.2.1 Luftstrømninger .....	7
2.2.2 Grensesjiktet.....	7
2.2.3 Ventilasjon .....	7
2.3 VARME .....	8
2.3.1 Latent Varme.....	9
2.3.2 Adsorpsjonsvarme.....	9
2.3.3 Varme i bygg.....	11
2.4 VARMETRANSPORT .....	13
2.4.1 Konduksjon .....	13
2.4.2 Konveksjon.....	14
2.4.3 Stråling.....	15
2.5 FUKT.....	15
2.5.1 Vannets egenskaper.....	15
2.5.2 Faseoverganger.....	16
2.5.3 Luftfuktighet.....	17
2.6 FUKTTRANSPORT I LUFT .....	18
2.6.1 Vanndampdiffusjon i luft.....	18
2.7 FUKTTRANSPORT I TRE .....	19
2.7.1 Diffusjon - Vanndampdiffusjon i tre.....	19
2.7.2 Konveksjon.....	21
2.7.3 Enfasetransport.....	21

2.7.4	Tofasetransport.....	22
2.7.5	Væsketransport gjennom linseporer.....	22
2.8	FUKTLAGRING I TRE.....	23
2.8.1	Fuktinnhold.....	23
2.8.2	Hystereseeffekten.....	27
2.8.3	Fuktbufring.....	28
2.9	SIMULERING.....	29
2.9.1	WUFI Plus.....	30
2.9.2	Nødvendige Parametere.....	31
2.10	DEN METEOROLOGISKE STASJONEN I ÅS.....	31
2.10.1	Lufttemperatur.....	32
2.10.2	Jordtemperaturer.....	32
2.10.3	Vindhastighet og vindretning.....	32
2.10.4	Nedbør og luftfuktighet.....	32
2.10.5	Stråling.....	33
<b>3</b>	<b>METODE.....</b>	<b>34</b>
3.1	FELTFORSØK.....	34
3.1.1	Testhus.....	34
3.1.2	Instrumentering av testhus.....	35
3.2	SIMULERING.....	39
3.2.1	Grensebetingelser.....	40
3.2.2	(I) Simulering 1. oktober til 31. desember.....	41
3.2.3	(II) Simulering fra 1. januar til 30. april med «Osloklima».....	41
3.2.4	(III) Simulering fra 1. januar til 30. april med 2013-klima.....	42
3.3	DATABEHANDLING – BEREGNINGER.....	42
3.3.1	Beregning av fuktflyt/fuktbalanse.....	42
3.3.2	Temperaturkorrigering av trefuktmålinger.....	43
3.3.3	Beregning av energibalanse.....	43
<b>4</b>	<b>RESULTATER.....</b>	<b>45</b>
4.1	VÆRET I LØPET AV FORSØKET.....	45
4.2	SIMULERING.....	46
4.2.1	(I) Simulering 1. oktober til 31. desember.....	46
4.2.2	(II) Simulering fra 1. januar til 30. april med «Osloklima».....	46
4.2.3	(III) Simulering fra 1. januar til 30. april med 2013-klima.....	47
4.3	TREFUKT.....	47
4.3.1	Temperaturkorrigerte målinger.....	47
4.4	LUFTFUKT.....	48
4.4.1	Fuktflyt.....	48

4.4.2	<i>Akkumulert avfukting</i> .....	49
4.5	ENERGI.....	49
4.5.1	<i>Energi- og fuktbalanse</i> .....	50
4.6	TEMPERATURER.....	51
4.6.1	<i>Sammenlikning av måledata med WUFI</i> .....	51
4.6.2	<i>Sammenlikning av godværsdag og overskyet dag</i> .....	52
<b>5</b>	<b>DISKUSJON</b> .....	<b>54</b>
5.1	SIMULERING.....	54
5.2	TREFUKT.....	54
5.3	LUFTFUKT.....	55
5.4	ENERGIFORBRUK.....	58
5.4.1	<i>Energibalanse/fuktbalanse</i> .....	58
5.5	TEMPERATURER.....	59
<b>6</b>	<b>KONKLUSJON</b> .....	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>VIDERE ARBEID</b> .....	<b>62</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFI</b> .....	<b>63</b>
<b>VEDLEGG</b> .....	<b>A</b>	
VEDLEGG 1: KARTLEGGING AV INITIALFUKTIGHET.....	A	
VEDLEGG 2: SIMULERING I: INITIAL TEMPERATUR.....	B	
VEDLEGG 3: TEMPERATURER – RÅDATA.....	C	
VEDLEGG 4: LUFTFUKT - RÅDATA.....	C	
<i>Relativ fuktighet</i> .....	C	
VEDLEGG 5: VEGGFUKT – RÅDATA.....	D	
VEDLEGG 6: 19.03 – 22.03: OPPSTART.....	E	
<i>Luftmålinger</i> .....	E	
<i>Veggmålinger</i> .....	F	
VEDLEGG 7: WUFI PLUS-DETALJER.....	G	
VEDLEGG 8: VARME OG VENTILASJON I TESTPERIODEN.....	J	



## Figurliste

<i>Figur 1: Vårved og sommerved fra trevirke i temperert klima (Perré og Key 2006)</i>	4
<i>Figur 2: Venstre: Norsk gran. Midt: Eik. Høyre: Europeisk bøk. (Perré og Key 2006)</i>	5
<i>Figur 3: Ulike typer limtreprodukter (Kristensen 1999)</i>	6
<i>Figur 4: Illustrasjonen beskriver sammenhengen mellom adsorpsjonsvarme og vanninnholdet i trevirket (wood moisture content) sett i forhold til vanns fordampningsvarme ( (Hameury 2005), etter (Siau 1995))</i>	10
<i>Figur 5: Vannets faser og faseoverganger (Straube 2006)</i>	16
<i>Figur 6: Mollierdiagram (Blom og Aarseth 2003)</i>	18
<i>Figur 7: Illustrasjon av diffusjon gjennom materialets porestruktur (Perré og Key 2006)</i>	20
<i>Figur 8: Figuren viser hvordan linseporene reagerer på krefter de blir utsatt for. (Perré og Key 2006)</i>	23
<i>Figur 9: Sorpsjonskurve (Straube 2006)</i>	27
<i>Figur 10: Skjema over energi og informasjonsflyt i testhus A</i>	37
<i>Figur 11: Grafen beskriver sammenhengen mellom målt vanninnhold i trevirke og materialtemperaturen. (Fløtaker og Tronstad 2000)</i>	43
<i>Figur 12: Figuren viser Lufttemperatur og RF gjennom forsøksperioden</i>	45
<i>Figur 13: Vindrose med fremherskende vindretninger i testperioden</i>	45
<i>Figur 14: Figuren viser vindhastigheten gjennom forsøksperioden</i>	46
<i>Figur 15: nedbør i forsøksperioden.</i>	46
<i>Figur 16: Temperaturkorrigerte målinger for nord- og sørveggen. 20.03.13-01.05.13</i>	47
<i>Figur 17: Sammenlikning av fuktmålinger i testhuset og resultatene fra simuleringen. Tall i vekt%.</i>	48
<i>Figur 18: Sammenlikning av fuktflyt gjennom ventilasjonsanlegget i testhuset og simuleringen 19.03-30.04. Luftmengden i WUFI-kurven er sammensatt av mekanisk ventilasjon og infiltrasjon (se Figur 24), mens infiltrasjon ikke er medregnet i målingene.</i>	48
<i>Figur 19: Ekstrahert fukt [kg] i simulering og måling 19.03-30.04.</i>	49
<i>Figur 20: En sammenlikning av energiforbruket i testhus og simuleringshus</i>	49
<i>Figur 21: Figuren over viser hvordan temperaturene for testhuset og simuleringen varierer i takt med utetemperaturen 21.03-30.04.</i>	51
<i>Figur 22: Innetemperatur 01.04-02.04: Måling vs. WUFI ved klarvær.</i>	52
<i>Figur 23: Innetemperatur 12.04-13.04: Måling vs. WUFI ved skyet vær.</i>	52
<i>Figur 24: Fuktflyt gjennom ventilasjon i WUFI 19.03-30.04.</i>	57
<i>Figur 25: Temperaturforløp i simulering I (WUFI-grafikk).</i>	B
<i>Figur 26: Utvikling til relativ fuktighet i perioden 21.03-30.04.</i>	C
<i>Figur 27: Veggfukt nordveggen 20.03-30.04</i>	D
<i>Figur 28: Veggfukt i sørveggen 20.03-30.04</i>	D
<i>Figur 29: Målt lufttemperatur inne 19.03-22-03</i>	E
<i>Figur 30: Målt RF inne 19.03-22.03</i>	E

## Tabelliste

Tabell 1: Vannets fordampningsvarme ved ulike temperaturer. _____	9
Tabell 2: Vannets faser og egenskaper _____	16
Tabell 3: forskjellige måter å angi fuktinnholdet til et materiale (Geving og Thue 2002). _____	23
Tabell 4: Vitale mål til testhus _____	35
Tabell 5: Tabellen er en forklaring på det forsøksoppsettet vist i figur 10. _____	35
Tabell 6: Verdier som hentes ut fra målinger i testhuset. Tallene har ingen kobling med tallene i Figur 10. _____	36
Tabell 7: Plassering av fuktmålere i testhus _____	38
Tabell 8: Tabellen viser egenskapene til de viktigste materialene (tre og isolasjon) i simuleringen _____	40
Tabell 9: U-verdier i simulering vs. TEK10-krav (TEK10 - Norges lover 2010) _____	40
Tabell 10: Tabellen viser sammensetning av komponentene i simuleringene. _____	41
Tabell 11: Energiforbruk til fordamping av vann i forhold til registrert tilført energi. (Totalt = all tilført energi, Energiforbruk = differanse mellom tilført energi og $H_m$ , $H_m$ =fordampingsenergi). _____	50
Tabell 12: Energiforbruk til fordamping av vann $H_m$ . _____	50
Tabell 13: Kontrollmåling av veggfukt med protimeter (verdiene fra skruene er ikke temperaturkorrigerte, og kan dermed anslås å være noe høyere i virkeligheten). _____	55
Tabell 14: Målt vanninnhold på nordveggen [vekt%] _____	A
Tabell 15: Målt vanninnhold på sørveggen [vekt %] _____	A
Tabell 16: Målt vanninnhold på østveggen [vekt %] _____	A
Tabell 17: Målt vanninnhold på vestveggen [vekt %] _____	B
Tabell 18: Tabellen beskriver hvordan varme og ventilasjon er regulert i testperioden _____	J

## Bildeliste

Bilde 1: Testhus A på den meteorologiske stasjonen på Ås _____	34
Bilde 2: RF-/temperatursensor under avtrekk i testhus A _____	38
Bilde 3: Overblikksbilde av testhus A _____	39
Bilde 4: Overflatetemperaturer nord og sør 19.03-30.04 _____	C
Bilde 5: Skjermdump fra simulering III. Nordveggen er valgt i panelet til venstre og sammensetningen kan sees til høyre _____	G
Bilde 6: bildet viser 3D-modellen av huset i WUFI _____	G
Bilde 7: Mekanisk ventilasjon i WUFI – her kan man dele opp simuleringen i forskjellige perioder med ulikt luftskifte. _____	H
Bilde 8: naturlig ventilasjon i WUFI. Det var kun mulig å ha en fast infiltrasjon, så man brukte naturlig ventilasjon som en erstatter siden den var variabel. _____	H
Bilde 9: I WUFI kan man raskt få en oversikt ved hjelp av grafene. Her er RF og temperatur ute. _____	I

Bilde 10: man kan også se tilstanden for hvert element grafisk, her varme- og fuktflow i nordveggen.

I

## Parametere

Parameter	Forklaring	Benevning
$\rho$	Tetthet/romdensitet	
$\rho_{sol}$	Densitet til materialets faststoff (uten porer)	$\text{kg/m}^3$
w (1)	Fuktig masse	kg
V	Fuktig volum	$\text{m}^3$
n	Porøsitet	0 - 1
Q	Varmemengde, samlet varmetap	Joule [J]
c	Spesifikk varmekapasitet	$\text{J/kg}\cdot\text{K}$
$H_v, H_i, H_s$	Fordampningsvarme, smeltevarme, sublimasjonsvarme	$\text{kJ/kg}$
$\Delta H_s$	Adsorpsjonsvarme	$\text{kJ/kg}$
$H_m$	Total fordampningsvarme	$\text{kJ/kg}$
u	Vanninnhold i trevirke – fuktmasse per tørrstoffmasse	$\text{kg/kg}$ (%)
$u_{corr}$	Temperaturkorrigert vanninnhold i trevirke	$\text{kg/kg}$
w (2)	Vanninnhold i trevirke – fuktmasse per materialvolum	$\text{kg/m}^3$
$\psi$	Vanninnhold i trevirke – fuktvolum per materialvolum	$\text{m}^3/\text{m}^3$
S	Metningsgrad – fuktvolum per porevolum	- / %
$\lambda$	Varmekonduktivitet	$\text{W/mK}$
R, ( $R_T$ )	Varmemotstand, (total)	$\text{m}^2\text{K/W}$
d	Materialsjiktets tykkelse	m
$R_{si}, R_{se}$	Varmeovergangsmotstand	$\text{m}^2\text{K/W}$
U	Varmegjennomgangskoeffisienten (U-verdi)	$\text{W/m}^2\text{K}$
A	Areal	$\text{m}^2$
$\Delta\theta$	Temperaturforskjell (f.eks mellom inne og ute)	$^\circ\text{C}$
h, T	Tid	t, s
$dQ_x$	Varmemengde gjennom en flate	J
$\frac{\partial T}{\partial x}$	Temperaturgradient i retning x	$\text{K/m}$
$q_{cv}$	Varmetransport ved konveksjon	$\text{W/m}^2$

$h_c$	Det konvekktive varmeovergangstallet	$W/m^2K$
$T_s$	Overflatetemperatur	K
$T_a$	Fluidtemperatur	K
$E$	Total varmestråling per arealenhet	$W/m^2$
$\varepsilon$	Emissivitet	$0 < \varepsilon < 1$
$\sigma$	Stefan-Boltzmanns konstant ( $= 5,67 \cdot 10^{-8}$ )	$W/m^2K^4$
$p_v$	Vanndampens partialtrykk	Pa
$p_{sat}, p_s$	Vanndampens metningstrykk	Pa
$\nu$	Vanndampkonsentrasjon (absolutt fuktighet)	$kg/m^3$
$\nu_{sat}$	Vanndampkonsentrasjon ved metning	$kg/m^3$
RF, $\phi$	Relativ fuktighet	%
$g$	Dampfluks gjennom en flate	$kg/m^2s$
$\nabla p_v$	Gradienten i vanndampens partialtrykk	Pa/m
$\nabla \nu$	Gradienten i vanndampkonsentrasjonen	$kg/m^4$
$D_p, \delta_p$	Vanndampens diffusjonstall i luft basert på damptrykk (damppermeabilitet)	$kg/m \cdot s \cdot Pa$
$D_v, \delta_v$	Vanndampens diffusjonstall i luft basert på dampkonsentrasjon	$m^2/s$
$R_v$	Gasskonstanten for vanndamp ( $= 461,4$ )	$Nm/kgK$
$M$	Materialmotstandsfaktoren	-
$x$	diffusjonsveien	m
$s_d$	Diffusjonsekivalent luftlagstykkelse	m
$\mu (1)$	Relativ fuktmotstand (i forbindelse med $s_d$ -verdi)	
$V$	Vannets hastighet gjennom trevirket (Darcys lov)	m/s
$K$	Materialets permeabilitet (Darcys lov)	$m^2$
$\mu (2)$	Dynamisk viskositet (Darcys lov)	Pa/s
$P_c$	Kapillærtrykk	Pa
$P_l$	Væsketrykk	Pa
$P_g$	Gasstrykk	Pa
$b_m$	Fukteffusivitet	$kg/(m \cdot Pa \cdot s^{1/2})$
$\rho_0$	Materialets tetthet i tørr tilstand	$kg/m^3$
$MBV_{ideal}$	Ideell fuktighetsbufferverdi	$kg/m^2 \cdot \%RH$

$G(t)$	Akkumulert fuktopptak over en flate	$\text{kg/m}^2$
$d_p$	Penetreringsdybde	m
$D_w$	Fuktdiffusivitet til et materiale	$\text{m}^2/\text{s}$

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Denne masteroppgaven er skrevet som et forprosjekt til energidelen av WEEE – Wood, Energy, Emissions and Experience, i samarbeid med Treteknisk Institutt og Universitetet for Miljø og Biovitenskap. Energidelen av WEEE-prosjektet har som mål å måle og beregne hvilket energibidrag vi kan ha ved å bruke tre som innvendig overflatemateriale, blant annet ved å redusere ventilasjonsbehovet (Tellnes, Nore og Nyrud 2012) (Korsnes 2012). Dette skal oppnås ved å ta i bruk to testhus av massivtre på 5x8m. Før WEEE-prosjektet kan sette i gang skal trehusene tørkes ut, og det er denne uttørkingen oppgaven dreier seg om.

I Norge finnes det mange lite brukte trehytter og fritidshus. Et kjent problem ved mange hytter er at de er nesten umulige å få varme i før man reiser bort igjen. En av årsakene til denne tregheten er at det kreves potensielt store mengder energi for å fordampe ut fuktigheten av veggene før temperaturen kan begynne å stige. Målet med denne oppgaven har vært å dokumentere hvor mye energi totalt som kreves for å tørke ut vannet som sitter i veggene.

## 1.2 Omfang

Denne oppgaven består av en teoridel og en forsøksdel. Teoridelen belyser bygningsfysikken som danner bakgrunnen for forståelse av forsøksdelen. Forsøksdelen beskriver forsøkene som har blitt gjort, samt resultatene og konklusjonene som har blitt trukket.

## 1.3 Problemstilling

Formålet med denne oppgaven er å finne ut hvor mye energi som kreves for å tørke ut testhuset i massivtre. Det andre jeg ønsker å finne ut er om det er mulig å forutsi dette energibehovet ved bruk av simuleringsprogrammet WUFI Plus.

## 1.4 Hypoteser

1. Det er grunn til å tro at fordamping av fuktighet i trevirket utgjør en vesentlig mengde energi ved oppvarming av trehuset.

2. WUFI Plus fungerer bra og det er mulig å anslå energibehovet til vannfordampingen innenfor 10% avvik fra de målte resultatene.

## 2 Teori

Materialet i teorikapittelet er hentet fra John F. Siau, "Transport Processes in wood" (1984), Trehus (2007), "Handbook of Industrial Drying" kap. 4 og 36, Taylor & Francis Group (2006) og Fukt i Bygninger, Geving og Thue (2002). Andre kilder er sitert der det er aktuelt.

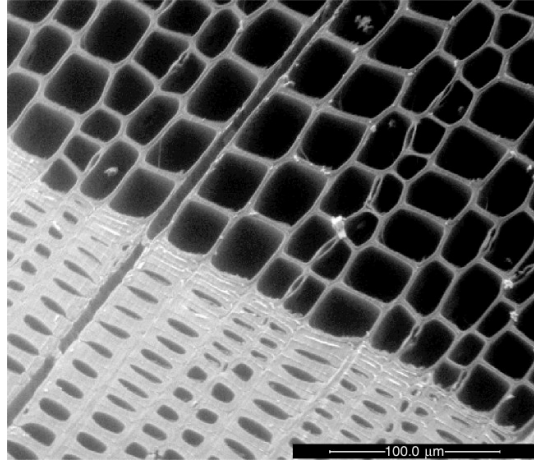
### 2.1 Trevirke - Gran

#### 2.1.1 Oppbygging

95% av granveden består av trakeider, eller fibre. Disse fibrene er langstrakte celler som er mellom 2 og 8mm lange, 200 ganger så lange som bredden. Trakeidene går i trevirkets lengderetning. Trakeidene er vanntransporterende celler i treets lengderetning. Margstråler går på tvers av lengderetningen, fra margin, og ut til ytterveden. Disse margstrålene er belter av transportceller. Årringer i trestammens tverrsnitt viser at det er to slags typer ved i trevirke, vårved og sommerved. Om våren vokser trevirket fort, dette danner lys vårved med lav densitet. Dette på grunn av at vårcellene har store cellehulrom. Om sommeren vokser veden gradvis saktere, da dannes det mørk og kompakt sommerved med høy densitet. Vårveden karakteriseres av celler med stor diameter og tynne vegger, dette skaper store hulrom. Sommerveden har celler med mindre diameter og tykkere vegger og har dermed mindre størrelse på hulrommene se Figur 1. Det kan også dannes årringer av at treet har stagnert pga. alvorlige insektangrep eller tørke (Böhmer 2013).

Radiell vekst i et tre forårsakes av celledeling i kambrium. Kambrium er laget mellom barken og veden. De fleste nye vedcellene lever ikke lenger enn i et par uker, de gjennomgår lignifisering, eller forveding (Perré og Key 2006). Cellene som ikke gjennomgår denne prosessen, parenkym, kan leve i årevis og står bak dannelsen av kjerneved. Parenkymene er lagringsceller som lagrer næring. Kjerneveden er den innerste veden i stammen, den har et naturlig lavere fuktinnhold enn de ytre lagene. De mekaniske cellene/vedcellene avstiver treet.





Figur 1: Vårved og sommerved fra trevirke i temperert klima (Perré og Key 2006)

### Densitet

Densiteten eller tettheten (masse per volum) ved en gitt fuktighet kan beskrives med formelen;

$$\rho = \frac{w}{V} \quad (1)$$

Hvor  $w$  = fuktig masse og  $V$  = fuktig volum. Norsk gran har en gjennomsnittlig densitet på  $430 \text{ kg/m}^3$ . Densiteten øker allikevel når trevirket tas i bruk, grunnet fuktopptak fra omgivelsene. Ved 12% fuktinnhold vil granas gjennomsnittlige densitet være på  $460 \text{ kg/m}^3$ . I WUFI-simuleringene brukes gran med densitet på  $420 \text{ kg/m}^3$ .

### Porøsitet

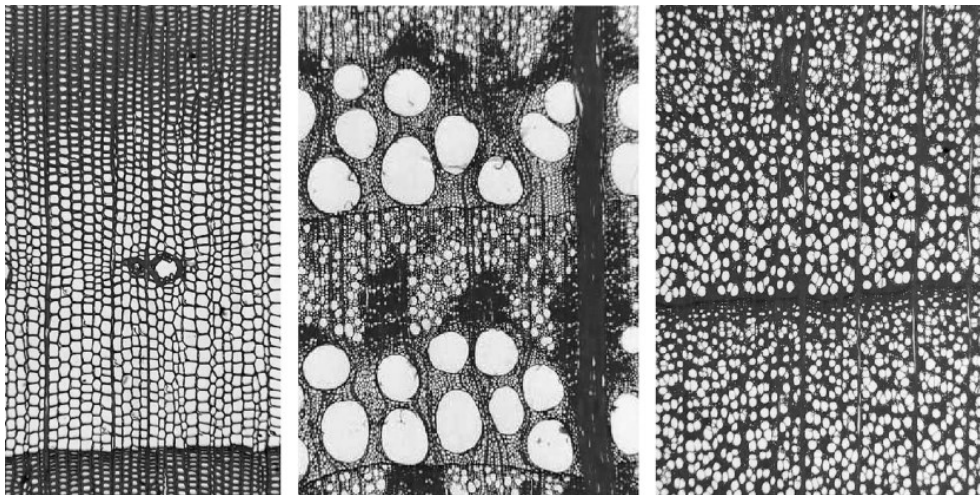
Et materiales poresystem betyr mye for fukttransport og fuktopptak. Et materiale med store porer vil transportere fukt i damp- og væskeform raskere enn om det hadde små porer. Fordeling av porestørrelser har også noe å si, mange små porer vil føre til at vannet bindes fastere i materialet og man får et større fuktinnhold (RF under 98%). Porestørrelse i diameter rangerer fra flere mm, ned til molekylestørrelser. Praktisk nedre grense er diameteren for et vannmolekyl,  $0,3 \text{ nm}$ .

Det aktuelle porevolumet bestemmes eksperimentelt. Eksempler på metoder er koking eller neddykking i vann med eller uten vakuumbehandling. Disse prøvene vil ikke gi

et bilde av totalt porevolum, bare det aktuelle, fordi noen porer er isolerte fra resten av poresystemet og vil ikke bli fylt med vann. Andre metoder er bl.a. mikroskopisk analyse, penetrering med kvikksølv eller gassadsorpsjons/-desorpsjonsanalyser. I trevirke er fordeling mellom porer og fast stoff på en slik måte at porene er kontinuerlige og det faste stoffet er kontinuerlig, men det er fortsatt mer fast stoff enn porer. Eksempler på materialer med andre porestrukturer er metall, skumglass og mineralull. I metall er det ingen porer, i skumglass er faststoffet kontinuerlig og porene er diskontinuerlige og lukkede, i mineralull er faststoffet diskontinuerlig og porene utgjør mye av materialvolumet. Porøsiteten,  $n$ , bestemmes av formelen:

$$n = 1 - \left( \frac{\rho}{\rho_{sol}} \right) \quad (2)$$

Hvor  $\rho$  er romdensiteten og  $\rho_{sol}$  er densiteten til materialets faststoff (uten porer). Porøsiteten kan ha en verdi mellom 0 og 1. Tre kan ha en poreoverflate på  $30\text{m}^2/\text{g}$  og er potensielt meget porøst. Figur 2 viser hvordan porestrukturen, og dermed også porøsiteten, kan variere fra tresort til tresort.



Figur 2: Venstre: Norsk gran. Midt: Eik. Høyre: Europeisk bøk. (Perré og Key 2006)

### Hygroskopiske egenskaper

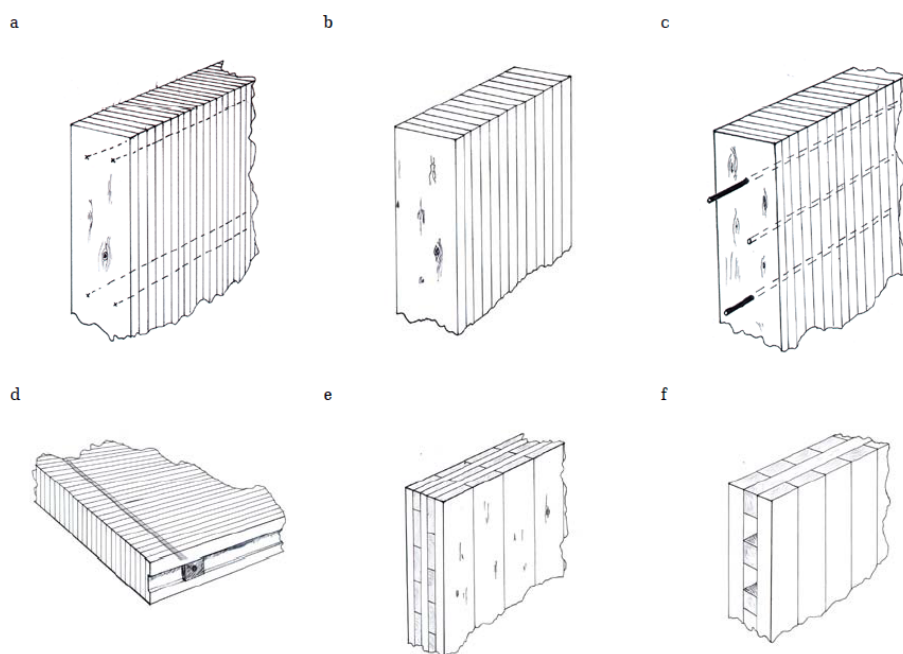
Et materiale med porer, lik trevirke, har hygroskopiske egenskaper (hygroskopiske materialer), det vil si at disse materialene kan binde fukt til seg. Mer om fukt i tre i kapittel 2.7 og 2.8.

### 2.1.2 Energimessige fordeler med innvendig trebruk

Ved å ta i bruk trematerialer inne i hus, enten ved bruk av panelering, massivtre eller andre ubehandlede overflateprodukter av tre, kan man nyttiggjøre seg den latente varmen som er lagret i vanndamp. Den frigis idet dampen kondenserer mot trevirkets tørrere overflate. Når trevirket suger til seg vann, minker den relative luftfuktigheten i innelufta og behovet for ventilasjon synker. Mer om latent varme i kapittel 2.3.

### 2.1.3 Massivtreelementer

Testhusene er sammensatt av massivtremoduler. Slike elementer er etter hvert blitt mer og mer vanlige i større byggeprosjekter. Massivtreelementer produseres ved at planker eller bjelker sammenføres til elementer ved spikring, liming, bruk av tredybler eller strekkstag (Figur 3). I modulene i testhusene er det benyttet limede elementer. Et slikt massivt element vil inneha helt andre egenskaper enn en lettere trekonstruksjon som man typisk har tradisjon for i Norge (bindingsverk etc.). Akustiske, termiske, statiske/mekaniske og fuktegenskaper vil være annerledes når elementene blir brukt i en konstruksjon, og man vil måtte ta hensyn til dette ved bruk. (Kristensen 1999)



Figur 3: Ulike typer limtreprodukter (Kristensen 1999)

## 2.2 Luft

Tørr luft (uten vanndamp i seg) er en blanding av ca. 21% oksygen,  $O_2$ , ca. 78% nitrogen,  $N_2$ , ca. 0,9% argon, Ar, ca. 0,03% karbondioksid,  $CO_2$ , i tillegg til små

mengder av andre gasser. Lufta kan også inneholde større eller mindre mengder vanddamp. Hvor mye vanddamp lufta kan inneholde avhenger av luftas temperatur.

### *2.2.1 Luftstrømninger*

Luftstrømninger drives av trykkgradienter. I forbindelse med bygninger skapes disse trykkgradientene enten av større trykkforskjeller over en bygning eller av temperaturgradienter inne i et rom/en bygning. I det første tilfellet er det anblåsning mot bygningen som skaper trykkforskjeller over bygningens overflater. Avhengig av bygningens form (bl.a. takvinkel) dannes det da forskjellige kombinasjoner av trykk og sug over bygningens overflater. På lesiden vil det som oftest dannes undertrykk (sug) og på losiden overtrykk (trykk). Hvis bygningen ikke er hermetisk lukket, men luftgjennomtrengelig vil innelufta påvirkes av dette i form av *infiltrasjon* og *eksfiltrasjon*. Ved infiltrasjon blir utelufta sugd inn gjennom utettheter i veggene, mens ved eksfiltrasjon vil det motsatte forekomme. Avhengig av uteluftens temperatur (og dermed metningspunkt for fukt) kan infiltrasjon virke både uttørkende og oppfuktende. Temperaturforskjeller vil også påvirke lufta. Varm luft utvider seg og vil være lettere enn den kalde lufta, dermed stiger den oppover og danner bevegelse på den måten. Skorsteinseffekten er en følge av dette fenomenet, det skapes et undertrykk fordi den varme lufta strømmer opp og luft vil strømme til, gjerne kald luft utenfra. Ventilasjonssystemet i bygningen vil også ha en innvirkning på hvordan lufta strømmer gjennom bygningen/rommet. (Geving og Thue 2002)

### *2.2.2 Grensesjiktet*

Tett inntil en overflate vil lufta bevege seg annerledes enn ellers i rommet. Det vil dannes et luftlag som kalles *det laminære grensesjiktet*. Lufta i dette tynne laget kleber nærmest til overflaten. Hastigheten er dermed liten og strømlinjene er parallelle med overflaten (Utaaker 1991). Siden lufthastigheten i det laminære grensesjiktet er så liten bremses både varme og fukttransporten kraftig opp.

### *2.2.3 Ventilasjon*

Det finnes ulike former for ventilasjonssystemer i forbindelse med bygninger. De mest vanlige ventilasjonssystemene er balansert ventilasjon, mekanisk ventilasjon og naturlig ventilasjon.

I moderne hus er det nå påkrevet å prosjektere med et balansert ventilasjonssystem,

dvs. et system hvor man kontrollerer luften som kommer inn og luften som kommer ut. Siden man kontrollerer både inn- og utslipp er det vanlig å bruke en varmegjenvinner, slik at varmen fra innelufta som går ut kan brukes til å varme opp utelufta som kommer inn. På denne måten sparer man penger på oppvarming.

Tidligere har det vært vanlig med mekanisk ventilasjon. Ved mekanisk ventilasjon kontrollerer man kun lufta som går ut av huset gjennom et avtrekkssystem. Det dannes et undertrykk inne i huset og frisk luft kommer inn gjennom utettheter, luker eller vinduer. Ved mekanisk ventilasjon har man ikke mulighet til å varme opp lufta som kommer inn utenfra, og varmen i lufta som går ut av systemet uutnyttet. Ved bruk av et mekanisk ventilasjonssystem plasseres gjerne avtrekkene i belastede rom som kjøkken og våtrom. I testhuset benytter man seg av et slikt system, med én avtrekksvifte.

I eldre bygninger er det vanlig å ikke ha noe kontrollert ventilasjonssystem, kun naturlig ventilasjon, hvor man utnytter at varm luft stiger opp og siver ut, mens uteluft kommer inn nedenfra gjennom for eksempel utettheter eller åpne vinduer. Infiltrasjon er en betegnelse på at luft kommer inn gjennom sprekker og mindre åpninger i en bygning.

## 2.3 Varme

Varme er energi. I SI-systemet brukes enheten Joule [J] for varmemengde  $Q$ , og Watt [W] for varmemestrøm eller effekt.

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} \tag{3}$$

For å øke temperaturen i et stoff, må det tilføres energi avhengig av materialets beskaffenhet og ønsket temperaturendring. Spesifikk varmekapasitet,  $c$  [J/kg·K], er den varmemengden et 1 kg av et stoff trenger for å øke temperaturen sin med 1K (Kelvin: temperaturer i den absolutte skala.  $T_{\text{celsius}} = T_{\text{kelvin}} - 273,15$ ). Ved faseendringer i et stoff endres stoffets varmeinnhold uten at temperaturen endres, denne endringen i varmeinnhold kalles latent varme, og oppgis i [J/kg].

### 2.3.1 Latent Varme

Latent varme (latin – *latere* = *skjult*) er en betegnelse man støter på i forbindelse med materialers faseoverganger. Vann, for eksempel, krever en viss energi for å gå over fra fast fase (is) til væskefase (vann), denne energien kalles *smeltevarme*  $H_i$ . Når vann går fra væskefasen til gassfasen (vanndamp) kreves en annen energimengde, denne energien kalles *fordampningsvarme*  $H_v$  (Straube 2006). Smeltevarmen og fordampningsvarmen er forskjellige fra hverandre, og ulik fra materiale til materiale. Smeltevarme og fordampningsvarme lagres i materialet og fører ikke til temperaturøkning i stoffet, og går derfor også under fellesbetegnelsen *latent varme*, eller ikke følbare varme. Når prosessen reverseres og vanndamp går til å bli vann (kondenserer) og seinere is (fryser), frigjøres den latente varmen tilbake til omgivelsene. Is kan også gå rett til å bli vanndamp, det heter sublimasjon, og *sublimasjonsvarme*  $H_s$ . Sublimasjonsvarmen er summen av smeltevarmen og fordampningsvarmen ( $H_s = H_i + H_v$ ). Fordampningsvarme og smeltevarme til vann er ikke konstant, men endrer seg i takt med lufttrykk og temperatur (Utaaker 1991). Tabell 1 viser vannets fordampningsvarme ved ulike temperaturer.

Tabell 1: Vannets fordampningsvarme ved ulike temperaturer.

Temperatur [°C]	Fordampnings- varme, $H_v$ , [kJ/kg]
0	2501
10	2478
20	2430
100	2260

### 2.3.2 Adsorpsjonsvarme

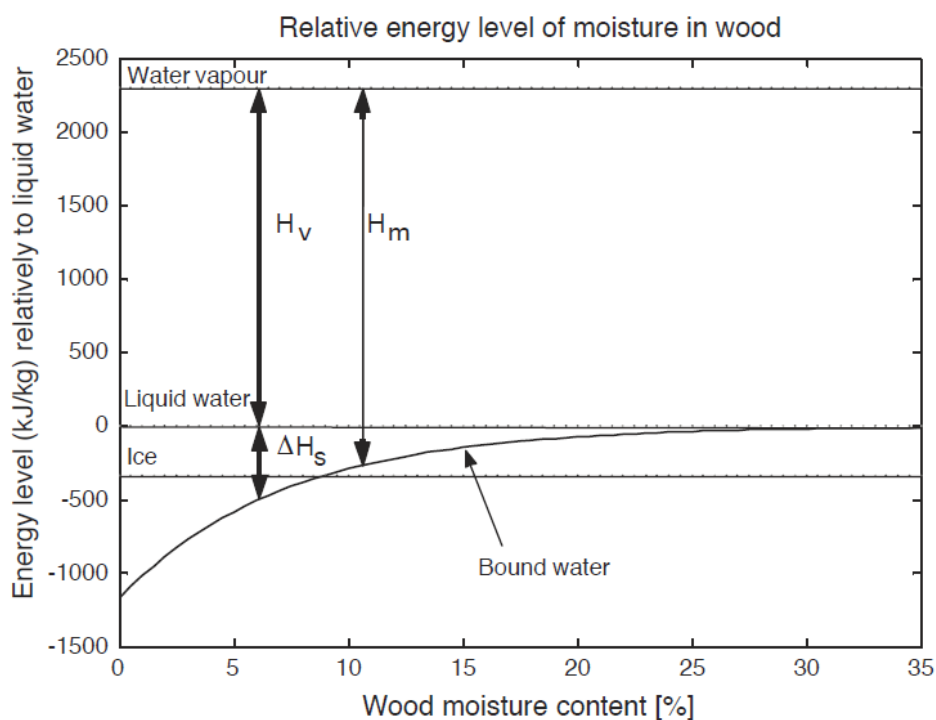
Ved adsorpsjon blir vannmolekylene bundet til celleveggene i trevirket. For å frigjøre vannmolekylene (til damp) kreves det mer energi enn bare fordampningsvarmen. Dette er fordi adsorbent vann har en mye lavere entalpi (energinivå) enn flytende vann (Time 1998). Adsorpsjonsvarmen avhenger av hvor fuktig trevirket er. Dersom trevirket er mettet, dvs. har nådd fibermetningspunktet (ca. 30 vektprosent) er adsorpsjonsvarmen tilnærmet lik fordampningsvarmen for vann.

En empirisk formel for adsorpsjonsvarmen (eng. differential heat of sorption) er beskrevet av (Hameury 2005), etter (Skaar 1988):

$$\Delta H_s(u) = 1,17 \times 10^6 \times e^{(-14u)} \quad (4)$$

Hvor  $\Delta H_s$  [J/kg] er adsorpsjonsvarmen og  $u$  [kg/kg] er vanninnholdet i trevirket. Denne adsorpsjonsvarmen kommer i tillegg til fordampningsvarmen, så den totale fordampningsvarmen blir:

$$H_m = H_v + \Delta H_s \quad (5)$$



**Figur 4:** Illustrasjonen beskriver sammenhengen mellom adsorpsjonsvarme og vanninnholdet i trevirket (wood moisture content) sett i forhold til vanns fordampningsvarme ( (Hameury 2005), etter (Siau 1995))

Figur 4 belyser temaet. Langs den horisontale aksene er vanninnholdet i trevirket i vektprosent, og langs den vertikale aksene er energinivå relativt til flytende vann. I grafen har man en buet linje som beskriver adsorpsjonsenergien ( $\Delta H_s(u)$ ) og to horisontale linjer, én fra et nullpunkt som er definert som er definert som fordampningsenergien for flytende vann ved laveste temperatur og én for is. Linjen for adsorpsjonsenergien beskriver hvordan energinivået endrer seg i takt med

metningsgraden til trevirket. Når trevirket er meget tørt (til venstre i diagrammet) er det veldig sterke adhesive bindinger mellom vannmolekylene på celleveggen og tilsvarende energimengder kreves for å løsrive vannmolekylene fra celleveggen. Det motsatte er tilfellet hvis fuktinnholdet i trevirket har nådd metningspunktet, da kreves kun vannets fordampningsenergien for å løsne vannmolekylene fra trevirket. Dvs. jo tørrere et materiale er, jo vanskeligere er det å tørke ut «siste rest» av fukt.

### 2.3.3 Varme i bygg

Her presenteres noen begreper som angår varmetransport i materialer, som benyttes i bygningsfysikken.

#### **Varmekonduktivitet – $\lambda$**

Varmekonduktiviteten (varmeledningsevne) er en størrelse som brukes til å beskrive varmetransport gjennom et materiale. Varmekonduktiviteten har betegnelsen [W/(mK)] og er den varmestrømmen [W] som går gjennom et tverrsnitt på  $1\text{m}^2$  av et homogent materialsjikt når det er en temperaturforskjell på 1K per meter materialtykkelse. Denne materialegenskapen bestemmes eksperimentelt og er avhengig av materialets struktur, densitet, temperatur og fuktinnhold. Varmekonduktiviteten til trevirke er 0,13 W/mK (for gran og furu med densitet lik  $500\text{kg/m}^3$ ). (Edwardsen og Ramstad 2007)

#### **Varmemotstand – R**

Varmemotstanden i et materialsjikt beskriver den motstanden varmeoverføring møter gjennom materialets dybde. Denne størrelsen beskrives ved formelen:

$$R_T = R + R_{si} + R_{se} \tag{6}$$

hvor  $R = \frac{d}{\lambda}$ , og d er materialsjiktets tykkelse.

#### **Varmeovergangsmotstand - $R_{si}$ , $R_{se}$**

Varmeovergangsmotstand er den motstanden varmeoverføringen møter ved en innvendig eller utvendig overflate. Varmeovergangsmotstanden er avhengig av lufthastigheten langs overflaten, emissiviteten, middeltemperaturen for flaten og



omgivelsene. Størrelsen betegnes av  $R_{si}$  (innvendig) og  $R_{se}$  (utvendig), og  $R_{si} > R_{se}$  på grunn av vind og avstråling mot kalde luftlag. Videre er varmeovergangsmotstanden lavere for horisontale flater (tak og etasjeskillere) enn for vertikale flater (vegger). (Edwardsen og Ramstad 2007).

### **U-verdi**

U-verdi er en størrelse som brukes til å beregne varmetransport gjennom (lagdelte) konstruksjoner. For karakterisering av en konstruksjons varmeisolasjonsytelse brukes varmestrømstettheten gjennom konstruksjonen ved én grads forskjell i omgivelsestemperatur, for eksempel innetemperatur og utetemperatur, eller en grad forskjell mellom to rom i et hus.

$$U = \frac{1}{R_T} + \Delta U \tag{7}$$

U [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] betegnes som varmegjennomgangskoeffisienten. En høy U-verdi beskriver en bygningsdel som har en lav varmeisolasjonsevne, og motsatt, en lav U-verdi finner vi hos en bygningsdel med høy varmeisolasjonsevne. (Edwardsen og Ramstad 2007).

### **Kuldebroer**

En kuldebro er et område av en bygning/konstruksjon som har vesentlig dårligere varmeisolasjonsevne enn de nærliggende konstruksjonsdeler. Varmegjennomgangen i denne konstruksjonen er større enn i området omkring. Problemet oppstår når disse dårlig isolerende materialene er i umiddelbar kontakt med kalde utetemperaturer, og leder disse lave temperaturene inn til innemiljøet, eller sagt på en annen måte, leder varmen fra innemiljøet ut av huset. Konsekvenser av disse kuldebroene kan være at huset har uforholdsmessig stort varmetap, lav overflatetemperatur fører til ubehag for beboere eller at ujevn overflatetemperatur fører til bygningstekniske skader. I hygroskopisk materiale som tre vil kuldebrovirkningen øke dersom fuktinnholdet i trevirket øker. Høyt fuktinnhold fører til en økt varmeledningsevne og ytterligere senket overflatetemperatur på varm side av bygningsdelen. (Edwardsen og Ramstad 2007).

## Varmetap

Det er interessant å vite varmetapet for et bygg for å få et begrep om hvor mye oppvarming som trengs. I uttørkingsøyemed er det også viktig å kunne skille hvor mye energi som brukes til selve uttørkingen og hvor mye som tapes ut gjennom husets overflater. Samlet varmetap beregnes slik:

$$Q = U * A * \Delta\theta * h \quad (8)$$

hvor U er U-verdien, A [m<sup>2</sup>] er totalt veggareal,  $\Delta\theta$  er temperaturforskjell og h [t] er tid.

## Temperaturfordeling gjennom veggen

Beregning av temperaturfordelingen gjennom en konstruksjon kan brukes til å anslå sannsynligheten for kondens inne i konstruksjonen.

$$\frac{\Delta\theta_x}{\Delta\theta_{tot}} = \frac{R_x}{R_{tot}} \quad (9)$$

## 2.4 Varmetransport

Ved temperaturforskjeller vil det oppstå energitransport fra høy til lav energikonsentrasjon, eller høy til lav temperatur (Geving og Thue 2002). Man skiller mellom ulike former for varmetransport:

- Konduksjon
- Konveksjon
- Stråling

### 2.4.1 Konduksjon

Ved varmeledning brer varmen seg gjennom stoffet ved molekylbevegelser. Et atom med stor indre energi vil «vibrere» og overføre energien sin til nærliggende atomer ved sammenstøt og kollisjoner. Slik brer energien/varmen seg til temperaturforskjellene/ energinivåene atomene imellom er så små at de blir ubetydelige. Varmeledning er proporsjonal med denne temperaturgradienten – temperaturendringen per lengdeenhet, og varmestrømstettheten beskrives ved Fouriers varmeledningslov:

$$q_x = \frac{dQ_x}{dA dT} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (10)$$

Hvor  $dQ_x$  [J] er varmemengden som strømmer gjennom en flate med areal  $dA$  [m<sup>2</sup>] vinkelrett på x-retningen,  $dT$  [K] er tidsintervallet og  $\frac{\partial T}{\partial x}$  [K/m] er temperaturgradienten i retning x. Varmestrømmen er retningsavhengig, og beveger seg i temperaturens avtakende retning. Flater med samme temperatur kalles isotermer, og varmemestrømmen er vinkelrett på isotermene.

#### 2.4.2 Konveksjon

Konveksjon er en varmetransportsmekanisme som finner sted når et stoff i flytende- eller gassfase blir varmet opp, utvider seg, og flytter seg. Den indre energien blir overført til en flate som har en lavere temperatur. Varmetransport ved konveksjon er en sammensatt prosess som skyldes ulike mekanismer:

- 1) Fluidet varmes eller kjøles ved ledning i et tynt grensesjikt ved materialoverflaten, hvor strømningshastigheten er liten
- 2) Varme overføres ved at fluidet strømmer og blander seg med omkringliggende fluid.

Varmetransport ved konveksjon avhenger av om det er snakk om vann eller luft, tilstand, temperatur, orientering i forhold til tyngdekraften, ruhet, form og dimensjon. Man skiller mellom fri konveksjon (naturlig ventilasjon) og tvungen konveksjon (mekanisk ventilasjon + vind). I testhusene er det mekanisk ventilasjon. I noen tilfeller vil utveksling av latent varme oppstå, ved kondensasjon eller fordampning på overflaten lufta er i kontakt med. Dette er diskutert nærmere i kapittel om latent varme. Varmetransport ved konveksjon mellom en overflate og en strømmende substans beskrives ved formelen:

$$q_{cv} = h_c(T_s - T_a) \quad (11)$$

Hvor  $q_{cv}$  [W/m<sup>2</sup>] er varmetransporten,  $h_c$  [W/m<sup>2</sup>K] er det konvekktive varmeovergangstallet,  $T_s$  [K] er overflatens temperatur og  $T_a$  [K] er fluidtemperaturen

utenfor grensesjiktet.

### 2.4.3 Stråling

Stråling er elektromagnetiske bølger som beveger seg gjennom rommet i lysets hastighet med forskjellige bølgelengder. Varmestråling har bølgelengde i forhold til legemets eller flatens temperatur. For temperaturer fra  $-30^{\circ}\text{C}$  til  $+50^{\circ}\text{C}$  ligger varmestråling i det infrarøde spekteret. For høyere temperaturer, f.eks. ved oppvarming og smelting av metall blir temperaturen så høy og strålingen så intens at det går over i det synlige spekteret. Emisjon fra en overflate eller et legeme kan skje i alle retninger, avhengig av overflatens egenskaper. I bygningsfysikken antar man at strålingen er lik i alle retninger. Den totale varmestrålingen beskrives ved denne formelen:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (12)$$

Hvor  $E$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] er den totale varmestrålingen per arealenhet,  $\varepsilon$  [ $0 < \varepsilon < 1$ ] er overflatens emissivitet,  $\sigma$  er Stefan-Boltzmanns konstant [ $= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ] og  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] er overflatens temperatur.

Når stråling treffer en flate vil energien reflekteres [ $\rho$ ], transmitteres [ $\tau$ ] og absorberes [ $\alpha$ ], avhengig av legemets og overflatens beskaffenhet. Disse faktorene blir til sammen alltid lik én. I simulering bruker man størrelsen globalstråling, som er summen av stråling, direkte og diffus (reflektert fra bakken og andre flater) fra sola.

## 2.5 Fukt

### 2.5.1 Vannets egenskaper

Vann er et molekyl som består av hydrogen (11,2%) og oksygen (88,8%). Vannmolekylets diameter er ca. 0,3 nanometer. Vannmolekylene er polare, dette er på grunn av vannmolekylene oppbygning. De to positivt ladede hydrogenatomene samler seg på den ene siden av det negativt ladede oksygenatomet slik at molekylet får et positivt ladd og en negativt ladd side ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Dette fører til at vannmolekylene oppfører seg som en magnet og tiltrekkes av mange forskjellige materialer i både flytende form og gassform. Denne materialegenskapen til vannet bidrar til

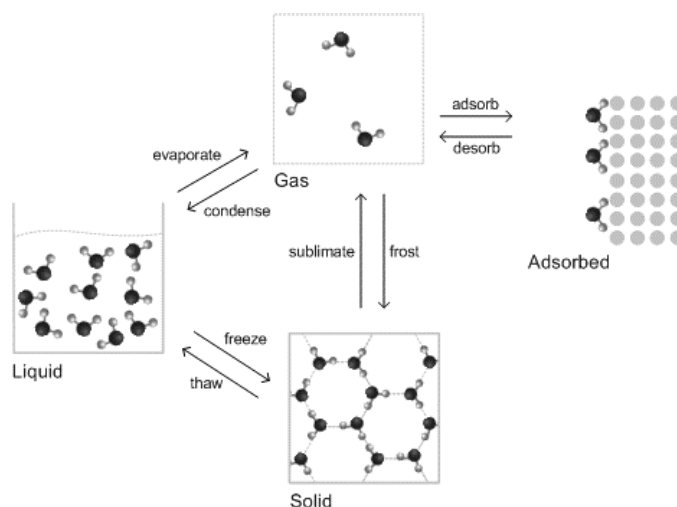
kapillæreffekten som vi finner i blant annet trevirke, hvor vannet blir sugd opp i tynne kapillærrør. Noen materialer motstår likevel denne effekten, som silikon, oljer og noen former for plastikk. Vannet vil da «perle» seg på disse overflatene (Straube 2006). Materialer som frastøter seg vann kalles hydrofobe. Materialer som tiltrekker vann er hydrofile.

### 2.5.2 Faseoverganger

Polariteten i vann fører også til at nabomolekyler i stor grad tiltrekkes av hverandre, positiv side av ett molekyl trekkes mot den negative siden til nabomolekylet. Dette fører til at vann må tilføres uvanlig store mengder energi for å gå fra én tilstandsform (fase) til en annen. Varmen som tilføres eller avgis i løpet av en faseovergang (mens temperaturen er konstant), kalles *latent varme*. Latent varme er tidligere beskrevet i kapittelet om varme. Tabell 2 og Figur 5 beskriver vannets tilstand i de forskjellige fasene.

Tabell 2: Vannets faser og egenskaper

	Temperatur	Egenskaper
<b>Is</b>	$< 0^{\circ}\text{C}$	<i>Is</i> – lave temperaturer, ekspanderer (som er uvanlig for et materiale ved lave temperaturer)
<b>Vann</b>	$0 - 100^{\circ}\text{C}$	<i>Vann</i> – mest tilgjengelig,
<b>Damp</b>	$> 100^{\circ}\text{C}$	<i>Damp</i> – lite tilgjengelig, stor avstand mellom partiklene.
<b>Adsorbent</b>	-	<i>Bundet til celleveggen i trevirke eller et annet hygroskopisk materiale-</i>



Figur 5: Vannets faser og faseoverganger (Straube 2006)

### 2.5.3 Luftfuktighet

Lufta kan inneholde fuktighet, som oftest i form av vanndamp. Hvor mye fuktighet lufta kan inneholde avhenger av temperaturen. Luft ved høy temperatur kan bære på mer vann enn den samme lufta ved en lavere temperatur. Fuktmengden lufta inneholder kan angis på forskjellige måter:

- Som vanndampens partialtrykk  $p_v$  [Pa]
- Som vanndampkonsentrasjon  $v$  (absolutt fuktighet) [kg/m<sup>3</sup>]
- Som vanndampmasse per tørr luft [kg/kg]

Den øvre grense fuktighet et volum med luft kan inneholde kalles metningsinnholdet eller metningstrykket. Metningstrykket øker med økende lufttemperatur. For å beskrive fuktinnholdet til en «pakke» med luft ved en gitt temperatur på en god måte er det vanlig å bruke *relativ fuktighet*, RF [%], som sier oss hvor mye fuktighet lufta *inneholder* i forhold til hvor mye den *kan* inneholde (ved metningstrykket) ved en gitt temperatur.

$$RF = \frac{v}{v_{sat}} \cdot 100\% = \frac{p_v}{p_{sat}} \cdot 100\% \quad (13)$$

Når  $p_v = p_{sat}$  er  $RF = 100\%$ , dette kalles duggpunktet. Lufta kan ikke ta til seg ytterligere fuktighet, den er mettet. Hvis lufttemperaturen synker på dette stadiet vil fuktighet skilles ut (kondenseres ut).

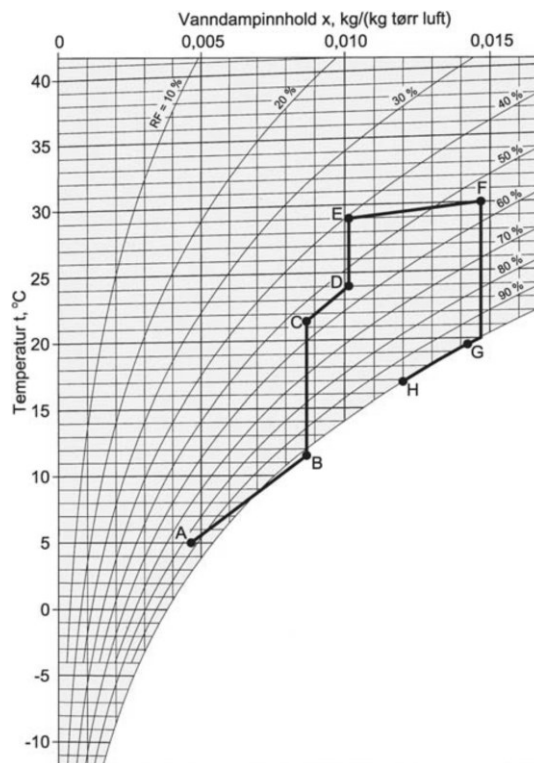
Figur 6 viser et Mollierdiagram, som viser sammenhengen mellom vanndampinnhold, lufttemperatur og relativ fuktighet. Her kommer det fram hvor stort vanninnhold som gir f.eks. 100% RF ved en gitt temperatur.

#### **Omgjøring fra relativ fuktighet til absolutt fuktighet**

Som vist i mollierdiagrammet i Figur 6 avhenger absolutt fuktighet i lufta både av temperatur og relativ fuktighet. Denne sammenhengen kan med en nøyaktighet på 0,1% i intervallet  $-30^\circ\text{C} < T < 35^\circ\text{C}$  uttrykkes slik (CarnotCycle 2012) fra (Bolton 1980):

$$\text{Absoluttfuktighet} = \frac{a \cdot e^{\left(\frac{b \cdot T}{T+c}\right) \cdot d \cdot RF}}{273,15+T} \quad (14)$$

Hvor  $a = 6,112 \text{ mbar}$ ,  $b = 17,67$ ,  $c = 243,5^\circ\text{C}$  og  $d = 2,164$ .  $T [^\circ\text{C}]$  er lufttemperaturen og  $RF$  er den relative luftfuktigheten i lufta.



Figur 6: Mollierdiagram (Blom og Aarseth 2003)

## 2.6 Fukttransport i luft

### 2.6.1 Vanndampdiffusjon i luft

Vanndampdiffusjon beskriver hvordan vanndampmolekyler sprer seg i luft. Vanndampmolekylene har høy hastighet og vil i et avgrenset volum spre seg jevnt utover i volumet. Denne mekanismen kalles diffusjon og drivkreftene bak er forskjellen i vanndamptrykk i volumet og molekylenees hastighet. I et luftvolum med et inhomogent vanndamptrykk vil det skje en damptransport fra høyt til lavt damptrykk. Under isoterme forhold (konstant temperatur) beskrives netto damptransport i lufta ved hjelp av Ficks diffusjonslov (Geving og Thue 2002):

$$g = -D_p \cdot \nabla p_v = -D_v \cdot \nabla v \quad (15)$$

Og

$$D_v = D_p \cdot R_v \cdot T \quad (16)$$

Hvor  $g$  [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ] er dampfluksen gjennom en flate,  $\nabla p_v$  [ $\text{Pa}/\text{m}$ ] er gradienten i vanndampens partialtrykk,  $\nabla v$  [ $\text{kg}/\text{m}^4$ ] er gradienten i vanndampkonsentrasjon,  $D_p$  [ $\text{kg}/(\text{m s Pa})$ ] er vanndampens diffusjonstall i luft basert på damptrykk,  $D_v$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] er vanndampens diffusjonstall i luft basert på dampkonsentrasjon,  $R_v$  [ $\text{Nm}/\text{kgK}$ ] er gasskonstanten for vanndamp ( $=461,4 \text{ Nm}/\text{kgK}$ ) og  $T$  [ $\text{K}$ ] er absolutt temperatur. Minustegnet på den høyre siden av likningen skyldes at konsentrasjonen går mot avtakende konsentrasjon/partialtrykk.

## 2.7 Fukttransport i tre

### 2.7.1 Diffusjon - Vanndampdiffusjon i tre

Fukttransport ved vanndampdiffusjon forekommer når et tørt og porøst materiale plasseres i fuktig luft. Vannmolekyler diffunderer/beveger seg gjennom materialet i retning avtakende dampkonsentrasjon. Dermed er det det absolutte fuktinnholdet/damptrykket som avgjør hvilken vei dampdiffusjonen går og ikke endringen i relativ fuktighet. Vanndampdiffusjonen vil foregå helt til fuktinnholdet stiller seg i en likevekt med lufta rundt (når likevektsfuktinnholdet).

Vanndamppermeabiliteten til et materiale angir hvor fort vanndamp kan transporteres gjennom et materiale ved diffusjon (Siau 1984). Stor vanndamppermeabilitet gir rask vanndamptransport. I trevirke påvirkes vanndampdiffusjonen av fuktinnholdet i materialet. Økt fuktinnhold gir økt vanndamppermeabilitet. Diffusjon gjennom et materiale er ikke identisk med diffusjon gjennom et luftvolum. I et materiale må vanndampen trenge gjennom poreåpninger som kan være mindre enn dampmolekylene, da vil ikke lenger molekylbevegelsene bli bestemt av sammenstøt mellom molekylene, men av sammenstøt med poreveggene. På grunn av ulik størrelse vil damp- og luftmolekylene bevege seg uavhengig av hverandre, og den transporterte



dampmengden blir bestemt av antall molekyler som treffer poreåpningen. Denne typen damptransport kalles effusjon. Innvirkningen av materialets mikrostruktur på den resulterende fukttransporten beskrives av den dimensjonsløse materialmotstandsfaktoren  $\mu$ . Diffusjon gjennom et materiale kan da beskrives ved denne likningen:

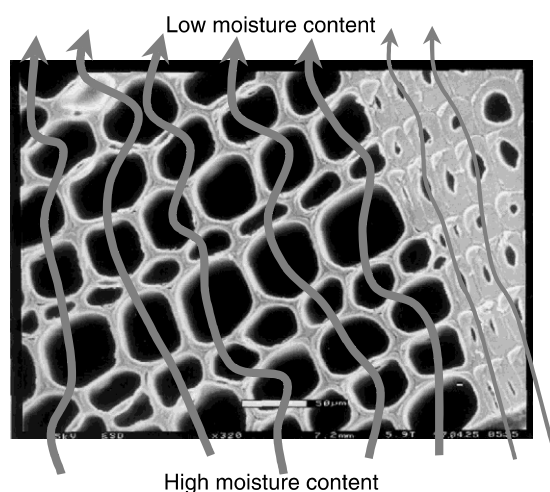
$$\delta_p = \frac{D_p}{\mu}, \quad (17)$$

Hvor  $\delta_p$  [kg/(m s Pa)] er vanndamppermeabiliteten,  $D_p$  [kg/(m s Pa)] er vanndampens diffusjonstall i luft basert på damptrykk, og  $\mu$  er materialmotstandsfaktoren.

Ved å bruke Ficks lov (formel 15) og likningen for vanndamppermeabiliteten (formel 17) kan man sette opp et uttrykk for fukttransporten,  $g$  [kg/(m<sup>2</sup>s)], ved isoterme forhold og endimensjonal strøm:

$$g = -\delta_v \cdot \frac{dv}{dx} = -\delta_p \cdot \frac{dp_v}{dx}, \quad (18)$$

Hvor  $\delta$  er vanndamppermeabiliteten for materialet,  $\delta_v$  [m<sup>2</sup>s] er vanndampens diffusjonstall i materialet (relatert til konsentrasjonsgradienten),  $\delta_p$  [kg/(m Pa s)] er vanndampens diffusjonstall i materialet (relatert til damptrykkgradienten) og  $x$  [m] er diffusjonsveien.



Figur 7: Illustrasjon av diffusjon gjennom materialets porestruktur (Perré og Key 2006)

Diffusjonshastigheten kan uttrykkes på flere forskjellige måter i tillegg til vandamppermeabilitet, herunder følger vandamppermeans, vandampmotstand og diffusjonsekvivalent luftlagstykkelse. Disse benyttes helst for tynne sjikt, siden de er knyttet til materialer med en gitt tykkelse. Her er diffusjonsekvivalent luftlagstykkelse ( $s_d$ -verdi) den mest anvendelige verdien. Den defineres slik:

$$s_d = \mu \cdot d \quad [\text{m}] \quad (19)$$

Hvor  $\mu$  [-] er den relative fuktmotstanden og  $d$  [m] er materialets tykkelse.

### *2.7.2 Konveksjon*

Fukttransport ved konveksjon forekommer når vandamp transporteres i en luftstrøm fra høyt lufttrykk til lavt lufttrykk. Det finnes både naturlig og tvungen konveksjon. Naturlig konveksjon finner man i luftfylte spalter og hulrom som er isolert med materialer som lar luft sirkulere. Dette fører til at fuktighet blir omfordelt i konstruksjonen. Den samme virkningen kan man også få i en litt større sammenheng, nemlig at fukt transporteres fra et rom til et annet. Tvungen konveksjon kan forekomme hvis det oppstår en forskjell i luftas totaltrykk over en bygningsdel. Lufta vil også her strømme mot lavere lufttrykk, men potensielt i betydelig større mengder enn ved naturlig konveksjon. Dermed vil det også være mulig å frakte store mengder fuktighet.

Bygningstekniske problemer forbundet med begge former for konveksjon er i de tilfellene hvor varm fuktig luft blir fraktet mot et område eller en flate som er kaldt. Den nedkjølte lufta vil ikke lenger være i stand til å holde på vannet og vann kondenseres ut på flater eller inni bygningsdeler. Denne formen for oppfuktning fører med seg fare for mugg og råte i trevirke, samt dårligere isolasjonsevne.

### *2.7.3 Enfasetransport*

Enfasetransport er transport av vann i væskefase, tofasetransport er transport av vann i både gass- og væskefase samtidig. Enfasetransport kan beskrives vha. Darcys lov:

$$v = \frac{K}{\mu} \nabla(P) \quad (20)$$

Hvor  $v$  [m/s] er vannets hastighet gjennom trevirket,  $K$  [m<sup>2</sup>] er materialets permeabilitet og  $\mu$  [Pa/s] er den dynamiske viskositeten til væsken.

Væskestrømning gjennom trevirket foregår gjennom det naturlige langsgående systemet av trakeider, dette gjør vannforflytningen meget anisotrop. For treslag som gran og furu kan den langsgående permeabiliteten være opptil 1000 ganger større enn den transverse permeabiliteten (Banks 1968). Denne anisotropien varierer fra tresort til tresort.

#### 2.7.4 Tofasetransport

Ved transport av to eller flere faser, følger bevegelsene Darcys Lov. Den volumetriske transportraten til hver fase (gass, væske, etc.) er proporsjonal med trykkgradienten til den korresponderende fasen.

Gassfase:

$$v_g = -\frac{Kk_{rg}(S)}{\mu_g} \nabla P_g, \quad (21)$$

Væskefase:

$$v_l = -\frac{Kk_{rl}(S)}{\mu_l} \nabla P_l, \quad (22)$$

Gasstrykk forholder seg til væsketrykk på denne måten:

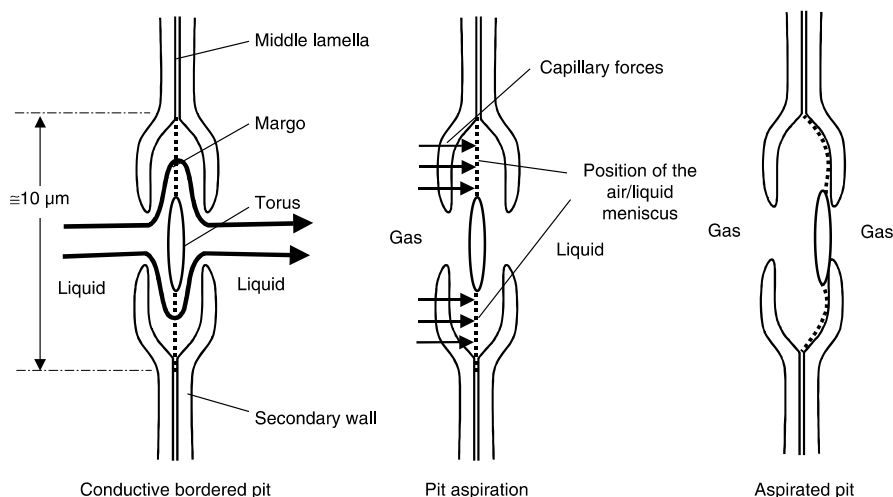
$$P_l = P_g - P_c(S), \quad (23)$$

Hvor  $K$  er permeabiliteten,  $P_c$  er kapillærtrykket,  $P_l$  er væsketrykket og  $P_g$  er gasstrykket.

#### 2.7.5 Væsketransport gjennom linseporer

Væsketransport på tvers av trevirkets fiberretning foregår gjennom linseporer. Linseporene er laget slik at de vil forsegle og isolere trakeider som blir skadet eller

som har gått over til å være lagringsenhet for overskuddsstoffer i treet, men likevel forbli åpne for livsnødvendig væsketransport. Mekanismen fungerer på den måten at hvis det kommer gass(luft) inn i en av trakeidene på hver side av en linsepore, vil trykkforskjellen føre til at torusplaten forskyves og blokkerer for massetransport gjennom linsen (se Figur 8). Denne mekanismen fører til noen problemer når det kommer til tørking av tre, siden porene vil lukkes når de blir utsatt for trykkforskjeller pga. ulikt vanninnhold på hver side (Perré og Key 2006).



Figur 8: Figuren viser hvordan linseporene reagerer på krefter de blir utsatt for. (Perré og Key 2006)

## 2.8 Fuktlagring i tre

### 2.8.1 Fukttinnhold

Fukttinnholdet i trevirke kan angis på flere forskjellige måter. Den mest relevante for trevirke og andre tyngre materialer er  $u$ , fuktmasse per tørrstoffmasse som gjerne angis i prosent, siden den ikke har noen benevning ([kg/kg]). Flere måter å angi fuktighet i trevirke på vises i Tabell 3.

Tabell 3: forskjellige måter å angi fukttinnholdet til et materiale (Geving og Thue 2002).

Definisjon	Symbol	Enhet
Fuktmasse/tørrstoffmasse	$u$	[kg/kg], evt. vektprosent
Fuktmasse/materialvolum	$w$	[kg/m <sup>3</sup> ]
Fuktvolum/materialvolum	$\psi$	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ], evt. volumprosent
Metningsgrad: Fuktvolum/porevolum	$S$	Ubenevnt, evt. prosent

I trevirke skilles det mellom fritt vann og bundet vann. Det frie vannet blir transportert rundt i poresystemet, mens det bundne vannet er bundet til celleveggene i trevirket.

### **Fritt vann**

Den væsken i trevirket som blir transportert rundt i karsystemet kalles fritt vann. Det er fordi dens egenskaper som tetthet, viskositet og vanndampmetningstrykk er svært like flytende vanns egenskaper. Dette vannet er bundet til poresystemet i trevirket ved *kapillærkrefter*.

### **Bundet vann**

Bundet vann henger sammen med vedens hygroskopiske natur. Fibermetningspunktet beskriver hvor mye fuktighet celleveggene i trevirket kan ta til seg. På grunn av hystereseeffekten er fuktinnholdet ved likevekt ved en gitt relativ fuktighet høyere hos ferskt, utørket tre, enn hos tre som har vært tørket og fuktet opp igjen. Det finnes ulike former for bindinger mellom vannmolekylene og trevirket:

- Adsorpsjon
- Absorpsjon
- Kapillærkondensasjon

### ***Adsorpsjon***

Adsorpsjon skyldes tiltrekningskrefter mellom materialoverflatens molekyler og vann- eller vanndampmolekyler. Denne tiltrekningen skyldes vannmolekylens dipolare egenskaper tidligere omtalt i kapittelet. Mengden av vann som kan lagres i celleveggen begrenses av materialets beskaffenhet (antall sorpsjonsplasser tilgjengelig og hvor mange vannmolekyler som kan bindes til hver sorpsjonsplass) og poreareal. Det innerste laget av vannmolekyler som fester seg på celleveggene blir bundet med krefter tilsvarende 10000 – 20000 atm (atmosfæriske trykk). Til sammenlikning kjenner vi kun ett atmosfærisk trykk ved havoverflaten. De store kreftene sier oss at det trengs betydelige mengder energi for å kunne frigjøre vannmolekylene. De neste lagene med vannmolekyler som fester seg til celleveggene er bundet av langt mindre krefter. De fleste byggematerialer kan adsorbere opptil ca. 30 lag med vannmolekyler. Etter hvert vil det danne seg en balanse mellom vannhinna som nå har lagt seg på celleveggene i trevirket og den relative fuktigheten i lufta omkring. På grunn av

kraftige varmesvingninger i vannmolekylene, vil noen bryte seg løs mens vandampmolekyler fra lufta vil feste seg til vannhinna. Dette medfører at tykkelsen på den adsorberte væskehinna øker med stigende relativ fuktighet. Hvis materialet er helt tørt ved oppfukting vil adsorpsjon stå for fuktopptaket i startfasen av oppfuktingen. Etter hvert vil kapillærkondensasjon overta.

### ***Absorpsjon***

Når trevirket er mettet, er det ikke mer plass til vann i bundet form i trevirkets cellevegger. Hvis trevirket er utsatt for tilstrekkelige fuktige forhold, vil det begynne å absorbere fuktigheten. Nå blir vannet lagret i fri form inni den åpne porestrukturen i trevirket. Kapillærkraften vil bidra til denne effekten. Når porene fylles av vann vil trevirket begynne å svulle og styrken til tømmeret minke. Varme- og elektrisk ledningsevne øker begge i takt med fuktinnholdet inni trevirket.

### ***Kapillærkondensasjon***

Kapillærkondensasjon er en sekundær virkning av adhesjonskreftene. Tykkelsen på de adsorberte molekyllagene øker i takt med økende RF og dermed reduseres den luftfylte delen av porene. I denne prosessen vil vannhinner på motsatt side av hver pore krype sammen. De delene av poreveggene som ikke er klistret til motsatt side danner krumme menisker (Figur 8) på grunn av adhesjonskreftene. Krumningen fører til at vandampens metningstrykk over en menisk blir lavere enn over en fri, plan vannflate ved samme temperatur. Kapillærkondensasjonen gir utslag ved RF fra 80% til 100%, men den har liten betydning for porer med radius større enn 100 nm.

### **Fuktinnhold ved likevekt**

Når luften rundt har en relativ RF på 0%, vil også fuktinnholdet i trevirket være tilnærmet lik null. Andre faktorer påvirker også fuktinnholdet ved likevekt. Likevektsfuktinnholdet i trevirket øker i takt med RF i lufta rundt. Ved RF=100% oppnår celleveggen metningspunktet som kalles fibermetningspunktet. Fibermetningspunktet er definert av (Tiemann 1906) som fuktinnholdet trevirket innehar når fibrene er mettet med vann bundet i celleveggene, men uten vann i porene. Ytterligere vann som tilkommer trevirket blir lagret i flytende form i porene. Fibermetningspunktet er avhengig av treslag og temperatur og ligger på ca. 28 % for

gran og furu ved 20 °C (Tronstad 2000).

### **Sorpsjonskurver**

En sorpsjonskurve viser sammenhengen mellom vanninnhold i et materiale og relativ luftfuktighet i lufta. I tørkeprosessen kan man lese av en sorpsjonskurve hvilken minimums fuktverdi trevirket vil kunne oppnå i forhold til den relative fuktigheten i tørkelufta (Marinos-Kouris og Maroulis 2006). Figur 9 viser en sorpsjonskurve med både sorpsjons- og desorpsjonskurver. Sorpsjonskurver deles opp i tre områder:

- Hygroskopisk område
- Kapillært område
- Overmettet område

### **Hygroskopisk fukt – det hygroskopiske området**

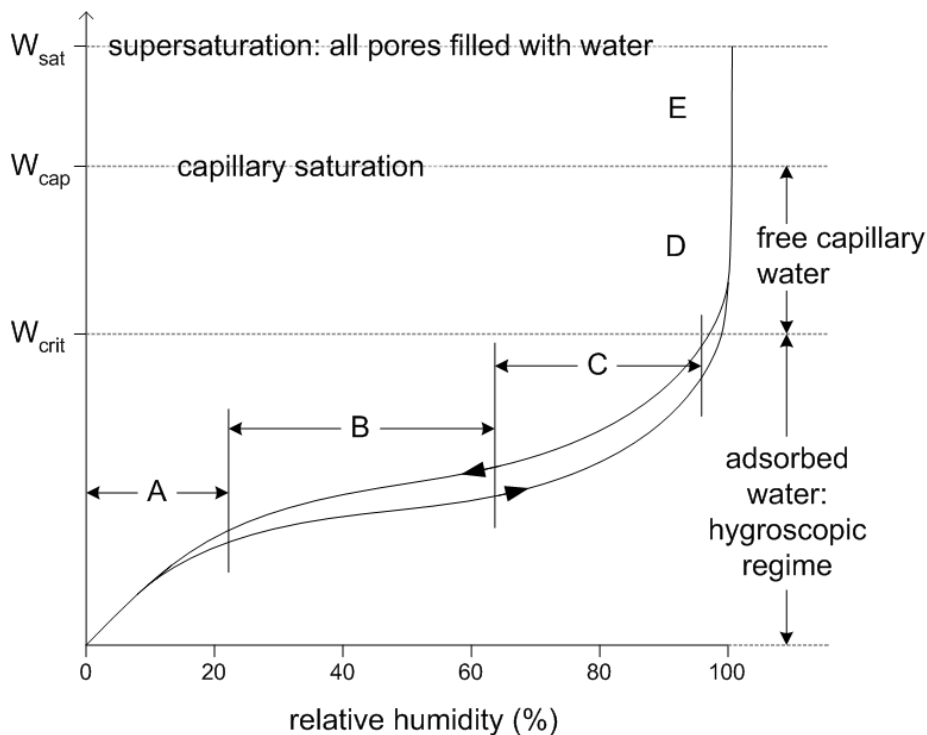
Ved hygroskopisk lagring er det livevekt mellom materialet og fuktigheten i lufta. Dess høyere luftfuktigheten er, dess høyere blir fuktinnholdet i materialet. Den øvre grensen i denne tilstanden er ved lagring i luft med 100% RF. Ved likevekt med RF på 95-98% når materialet den øvre hygroskopiske grense. Over denne grensen finner vi kritisk fuktinnhold, porevannsystemet blir da kontinuerlig, og væskestrømning begynner å dominere fukttransporten, i motsetning til under den kritiske grensen, hvor damptransport og overflatebevegelse i det adsorberte vannsjiktet er det største tilskuddet i fukttransporten. A – B – C i Figur 9.

### **Kapillær fukt – Det kapillære området**

Området fra øverste hygroskopiske grense til kapillær metning,  $w_{cap}$ , kalles det kapillære området. Den kapillære fuktingen inntreffer når trevirket i lengre tid står i kontakt med fritt vann. Fuktinnholdet vil da øke inntil det når kapillær metning. Ved kapillærsug oppnås ikke total metning, dvs. at ikke alle trevirkets porer vil bli fylt med vann på denne måten. D i Figur 9.

### **Overmetning – overmettet område**

Overmetningsområdet er området fra kapillær metning til full metning  $w_{sat} / w_{max}$ . Full metning oppnår man ved å fylle absolutt alle porene i trevirket med vann. Da må den innesluttede luften drives ut. Siden dette ikke er en naturlig tilstand, kan den bare oppnås i et laboratorium vha. vakuumbehandling eller koking. E i Figur 9.



Figur 9: Sorpsjonskurve (Straube 2006)

Sorpsjonskurver kan bestemmes eksperimentelt, enten ved bruk av gravimetrisk, eller hygrometrisk metode (Marinos-Kouris og Maroulis 2006).

### Gravimetrisk metode

Målinger foregår mens temperaturen og vannaktiviteten blir holdt konstant, helt til materialprøven når en konstant likevektsfuktighet. Det er forskjellige måter å gjøre dette på, med eller uten omrøring i lufta og ved kontinuerlig eller diskontinuerlig veiing av prøven.

### Hygrometrisk metode

I den hygrometriske metoden gjør man målinger mens fuktinnholdet i materialprøven blir holdt konstant til den omgivende lufta når en konstant likevektsverdi. Luft-vannaktiviteten blir målt med et hygrometer eller manometer.

#### 2.8.2 Hystereseeffekten

Et materiale vil ikke følge den samme fukt/RF-kurven ved sorpsjon som ved desorpsjon. Det vil si at den vil ha et ulikt likevektsfuktinnhold ved en gitt RF ved tørking og ved den samme RF ved oppfukting. Ved uttørking vil fuktinnholdet være



høyere ved samme RF enn ved oppfukning. Denne effekten kalles hystereseseffekt. Hystereseparalleller i andre materialer er for eksempel det at jern holder på noe av magnetismen, eller formforandring i elastisk materiale som har blitt strukket utover elastisitetens grense (Fremmedordboken 2013). For beregning av fuktvariasjon ser man ofte bort ifra hystereseseffekten og bruker middelkurven for absorpsjon og desorpsjon som grunnlag.

### 2.8.3 Fuktbufring

#### Fuktighetsbufferen

Fuktighetsbufferen til et rom er evnen til materialene i rommet til å moderere (bufre) variasjonene i den relative fuktigheten i rommet (Nordisk InnovasjonsCenter 2005). Materialet tar til seg fuktighet når den relative fuktigheten er høy, og avgir fuktighet når konsentrasjonen er lav. Dette jevner ut de største fuktighetsvariasjonene i lufta.

#### Fukteffusivitet

Fukteffusivitet er et materiales evne til å ta opp eller avgi fuktighet og er beskrevet av formelen:

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi}}{p_s}}, \quad (24)$$

hvor  $\delta_p$  [kg/(m\*s\*Pa)] er damppermeabiliteten,  $\rho_0$  [kg/m<sup>3</sup>] er materialets tetthet i tørr tilstand,  $u$  [kg/kg] er vanninnholdet,  $\varphi$  [-] er relativ fuktighet og  $p_s$  [Pa] er vanddampmetningsstrykket. Fukteffusiviteten gjør det teoretisk mulig å uttrykke raten til fuktighet absorbert av et materiale når materialet blir utsatt for en plutselig økning i overflatefuktighet.

#### Ideell fuktighetsbufferverdi

$$MBV_{ideal} \approx \frac{G(t)}{\Delta RH} = 0,00568 * p_s * b_m * \sqrt{t_p}, \quad (25)$$

hvor  $G(t)$  er akkumulert fuktopptak [kg/m<sup>2</sup>] over en flate. Fuktopptaket i løpet av 8

timer tilsvarer fuktavgivelse i løpet av 16 timer. Den ideelle fuktighetsbufferverdien er en dynamisk størrelse. Den ideelle fuktighetsbufferkapasiteten er basert på en forutsetning om at de aktuelle materialene har en tykkelse som er større enn penetreringsdybden til materialet.

### **Praktisk fuktighetsbufferverdi**

Det er også mulig å bestemme fuktighetsbufferverdien eksperimentelt. Denne praktiske verdien indikerer mengden vann transportert inn eller ut av et materiale per åpent overflateareal per tid, når det blir utsatt for variasjoner i RH i omkringliggende luft. Enheten for denne verdien er  $[\text{kg}/(\text{m}^2\text{RH}\%)]$ . Den praktiske fuktighetsbufferverdien fastslås ved at en materialprøve går igjennom sykluser med variasjon i RH mellom høye og lave verdier i henholdsvis 8 og 16 timer.

### **Penetreringsdybde**

Penetreringsdybden til et materiale er dybden hvor amplituden til fuktinnholdsvariasjonene bare er 1% av variasjonene til den relative fuktigheten på overflaten og er gitt ved;

$$d_{p,1\%} = 4,61 \sqrt{\frac{D_w t_p}{\pi}}, \quad (26)$$

hvor  $D_w$  er fuktdiffusiviteten til materialet.

## **2.9 Simulering**

Simulering har gjort det mulig å til en viss grad forutsi bygningsfysiske reaksjoner under gitte betingelser. Ved hjelp av simulering kan man anslå duggpunkt inni konstruksjoner, for å se om det er fare for kondens inni en vegg eller på en flate. Man kan se hvor stort varme-/kuldetilskudd og ventilasjon som kreves for å holde et klima stabilt inni et hus, og man kan se hvordan «indre laster» påvirker klimaet inni bygningen. I denne oppgaven er hensikten med simuleringen å finne ut om simuleringsprogramvaren WUFI Plus egner seg til å beregne, og dermed predikere, energibehovet ved uttørring av et testhus. Fordelen med simulering er at det er ressurs-/kostnadsbesparende, man trenger ikke å utføre kompliserte og teknisk

krevenne undersøkelser i klimakammer etc. Dessuten kommer resultatene raskt i forhold til i virkeligheten, en simuleringsperiode kan være på flere år, og simuleringstiden behøver ikke være noe mer enn et par timer. Det er også noen ulemper ved å bruke simulering som arbeidsmetode. Selv om man prøver å komme så nær virkeligheten som mulig, vil det være vanskelig å kopiere virkeligheten helt nøyaktig. Det kan for eksempel være vanskelig å sette de rette grensebetingelsene, som klima, og finne de rette materialene i databasen. Hvis man ikke finner de rette materialene, så må man finne ut hva de riktige parametere for det spesifikke materialet er, og det kan by på utfordringer.

### *2.9.1 WUFI Plus*

I denne oppgaven er det programvaren WUFI Plus som blir brukt. WUFI (Wärme Und Feuchte Instationär) er utviklet av IBP (Fraunhofer IBP 2013) og har blitt validert vha. data fra utendørstester og laboratorietester. Versjonen benyttet i tilknytning til denne oppgaven er WUFI Plus fra 2012. Programvaren gir mulighet til å beregne den transiente (tidsavhengige) hygrotermiske opptreden til bygningskomponenter i flere lag utsatt for naturlige klimapåkjenninger. Her er det mulig å lage en 3D-modell av bygningen/rommet/sonen man vil simulere. Man kan velge mellom to ulike moduser i programmet som brukes til ulike formål, «Design» og «Calculation».

#### **Design**

Ved bruk av Design-metoden kan man fastsette et ønskelig inneklimate og en ytre påkjønning. Man kan så la simuleringsprogrammet beregne seg fram til hva som er nødvendig varme-/kuldetilskudd og nødvendig ventilasjon for å opprettholde det ønskede inneklimate.

#### **Calculation**

Ved bruk av Calculation-metoden kan man finne ut hvordan et innemiljø reagerer på fastsatte parametere. Man kan for eksempel legge til varme- og fuktbelastninger, og se hvordan inneklimate blir med ulike type belastning. I denne modusen kan man også finne ut hvor mye energi som blir brukt på oppvarming og hvordan fuktbalansen i sonen eller elementene er.

## 2.9.2 Nødvendige Parametere

### Materialparametere

- Tetthet [kg/m<sup>3</sup>]
- Porøsitet [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- Varmelagringskapasitet [J/kgK]
- Tørr varmekonduktivitet [W/mK]
- Materialmotstandsfaktoren [μ]

(Fraunhofer IBP - WUFI Wiki 2013)

### Meteorologiske parametere

WUFI kan bruke målte klimadata som betingelser, på denne måten kan man komme svært nært opptil de virkelige forhold et element eller en sone utsettes for. I denne oppgaven har det blitt benyttet:

- Lufttemperatur [°C]
- Jordtemperatur 10cm ned i bakken [°C]
- Relativ fuktighet i luft [%]
- Diffus og global solinnstråling [W/m<sup>2</sup>]
- Nedbør [L/m<sup>2</sup>t]
- Vindretning [°] og vindstyrke [m/s]
- Lufttrykk [hPa]

## 2.10 Den meteorologiske stasjonen i Ås

Testhusene ligger på forskningsfeltet ved UMBs meteorologiske stasjon i Ås Kommune. Informasjonen om den meteorologiske stasjonen i Ås er innhentet fra værstasjonens hjemmeside (Fagklim 2009).

### Beliggenhet og omgivelser

Feltstasjon for agroklimatiske studier ligger på Sørås, i Ås i Akershus, ca. 800 m sørøst for Institutt for matematiske realfag og teknologi på UMB. Koordinater (for målehytte): N 59° 39' 37", Ø 10 ° 46' 54", 93.3 MOH. Feltstasjonen disponerer et areal på 12 da og ligger i sentrum av et åkerlandskap på omkring 500 da som skråner lett (1%) mot sørvest. Åkerlandskapet er omgitt av skog og villabebyggelse med en minsteavstand fra feltstasjonen på 200m. Feltstasjonen er inngjerdet.

### *2.10.1 Lufttemperatur*

Lufttemperaturen måles i en standard meteorologisk instrumenthytte i 2 meters høyde. Den automatiske målingen foregår ved hjelp av platina motstandstermometer, såkalt PT100-element. For kontroll av datakvalitet avleses også lufttemperaturen manuelt med et væsketermometer kl. 08 på hverdager og kontinuerlig med bimetalltermometer tilkoblet termograf. Maksimumstemperatur beregnes som den høyeste, og minimumstemperatur beregnes som den laveste, 10-minuttersverdien for lufttemperatur som er registrert mellom klokken 00.00 og påfølgende midnatt.

### *2.10.2 Jordtemperaturer*

Jordtemperaturen måles i forskjellige dyp, 2, 5, 10, 20, 50 og 100 cm under bakken, ved hjelp av platina motstandstermometer, såkalte PT100-elementer.

I simuleringsprogramvaren WUFI benyttes temperaturer 10 cm under bakken for jordklimafilen.

### *2.10.3 Vindhastighet og vindretning*

Vindhastighet er absoluttverdien av vindens hastighet i horisontalplanet i 10 m høyde. Instrumentet er et ultralydanemometer som måler lufthastigheten i tre dimensjoner og omgjør til horisontal vindhastighet og vindretning.

### *2.10.4 Nedbør og luftfuktighet*

#### **Nedbør**

Nedbør, mengden av regn og snø som faller på bakken, måles i 2 meters høyde som vannsøyle i millimeter. Nedbørsmåleren er utviklet og bygget ved NLH, basert på veiing av nedbøren med veicelle. For kontroll av datakvalitet måles også nedbøren manuelt kl. 08 på hverdager med standard meteorologisk nedbørsmåler og i tillegg foretas det automatiske dubleringsmålinger.

#### **Luftfuktighet**

Relativ luftfuktighet er andelen vanddamp som luften inneholder, i forhold til det maksimale vanddampinnholdet luften kan ha ved den aktuelle lufttemperaturen. Instrumentet er et *hårhygrometer* som måler relativ luftfuktighet direkte. For kontroll av datakvalitet måles også den relative luftfuktigheten kontinuerlig med en hygrogaf.

### *2.10.5 Stråling*

Global stråling er summen av stråling, direkte og diffus fra sola, i bølgelengdeområdet for ultrafiolett lys, synlig lys og infrarødt lys (varmestråling): 295 - 2800 nm. Instrumentet måler strålingen som faller inn på en horisontal flate. Et pyranometer som er skjermet for direkte solstråling måler den diffuse strålingen i bølgelengdeområdet 295 - 2800 nm.

## 3 Metode

### 3.1 Feltforsøk

#### 3.1.1 Testhus

##### Oppbygging og materialer

Testhusene er bygget med krysslimte massivtreelementer av gran. Elementene består av tre lameller. Testhusene er to moduler som tidligere sto plassert oppå hverandre. Tabell 4 viser testhusets innvendige og utvendige mål. I denne oppgaven er det kun én av modulene som blir benyttet. Testhuset er plassert oppå trykksterk mineralull. Veggene i testhuset er utette og uisolerte. Dette gjør at de ikke kan sammenliknes med en isolert vegg som oppfyller TEK10-krav med tanke på isoleringsevne og lufttetthet. Utetthetene i testhuset gjør at man kan anta at infiltrasjonen er betydelig. I tillegg til dette står testhuset utsatt til midt ute på et jorde med til dels mye vind. Infiltrasjon er dermed i denne oppgaven en stor feilkilde, siden man ikke kan vite hvor mye fuktighet som tørker ut gjennom infiltrasjon. **Veggene består av:** Massivtreelementer 100 mm av gran. **Gulvet (tilfarergulv) består av:** 120 mm massivtreelement, 25 mm sylodonklosser, 98 mm tilfarer (hulrom fylt med Glava 36), 22 mm gulvsponplate, 20 mm trinnlydplate (Rockwool, «trinnlydplate med duk»), 22 mm gulvsponplate, 14mm eikeparkett. **Taket består av:** 120 mm massivtreelement, 250 mm Rockwool, bølgeblikk til tak (skrått). Rundt kantene er isolasjonen dekket av et fukt- og vindstoppende materiale, Tyvek, (se bilde 1).



Bilde 1: Testhus A på den meteorologiske stasjonen på Ås

Tabell 4: Vitale mål til testhus

Innvendige mål		Utvendige mål		Elementer	
Lengde [m]	7	Lengde [m]	7,2	Veggtykkelse [mm]	100
Bredde [m]	3,6	Bredde [m]	3,8	Gulvtykkelse [mm]	120
Høyde [m]	2,18	Høyde [m]	-	Tak [mm]	120
Areal [m <sup>2</sup> ]	25,2				

### 3.1.2 Instrumentering av testhus

Figur 10 er en skjematisk framstilling av instrumenteringen i testhuset. Den stiplede linjen representerer kabinettet som henger inne i testhuset. Tabell 5 forklarer nummereringen i Figur 10.

Tabell 5: Tabellen er en forklaring på det forsøksoppsettet vist i figur 10.

Nr. fig. 10	Hva er det?	Funksjon
1	Fieldpoint FP	Kontrollenhet
2	Solid State Relay (av/på)	Regulerer varmeovn
3	Power Controller (0%-100%)	Regulerer ventilasjonen
4	Energimåler [Wh]	
5	Datamaskin med LabView	Kontrollerer systemet og logger data
6	Strømuttak til belysning og diverse	
7	Vifte/ventilasjon	Ventilerer ut innelufta
8	Varmeovn 1000W	Varmer opp testhuset
9	Temperatursensorer for overflatene nord, sør, himling, gulv og i tillegg operativ temperatur.	Måler overflatetemperaturer og operativ temperatur
10	Uttakssensor (DT043) som måler relativ fuktighet [%] og temperatur [°C]	
11	Energiforbruksdata (fra energimåler(4) til FP (1))	



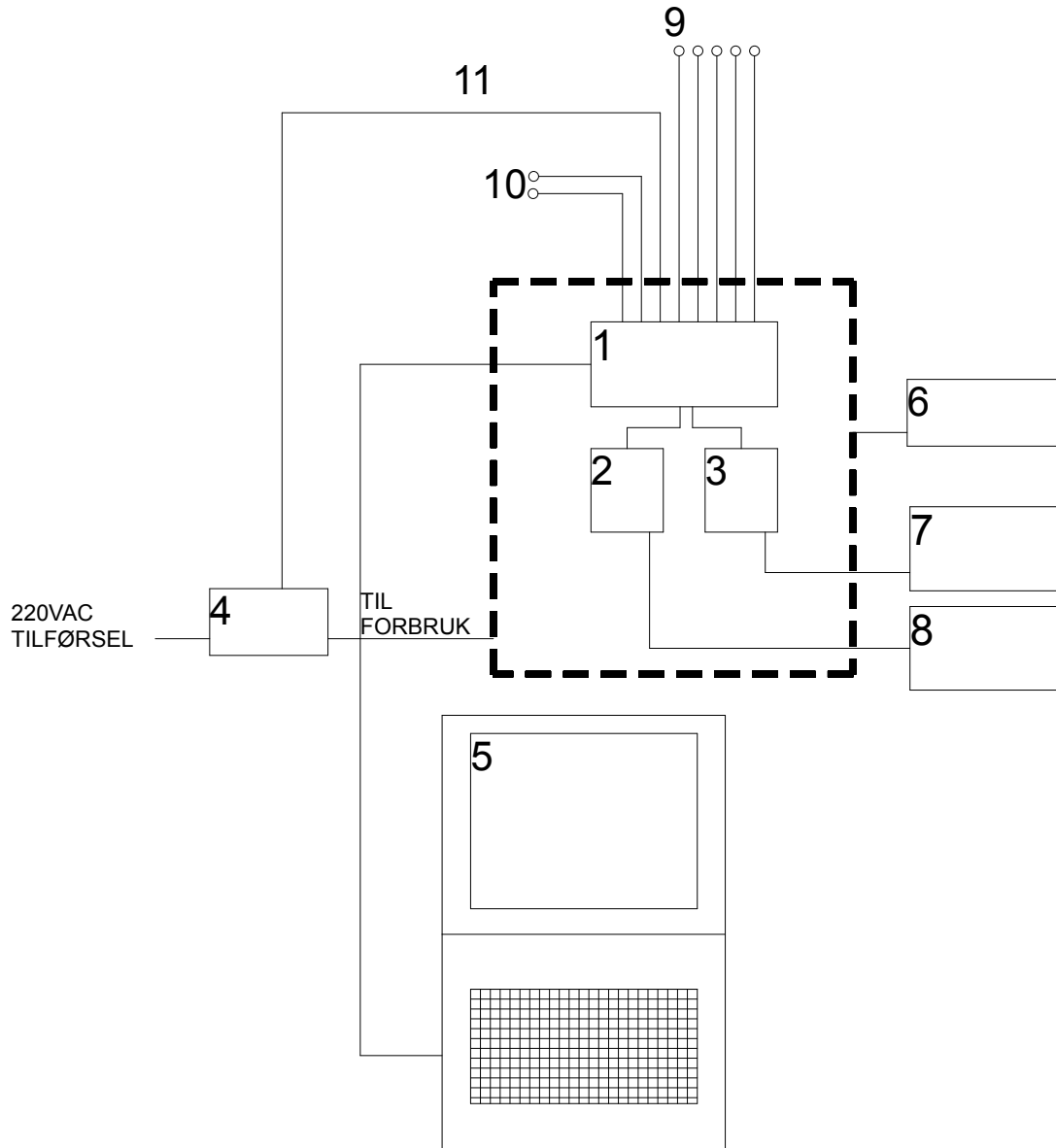
Tabell 6: Verdier som hentes ut fra målinger i testhuset. Tallene har ingen kobling med tallene i Figur 10.

	Måling	Enhet
1	RF - inne	[%]
2	Temperatur - inne	[°C]
3	Luft-«flow»	[m <sup>3</sup> /t]
4	Operativ temperatur	[°C]
5	Overflatetemperatur tak	[°C]
6	Overflatetemperatur nord	[°C]
7	Overflatetemperatur sør	[°C]
8	Overflatetemperatur gulv	[°C]
9	Energiforbruk	[kW]

Det er dermed 9 datapunkter som blir målt, og som vil danne grunnlag for oppgaven fra testhusets side (sett bort ifra trefuktmålingene). Dette er sammenfattet i Tabell 6. En oversikt over regulering av varme og ventilasjon i forsøksperioden finnes i Tabell 18 i vedlegg 8.

### Temperatursensorer

For å temperaturovervåking på trevirket og i lufta er det installert temperatursensorer midt på alle fire flater i rommet (nord, sør, himling og gulv), i tillegg til en sensor som henger ned fra taket midt i rommet langs det samme tverrsnittet. Disse sensorene er plassert langs et tverrsnitt som befinner seg 1,75m fra den vestvendte kortveggen. Det er til sammen fem målere. Temperatursensorene er av typen Microchip (MCP9700/01) – Low-Power Voltage Output Temperature Sensor, som er en analog temperatursensor. Den måler temperaturer fra -40°C til 125°C og har en nøyaktighet på minimum  $\pm 4^{\circ}\text{C}$  i intervallet 0°C til 70°C. **Det er blitt gjort en systemkalibrering, og nøyaktigheten er betydelig bedre,  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .** Sensorene virker på den måten at de omdanner temperaturen til et analogt signal (volt). Hver av overflatetemperatursensorene er formet som en halv sylinder hvis rette flate er i direkte kontakt med underlaget. Temperaturmålerne ble kalibrert i et vannbad opp mot en meget nøyaktig temperaturmåler som heter FLUKE 1523.



Figur 10: Skjema over energi og informasjonsflyt i testhus A

### RF-målere

I forsøket brukes en måler av typen *Fourier Systems Humidity and Temperature Probe (DT043)*. Den logger både RF og temperatur ved avtrekket (10). Bilde 2 viser temperatur-/RF-måleren under avtrekket i testhuset. Denne sensoren er en meget nøyaktig fukt- og temperatursensor. Den måler en relativ fuktighet fra 0 til 100% med en nøyaktighet på minimum  $\pm 1,5\%$  i hele intervallet. Den måler temperaturer fra  $-50^{\circ}\text{C}$  til  $100^{\circ}\text{C}$ . Ved  $23^{\circ}\text{C}$  har den en nøyaktighet på  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . For å sikre riktige måleverdier kjøres det parallellmåling i en periode med en annen, mer nøyaktig sensor ved navn *HOBO U12 Temperature/Relative Humidity Logger*. Denne sensoren

har en nøyaktighet i temperaturmåling på  $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$  ved  $0^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$  og i fuktighetsmåling på  $\pm 2,5\%$  ved  $10\% < \text{RH} < 90\%$ .



Bilde 2: RF-/temperatursensor under avtrekk i testhus A

### Energilogger

Energiloggeren logger hvor mye energi som brukes i testhuset. Det er slik fordi all energien som brukes inni huset før eller siden går over til å bli varmeenergi. Vifteenergien logges ikke, fordi vifta, og dermed varmetilskuddet fra vifta er plassert «utenfor» rommet og suger luft ut, slik at det ikke tilkommer noe energi/varmetilskudd fra vifteenheten.

### Trefuktmålere

Grunnet begrensninger i antall porter for inndata måles og logges trefukten i trevirket uavhengig av tidligere nevnt oppsett. Trefukten måles med seks punkter langs et vertikalt tverrsnitt av testhuset. Tverrsnittet er tatt 1,75 m fra vestveggen og det er plassert tre loggere på sørveggen og tre loggere på nordveggen langs dette tverrsnittet. Tabell 7 viser plasseringen til nodene på nord- og sørveggen.

Tabell 7: Plassering av fuktmålere i testhus

Node nr.	Plassering	
T1	5 cm fra parkett	Nederst
T2	105 cm fra parkett	Midterst
T3	5 cm fra himling	Øverst

Loggingsintervallet for trefuktmålerne er én time. Målerne er av typen *Materialfox Mini*, og blir produsert av *Skanntronik Murgrauer GmbH*. Hvert punkt på fuktighetsmålerne består av to skruer med en sensor/node som er skrudd inn i veggen 30 mm fra hverandre. Skruene er plassert horisontalt i forhold til hverandre og dermed på tvers av fiberretningen. En strøm sendes gjennom sensorene (fra + til -), og motstanden (i trevirket og nodene) strømmen må passere blir logget. Vanninnholdet øker ledeevnen til trevirket, så jo tørrere trevirket er, jo større motstand må strømmen passere. Loggerne har redusert nøyaktighet ved trefukt under 11 vektprosent.

### Ventilasjon

Vifta som er installert i testhuset styres av en trykkmåler. Denne måler trykkforskjellen over et kalibrert blende som styrer luftmengdene som kommer ut. Trykkforskjellsmåleren er av typen Sensiron.

### Varmekilde



Bilde 3: Overblikksbilde av testhus A

En panelovn (se bilde 3) på 1kW er koblet opp mot energilogger og termostat. Andre varmekilder er det andre elektriske utstyret i testhuset, som datamaskin og belysning, og menneskelig aktivitet. Varmeovnen er termostatstyrt med en maksgrense på 30°C i mesteparten av uttørkingsperioden (med unntak av oppstarten, med varierende temperaturregulering).

## 3.2 Simulering

I forbindelse med oppgaven vil det gjøres forskjellige simuleringer:

- (I) Den første simuleringen brukes for å finne initialtemperaturen i elementene. Brukes i simulering (II) og (III).
- (II) Den neste simuleringens formål er å få fram data for å gjøre uttørkingen av testhuset på best mulig måte. Her ønsker man å finne ut ca. hvor mye energi som kreves for å tørke ut huset og hvor lang uttørkingsperioden vil være, dette for å tilpasse forsøket best mulig.
- (III) Denne simuleringen skal være så lik forsøket som mulig, og gjøres i etterkant av uthenting av data fra testhuset. Her skal brukes værd data fra den meteorologiske stasjonen i testperioden for å komme så nær virkeligheten som mulig.

I vedlegg 7 kan man se screenshots fra brukergrensesnittet i WUFI Plus.

### 3.2.1 Grensebetingelser

Tabell 8 viser hvilke materialparametere som blir tatt i bruk i simuleringene.

Tabell 8: Tabellen viser egenskapene til de viktigste materialene (tre og isolasjon) i simuleringen

Material	Porøsitet	Densitet	Spesifik k varme- lagrings- evne	varme- kondukti- vit	vanndamp- diffusjons- motsands- faktor
		$\rho$	c	$\lambda$	
Enhet	[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]
<b>scandinavian trans. Spruce II</b>	0,75	390	1600	0,13	108
<b>Mineralull</b>	0,95	60	850	0,0399	1,3

Tabell 9: U-verdier i simulering vs. TEK10-krav (TEK10 - Norges lover 2010)

	U-verdi (sim.) [W/m <sup>2</sup> K]	TEK10- krav
<b>vegg</b>	1,06	0,18
<b>tak</b>	0,13	0,13
<b>gulv</b>	0,11	0,15

Tabell 10: Tabellen viser sammensetning av komponentene i simuleringene.

Materiale		Tykkelse [m]	$\lambda$ [W/mK]	Samlet U- verdi [W/m <sup>2</sup> K]
<b>Sammensetning tak</b>				
1	Metallplate	0,002	600	0,13
2	Luftlag	0,5	0,94	
3	Mineralull	0,25	0,0399	
4	Fuktsperre	0,001	2,3	
5	Gran	0,12	0,13	
<b>Sammensetning gulv</b>				
1	Mineralull	0,2	0,04	0,11
2	Dampsporre	0,001	2,3	
3	Luftlag	0,048	0,28	
4	Mineralull	0,098	0,04	
5	Sponplate	0,022	0,11	
6	Mineralull	0,02	0,04	
7	Sponplate	0,022	0,11	
8	Eik - parkett	0,014	0,3	
<b>Sammensetning vegger</b>				
1	Gran	0,05	0,13	1,06
2	Gran	0,05	0,13	

### 3.2.2 (I) Simulering 1. oktober til 31. desember

For å finne initialtemperaturen i massivtreelementene kjøres det en simulering med fra 1. oktober til 31. desember med værdata fra 2012 for å få en mest mulig reell situasjon i veggene. Dette er nødvendig for å finne ut hvilken temperatur man skal bruke i de neste simuleringene, noe som er relevant informasjon for hvor mye energi man bruker på å varme opp og tørke ut fuktigheten, og om vannet går fra et energinivå tilsvarende fryst tilstand (temperatur under null grader) til væske og så til gass, eller bare fra væske til gass. Blir det inkludert en faseovergang fra energinivå tilsvarende fast tilstand til flytende væske, antas det et betydelig høyere energiforbruk. Initialtemperatur i materialene 1. oktober settes til 5°C.

### 3.2.3 (II) Simulering fra 1. januar til 30. april med «Osloklima»

Den neste simuleringen gjøres i forkant av prosjektoppstart. Formålet med denne simuleringen er å anslå hvor mye energi som brukes til å tørke ut husene. Med initialtemperatur og målt fuktighet i veggene. Denne informasjonen brukes til å sette

inn rimelige forhold i den faktiske uttørkingsprosessen. Kriterier som ventilasjonsmengde og oppvarmingsbehov bestemmes basert resultater fra den første simuleringen. I denne simuleringen brukes det klimadata for Oslo fra klimadatabasen i WUFI, fordi temperaturen i vårmånedene i Ås 2012 var betraktelig høyere enn i et normalår. Oppvarming med 1000 W og ventilasjon på 0,5 luftutskiftninger starter 1. mars da dette er antatt klardato for ferdig instrumentert hus. Simuleringen avsluttes 30. april.

### 3.2.4 (III) Simulering fra 1. januar til 30. april med 2013-klima

Formålet med denne simuleringen er å konstruere et simuleringsforløp som er så tett opptil forholdene i testhuset. Værdata kommer fra Ås-klimaet i perioden 01.01.13 – 30.04.13. Tabell 18 i vedlegg 8 beskriver varme og ventilasjon gjennom simuleringen.

## 3.3 Databehandling – Beregninger

### 3.3.1 Beregning av fuktflyt/fuktbalanse

For å finne ut hvor mye fukt som forlater testhuset beregner man differansen på fukt som kommer inn i huset og fukt som går ut av huset [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. Disse verdiene finner man ved å benytte seg av formel (14) i kap. 2.5.3 Luftfuktighet.

Rent praktisk blir det slik:

$$\Delta_{abs.fukt} = \frac{a * e^{\left(\frac{b * T_{inne}}{T+c}\right) * d * RF_{inne}}}{273,15 + T_{inne}} - \frac{a * e^{\left(\frac{b * T_{ute}}{T+c}\right) * d * RF_{ute}}}{273,15 + T_{ute}} = \text{tørket fra innervegg}$$

[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

(For parametere se formel 14)

(27)

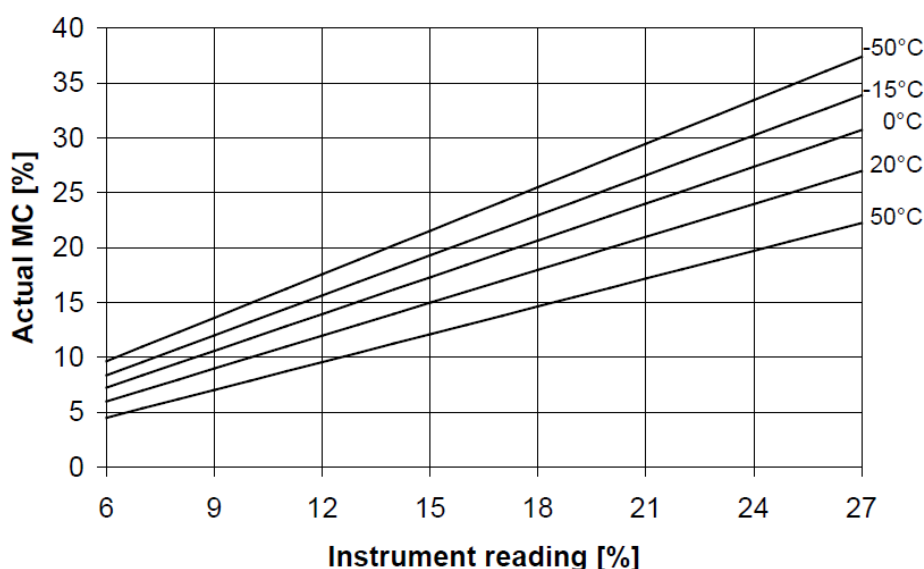
Denne beregningen gjennomføres for samtlige timesintervaller. Alle svarene summeres slik at:

$$\sum \Delta_{abs.fukt} = \text{totalt ekstrahert fuktighet}$$

(28)

### 3.3.2 Temperaturkorrigering av trefuktmålinger

Det er flere faktorer som påvirker trefuktmålinger gjort med motstandsmåler. Den fiktigste av disse faktorene er temperaturen til trevirket. Ved en høyere materialtemperatur vil instrumentet måle en høyere trefukt enn ved en lavere temperatur. Dette illustreres av Figur 11.



Figur 11: Grafen beskriver sammenhengen mellom målt vanninnhold i trevirke og materialtemperaturen. (Fløtaker og Tronstad 2000)

For å korrigere fuktmålingene for temperaturen har denne formelen fra Fløtaker og Tronstad (2000) blitt brukt:

$$u_{corr} = - \frac{u + 0,567 - 0,0260 * (t + 2,8) + 0,000051 * (t + 2,8)^2}{0,881 * 1,0056^{(t+2,8)}} \quad (29)$$

### 3.3.3 Beregning av energibalanse

Et av målene med forsøkene er å finne ut hvor mye energi som kreves for å tørke ut testhuset. Energiforbruket beregnes ut fra hvor mye fukt som har blitt ekstrahert fra testhuset og fuktnivået i veggene. Formel 4 og 5 beskriver denne sammenhengen. For å finne  $H_v$  (fordampningsvarmen i formel 5) må man multiplisere antall liter uttørket ( $\sum \Delta_{abs.fukt}$ ) med energibehovet for å tørke ut én liter. For å finne ut hvor mye energi som kreves for å løsrive den adheerte fukten bruker man likning 4 ( $\Delta H_s(u)$ ). Når man har funnet den totale fordampningsenergien ( $H_m$ ), kan man finne ut hvor mye energi som *ikke* har gått med til å fordampe ut fuktighet, men som har blitt tapt eller har



bidratt til å heve temperaturen i lufta og konstruksjonen ellers. Det ble gjort slik:

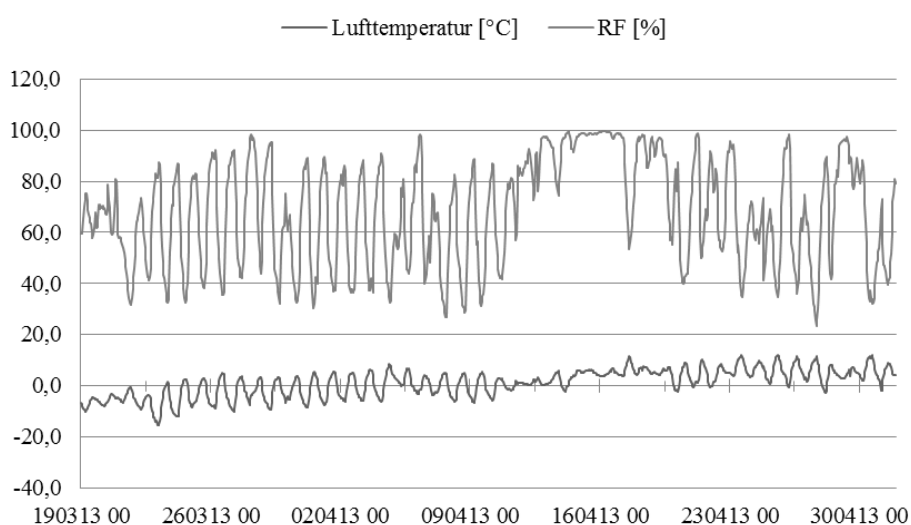
$$H_{tilført} - H_m = H_{tap}$$

(30)

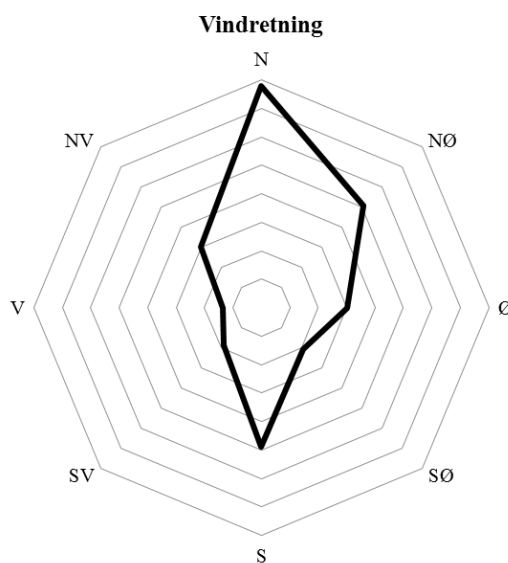
## 4 Resultater

### 4.1 Været i løpet av forsøket

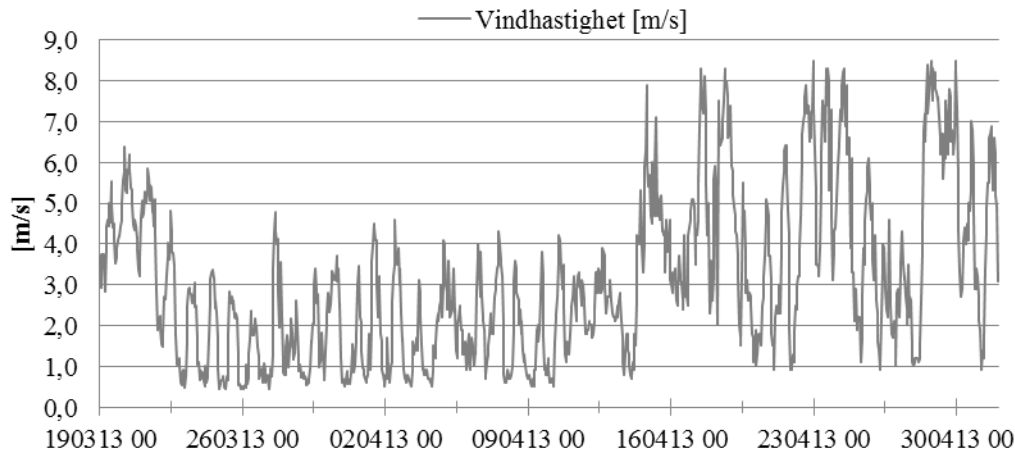
Figurene 12-15 illustrerer vær-situasjonen i forsøksperioden. Den fremherskende vindretningen er nord-sør og temperaturen har ligget mellom  $-15^{\circ}\text{C}$  og  $+15^{\circ}\text{C}$ . Den relative fuktigheten i lufta fluktuerer en del mellom natt og dag, men holder seg stort sett rundt 70%. Det har vært perioder med mer vind og mindre vind. Og man kan se at nedbøren stort sett har falt i perioder med mye vind. Dette gir slagregn, som er en viktig klimaparameter i bygningsfysikken.



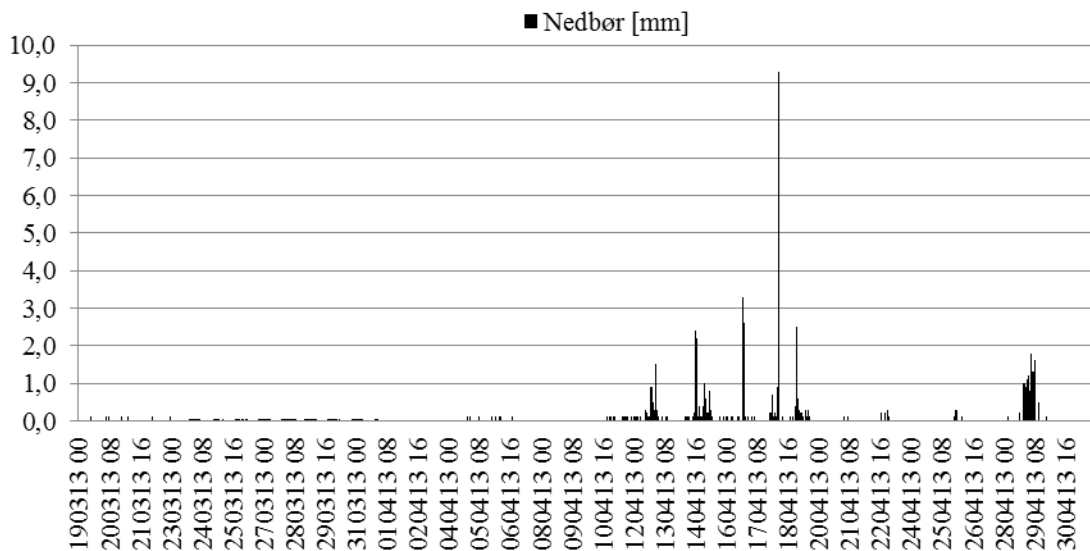
Figur 12: Figuren viser Lufttemperatur og RF gjennom forsøksperioden



Figur 13: Vindrose med fremherskende vindretninger i testperioden



Figur 14: Figuren viser vindhastigheten gjennom forsøksperioden



Figur 15: nedbør i forsøksperioden.

## 4.2 Simulering

### 4.2.1 (I) Simulering 1. oktober til 31. desember

I den første simuleringen som ble gjennomført var formålet å finne et utgangspunkt for de videre simuleringene når det gjaldt veggtemperatur. Veggtemperaturen ble funnet å være  $-2^{\circ}\text{C}$ . figuren i vedlegg 2 viser hvordan temperaturen utvikler seg fram mot 2013.

### 4.2.2 (II) Simulering fra 1. januar til 30. april med «Osloklima»

Den neste simuleringen hadde som mål å anslå hvor mye energi som ville bli brukt til å tørke ut testhuset. Denne informasjonen ble brukt til å tilpasse forsøket. Det ble funnet ut at det var nødvendig med en varmeovn på 1000W, en øvre grense på

termostaten på 30°C, og luftskifte på 0,5 utvekslinger i timen.

#### 4.2.3 (III) Simulering fra 1. januar til 30. april med 2013-klima

Dette er hovedsimuleringen, og det er resultater fra denne simuleringen som blir brukt til å sammenlikne med resultatene fra testhuset

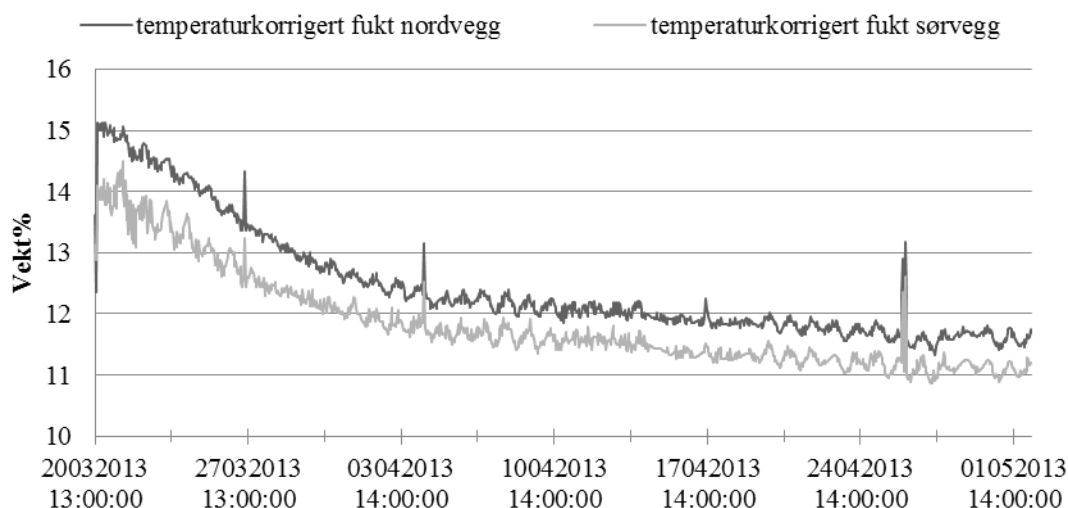
### 4.3 Trefukt

Trefukten har blitt målt gjennom forsøksperioden med skruer som måler den elektriske motstanden i trevirket, og beregner trefukten fra denne målingen. Rådata fra disse målingene finnes i vedlegg 5 og viser en økning i begynnelsen av uttørkingsperioden.

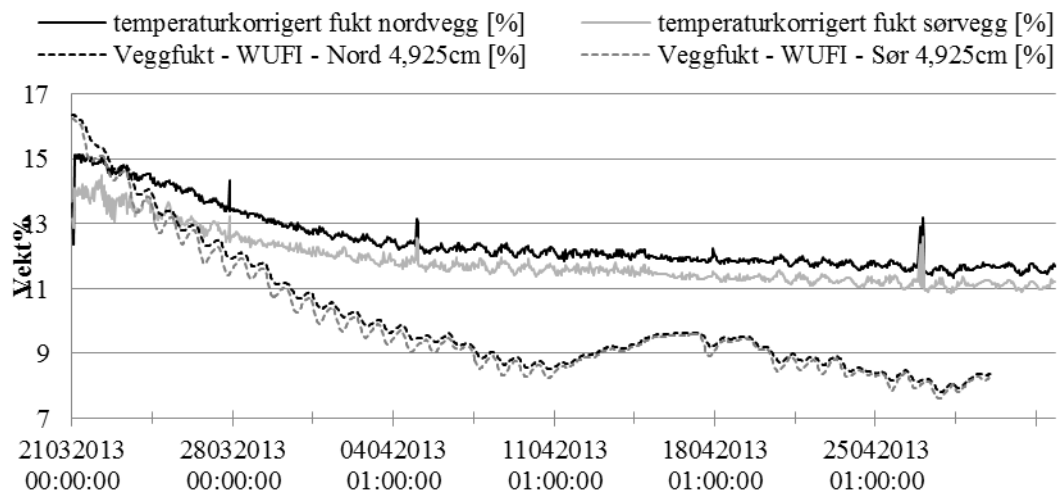
#### 4.3.1 Temperaturkorrigerte målinger

Etter temperaturkorleksjon (Figur 16) jevnet kurven seg ut og man fikk en mer naturlig fuktreduksjon. Nordveggen begynner på 15,1 vekt% og ender opp på 11,7 vekt%, en reduksjon på 3,4 vekt%. Sørveggen starter ut på 13,1 vekt% og ender opp på 11,2 vekt%, en reduksjon på 1,9 vekt%. Nordveggen har høyere og jevnere fuktverdier enn sørveggen, dette er fordi den er i skyggen og ikke opplever stor forskjell mellom natt og dag (døgnvariasjon).

Figur 17 viser resultatene for veggfukt fra WUFI-simuleringen. Man kan se at WUFI tørker ut vesentlig raskere og mer enn det som har blitt registrert i testhuset.



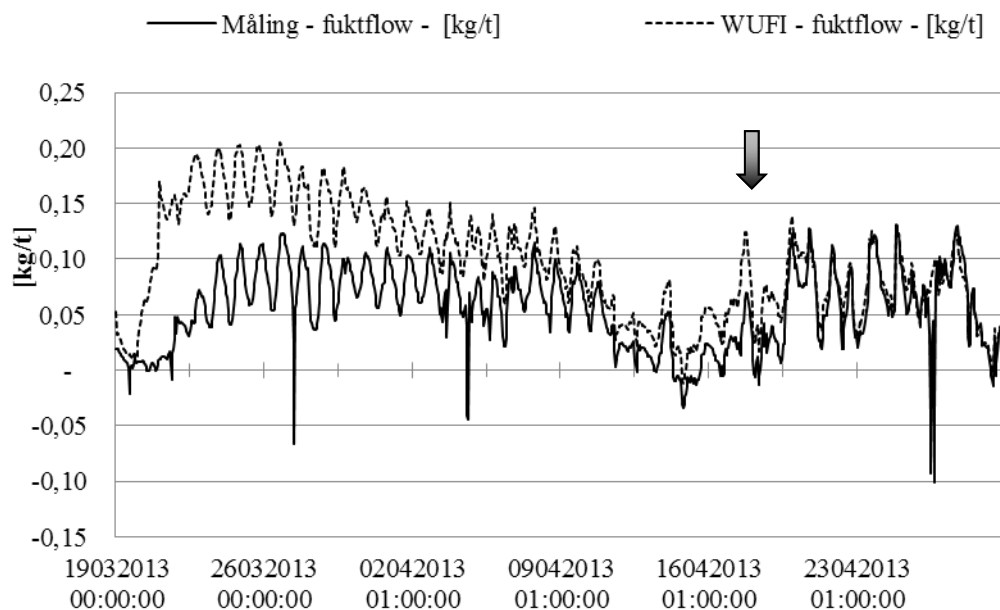
Figur 16: Temperaturkorrigerte målinger for nord- og sørveggen. 20.03.13-01.05.13



Figur 17: Sammenlikning av fuktmålinger i testhuset og resultatene fra simuleringen. Tall i vekt%.

## 4.4 Luftfukt

### 4.4.1 Fuktflyt

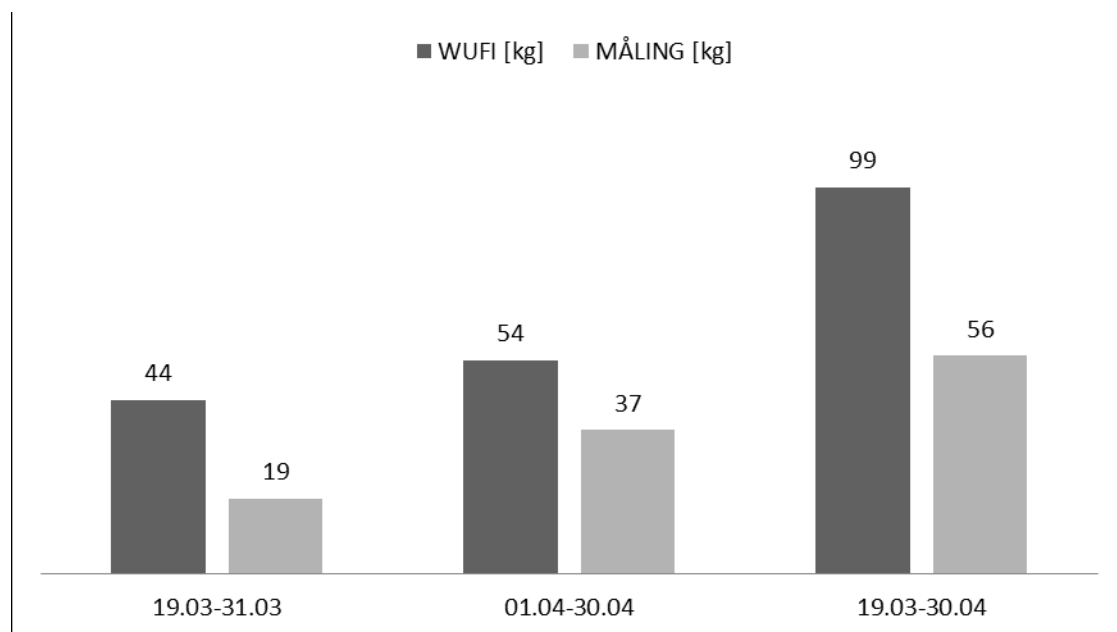


Figur 18: Sammenlikning av fuktflyt gjennom ventilasjonsanlegget i testhuset og simuleringen 19.03-30-04. Luftmengden i WUFI-kurven er sammensatt av mekanisk ventilasjon og infiltrasjon (se Figur 24), mens infiltrasjon ikke er medregnet i målingene.

Fuktflyten [kg/t] ut og inn av huset har blitt beregnet basert på målinger av RF og temperatur ute og inne (formel 27 og 28). Figur 18 viser denne fuktflyten gjennom ventilasjonssystemet for hver time av måling og simulering. Grafen for testhus er basert på differansen mellom absolutt fuktighet i utelufta og avtrekket (innelufta). Det går fram av grafen at fuktflyten ut av huset er større i simuleringen i tiden etter

oppstart, mens det etter den 9. april er tilnærmet likt. Den 18. april ble det foretatt plugging av de største utetthetene i testhuset for å redusere infiltrasjonen (svart pil i Figur 18). Etter denne datoen samsvarer resultatene fra målingen og simuleringen mye bedre.

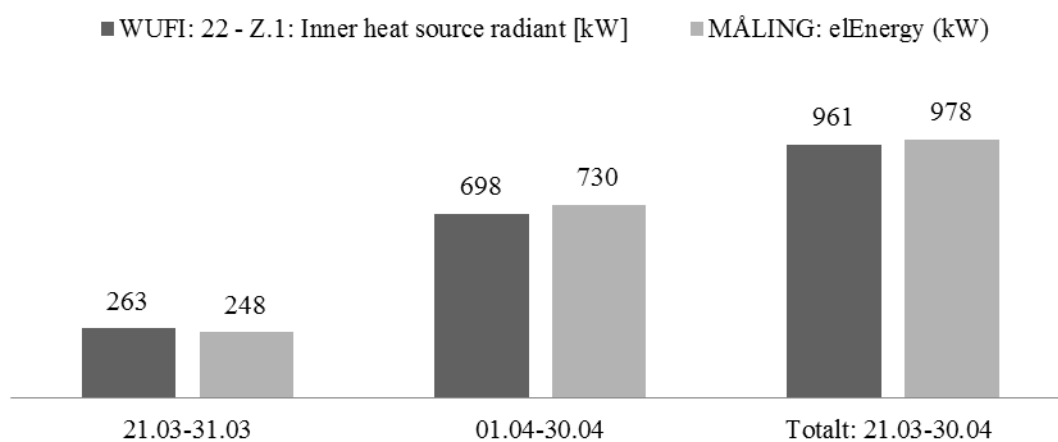
#### 4.4.2 Akkumulert avfukting



Figur 19: Ekstrahert fukt [kg] i simulering og måling 19.03-30.04.

Figur 19 viser totalt ekstrahert fukt fra både testhus og i simulering. Man kan se at det i simuleringen blir tørket ut mer fukt enn målingene viser. I simuleringen blir nesten dobbelt så mye fukt luftet ut i forhold til testhuset.

## 4.5 Energi



Figur 20: En sammenlikning av energiforbruket i testhus og simuleringshus

Figur 20 viser hvor mye energi som har gått med til både testhuset og i simuleringen i WUFI. Det går fram av grafen at det brukes omtrent like mye i hver. Totalt brukes det 978 kWh i målingen og 961 kWh i simuleringen.

#### 4.5.1 Energi- og fuktbalanse

Tabell 11 viser hvor mye energi som har vært krevet for å tørke ut den beregnede fuktigheten,  $H_m$ , for simulering og testhus. Kolonnen helt til høyre er all energien som har blitt tilført testhuset, og den midterste kolonnen er differansen mellom tilført energi og  $H_m$ , dvs. energien som har gått med til det å varme opp lufta og bygget og selvfølgelig også varmetap.

**Tabell 11: Energiforbruk til fordamping av vann i forhold til registrert tilført energi. (Totalt = all tilført energi, Energiforbruk = differanse mellom tilført energi og  $H_m$ ,  $H_m$  =fordampingsenergi).**

	$H_m$	Energi- forbruk	Totalt
<b>wufi - [kWh]</b>	72	889	961
<b>testhus - [kWh]</b>	42	937	978
<b>wufi %</b>	8 %	92 %	100 %
<b>testhus %</b>	4 %	96 %	100 %

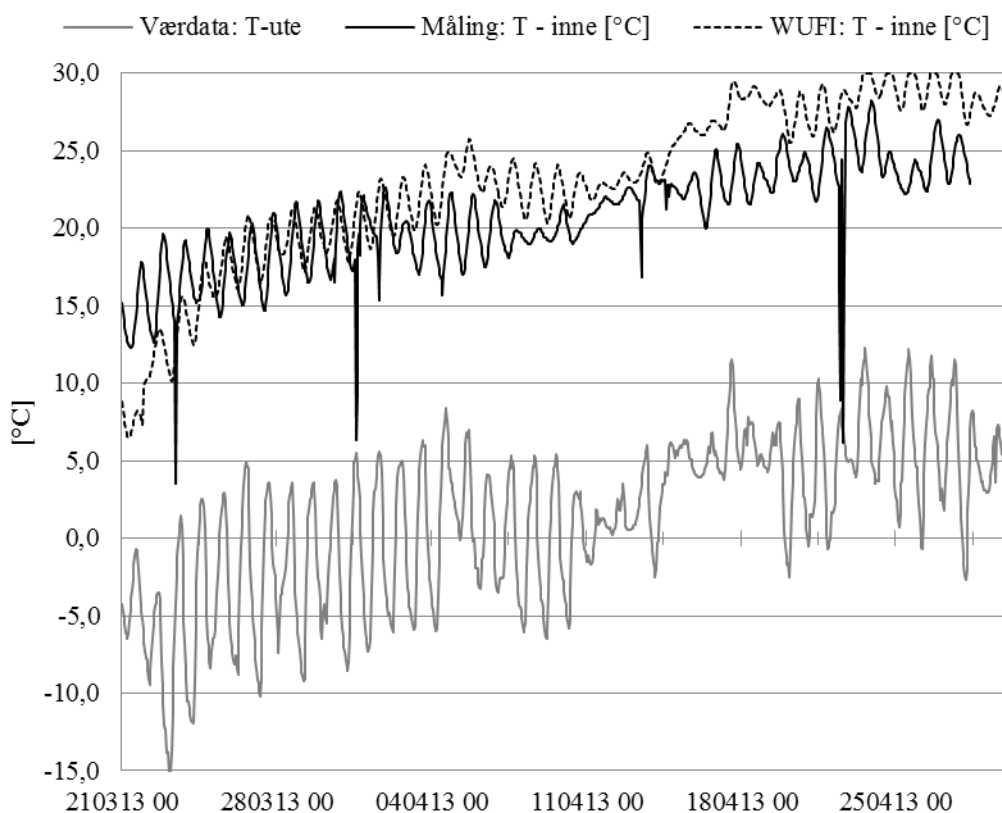
Tabell 12 viser resultatet av formelen for den totale fordampningsvarme ( $H_m = H_v + \Delta H_s$ ). I simuleringen består adsorpsjonsvarmen av 6% av den totale fordampningsvarmen, mens i testhuset er det samme tallet 8%.

**Tabell 12: Energiforbruk til fordamping av vann  $H_m$ .**

	$H_v$	$\Delta H_s$	$H_m$
<b>wufi - [kWh]</b>	68,0	4,4	72,4
<b>testhus - [kWh]</b>	38,3	3,3	41,6
<b>wufi %</b>	94 %	6 %	100 %
<b>testhus %</b>	92 %	8 %	100 %

## 4.6 Temperaturer

### 4.6.1 Sammenlikning av måledata med WUFI

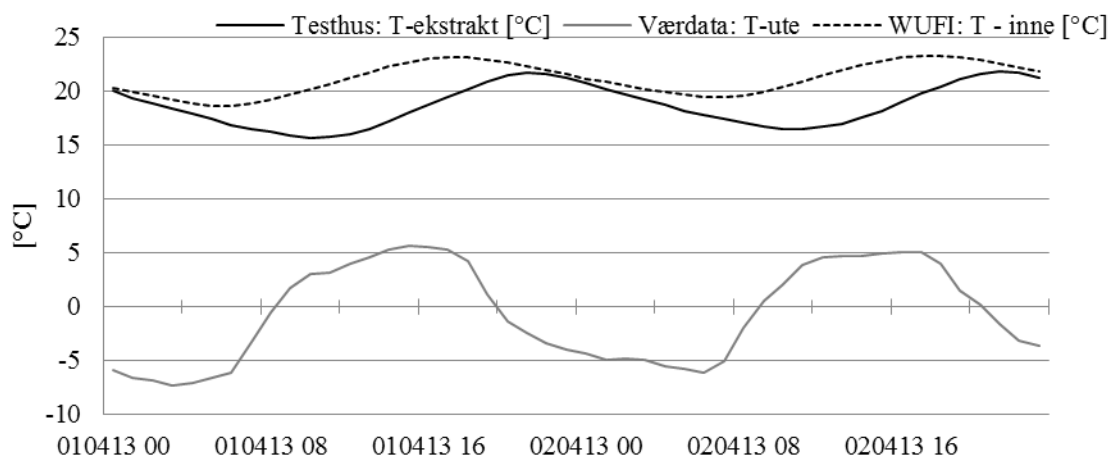


**Figur 21:** Figuren over viser hvordan temperaturene for testhuset og simuleringen varierer i takt med utetemperaturen 21.03-30.04.

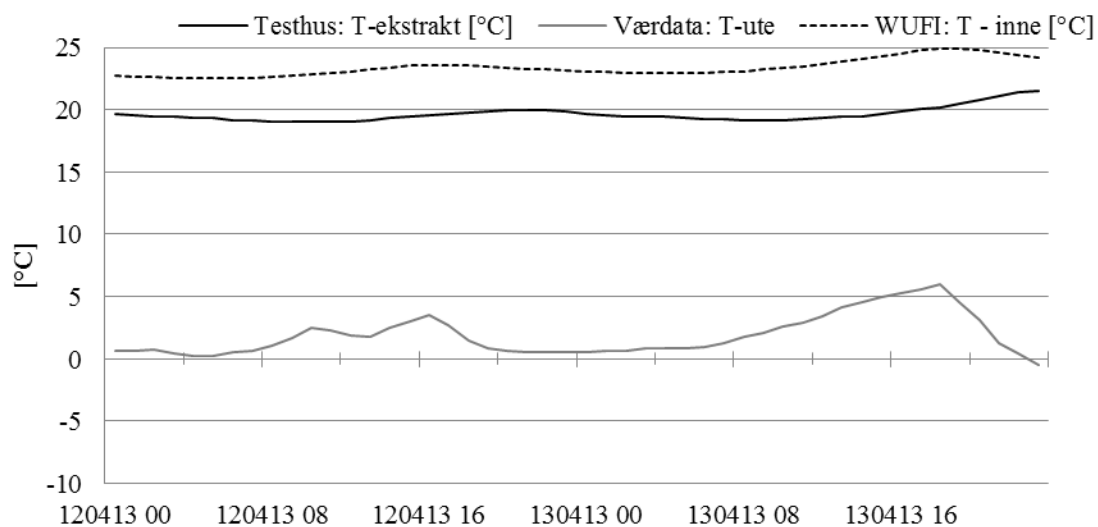
Temperaturen gjennom testperioden er illustrert i Figur 21. Det går fram av grafen at temperaturene for simulering og testhus ikke er helt like. Selv om temperaturen i WUFI har et lavere utgangspunkt (8°C) enn temperaturen i målingen (15°C), har kurven et brattere stigningstall som gjør at simuleringstemperaturen til slutt ender opp på en høyere temperatur enn den i testhuset. Uten grensen 30°C ville simuleringstemperaturen utvilsomt vært enda høyere. Man kan se at simuleringstemperaturen «stanger i taket» de siste to ukene. Testhustemperaturen derimot har en slakere stigning og når aldri maksimaltemperaturen. Generelt kan man også si om testhustemperaturen at den har en større amplitude, og varierer i større grad med temperaturendringene utendørs. Man kan se at både testhustemperaturen og simuleringstemperaturen varierer i takt med utetemperaturen, og i den overskyede perioden (jevne, med mindre forskjell på natt og dag), jevnes også temperaturene i simulering og måling ut.



#### 4.6.2 Sammenlikning av godværsdag og overskyet dag



Figur 22: Innetemperatur 01.04-02.04: Måling vs. WUFI ved klarvær.



Figur 23: Innetemperatur 12.04-13.04: Måling vs. WUFI ved skyet vær.

I Figur 22 er det trukket fram et par dager (01.04-02.04) med fint vær og lite skyer. Døgnvariasjonen mellom natt og dag er på over ti grader celsius. Av grafen går det fram at temperaturen i simuleringen ligger noe høyere enn den målte temperaturen i testhuset. I tillegg inntreffer maksimumstemperaturen til simuleringen tidligere enn maksimumstemperaturen fra testhuset. Det er en forskyvning tilstede på ca. 4 timer.

Figur 23 illustrerer temperaturen i testhuset og simuleringa over to dager med en skyet værtype. Utetemperaturen er jevn, og med en amplitude på kun 5°C. I Figur 23 er temperaturforskjellen mellom simuleringen og målingene fra testhuset tydeligere. Temperaturforskjellen holder seg rundt 2-3°C.

## 5 Diskusjon

Ved forsøkets slutt viser det seg noen klare resultater. Både i trefuktmålingene og luftfuktberegningene viser det seg at WUFI Plus tørker ut simuleringshuset raskere og i større grad enn det som var tilfelle i forsøket med testhuset. At resultatene sammenfaller slik, styrker videre konklusjoner.

### 5.1 Simulering

Det ble foretatt tre simuleringer (I, II, III). I den første (I) simuleringen fant man at veggtemperaturen i begynnelsen av januar 2013 ville være på ca.  $-2^{\circ}\text{C}$ . Dette tallet virker sannsynlig og ble brukt videre i de neste simuleringene. Den andre simuleringen brukte man til å tilpasse/dimensjonere forsøket best mulig. Man fant at det var tilstrekkelig med én varmeovn på 1000 W. Dette viste seg å holde godt i forsøket. Den tredje simuleringen (III) forsøkte man å få så nær forholdene i testhuset som mulig. Når resultatene likevel viste seg å avvike fra resultatene fra feltforsøket er det nærliggende å tro at det enten har noe med materialegenskapene i simuleringshuset, ytre faktorer eller beregningsmodellen som brukes av simuleringsprogrammet.

### 5.2 Trefukt

Resultatene fra trefuktmålingene fra testhuset og simuleringen viser at de to tilnærmingene ikke samsvarer i det hele tatt (se Figur 17). Målingene fra testhuset viser en moderat uttørking, mens resultatene fra simuleringen viser en større og raskere uttørking.

Den bratte senkingen i fuktnivået i simuleringsskurven ansees som veldig optimistisk og lite troverdig. Det er grunn til å tro at programvaren ikke er hundre prosent i stand til å beregne uttørking av tykkere/massive trelementer. Det kan være flere forskjellige årsaker til denne utviklingen, men beregningene er veldig komplekse og det er derfor vanskelig å trekke ut én hovedårsak. Materialelegenskaper som vanddamppermeabilitet kombinert med fuktinnhold (økt fuktinnhold gir økt vanddamppermeabilitet), U-verdi og varmelagringssevne har stor betydning. WUFI opererer med transiente parametere i sine beregninger, dvs. at f.eks U-verdien blir påvirket av fuktinnholdet i materialet og derfor ikke er en statisk verdi. Det kan allikevel tenkes at beregningsmodellen som blir benyttet av programvaren ikke er godt nok tilpasset trevirke/massivtre.

Underveis i forsøksperioden ble forskningsgruppen gjort oppmerksom på at måleapparatene som var satt i gang med å logge trefukten i nord- og sørveggen var erfart å ikke ta nøyaktige målinger i ved veggfukt < 11-12%. Siden det ikke var noen alternative jevn gode målemetoder tilgjengelig, ble det besluttet å fortsette med målingene, og sjekke med et annet manuelt måleapparat (protimeter) for å se hvordan verdiene samsvarte med det. Resultatene av undersøkelsen som ble gjort den 3. juni (Tabell 13) viste at målingene ikke samsvarte med protimeteret. *Man kan likevel ikke, på bakgrunn av denne undersøkelsen, forkaste de langsgående målingene som har blitt gjort, siden målingen med protimeteret kun ble foretatt én gang.* I ettertid ser man at det hadde vært lurt å foreta flere kontrollmålinger underveis, kanskje med flere forskjellige måleapparater, for å verifisere målingene.

**Tabell 13: Kontrollmåling av veggfukt med protimeter (verdiene fra skruene er ikke temperaturkorrigerte, og kan dermed anslås å være noe høyere i virkeligheten).**

	<b>Protimeter</b> [vekt%]	<b>"Skruer"</b> [vekt%]
<b>Nord T1</b>	9	12
<b>Nord T2</b>	9	11,9
<b>Nord T3</b>	9	12,1
<b>Sør T1</b>	11,2	11,9
<b>Sør T2</b>	9,5	11,4
<b>Sør T3</b>	9	11,3

### 5.3 Luftfukt

Resultatene for luftfukt viste at det ventileres ut et større antall kilo vann fra huset i simuleringen enn fra testhuset (Figur 19). Figur 18 viser for simuleringen at det er i starten det tørkes ut i størst grad, fram til etter den 20. april, hvor nivået likner nivået i testhuset. Dette sammenfaller med resultater hos (Kong og Zheng 2008) hvor man fant at i en uttørkingsprosess (byggfukt) tørket man ut aller mest i løpet av de første to månedene. Det kan være mange forskjellige årsaker til denne forskjellen mellom simulering og målinger. Feilen kan ligge i simuleringsprogrammet, målingene eller instrumenteringen, eller en kombinasjon av disse.

Materialeegenskaper virker selvfølgelig inn på resultatene, og det kan stilles spørsmål ved om materialet i simuleringen har hatt de samme materialeegenskapene som

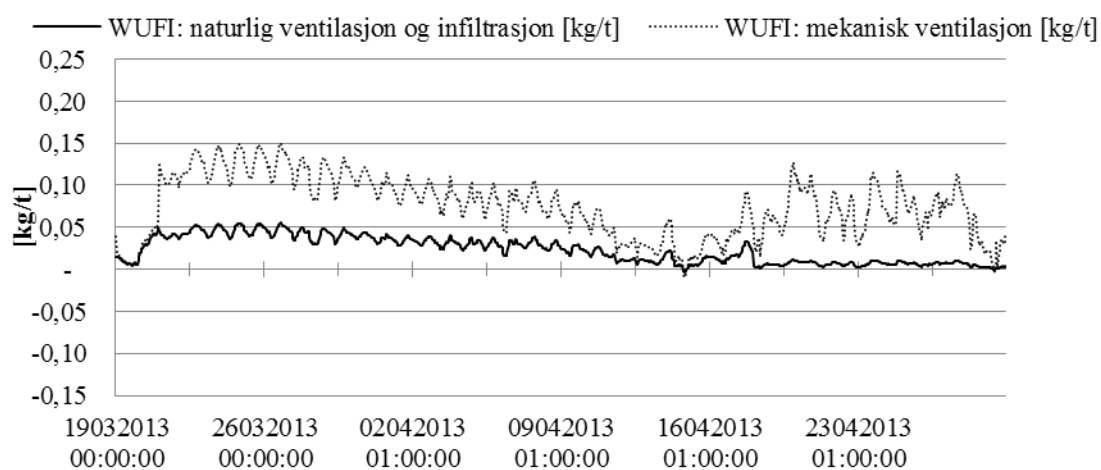
massivtreelementene i testhuset. En åpenbar forskjell er at massivtreelementene er føyet samen vha. to limlag. Er limlagene dampdiffusjonsåpne eller –lukkede? Dersom limlagene bremset ned uttørkingen, og på den måten fungerte som «dampsperrer» inni massivtreet ville de også bremset fuktighet fra f.eks. slagregn fra utsiden eller fukt fra indre fuktkilder å trenge inn til den midterste lamellen. På den annen side ville eventuelt fuktinnhold i den midterste lamellen ha vært innestengt mellom to dampbremsende sjikt, det virker som en ulogisk måte å produsere elementer, så diffusjonslukkede limsjikt ansees som lite sannsynlig.

En annen materialegenskap som derimot kan ha hatt en meget stor betydning, er U-verdien. En lav U-verdi gir gode isolerende egenskaper, mens en høy U-verdi gir dårlige isolerende evner i et materiale. Tabell 8 viser hvilke materialparametere som blir tatt i bruk i simuleringene. Tabell 10 gir et bilde av materialegenskapene og den totale U-verdien til hvert av elementene i det simulerte huset. U-verdien i veggene er på  $1,06 \text{ W/m}^2\text{K}$ , det er et ganske høyt tall som gir en dårlig isolerende evne. På tross av at veggene i simuleringshuset har såpass dårlig isolasjonsevne er innetemperaturen i simuleringa høyere enn innetemperaturen i testhuset. Det indikerer at U-verdien i testhuset er enda høyere (eller at det er større grad av infiltrasjon i testhuset), og gir enda dårligere isoleringsevne enn materialet i simuleringen. En annen indikator på at U-verdien er en bidrager er det faktum at omtrent den samme energimengden har blitt tilført de to tilfellene (Figur 19), som så reagerer med forskjellige temperaturøkninger. Det er dermed ganske sannsynlig at forskjellen i U-verdier kan ha forårsaket at den innvendige temperaturen i simuleringen har blitt høyere og dermed veggene tørket ut mer enn i testhuset.

Problematikken rundt omrøring i innelufta er også et tema. Med sirkulasjon forårsaket av f.eks. en vifte, ville det laminære grenselaget som ligger rett over veggoverflaten blitt påvirket, og uttørking ville gått raskere. Men, i testhuset er den eneste sirkuleringen i lufta forårsaket av «treg» termisk oppdrift. Ei heller i simuleringen er det regnet med noen større grad av omrøring i innelufta, da WUFI Plus behandler innelufta som et «fast legeme». Omrøring ansees dermed ikke som medvirkende årsak til de observerte forskjeller.

En annen luft-/ventilasjonsrelatert faktor er infiltrasjon. Fordi hovedlekkasjene i testhuset antas å befinne seg i døråpningen har ikke blitt tatt noen blåsedørstest av testhuset for å finne lekkasjetallet. Før 18. april var det noen monteringshull i nord- og sørveggen, det antas at de bidro til en del ventilasjon/infiltrasjon på dager med sterk vind i nord-sør-retning, som er fremherskende vindretning (se Figur 13). Den 18. april ble disse hullene plagget igjen, og det antas at infiltrasjonen ble kraftig redusert. Etter denne pluggingen samsvarer «fuktflow» i simulering og målinger mye bedre (Figur 18). I WUFI ble denne infiltrasjonen grovt estimert til å være på 0,2 utskiftninger per time før plugging og 0,05 utskiftninger per time etter plugging. Dette er bare et grovt anslag, for uten en tetthetstest er det vanskelig å si noe nøyaktig om infiltrasjonen.

Figur 24 viser hvordan infiltrasjon/naturlig ventilasjon bidrar til den totale fuktflyten ut av huset. Man kan se hvordan den simulerte pluggingen av huset den 18. april reduserer infiltrasjonen. Før «pluggingen» ligger andelen fuktflyt grunnet infiltrasjon per total fuktflyt rundt 27% og etter pluggingen er den samme andelen 8%. Man kan likevel ikke helt vite om de valgte verdier er representative for testhuset i feltforsøket. Infiltrasjonen kan ha vært større og muligens ha bidratt til oppfukning (varmt ute, kaldt inne) eller uttørking (kaldt ute, varmt inne) ved sterk nok vind (vindhastigheten gjennom forsøket er beskrevet i Figur 14).



Figur 24: Fuktflyt gjennom ventilasjon i WUFI 19.03-30.04.

## 5.4 Energiforbruk

Figur 20 illustrerer energiforbruket i simuleringen og testhuset, og forteller at simuleringen kun har 17 kWh mer i forbruk. Dette er ikke noe urimelig resultat, siden det ikke er så mange faktorer som har kunnet påvirke disse verdiene. I testhuset var termostaten satt til 30°C. dvs. at effekten på varmeovnen skulle slås av hvis temperaturen nådde 30°C. Den samme grensebetingelsen ble gitt i simuleringen. Temperaturen nådde nesten aldri 30°C i testhuset, så der sto effekten kontinuerlig på konstant 1000W. I simuleringen nådde temperaturen maksimumet noen få ganger mot slutten av simuleringsperioden.

### 5.4.1 Energibalanse/fuktbalanse

En annen ting som derimot er forskjellig mellom resultatene fra testhuset og simuleringen er hvor mye energi som gikk til fordamping av fukt fra veggene. I simuleringen gikk en større andel av den totale energien med til uttørring, 72 kWh, mens i testhuset ble det brukt 40% mindre energi på fordamping av vann fra veggene, 42 kWh. Denne latente varmen er beregnet ut fra formelen for  $H_m$  som tar med vannets fordampningsvarme i tillegg til energien som skal til for å løsrive vannmolekylene som er bundet til celleveggene ved adhesjon (Tabell 12). Energien er regnet ut fra vannmengden som er ekstrahert fra testhuset og huset i simuleringen. Det har blitt ekstrahert mer fukt fra simuleringshuset enn testhuset, dermed har det nødvendigvis blitt brukt mer energi til dét. Andelen fordampingsenergi i forhold til tilført energi ligger ifølge Tabell 11 på et relativt lavt nivå (for både WUFI og testhus), og man kunne være fristet til å trekke en slutning om at bidraget ikke er så stort. Men dette blir ikke riktig. Man må ta med i betraktning at U-verdien for veggene til testhuset overhodet ikke er på samme nivå som kravet i TEK10. Det vil si at i et hus som holdt standarden ville den prosentvise andelen fordampningsenergi per tilført energi blitt mye større. Dette er fordi en TEK10-vegg hadde isolert bedre og dermed sluppet ut mindre varme, temperaturen hadde nådd den øvre grensen på 30°C raskere og termostaten ville slått av ovnen. Dermed ville mengden tilført varme blitt redusert, mens energien som kreves for å fordampe vannet ville vært det samme.

## 5.5 Temperaturer

Resultatene viste at simuleringen og feltforsøket hadde et ulikt utgangspunkt ved igangsetting av uttørring (Figur 21). Simuleringen begynte lavere og endte høyere i temperatur enn feltforsøket. Temperaturforskjellen har vært opp mot 6°C.

Det kan være flere forskjellige årsaker til at temperaturen er høyere i simuleringen enn i testhuset. Siden man ikke er helt sikker på nøyaktig hvilke materialegenskaper massivtreelementene har, så har man i modelleringsprosessen vært nødt til å velge et materiale som passet så godt som mulig med antatte materialegenskaper i testhuset. En medvirkende årsak til den brattere stigningen i simuleringstemperaturen kan være at materialet i databasen til WUFI hadde en lavere U-verdi, dvs. en bedre isoleringsevne, slik at mindre varme har gått tapt gjennom husets vegger. Dette ville ha ført til en økt temperatur. En annen materialegenskap som potensielt kunne spilt inn på dette er varmelagringsevnen. Hvis materialet i simuleringen hadde en større evne til å magasinere varme enn massivtreelementene samtidig som lik varmemengde ble tilført begge steder, ville huset i simuleringen oppnå en høyere temperatur. Divergensen mot slutten av kurven indikerer også at veggene i simuleringen begynner å tørke opp mot slutten og at energien i simuleringen går med til å varme opp rommet og treelementene, mens i forsøket er det fortsatt for mye vann i elementene til å varme opp lufta i like stor grad.

Som ved fuktighetsresultatene kan man også her se at temperaturene svinger i takt med temperaturen ute. Figur 18 viser hvordan innnetemperaturene i simuleringen og testhuset reagerer på utetemperaturen i løpet av to dager med klarvær. I denne figuren kan man se at makstemperaturene i simuleringen og testhuset inntreffer på forskjellige tidspunkt på dagen. Makstemperaturen i testhuset inntreffer seinere på dagen enn makstemperaturen i simuleringen. Det er snakk om ca. fire timers forskyvning. Man kan si at testhuset er en tregere mekanisme enn simuleringshuset. En mulig årsak til denne forskyvningen i simuleringen kan være at veggene i simuleringen er tørrere enn veggene i testhuset, og dermed reagerer raskere på oppvarming. Den raskere oppvarmingen i WUFI kan potensielt også ha noe med hvordan programmet beregner solinnstråling i forbindelse med uteomgivelsene; hvis WUFI f.eks. ikke regner med at det er fuktig i utemiljøet, i gresset og på veggene (dugg), er dette i virkeligheten en et



varmesluk for testhuset vårt. Der må sola først fordampe bort vann før det kan varme opp veggene, mens i WUFI kan det hende det er direkte oppvarming av veggene uten først å fordampe bort dugg – dette ville også ha ført til en raskere oppvarming av simuleringshuset.

## 6 Konklusjon

Dette forsøket har vist at energibehovet i forbindelse med uttørking er betydelig. Til sammen ble det brukt 41,6 kWh til å tørke ut fukt. I et TEK10-hus ville denne energimengden vært en relativt stor del av energiforbruket. Dette har betydning for f.eks. hytteeiere som har trehytter stående i kalde klima som de besøker et par ganger på vinteren. Dette har en økonomisk betydning, men av større betydning er det faktum at hytteeiere kan spare seg for ubehag ved å gjøre tiltak som reduserer oppfukning av hytta når den ikke er i bruk. Dette kan innebære infiltrasjonsreducerende tiltak som tetting av luker og hull i bygningskroppen.

Simuleringsprogramvaren WUFI Plus ble benyttet til å simulere uttørkingsforløpet og estimere energiforbruket, og man startet med en hypotese om at WUFI klarte å beregne energiforbruket innenfor et 10%-intervall av måleresultatene. Det viste seg at simuleringen tørket ut dobbelt så mye vann som feltforsøket og da også krevde dobbelt så mye fordampningsenergi. Det har i tillegg blitt observert at huset i simuleringen er et lettere/raskere system enn huset i feltforsøket. Dette kunne man se på f.eks. temperatursvingninger, hvor topptemperaturen i simuleringen inntraff betydelig raskere enn den i testhuset. Det antas at det kan skyldes forskjell i materialegenskaper som varmekapasitet, U-verdi, etc. Uttørkingen gikk også raskere i WUFI. På grunn av de observerte forskjellene i resultatene fra simuleringen og feltforsøket kan man ikke med sikkerhet si at WUFI Plus fungerer godt nok til å forutsi uttørkingsprosessen og energibehovet ved uttørking av trehus.

## **7 Videre arbeid**

I det videre arbeidet i dette prosjektet, eller hvis det skal gjentas i ettertid, hadde det vært av interesse å finne ut hvorfor det ble så stor forskjell på simulering og testhuset.

Det ville vært å anbefale å måle og teste testhuset og byggematerialene på forhånd for å få en bedre kjennskap til materialeegenskapene og egenskapene for infiltrasjon for å komme så nært opp mot forsøket som mulig med simuleringen. Det hadde også vært interessant å foreta veggfuktmålingene igjen, med en annen type målere for å se hva som skjedde da, og om det hadde samsvart med den beregnede ekstraherte fukten fra testhuset og veggfuktmålingene i WUFI.

## 8 Bibliografi

- Banks, W. B. «A Technique for Measuring the Lateral Permeability of Wood.» *Journal of the Institute of Wood Science* (Journal of the Institute of Wood Science), 1968: 35-41.
- Blom, Peter, og Lars-Ivar Aarseth. «552.315 - Ventilasjon og Avfukting i Svømmehaller og Rom med Svømmebasseng.» *Byggforskserien*, 2003: 4.
- Bolton, David. «The Computational Equivalent of Potential Temperature.» *Monthly Weather Review* 108 (1980).
- Bøhmer, Einar. *Store Norske Leksikon*. 2013. <http://snl.no/tre/plante> (funnet mars 7, 2013).
- CarnotCycle. *Carnot Cycle - The Classical Blog on Thermodynamics*. 2012. <http://carnotcycle.wordpress.com/2012/08/04/how-to-convert-relative-humidity-to-absolute-humidity/> (funnet mai 8, 2013).
- Edwardsen, Knut Ivar, og Trond Ramstad . *Trehus - Håndbok 53*. Oslo: Norges Byggforskningsinstitutt, 2007.
- Fagklim. *Fagklim - Om Instrumenter og Målinger på Ås*. 2009. <http://www.umb.no/fagklim/artikkel/om-instrumenter-og-malinger> (funnet februar 2013).
- Fløtaker, Sjur, og Sverre Tronstad. *Rapport 47 - Description and initial test of 8 principles for in-kiln measuring and end-point control of wood moisture content*. Prosjektrapport, Oslo: Treteknisk Institutt, 2000.
- Fraunhofer IBP - WUFI Wiki. *WUFI Wiki*. 2013. <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Hauptseite> (funnet 2013).
- Fraunhofer IBP. *WUFI Pro*. 2013. [www.wufi-pro.com](http://www.wufi-pro.com) (funnet 2013).
- Fremmedordboken. *Hysteresis - Fremmedordboken - www.ordnett.no*. 2013. <http://ordnett.no/search?search=hysteresis&lang=no> (funnet april 2, 2013).
- Geving, Stig, og Jan Vincent Thue. *Fukt i Bygninger - Håndbok 50*. Oslo: Norges Byggforskningsinstitutt, 2002.
- Hameury, Stephane. «Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study.» *Building and Environment* 40 (2005): 1400-1412.
- Kong, Fanhong, og Maoyu Zheng. «Effects of combined heat and mass transfer on heating load in building drying period.» *Energy and Buildings*, 13 februar

- 2008: 1614-1622.
- Korsnes, Silje. «Fukt- og varmeutveksling i innvendige overflater.» Masteroppgave, 2012.
- Kristensen, Tor. *Rapport 45 - Bygningselementer i Massivtre*. Norsk Bygningsteknisk Institutt, 1999.
- Marinos-Kouris, Dimitris, og Z. B. Maroulis. «Transport Properties in the Drying of Solids.» I *Handbook of Industrial Drying*, redigert av Arun S Mujumdar, 54-120. Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- Nordisk InvasjonsCenter. *Moisture Buffering of Building Materials*. Rapport, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2005.
- Perré, Patrick, og Roger B Key. «Drying of Wood: Principles and Practices.» I *Handbook of Industrial Drying*, redigert av Arun S Mujamdar, 822-878. Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- Siau, John Finn. *Wood: Influence of Moisture on Physical Properties*. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995.
- . *Transport Processes in Wood*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1984.
- Skaar, Christen. *Wood-Water Relations*. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- Straube, John. «Moisture and Materials.» *www.buildingscience.com*. 2006. (funnet februar 14, 2013).
- TEK10 - Norges lover. *Kommunal- og Regionaldepartementet - Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10)*. 20. mars 2010. <http://www.lovdato.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20100326-0489.html> (funnet 2013).
- Tellnes, Lars, Kristine Nore, og Anders Nyrod. «WEEE: Wood - Energy, Emissions, Experience.» *Treteknisk Informasjon - Norsk Treteknisk Institutt*, juli. 2012: 12.
- Tiemann, H. D. «Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood.» *U.S. Department of agriculture, Forest Service*, 1906.
- Time, Berit. *Hygroscopic Moisture Transport in Wood*. Phd., Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1998.
- Tronstad, Sverre. «Nr. 39 Tørking av Gran og Furu.» *Fokus på Tre*, 2000.
- Utaaker, Kåre. *Mikro- og Lokalmeteorologi - Det Atmosfæriske Miljø på Liten Skala*. Alma Mater Forlag, 1991.

# Vedlegg

## Vedlegg 1: Kartlegging av initialfuktighet

Forklaring til tabellene: Hver tabell representerer én vegg. De grå tallene er innetemperatur og de hvite tallene er utetemperatur. Tabellene er en oversikt over hver vegg sett innenfra, dvs. grå A1 er øverst til venstre hjørne sett innenfra og det hvite tallet representerer den samme punktet rett på utsiden, slik at man kan bruke de verdiene til å lage seg en fuktlinje på gjennom veggen. Tallene er i vektprosent hvor 30% er mettet trevirke.

Tabell 14: Målt vanninnhold på nordveggen [vekt%]

<b>NORD</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>A-inne</b>	15	15	16	16	16
<b>A-ute</b>	16	17	18	16	17
<b>B-inne</b>	15	14	14	17	16
<b>B-ute</b>	18	20	18	18	17
<b>C-inne</b>	14	14	15	16	15
<b>C-ute</b>	20	19	22	26	23

Tabell 15: Målt vanninnhold på sørveggen [vekt %]

<b>SØR</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>A-inne</b>	15	15	16	15	16	15
<b>A-ute</b>	16	16	15	16	15	16
<b>B-inne</b>	15	15	15	15	15	15
<b>B-ute</b>	16	16	14	16	14	16
<b>C-inne</b>	14	13	14	15	14	13
<b>C-ute</b>	15	15	14	17	15	15

Tabell 16: Målt vanninnhold på østveggen [vekt %]

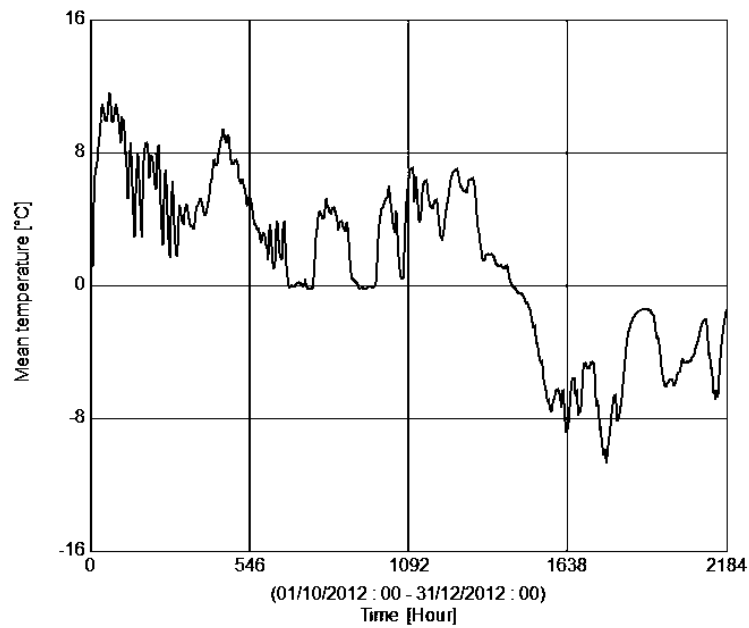
<b>ØST</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>A-inne</b>	15	17	15	16
<b>A-ute</b>	16	16	17	16
<b>B-inne</b>	15	16	15	15
<b>B-ute</b>	16	17	16	16
<b>C-inne</b>	14	15	16	15
<b>C-ute</b>	17	17	17	16

Tabell 17: Målt vanninnhold på vestveggen [vekt %]

VEST	1	2	3
A-inne	15	15	15
A-ute	17	17	17
B-inne	15	14	15
B-ute	17	17	18
C-inne	13	12	12
C-ute	15	18	18

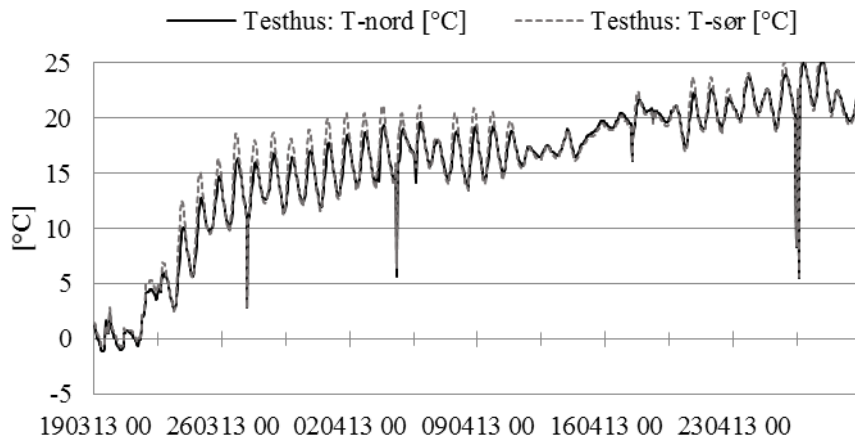
## Vedlegg 2: Simulering I: Initial temperatur

Figur 25 viser hvordan temperaturen utviklet seg fra oktober til desember 2012 og til slutt ender rundt  $-2^{\circ}\text{C}$ . Denne verdien ble brukt som initialverdien i veggene i de videre beregninger.



Figur 25: Temperaturforløp i simulering I (WUFI-grafikk).

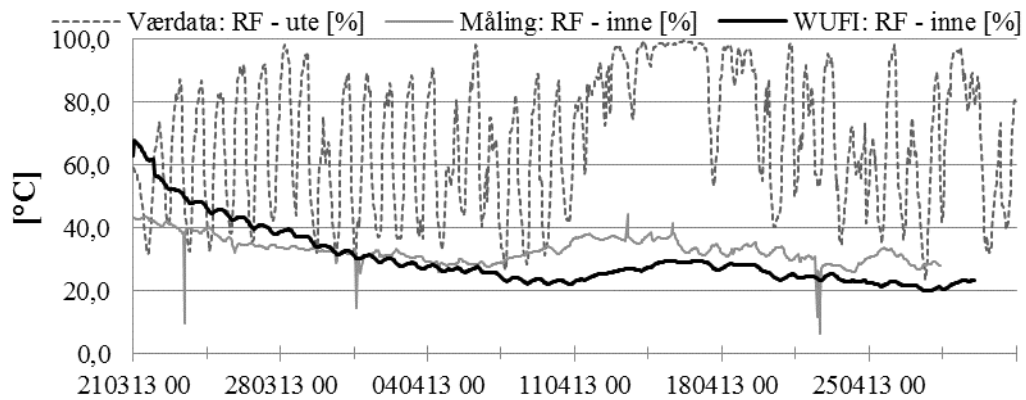
### Vedlegg 3: Temperaturer – rådata



Bilde 4: Overflatetemperaturer nord og sør 19.03-30.04

### Vedlegg 4: Luftfukt - rådata

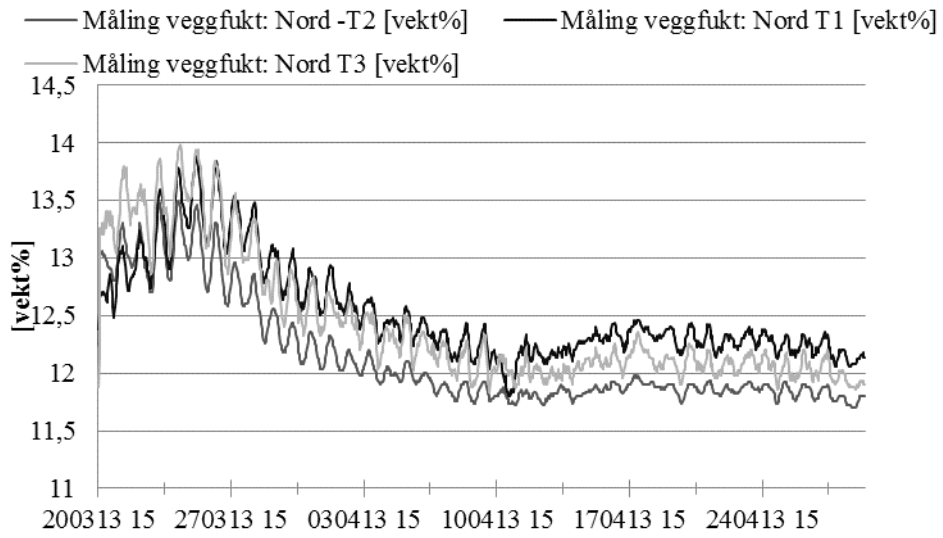
#### Relativ fuktighet



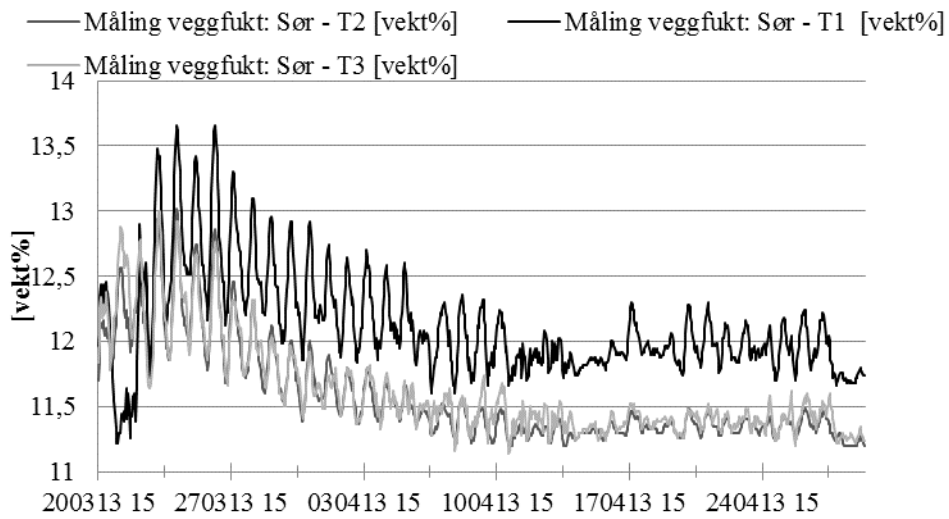
Figur 26: Utvikling til relativ fuktighet i perioden 21.03-30.04.



## Vedlegg 5: Veggfukt – rådata



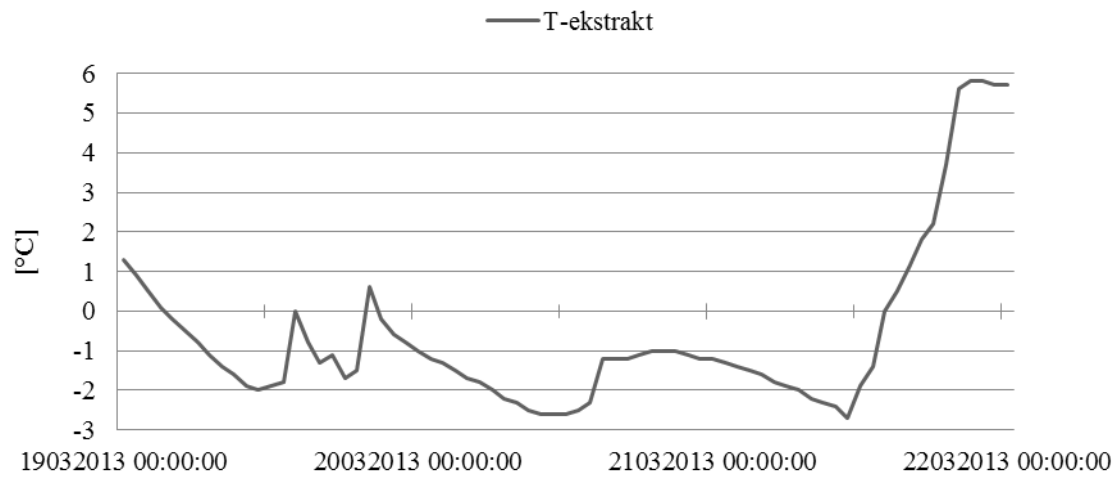
Figur 27: Veggfukt nordveggen 20.03-30.04



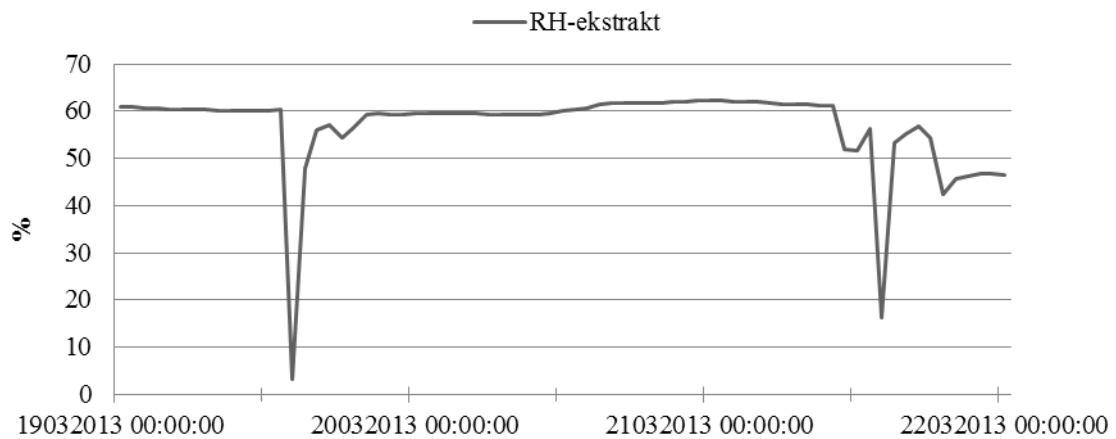
Figur 28: Veggfukt i sørveggen 20.03-30.04

## Vedlegg 6: 19.03 – 22.03: Oppstart

### Luftmålinger

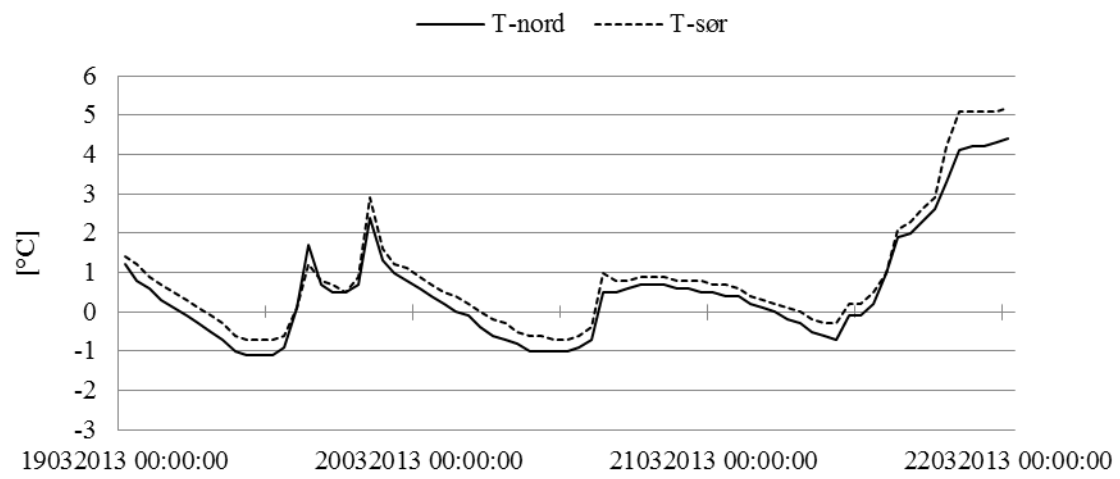


Figur 29: Målt lufttemperatur inne 19.03-22.03



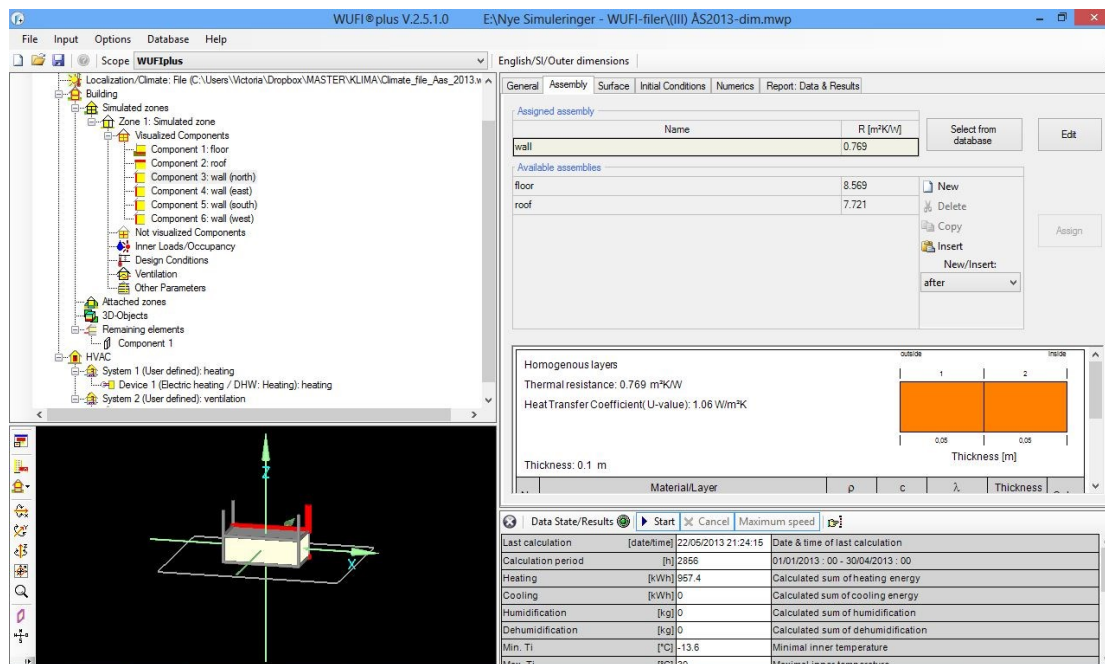
Figur 30: Målt RF inne 19.03-22.03

## Veggmålinger

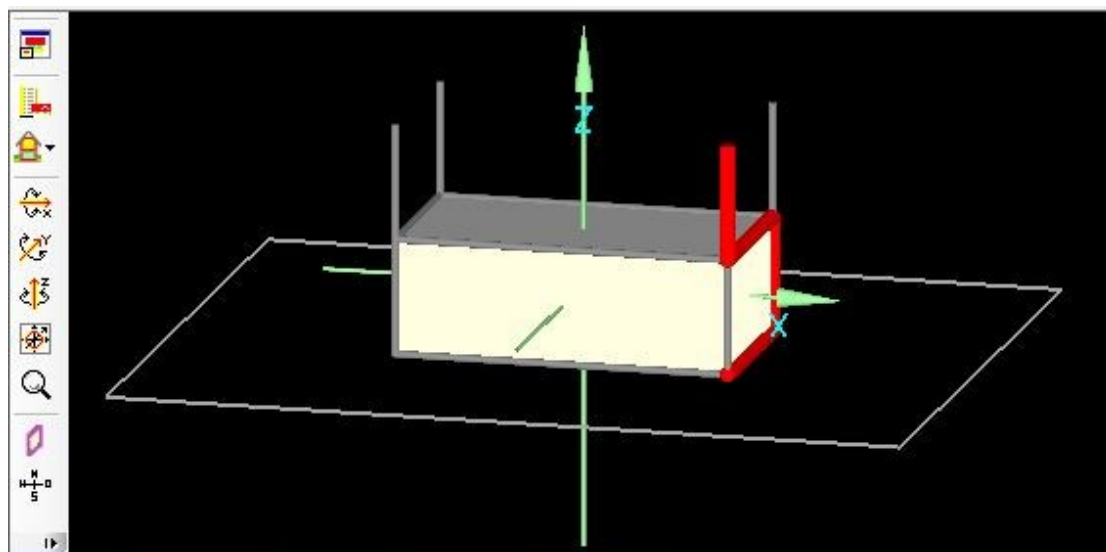


Figur 31: Overflatetemperaturer nord- og sørvegg 19.03-22.03

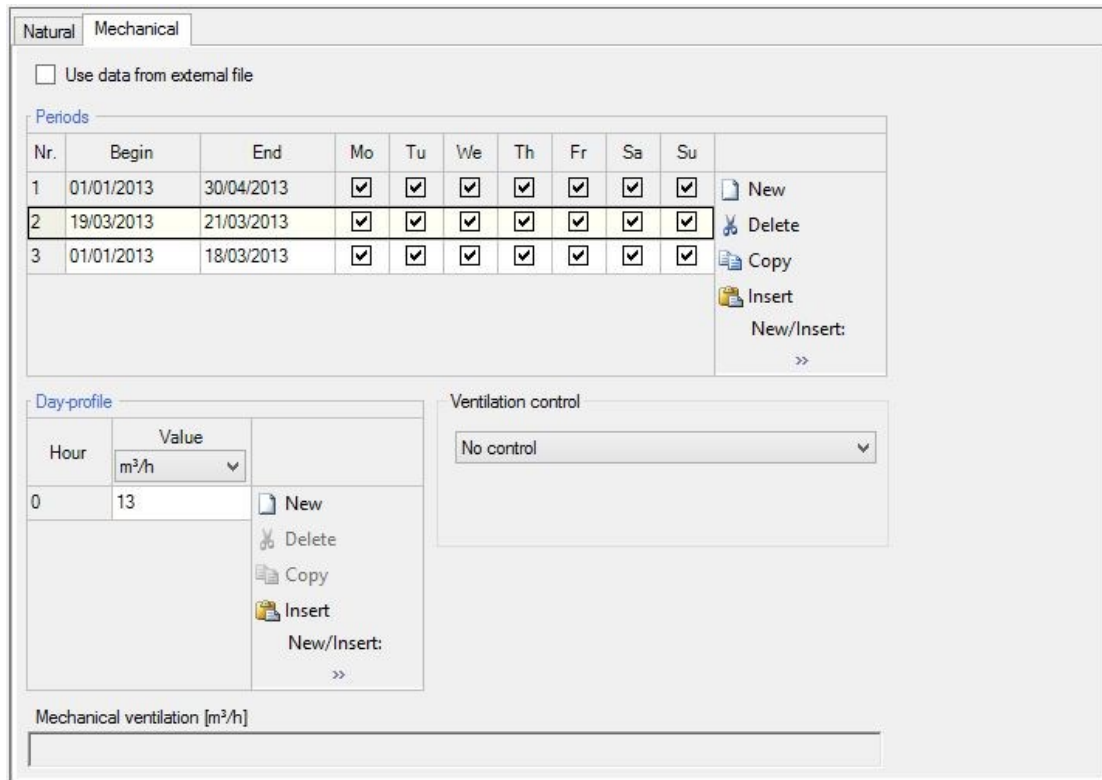
## Vedlegg 7: WUFI Plus-detalljer



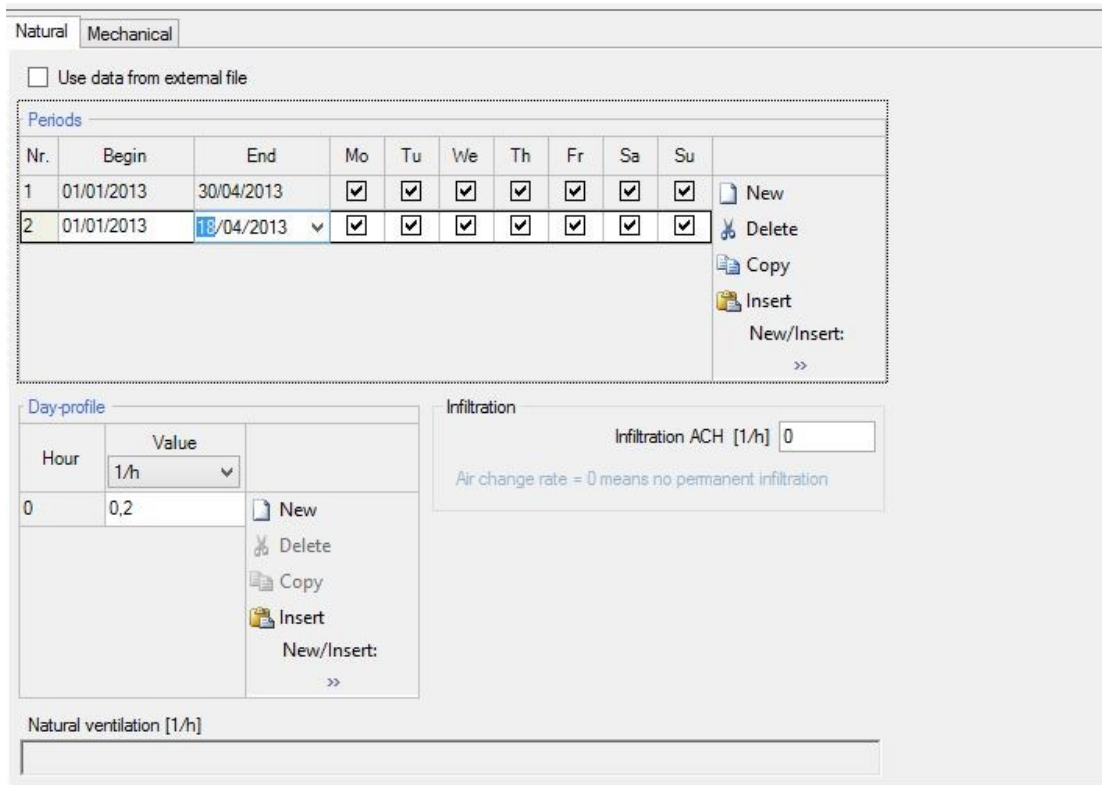
Bilde 5: Skjermdump fra simulering III. Nordveggen er valgt i panelet til venstre og sammensetningen kan sees til høyre



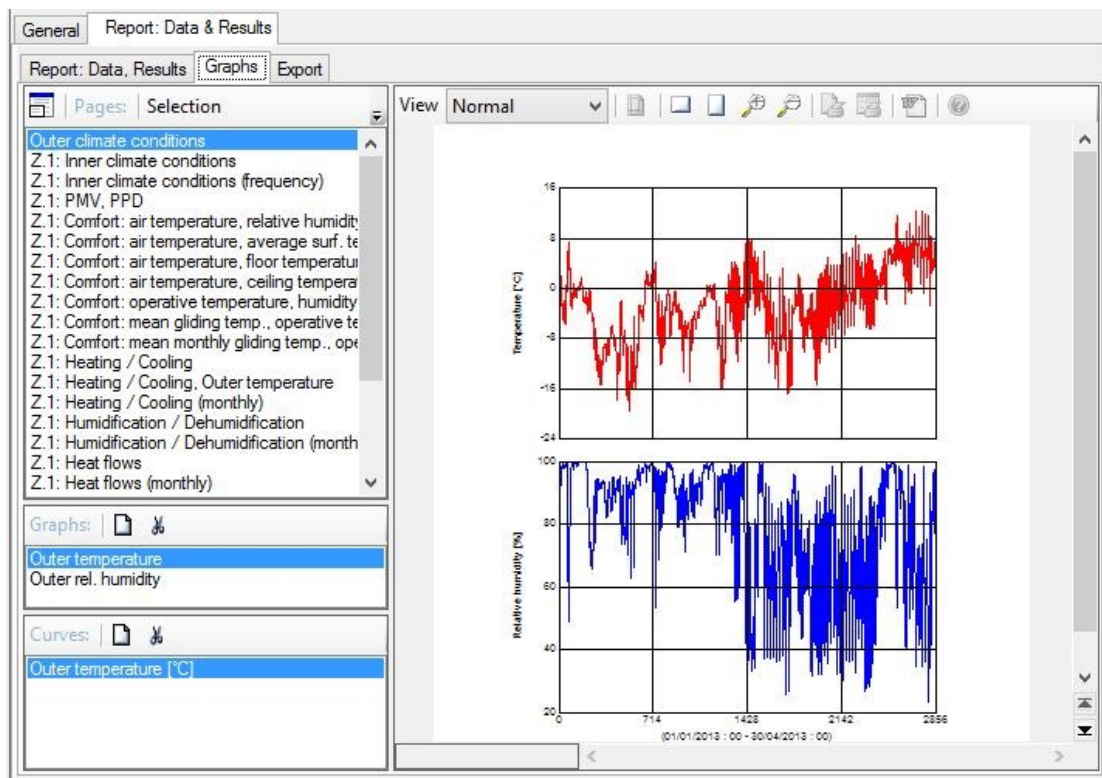
Bilde 6: bildet viser 3D-modellen av huset i WUFI



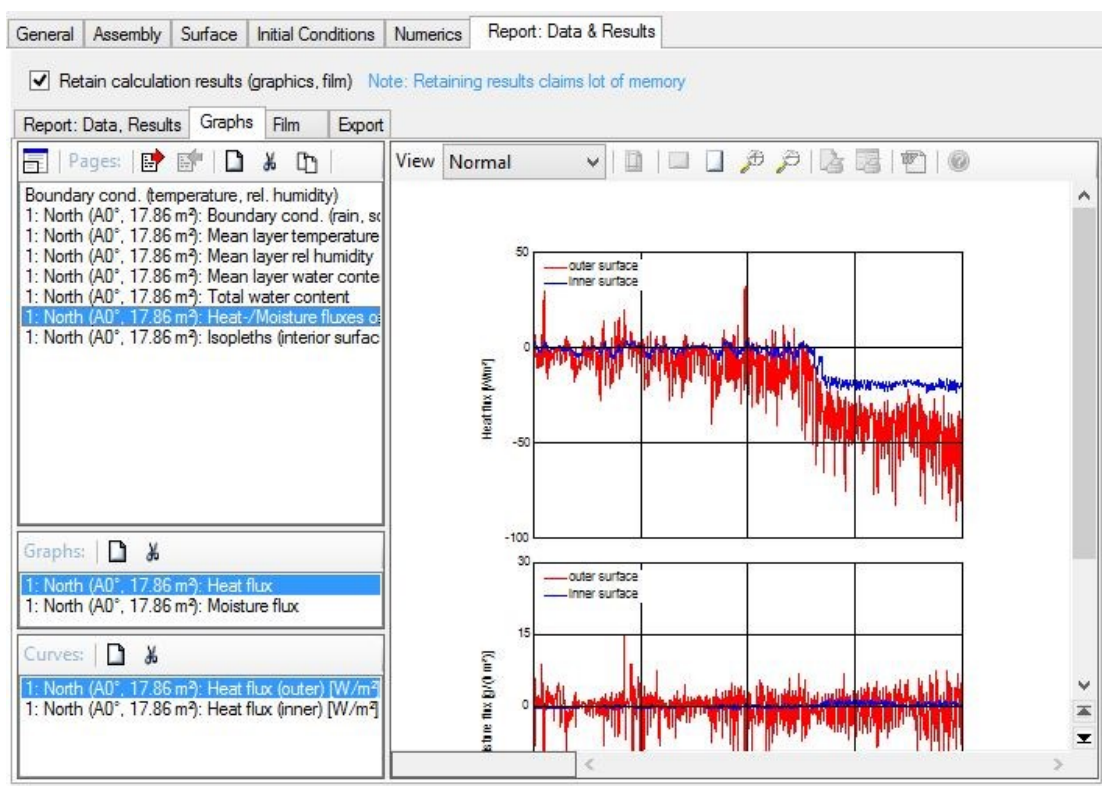
Bilde 7: Mekanisk ventilasjon i WUFI – her kan man dele opp simuleringen i forskjellige perioder med ulikt luftskifte.



Bilde 8: naturlig ventilasjon i WUFI. Det var kun mulig å ha en fast infiltrasjon, så man brukte naturlig ventilasjon som en erstatter siden den var variabel.



Bilde 9: I WUFI kan man raskt få en oversikt ved hjelp av grafene. Her er RF og temperatur ute.



Bilde 10: man kan også se tilstanden for hvert element grafisk, her varme- og fuktflow i nordveggen.

## Vedlegg 8: Varme og ventilasjon i testperioden

Tabell 18: Tabellen beskriver hvordan varme og ventilasjon er regulert i testperioden

<b>Varme:</b>	
01.01- 21.03	Ingen oppvarming
22.03- 23.03:	1000W reguleres med termostat opp til 4°C
23.03- 30.04:	1000W reguleres med termostat opp til 30°C
<b>Ventilasjon:</b>	
Mekanisk avtrekk:	
01.01- 18.03	Ingen ventilasjon
19.03- 21.03:	Reguleres til en trykkforskjell på 10Pa = 13m <sup>3</sup> /t
22.03- 30.04:	Reguleres til en trykkforskjell på 55Pa = 30m <sup>3</sup> /t = 0,5 luftskiftninger i timen.
Naturlig ventilasjon:	
01.01- 17.04	0,2 luftskiftninger i timen
18.04- 30.04	0,05 luftskiftninger i timen (etter plugging av større åpning i vegg)