



FORORD

Denne oppgaven markerer slutten på en spennende studietid ved Universitetet i Ås. Oppgaven omfatter 30 studiepoeng og ble utarbeidet våren 2014.

I samarbeid med Treteknisk Institutt ble det enighet om at oppgaven skulle inneholde en konferanseartikkel som skulle leveres til den 35. AIVC-konferansen i Poznan, Polen (Air Infiltration and Ventilation Centre). Arbeidet med forsøkene på Søråsfeltet og den påfølgende artikkelskrivingen har vært veldig krevende, men samtidig særdeles lærerikt og spennende. Jeg ønsker å takke Treteknisk Institutt og WEEE-prosjektet for muligheten til å være en del av dette. For uvurderlig veiledning og all støtte både før, under og etter arbeidet ønsker jeg å takke mine veiledere Kristine Nore og Tormod Aurlien. En stor takk rettes også til Dimitrios Kraniotis for all teknisk hjelp.

Oslo, 20.05.2014

Ivana Katavic

SAMMENDRAG

Denne masteroppgaven har til hensikt å undersøke potensiell effekt og miljøgevinst ved utnyttelse av fuktbufring og latent varme i eksponerte innvendige treoverflater. Relativ fuktighet (RF) i innelufta har stor innvirkning på både inneklimate/komfort og materialers bestandighet. Tre er et naturlig hygroskopisk materiale med evnen til å stabilisere svingninger i både temperatur og luftfuktighet innendørs. Studier har vist at det finnes potensiale for energibesparing ved aktiv utnyttelse av disse egenskapene.

I denne oppgaven inngår en frittstående konferanseartikkel som beskriver et feltforsøk utført på to testhus i massivtre. Eksperimentet sammenligner effekten av fuktbufring og latent varme i de to testhusene der den eneste forskjellen er den innvendige overflaten; eksponert tre i testmodul A og PE-folie i testmodul B. Begge modulene er påført store fuktpåkjenninger i form av vanndamp med ultrasoniske luftfuktere. Fuktighetsmålere og temperatursensorer registrerer måleverdier under hele prosessen. I modul B, med tett overflate, når RF 100 % innen kort tid etter at fuktpåkjenningen er påført. I modul A når RF kun ca. 80 %, under de samme forutsetningene. Selv med dobbel vanndampmengde på 1,2 kg/h i 9 timer, når ikke modul A en RF på 100 %. Resultatene viser også en temperaturøkning på omtrent 1-1,5 °C i overflatene med eksponert tre, og ingen økning hos de tette overflatene. Dette varmetilskuddet skyldes den latente varme som frigjøres når vanndamp i luften absorberes og går over til væskeform i treporene.

Parallelt med feltforsøket ble eksperimentet modellert i simuleringsprogrammet WUFI[®]Plus for å sammenligne målte og simulerte resultater. I simuleringen er det benyttet samme ytre klima (data fra værstasjon hvor modulene står), og mest mulig reelle parametere i et forsøk på komme nærmest virkeligheten. Resultatene fra simuleringen viser stor grad av samsvar med de målte verdiene når det gjelder den impermeable modul B. For den permeable modulen, derimot, greier ikke simuleringsprogrammet å forutsi responsen i like stor grad. Her øker RF i rommet for raskt, og avtar for sakte.

Ut ifra resultatene kan det slås fast at effektene av fuktbufring og latent varme i eksponerte treoverflater er signifikant og bør vurderes som mulig energibesparende tiltak der det lar seg benytte. Videre er det grunn til å hevde at simuleringsprogrammet ikke er tilstrekkelig egnet for å håndtere fuktbufring og permeabilitet i tykke, eksponerte massivtreelementer.

ABSTRACT

This thesis intends to examine the potential effect of moisture buffering and latent heat in exposed interior wooden surfaces. Relative humidity (RH) in the indoor air affects not only the indoor climate and comfort, but also material durability. Wood is naturally hygroscopic with the ability to stabilize indoor temperature and humidity variations. Studies have shown that there is energy saving potential in implementation of these properties.

Included as the first part, is a standalone conference paper describing a field experiment conducted on two massive wood test houses. The experiment compares the impact of moisture buffering and latent heat in the two test houses where the only difference is the internal surfaces; exposed wood in test module A and PE-foil in test module B. A serious moisture load is applied to both modules, in the form of water vapor produced by ultrasonic humidifiers. Humidity and temperature sensors monitor the values during the entire process. In module B, with impermeable surface, the RH reaches 100 % shortly after the moisture load is applied. In module A the RH reaches only approx. 80 % under the same conditions. Not even with the double moisture load of 1.2 kg / h in 9 hours does module A reach 100 % RH. The results also show a temperature increase of about 1-1.5 °C on surfaces with exposed wood. This heat addition comes from the latent heat released when water vapor in the ambient air is absorbed by the timber and undergoes a phase change to liquid state in the pores of the wood.

In addition to the experimental study, the cases were modeled in the hygrothermal simulation program WUFI[®]Plus for a comparison of the measured and simulated results. The parameters used in the simulation are kept as close to reality as possible. The results from the simulation show a high degree of correlation with the measured values in the cases concerning the impermeable module B. For the permeable module A, however, the simulation program seems unable to predict the responses to the same extent. Here, the RH in the room rises too abruptly and decreases too slowly.

Based on the results it is apparent that the effects of moisture buffering and latent heat in exposed wooden surfaces are significant and should be taken into account when designing energy efficient solutions. Furthermore, it seems that the simulation program is inadequate in regards to handling the moisture buffering and permeability in thick, exposed massive wood elements.

INNHold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Innhold	iv
Figurliste	vi
Tabelliste	vi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Omfang	1
1.3 Problemstilling	1
2 Konferanseartikkelen	2
3 Teori og bygningsfysisk grunnlag	16
3.1 Fukt	16
3.1.1 Luftfuktighet	16
3.1.2 Fukt i materialer	17
3.1.3 Fuktinnhold i materialer	19
3.1.4 Fuktbindinger	20
3.2 Fukttransport	22
3.2.1 Fuktkonveksjon	22
3.2.2 Vanndampdiffusjon i luft	23
3.2.3 Vanndampdiffusjon i materialer	23
3.2.4 Væsketransport	24
3.3 Varmetransport	25
3.3.1 Konduksjon	25
3.3.2 Konveksjon	25
3.3.3 Stråling	26
3.4 Tre	27
3.4.1 Struktur og oppbygging	27
3.4.2 Fuktinnhold	28
3.4.3 Fysiske egenskaper	29
3.4.4 Sorpsjon	30
3.4.5 Likevektsfukt og sorpsjonsisotermen	30

3.4.6 Latent sorpsjonsvarme.....	31
3.4.6 Termiske egenskaper.....	32
3.4.7 Permeabilitet.....	32
3.4.8 Massivtre.....	32
4 Konklusjon.....	33
5 Videre arbeid.....	33
5 Litteratur.....	34
VEDLEGG	

FIGURLISTE

Figur 1	View of test the houses from northwest. Module B is seen in the front; module A in the rear.	9
Figur 2	Interior view of module B where the walls and ceiling are upholstered in PE foil.	10
Figur 3	The ground plan of the modules and a schematic figuration of the instrumentation placement.	11
Figur 4	Results from case 1.	13
Figur 5	Results from case 2.	13
Figur 6	Results from case 3.	13
Figur 7	Mollierdiagram, sammenhengen mellom temperatur og fuktinnhold/damptrykk (Edwardsen et al. 2006)	18
Figur 8	Forskjellige typer materialstruktur og poresystemer (Geving & Thue 2002)	19
Figur 9	Menisker og kapillærkondensasjon i porer (Geving & Thue 2002)	22
Figur 10	Fiberstrukturen i bartrær (Edwardsen et al. 2006)	29
Figur 11	Tresnitt og væskestrøm (Edwardsen et al. 2006)	30
Figur 12	Fuktinnholdet u, % av tørrvekt (Edwardsen et al. 2006)	30
Figur 13	Fuktkapasiteten hos treverk som funksjon av RF (Geving & Thue 2002)	31
Figur 14	Sorpsjonsisotemer for gran ved forskjellige temperaturer (Geving & Thue 2002)	32
Figur 15	Hysteres, absorpsjonsisoterm og desorpsjonsisoterm (Geving & Thue 2002)	33

TABELLISTE

Tabell 1	Presentation of test cases and initial conditions	9
Tabell 2	Wall assembly	10
Tabell 3	Measured parameters.	10
Tabell 4	Summary of the test results	14
Tabell 5	Sum of heating energy (kWh) as calculated by WUFI	15
Tabell 6	Materialstruktur og kjennetegn	19
Tabell 7	Fukttransportmekanismer og deres drivpotensial	23
Tabell 8	Typiske verdier for gran og furu. (Norsk treteknisk institutt) (Wadsø 1993)	31

1 INNLEDNING

1.1 BAKGRUNN

Denne masteroppgaven er en del av forskningsprosjektet WEEE Wood – Energy, Emission, Experience initiert av Norsk Treteknisk Institutt med Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU) som en av samarbeidspartnerne. Oppgaven faller inn under temaet om energi, der målet er å undersøke om trevirkets termiske og hygroskopiske egenskaper kan ha positiv innvirkning på inneklima og energibehov. I regi av WEEE er det plassert to testhus i massivtre (25m²) på NMBUs eiendom i Ås. I testhusene er alle parametere under full kontroll. Både inneklima og uteklima (testhusene står på et metrologisk felt) er systematisk målt og dokumentert.

1.2 OMFANG

Oppgaven består av to distinkte deler. Del én (kapittel 2) er en konferanseartikkel som er planlagt å sendes inn til konferansen AIVC 2014 som går av stabelen i september i Poznan, Polen. Ved innleveringsfristen for masteroppgaven (medio mai) er ikke fristen for konferansens godkjenning av artikler enda utløpt. Artikkelen er skrevet på engelsk og fungerer som en selvstendig rapport med introduksjon, bakgrunn, metode, diskusjon, konklusjon og egen litteraturliste. Det var gitt en grense for maksimalt omfang på 10 sider. Artikkelen fremstår i denne oppgaven i samme form som den er planlagt å sendes inn i. De eneste justeringene er endret skriftstørrelse i abstraktet, fra punkt 10 til 12, og økt linjeavstand, fra 1 til 1,5.

Den andre delen (kapittel 3) er et supplement til artikkelen, og omfatter teorien og bygningsfysikken som ligger til grunn for de mekanismene og prosessene som beskrives der.

1.3 PROBLEMSTILLING

Artikkelens formål er å undersøke mulighetene til å utnytte eksponerte massivtreoverflater til fuktbufring og latent varme. To testhus i massivtre er påført fuktbelastinger og sammenlignet. Den ene huset har eksponerte treoverflater innvendig mens det andre har diffusjonstette vegger. Simuleringsprogrammet WUFI[®]Plus er benyttet til å simulere alle fuktpåkjenningene, for parallell evaluering.

Det er forventet tydelige forskjeller mellom åpen og tett overflate.

2 KONFERANSEARTIKKELEN

MEASURED MOISTURE BUFFERING AND LATENT HEAT CAPACITIES IN CLT TEST HOUSES

Ivana Katavic¹, Kristine Nore^{*2}, and Tormod Aurlien¹

*1 Department of Mathematical Sciences and
Technology, Norwegian University of Life Sciences
Universitetstunet 3
1430 Ås, Norway*

*2 Norwegian Institute of Wood Technology
Forskningsveien 3B
0373 Oslo, Norway
kristine.nore@treeteknisk.no

ABSTRACT

This research investigates the significance of the moisture buffering and latent heat capacities in exposed cross-laminated timber (CLT) walls with the respect to indoor climate and energy consumption. Hygroscopic materials have the ability to accumulate and release moisture due to change in the surrounding humidity. The moisture buffer capacity is regarded as this ability to moderate, or buffer, the indoor humidity variations. Latent heat refers to the heat of sorption due to the phase change from vapour to bound water in the material and the other way around. The indoor relative humidity (RH) is closely related to indoor comfort, more specifically to thermal and respiratory comfort and perceived air quality. Both persistently low RH (<20 %) and high RH (>75 %) can cause health threats for humans such as respiratory infections or the growth of mould. Wood is naturally hygroscopic, which enables it to act passive and efficient to stabilize the indoor humidity and thus, temperature variations. A better understanding and more deliberate implementation of these properties could potentially reduce the need for ventilation and heating without compromising the indoor comfort. A full-scale experimental study compares the responses of two 25 m² test houses to an applied moisture load. The test houses are identical constructions made of CLT elements, where the exposed spruce interior in module A is kept as is, while the interior in module B is covered with PE foil emulating an impermeable surface. The moisture load is applied as continuous flow of mist under several various conditions, including different magnitudes of the load and altered air change rates of the ventilation fan. The responses are measured in terms of RH, moisture content in the wood, changes in surface and air temperature and the time needed for the system to restore itself to the initial state. The software WUFI[®]Plus is utilized to perform a hygrothermal building performance simulation for comparison and evaluation. Both the experimental and calculated results show that exposed wood is an efficient moisture buffer capable of reducing daily fluctuations in RH. The results also show a rise in surface temperature, which is a contribution from the latent heat of sorption.

KEYWORDS

Moisture buffer capacity, latent heat, indoor climate, energy, buildings, exposed wood surface, Cross Laminated Timber (CLT)

INTRODUCTION

In the last decades a global “green awakening” has led to new standards and requirements concerning environmental awareness and sustainable development. According to the International Energy Agency (IEA), commercial and residential buildings represent 32 % of the worlds total final energy consumption (IEA 2014). In reducing this figure, the potential is mainly related to reducing the need for heating and cooling. The public and legislative demands for energy efficient building design have led to increased air tightness and insulation in modern dwellings. In these modern buildings, the ventilation accounts for a large amount of the heat loss through air renewal. One solution to keep the energy consumption down whilst providing a comfortable and healthy indoor climate is the use of passive design strategies. In its simplest form, passive methods include considerations such as shape and orientation of buildings to reduce the ventilation, cooling and/or heating demands. Thermal inertia associated with heavy walls is another type of passive design that is actively implemented. Thermal mass design takes advantage of the heat capacity, which enables heavy buildings to heat up and cool down up to three times slower compared to light buildings (Karlsson 2012). Well-controlled HVAC systems or ventilation that is RH or CO₂ sensitive are other options.

Studies on the moisture buffer capacity of hygroscopic materials have shown that these materials have a great ability in terms of moderating the indoor RH levels (Rode & Grau 2008). Moisture buffering is described as the ability of porous materials to buffer changes in the RH by absorbing and desorbing water vapour from the surrounding air. Indoor humidity varies significantly through the day and seasons. Materials that can store and release moisture can reduce the extreme values of these fluctuating humidity levels. This results in improved thermal comfort while keeping the energy consumption low.

Another phenomena closely connected to the moisture buffer capacity, is the latent heat of sorption. In the process of moisture exchange between the hygroscopic material and surrounding air, the humidity undergoes a phase change. The energy associated with this phase change from vapor state in air to liquid water in hygroscopic pores, or vice versa, is the latent heat of sorption (Osanyintola. & Simonson, 2006).

This paper aims to measure the significance of the moisture buffering capacity and latent heat of sorption of exposed spruce CLT in full-scale experimental facilities. The experimental facilities include two test houses: one with exposed spruce interior surface; and one control house with impermeable surface where moisture buffering and latent heat are limited. The responses of the test houses are compared to one another, as well as to results from a computer performed hygrothermal whole building performance simulation using WUFI®Plus (2007) in order to evaluate these models.

BACKGROUND

Indoor climate

The main purpose of air ventilation is to ensure adequate indoor air quality (IAQ) for users with regard to health and comfort (TEK10, 2010), and to keep the indoor humidity at correct levels to maintain the building structure and envelope. The indoor RH is affected by different factors, such as internal moisture sources (human activity and respiration, household appliances and equipment), airflow, leakages and external air moisture content. There is also a significant seasonal impact on the RH, more dependent on outdoor temperature than outdoor humidity. Heated homes are usually dry because the infiltrating cold winter air contains little water vapour. RH reaches its lowest levels during the coldest days. During hot summer days, the outdoor air contains plenty of vapour even if the RH is lower than in winter. But because of high vapour pressure outdoor, vapour generated inside hardly migrates out. (Kubler 1982)

Daily indoor moisture loads due to normal life activities leads to fluctuations and peaks in RH, which easily reaches 80-100 % in airtight spaces, like bathrooms. The moisture production in residences differs among people depending on habits and behaviour. The total moisture generation (sum of respiration and transpiration) of an adult at rest is in the range of 0.8-1.7 kg/day, while the total water vapour production (including daily chores, plants, pets etc.) for a family of five is in the range of 6.6-10.2 kg/day (TenWolde & Pilon 2007).

Keeping the RH at correct levels is vital for both the durability of the building materials and the indoor climate comfort. Surveys show that humans feel most comfortable at certain temperatures and humidities (ANSI/ASHRAE; ISO). The RH is important for skin humidity (Toftum et al. 1998a), respiratory comfort (Toftum et al. 1998b) and perceived IAQ. High RH can be associated with moisture problems in the building envelope, such as mould growth, as

well as human health problems, including asthma and allergies. Arlian (Arlian et al. 1999) suggests maintaining mean daily RH below 50 % to effectively restrict population growth of house dust mites.

In a wide variety of commercial buildings the right levels of RH can be of even higher importance. Swimming halls and laundry facilities often have excess humidity, while offices and production facilities with heavy machines tend to be perceived as too dry. Museum and gallery artefacts require specific and steady humidity and temperature levels to minimize deterioration (Janssen & Christensen 2013).

Energy efficient design strategies

By 2020, the EU Energy Performance of Buildings Directive (2010/31/EU) aims for a 20 % reduction in European primary energy consumption and Nearly Zero-Energy Building norm for all new buildings. Mandatory energy performance certificates are already implemented in commercial property development, and recent studies show that better energy efficiency is rewarded in the market.

The energy consumption in dwellings can be divided into three main categories: electricity for lightning and equipment, room heating/cooling and water heating. In Norwegian households, an estimated 60 % of the consumed energy is used on room heating alone. (Edvardsen et al. 2006) In more southern climates, the cooling and air conditioning in the hot season is the main energy drain. Energy efficient development means utilizing plan strategies where the total purchased energy need for a building is kept at a minimum.

Sustainable development requires that the choice of materials for building take into account the environmental impact of the materials being used, the energy consumption of building and the indoor environment. Manufacture, use and disposal of wood is associated with low energy cost and low emissions. Furthermore, wood used as indoor surface material enables its hygrothermal inertia to act as a passive system regulating the temperature and moisture fluctuations. Hameury and Lundström (2003) describe an experimental study performed in four occupied apartments in Sweden with large areas of exposed massive wood surfaces. The results show evidence of the wood contributing to buffer the indoor temperature.

A Canadian study estimated that applying hygroscopic materials in combination with RH and user presence control of HVAC systems reduces the heating energy consumption with 2-3 % and the cooling energy consumption with 5-30 % in moderate climates. (Osanyintola & Simonson 2006).

Compared with other materials, the heat conductivity of wood is low, especially perpendicular to the fiber axis. This makes (dry) wood a good insulator, but also poses as a limitation for heat storage purposes. Nevertheless, because wood is excellent at holding water, this captured moisture increases its basic heat storage capacity. This gives wood a beneficial compromise between insulation and heat storage. Since the thermal and hygroscopic behaviors of building physics are closely related, the wood moisture content also affects the thermal fluctuations through the material. A high moisture content enhances the heat flux.

Hygroscopic potential

The total moisture buffer capacity depends on the moisture buffer capacities of each material and furniture in the room together with the moisture production, air change rate and the ratio between the material surface area and the air volume. The materials active thickness, vapor permeability and moisture storage capacity, as well as the thickness of the boundary air layer are factors that determine the moisture buffering.

Moisture content in wood is expressed as a percentage of dry wood mass. Most hygroscopic properties in wood, including the wood surface – ambient air moisture exchange, are related to the hygroscopic moisture range where minimal capillary forces occur (Wood moisture content <30 %). The hygroscopic water is bound to the wood cells via hydrogen bonds, and its amount is limited by the number of sorption sites available and how many water molecules each site can hold. More energy is needed to release bound, as opposed to free, capillary water. As the bound-water content increases, the physical properties of the wood are altered: swelling, decrease in the mechanical strength, increase in thermal and electrical conductivity and higher rate of bound water diffusion (Siau, 1984).

In a hygrothermal simulation, Korsnes (2012) attempted to identify the magnitude of the latent heat exchange in a small bathroom under normal conditions. The comparison of case 1 with wood panels on the walls and ceiling to case 2 with solely impermeable surfaces shows huge advantages to the former. Not only are the values of RH lower and more stable, but there

is also an increase in indoor air temperature of 2.5 °C due to the latent heat. In a follow-up laboratory test conducted to verify the hygrothermal simulation, Nore (2014) subjected wood samples in a climate chamber to rapid increase in RH (from 20 % to 90 % RH). Thermography was used to measure the surface temperature change. In a few minutes, the exposed wood sample reached its maximum surface temperature nearly 2 °C higher than the reference sample covered in low-emitting PE-foil.

The latent heat is naturally user controlled in the sense that a space has to be occupied or employed, with a following moisture load, in order to be released. This has potential as local heating in spaces when it is actually needed. For instance, both kitchens, bathrooms and laundry rooms, are only occasionally used during the day. If the operating temperature of a room can be raised with 2 °C upon being occupied, the set temperature can be lowered accordingly when the room is not in use.

The latent heat of desorption may also be of practical use in building design. Desorption is the opposite process of sorption; here excess moisture in the wood is dried out by energy contribution from the ambient air. This may be applied to buildings which need cooling during the day in hot seasons. By airing the building during the night when the temperature is lower and humidity higher, humidity can accumulate in the indoor surfaces. During day time, this moisture will require heat from the indoor air to vaporize thus lowering the indoor temperature. A known problem to cabin owners in Norway, is the time it takes to heat the wood cabin during winter times; lot of energy is needed to firstly dry out the walls before the indoor temperature rises.

METHODOLOGY

This paper assesses the issues of moisture buffering and latent heat of sorption of CLT in two different ways; measurements under controlled conditions in experimental field facilities; and hygrothermal whole building performance simulation with WUFI[®]Plus. The test houses have been exposed to large moisture loads, 616 g/h and 1232 g/h over a 9 h 25 min. period, in an attempt to aggravate a response with as high RH as possible. The studied scenarios are presented in Table 1. Case I and II are conducted in multiple runs. Case III is only performed in module A, meaning the permeable hygroscopic module. The initial conditions differ in each case, and are here only approximately presented.

Table 1: Presentation of test cases and initial conditions

Case	Moisture load		Initial conditions				Experimental		Simulated	
	Diffusion rate [g/h]	Total load [kg]	Operative temperature [°C]	Indoor RH [%]	WME [%]	ACH [h ⁻¹]	A	B	A	B
I	616	5.8	20.2	23-24	7	0.5	x	x	x	x
II	616	5.8	20.1-20.5	32-37	7.4	0.3	x	x	x	x
III	1232	11.6	20.2-20.5	31	7.4	0.5	x		x	x

Field experiment



Figure 1: View of test the houses from northwest. Module

The field facilities consists of two identical test houses, module A and module B (see Figure 1) situated in a meteorological field, *Søråsfeltet*, affiliated to the Norwegian University of Life Sciences (NMBU) in Ås, Norway. The test houses are constructed of CLT made of spruce. The walls are made up 100 mm CLT and externally insulated with 100 mm mineral wool in the south and east directions, and 150 mm mineral wool in the west and north directions. There is a layer of weather resistive barrier between the CLT and insulation, and on the exterior side of the insulation, which can be seen in Figure 1. This barrier is vapour diffusion-open. The ceiling and roof consist of 140 mm CLT and 250 mm mineral wool insulation with a wind barrier in-between, and sheet metal roofing on top. The floor has 14 mm oak parquet over 22 mm chipboard and 100 mm mineral wool insulation. The modules are placed on top of 200 mm Rockwool with vapour barrier inhibiting any moisture to penetrate from the ground. The internal dimensions of the modules are 7.0 x 3.6 metres and 2.2 metres height from floor to ceiling. Table 2 shows the exact materials of the wall assembly.

The test houses do not fulfil the requirements demanded by the Norwegian Building Regulations (TEK 10) in terms of insulation, and is thus not comparable within these standards. Blower door tests ran in module A have shown that the air infiltration n is 1.63 and meets the national guideline requirements for residential houses with $n < 2.5$ (Olausen 2014).

Table 2: Wall assembly

Wall layer	Material
Surface coating	Module B: PE, 0,2 mm, $s_d=1500$
Indoor surface	Spruce CLT, 100 mm
Weather barrier	Tyvek: water resistant, diffusion open
Insulation	100/150 mm GLAVA mineral wool
Weather barrier	Tyvek, UV resistant



Figure 2: Interior view of module B where the walls and ceiling are upholstered in PE foil.

In module A the spruce walls and ceiling are kept exposed and untreated, in direct contact with the indoor climate. In module B the spruce surface has been upholstered with PE-foil to make the ceiling and walls impermeable and limit the effects of moisture buffering and latent heat (Figure 2).

The instrumentation inside the modules includes heat and ventilation flow control; registration of temperature and RH of air into and out the modules; wood moisture content sensors; and energy meter. The instrumentation system is limited to nine

Table 3: Measured parameters. The placement of the sensors is shown in Figure 3.

Module A	Specification	Module B
1 RH indoor	DT043 sensor Range 0-100% $\pm 1,5\%$	RH indoor
2 Extract temperature	DT043 sensor Range -50-100°C $\pm 0,5^\circ\text{C}$	Extract temperature
3 Air flow	Sensiron SDP	Air flow
4 Operative room temperature	MCP9700/01	Operative room temperature
5 Surface temperature, ceiling	Temperature sensor Range -40-125°C, $\pm 4^\circ\text{C}$	Surface temperature, ceiling
6 Surface temperature, north wall		Surface temperature, north wall
7 Surface temperature, south wall	DT043 sensor. Range 0-100%, $\pm 1,5\%$	RH outdoor
8 Surface temperature, floor	DT043 sensor. Range -50-100°C, $\pm 0,5^\circ\text{C}$	Temperature intake
9 Energy consumption	Energy meter	Energy consumption
10 A1 Surface temperature, RH, WME	Hygrotrac S-900-1, $\pm 0.4^\circ\text{C}$, $\pm 3.5\%RH$	B1 Surface temperature, RH, "WME"
11 A2 Extract temperature, RH, WME		B2 Extract temperature, RH, "WME"
12 A3 Surface temperature, RH, WME		

parameters in each test house. An additional five freestanding moisture sensors are mounted on small timber blocks of spruce and placed in the

test houses, three in module A and two in module B. Each of these sensors monitors the RH, ambient air temperature and wood moisture content. The 3rd sensor in module A is mounted directly on the CLT element of the south wall. Table 3 displays all the

measured parameters and Figure 4 depicts the floor plan.

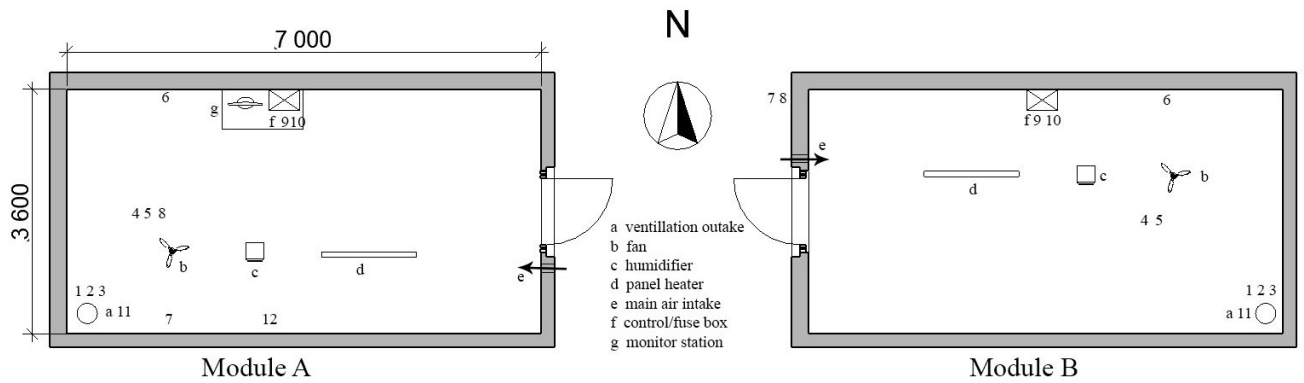


Figure 3: The ground plan of the modules and a schematic figuration of the instrumentation placement.

The indoor air temperature was held at 20°C using an electric heater with temperature control. The extract ventilation system supplies constant air change, controlled by differential pressure sensors. The ventilation is pre-set to $n = 0.5 \text{ h}^{-1}$ for both modules, in accordance with Norwegian building regulations (TEK 10), but later adjusted in Case 2. The moisture loads were introduced by ultrasonic evaporative humidifiers, each with a total capacity of 5.8 litres and diffusion rate 616 g/h. To prevent the humidity of being extracted straight out through the ventilation canal, a small table fan was placed on the floor to stir up the air and distribute the moist more evenly in the space. This fan was directed towards the floor to avoid disturbing the laminar boundary layer. (Figure 3) Some assumptions have been made regarding the experimental setup: the moisture load is applied with steady flow. The diffusion rate was measured in a laboratory and divided on the water container capacity to get the moisture load duration.

Simulation set-up

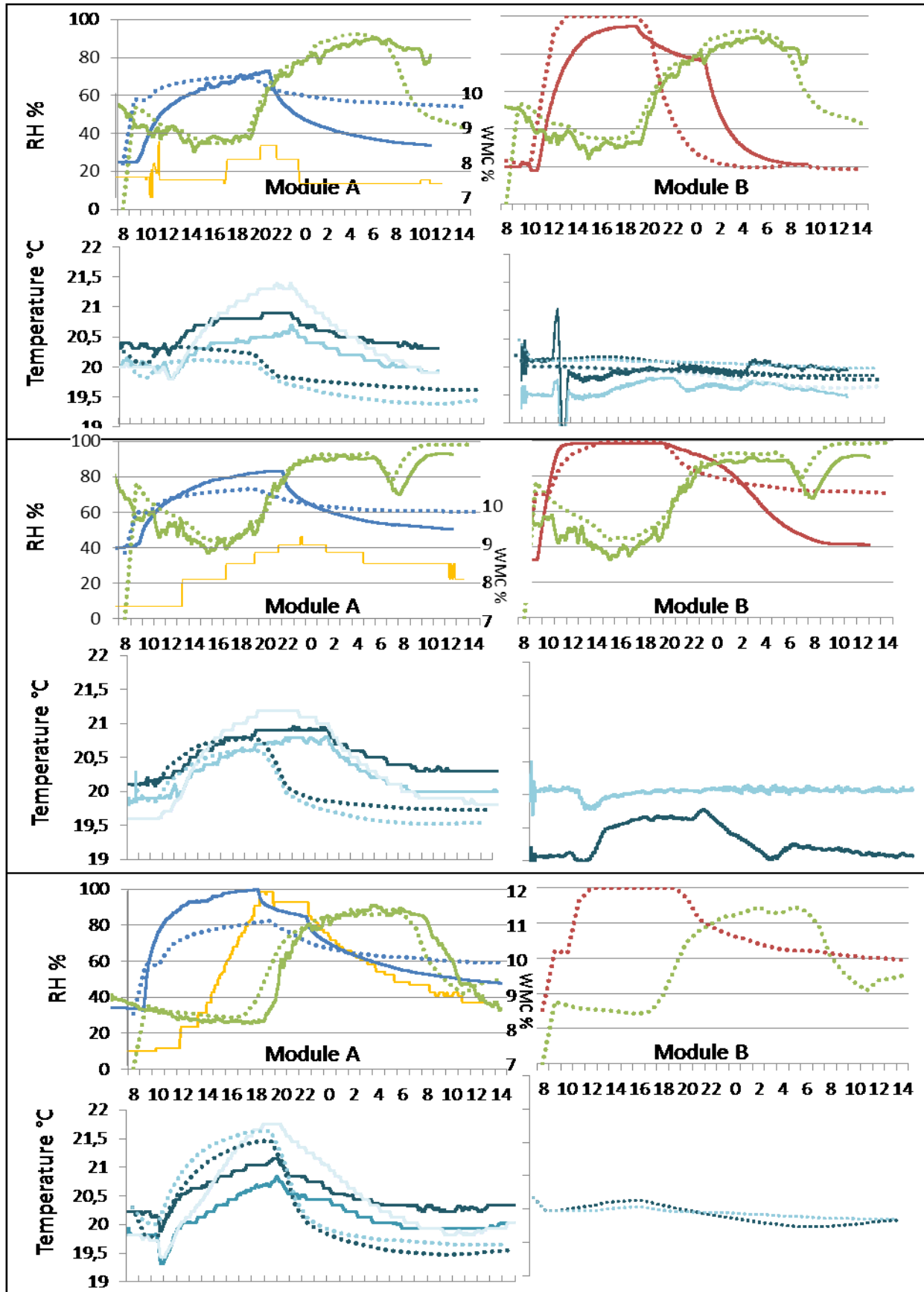
In the simulation part of this study, the hygrothermal building simulation software WUFI® Plus (2007) is used. This software is developed by Fraunhofer Institute IBP, and has been validated through experimental studies. The simulation cases are based on and designed after the real life test houses from the experimental study. The outdoor boundary conditions are the recorded weather data provided from the meteorological station in which the test houses are situated (Thue-Hansen & Grimenes 2014). The indoor initial conditions, including operating temperature, RH and wood moisture content, are set equal to the measured initial conditions from the equivalent experimental case.

RESULTS AND DISCUSSION

The results are presented in Figures 4-6, with the permeable cases on the left and the impermeable on the right. The experimental data is depicted with full line and the calculated results with a dotted. A summary of the complete results is presented in Table 4. The values are recorded with 1 minute intervals. A moving average data treatment of 10 steps have been applied to smoothen the all the curves. The exception is the temperature measurements from module B which have been treated with a 30 step moving average smoothing. The reason being an unsteady meter controller in this module making the recorded data flutter.

The RH curve starts rising as soon as the moisture is applied. The RH in the impermeable cases reaches 100 % in a short amount of time. The curves are steep, both increasing and decreasing. Under the permeable conditions, the RH has a lower interval, a gentler slope and delayed peak. In case 1, which is the first case conducted in the wood active module A, the initial RH is the same in both modules due to the fact that they both where dried out a long time ahead. In following experiments the initial RH differs with about 5 % less in the impermeable module, demonstrating clearly the hygroscopic inertia of wood. In Figure 4b the PE covered module B doesn't seem to reach 100 % RH, which has to do with the built-in hygostat in the humidifier kicking in. In case 4, which has the same setup, but with the built-in hygostat being disconnected, this curve looks like the B module RH curve in Figure 5b. The peak in RH in the permeable module is in all cases at the max (end point) of the moisture load. The wood moisture content also reaches its highest value when RH is max. The surface temperature curves follow the same path as the curves for wood moisture content, showing the effect of latent heat of sorption. After case 3 (last case) is conducted and the module is left closed, the wood moisture content reaches its initial state of 7.4 % 60 hours after the moisture load is fully applied.

There is a drop in temperature at the start of every case which is caused by the entrance door opening and shutting while launching the experiment. Temperature prior to this decrease is considered as the initial temperature, thus the increase in temperature due to the latent heat of sorption is quite conservatively estimated. The summarized Table 4 shows the initial/max temperatures from the ceiling surface sensor in the experimental tests. This curve was representative in all the cases, not being extreme either ways, as well as being given by WUFI. The temperatures from the different measurement points differ with at least 1 °C



4
ab
cd

5
ab
cd

6
ab
cd

Figure 4-6, a-d: Results from case 1-3 from top to bottom. The wood active module A is depicted on the left side and the PE-covered module B on the right side.

within each case. There are certainly some temperature differences from point to point due to air circulation and humidity not being distributed evenly. The latent heat effect from the south wall is higher in every case, compared to the other surfaces. It is reasonable to assume that the south walls are more dried out than the other surfaces by solar radiation, as well as being less insulated than the north wall. The increases in temperature due to latent heat lies around 0.5-1° C, not taking into account the temperature drop at the start. Nevertheless, there are clear trends regarding the permeable vs. impermeable cases when it comes to temperature rise.

Concerning the simulated cases; the accordance is quite accurate between the experimental and calculated impermeable cases. In the permeable cases however, there is more discrepancy. The max RH is too high in the simulations, and the RH decline to gentle compared to the measured cases. This problem might be linked to the values for the heat and moisture transfer coefficients used by the simulation program. Furthermore, the thickness of the CLT might cause the permeability to become too complex a process. The surfaces temperature curves returned from WUFI®Plus (mean surface and mean ceiling temperatures) do look more cohesive than the experimental results, as can be expected from an ideal computer simulation.

Table 4: Summary of the test results

Case			Moisture load				Experimental test						Simulation test			
#	Setup	Date	Ventillation rate [h ⁻¹]	Diffusion rate [g/h]	Duration [t]	Total load [litres]	Permeable			Impermeable			Permeable		Impermeable	
1	I	31.3.	0.54	616	09:25	5.8	initial	23.9	20.2	7.4	23.1	20.2	23.9	20.2	23.1	20.2
							max	75.4	20.9	8.6	98.1	20.2	70.4	21	100	20.2
							variance	+51.5	+0.7	+1.6	+75	0	+46.	+0.8	+76.9	0
2	II	11.4.	0.32/0.31	616	09:25	5.8	initial	37.3	20.1	7.4	32.4	20.5	37.3	20.1	32.4	20.5
							max	83.8	21	9.2	100	20.2	73.8	20.8	100	20.5
							variance	+46.5	+0.9	+1.8	+67.6	-0.3	+36.	+0.7	+67.6	0
3	III	15.4.	0.54	1232	09:25	11.6	initial	30.8	20.3	7.4			30.8	20.3	30.8	20.3
							max	97.1	21.2	12			82.3	21.6	100	20.3
							variance	+66.3	+0.9	+4.6			+51.	+1.3	+69.2	0
4	I	9.4.	0.53	616	09:25	5.8	initial	34	20.2	7.4	27.1	20.5	34	20.2	27.1	20.5
							max	74	20.4	8.8	100	20.5	72.4	20.3	100	20.5
							variance	+40	+0.2	1.4	+72.9	0	+38.	+0.9	+72.9	0

RH Temp. WMC RH Temp. RH Temp. RH Temp

Table 5 shows the energy demand for heating the modules as calculated in WUFI. Due to instrumentation failure, there is unfortunately no comparable experimental data to show the energy consumption. From these calculated figures, the reduction in heating demand for the permeable versus impermeable surfaces is around 10 %. When RH is the primary factor for ventilation, additional energy savings can be made by reducing the air exchange rate. In situations where humidifying/dehumidifying is necessary, exposed wood can help stabilize the environment and decrease this need. Another option for energy profit includes applying

moisture buffering to cooling strategies; moistened exposed wooden surfaces absorb heat from the ambient air during hot days.

Module/Case	1	2	3	4
A	11.4	6.4	7.6	11.3
B	12.4	7.5	10.2	12.7

Table 5: Sum of heating energy (kWh) as calculated by WUFI for the 30 h of each case.

CONCLUSIONS

The results from this paper show that the buffering effect from large areas of exposed wood surfaces helps keep the RH within a closer interval, with slower alteration upon moisture load being applied/removed compared to impermeable surfaces. The latent heat exchange gives rise to the indoor temperature and reduces energy transmission losses. There is a significant potential regarding exposed wood and indoor climate, especially in combination with a well-controlled HVAC system. For this to become practically applicable there is however still need for research and engineering.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was conducted within the research project Wood – Energy, Emission, Experience (WEEE). All participants are gratefully acknowledged. A thank to Florian Antretter and Fraunhofer IBP for great assistance. The financial assistance from Innovation Norway is greatly appreciated.

REFERENCES

- ANSI/ASHRAE. *Standard 55 - Thermal environmental conditions for human occupancy*.
- Arlan, L. G., Neal, J. S. & Vyszynski-Moher, D. L. (1999). Reducing relative humidity to control the house dust mite *Dermatophagoides farinae*. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 104 (4): 852-856.
- Edwardsen, K. I., Haug, T. & Ramstad, T. Ø. (2006). *Trehus*. 9. utg. ed. Håndbok / [Norges byggforskningsinstitutt]. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt. 333 s. pp.
- Geving, S. & Thue, J. V. (2002). *Fukt i bygninger*. Håndbok (Norges byggforskningsinstitutt : trykt utg.). Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Hameury, S. and Lundström (2003) Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign. *Energy and Buildings*, 36 (3): 281-292.

- International Energy Agency. (2014). *IEA*. 2014 [ONLINE] Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>. [Accessed 2014].
- ISO. 7730:2005 (*en*) *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*.
- Janssen, H. & Christensen, J. E. (2013). Hygrothermal optimisation of museum storage spaces. *Energy and Buildings*, 56 (0): 169-178.
- Karlsson, Jonathan (2012) Possibilities of using thermal mass in buildings to save energy, cut power consumption peaks and increase the thermal comfort. Licentiate thesis, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Lund, Sweden
- Korsnes, S. & Nore, K. (2012). Moisture buffering and the influence of exposed wooden surfaces on the indoor environment. Master thesis, Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway
- Kubler, Hans (1982) Effect of wood on humidities in homes. *Forest Products Journal*, Vol 32, No 6: 47-50.
- Nore, K. Englund F, Aurlien, T. and Nyrud, A.Q. (2014) Wood construction: Energy, Emissions and Experience. In: 10th Nordic symposium of building physics. Lund, Sweden June, 2014.
- Osanyintola, O. F. & Simonson, C. J. (2006). Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. *Energy and Buildings*, 38 (10): 1270-1282.
- Rode, C. & Grau, K. (2008). Moisture buffering and its consequence in whole building hygrothermal modeling. *Journal of Building Physics*, 31 (4): 333-360.
- TEK 10, (2010). Norwegian building regulations.
- TenWolde, A. & Pilon L. C. (2007) The effect of indoor humidity on water vapor release in homes. Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X, Atlanta, USA
- Thue-Hansen V. and Grimenes A.A. Meteorological data for Ås, Norwegian University of Life Sciences, 2014, Ås, Norway
- Olaussen, P. A. (2014) Master Thesis (In progress), Department of Mathematical Sciences and Technology, Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norway
- Toftum, J., Jorgensen, A. S. & Fanger, P. O. (1998a). Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin. *Energy and Buildings*, 28 (1): 1-13.
- Toftum, J., Jorgensen, A. S. & Fanger, P. O. (1998b). Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort. *Energy and Buildings*, 28 (1): 15-23.
- WUFI®Plus (2007) Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen, Germany.

3 TEORI OG BYGNINGSFYSISK GRUNNLAG

Samvirket mellom en bygningskropp og den omsluttende lufta er forårsaket av svært mange faktorer. Dette kapittelet beskriver fysikken som ligger til grunn for de prosesser som presenteres i konferanseartikkelen. Herunder faller transport og lagring av fukt og varme i luft og materialer, samt trevirkets oppbygging og fysikalske egenskaper. Varme- og fukttransport er en bundet og sammensatt prosess. Det ene inntreffer ikke uten at det andre påvirkes. For enkelthets skyld er likevel de to prosessene beskrevet i hvert sitt delkapittel.

Stoffet er for det meste hentet fra *Fukt i bygninger* (Geving & Thue 2002) og *Transport Processes in Wood* (Siau 1984).

3.1 FUKT

3.1.1 Luftfuktighet

Luften rundt oss har alltid et visst innhold av fukt i form av vanndamp. Denne fuktigheten angis enten som vanndamptrykket, absolutt eller relativt fuktinnhold. Vanndamptrykket er dét partialtrykket vanndampen alene utøver, ρ_v (Pa). Absolutt fuktinnhold, eller vanndampkonsentrasjon v , er mengden vanndamp i kilogram per kubikkmeter tørr luft (kg/m^3). Relativ fuktinnhold er forholdet mellom vanndampmassen x og massen tørr luft (kg/kg).

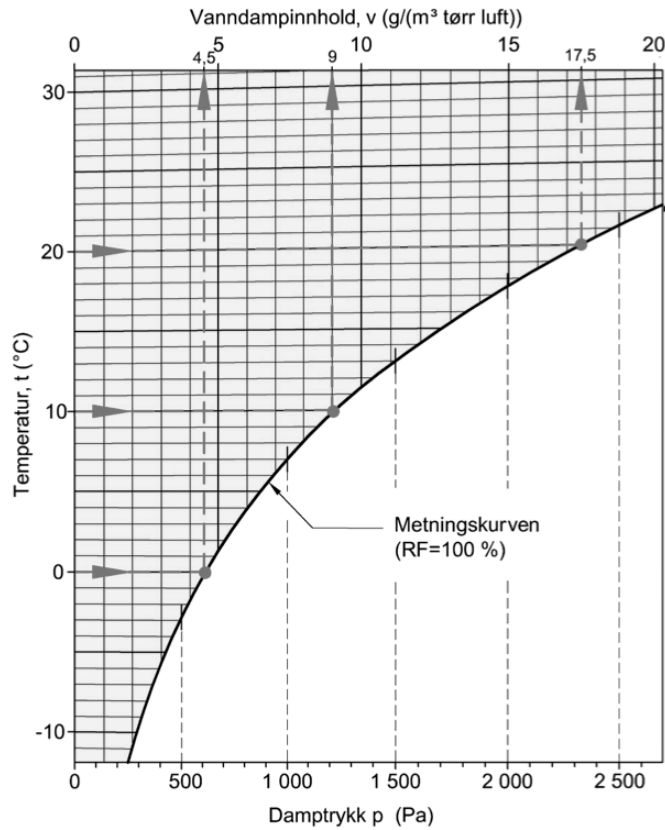
Ved enhver temperatur er det en øvre grense for hvor stort innholdet av vanndamp i lufta kan være. Denne øvre grensen kalles *metningsinnholdet* v_{sat} , eller *metningstrykket* ρ_{sat} , og øker med temperaturen. Vanligvis er vanndampinnholdet lavere enn denne grensen. Relativ fuktighet (RF) er forholdet mellom vanndampinnholdet v og metningsinnholdet v_{sat} , eller forholdet mellom vanndamptrykket ρ_v og metningstrykket ρ_{sat}

$$\phi = \frac{v}{v_{sat}} = \frac{\rho_v}{\rho_{sat}} \quad (1)$$

I bygningsfysisk sammenheng er RF gjerne gitt i prosent

$$RF = \phi \times 100\%$$

Når $\rho_v = \rho_{sat}$ er luften fullstendig mettet og RF er 100 %. Dette punktet kalles duggpunktet, og mer tilførsel av vanndamp ved samme temperatur vil resultere i kondensering.

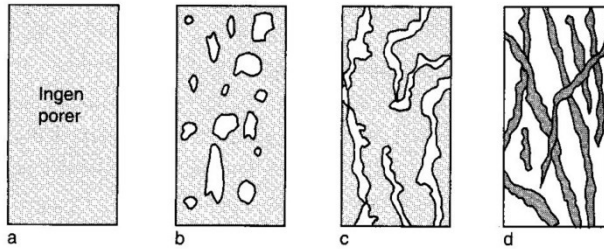


Figur 7: Mollierdiagram, sammenhengen mellom temperatur og fuktinnhold/damptrykk (Edvardsen et al. 2006)

Ettersom metningstrykket synker når temperaturen faller, vil kjøling av fuktig luft føre til at den overflødig vanndampen utfelles. Dette er tilfelle med kondens på kalde flater som vinduer og speil i varme, fuktige(re) rom. Figur 7 er et luftfuktighetsdiagram som viser sammenhengen mellom lufttemperatur og fuktinnhold.

3.1.2 Fukt i materialer

Materialer som får kontakt med fukt i væske eller dampform, vil oppta mer eller mindre av fukten. Unntaket er materialer med lukkede porer, som metall og glass. Poresystemet i materialene er avgjørende for fuktopptak og transport. Store porer bidrar til raskere transport gjennom materialet, mens små porer medfører at vannet bindes fastere til materialet. Porediameteren kan variere fra flere millimeter til molekylær størrelse. I fuktsammenheng er det en naturlig nedre grense ved vannmolekylets diameter, ca. 0,3 nm. Poresystemet defineres ut ifra materialstrukturen (Figur 8 og Tabell 6).



Figur 8 a-d: Forskjellige typer materialstruktur og poresystemer (Geving & Thue 2002)

Tabell 6: Materialstruktur og kjennetegn

Struktur og poresystem		
a	Ingen porer	Kompakte, ikke-porøse og ikke-hygroskopiske materialer. Metall, glass, enkelte plastmaterialer
b	Kontinuerlig faststoff med lukkede porer	Isolerte porer i materialet gir begrenset evne til fuktopptak. Skumglass, ekspandert polyuretan
c	Kontinuerlig faststoff og poresystem	Både det faste stoffet og poresystemet danner kontinuerlige strukturer. Betong, tre, fleste byggematerialer
d	Diskontinuerlig faststoff	Poresystemet er kontinuerlig, mens det faste stoffet danner en diskontinuerlig struktur. Fibermaterialer, sand, sement.

Materialer som kan binde fukt i porene (b, c og d) betegnes som hygroskopiske. Maksimal mengde vann et materiale kan holde, bestemmes av porøsiteten n

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

der ρ er lik romdensiteten og ρ_{sol} er densiteten av materialets faststoff. Porøsiteten fra materiale til materiale varierer mye, fra 0 % i metaller til over 99 % i enkelte letteplastbaserte materialer. Det samme gjelder for poreoverflaten; fra null til flere hundre m^2 per gram av materialet. Tre, som er ganske porøst materiale, har en poreoverflate på ca. $30 m^2$ per gram.

3.1.3 Fuktinnhold i materialer

Fuktinnhold i et materiale er den totale mengden fritt vann, det vil vann som kan fordampe ved en viss temperatur. Fukt opptrer i materialer både i fast, flytende og dampform avhengig av omgivelsesbetingelsene. Fukten som fins i porene kan angis på ulike vis, på samme måte som fuktinnholdet i luft kan

- fuktmasse/tørrestoffmasse, u (kg/kg)
- fuktmasse/materialvolum, w (kg/m³)
- fuktvolum/materialvolum, ψ (m³/m³)
- metningsgrad, S (%)

Selv om intervallet mellom helt tørt og helt vannmettet materiale er bredt, er det i praksis noen få avgrensede delområder som har betydning for materialelegenskapene:

- det hygroscopiske området
- det kapillære området
- overmetningsområdet

Disse fuktinnholdsområdene er typiske for hygroscopiske, kapillære byggematerialer som tre, betong og mørtel. For enkelte isolasjonsmaterialer er bare overmetningsområdet aktuelt, mens folier bare har det hygroscopiske området.

Det hygroscopiske området tilsvarer et fuktinnhold i likevekt ved lagring i fuktig luft. Høyere RF gir høyere fuktinnhold. Den øvre grensen er i prinsippet ved 100 % RF, men i praksis er det ikke mulig å opprettholde et klima med så høy RF. Dermed er det vanlig å sette øvre hygroscopiske grense til 95-98 % RF.

Ved ytterligere økning av fuktinnholdet, nås punktet som kalles *kritisk fuktinnhold*, der porevannsystemet er kontinuerlig og fukttransport ved vannstrømning kan foregå. Ved lavere fuktinnhold er det damptransport som er den dominerende fukttransportmetoden, mens det over denne grensen altså er vannstrømning som dominerer.

Ved *kritisk fuktinnhold* er det samtidig økt risiko for redusert bestandighet og funksjonalitet utover akseptabelt nivå. Området fra øvre hygroscopiske grense til kapillær metning, kalles det kapillære området. Dersom materialet står i kontakt med fritt vann over lengre tid, kan fuktinnholdet øke til kapillær metning.

Overmetningsområdet er området mellom kapillær og full metning. For å oppnå full metning, må all innesluttet poreluft drives ut. Dette kan gjøres i et laboratorium ved for eksempel vakuumbehandling eller koking.

3.1.4 Fuktbindinger

Det skilles gjerne mellom kjemisk og fysisk bundet vann. Kjemisk bundet vann har så sterk binding til materialet at det normalt ikke inkluderes i fuktbetragtninger. Fukt i materialer regnes som det fysikalsk bundne, fordampbare, vannet.

Når vannet bindes til et materiale, avgis det samtidig en varmemengde. Denne varmen, kalt sorpsjonsvarme, er større når bindingen er sterkere. (Mer om sorpsjonsvarme i kapittel 3.4.6)

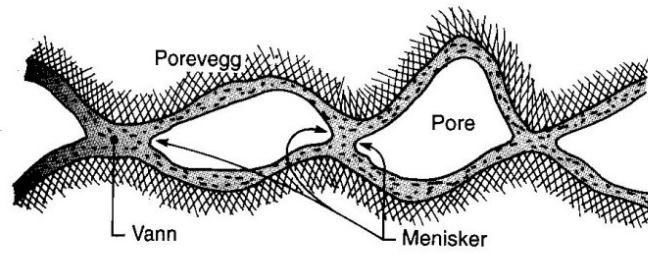
De fysikalske bindingsformene kan deles inn i tre grupper

- osmotiske bindinger
- adsorptive bindinger
- kapillærkondensasjon

Osmotiske bindinger skyldes salter til stede i materialet, som medfører redusert vandamptrykk i materialet. Mengden salter er vanligvis liten, og i kombinasjon med at det er vanskelig å skille mellom osmotiske og adsorptive bindinger, ser man bort ifra denne effekten.

Adsorptive bindinger skyldes adhesjonskrefter (tiltrekningskrefter) mellom overflatemolekylene i materialet (særlig poreoverflaten) og vann- eller vandampmolekylene. I utgangspunktet kan hvilke som helst molekyler bli adsorbent på poreveggen, men vannmolekylets dipolaritet gjør at disse fanges og holdes lettere enn andre stoffer. Det første laget av H₂O-molekyler som festes til poreveggen, holdes av en kraft tilsvarende 1 000 – 2 000 MN/m², og får en tilstandsform som minner om en seigtflytende væske. For å frigjøre disse molekylene, må det enorm energitilførsel til. De neste lag av molekyler får langt svakere bindingskrefter. De fleste bygningsmaterialer kan adsorbere opptil 30 molekyllag, som tilsvarer en fukthinne med tykkelse 10 nm på poreveggen. Mengden adsorptivt bundet vann avhenger av den totale poreoverflaten.

Adsorpsjon står for oppfuktingen av et materiale i startfasen. Kapillærkondensasjon overtar etterhvert, når de to fuktlagene på motsatte porevegger møtes i enkelte punkt og danner såkalte menisker (Figur 9). På grunn av krumningene i væskeoverflatene oppstår det lavere metningstrykk over meniskene, som dermed får større tiltrekningskraft på frie vandampmolekyler i porelufta. Kapillærkondensasjon gir først for alvor utslag når RF når 80-90 %.



*Figur 9: Menisker og kapillærkondensasjon i porer
(Geving & Thue 2002)*

3.2 FUKTTRANSPORT

Fukt kan transporteres både i damp- og væskeform, der begge transportformer kan inntreffe samtidig. Materialers evne til å ta opp og avgi fukt styres av potensialforskjeller (gradienter). Tabell 7 lister opp de transportmekanismene som foregår i praksis og hvilke potensial som driver de.

	Transportmekanisme	Drivpotensial
Vanndamptransport	Dampdiffusjon	Damptrykk
	Effusjon	Damptrykk
	Løsningsdiffusjon	Damptrykk
	Konveksjon	Luftas totaltrykk
Væsketransport	Kapillærledning	Kapillære sugekrefter
	Overflatekryping	RF
	Dreneringsstrømning	Tyngdekraften
	Hydraulisk strømning	Væsketrykk
	Elektrokinese	Elektriske felt
	Osmose	Ionekonsentrasjoner

Tabell 7: Fukttransportmekanismer og deres drivpotensial

De transportmekanismene som er aktuelle og mulige å behandle (beregningmessig) i sammenheng med bygningsfysikk, er dampdiffusjon, kapillærtransport i materialet og konveksjon. Overflatekryping skyldes adsorpsjonskrefter og er relevant her, men behandles som en del av dampdiffusjonen ved fuktinnhold i det hygroskopiske området.

3.2.1 Fuktkonveksjon

Fuktkonveksjon er vanndamptransport med luftstrøm fra høyt lufttrykk til lavere lufttrykk. Konveksjon kan under rette forutsetninger føre til transport av store luftmengder, og dermed også store mengder vanndamp. Konvektiv fukttransport er forbundet med risiko for bygningstekniske problemer drevet av lufttrykksforskjeller over bygningsdeler. For denne oppgaves betydning, vil fuktkonveksjon først og fremst bidra til omrøring og fordeling av fukt i volumet ved at varm, fuktig luft strømmer mot kaldere flater.

3.2.2 Vanndampdiffusjon i luft

Vannmolekyler i gassfase har høy hastighet, noe som medfører at vanndamp i et avgrenset rom etter en tid fordeler seg jevnt i det tilgjengelige volumet. Forskjeller i vanndampens partialtrykk jevnes gradvis ut. Diffusjon kalles transporten av damp i retning lavere vanndamptrykk. Under isoterme forhold uttrykkes netto damptransport i luft via diffusjon ved Ficks diffusjonslov

$$g = -D_p \cdot \nabla p_v = -D_v \cdot \nabla v \quad (3)$$

der g er dampfluks ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$), ∇p_v er gradienten i vanndampens partialtrykk (Pa/m), ∇v er gradienten i vanndampkonsentrasjonen (kg/m^4), D_p er vanndampens diffusjonstall i luft basert på damptrykk ($\text{kg}/(\text{m s Pa})$), og D_v er vanndampens diffusjonstall i luft basert på dampkonsentrasjon (m^2/s).

Diffusjonstallet D avhenger av sammenstøtene mellom molekyler (både kollisjonen mellom damp- og luftmolekyler, og mellom dampmolekylene innbyrdes), og øker med økende molekylhastighet og økt fri veilengde. Ved konstant temperatur avhenger dampfluksen av diffusjonstallet og endring i damptrykk eller konsentrasjonen.

3.2.3 Vanndampdiffusjon i materialer

Dersom man plasserer et tørt, porøst materiale i fuktig luft, vil vanndampmolekyler diffundere inn i materialporene. Med tiden blir vanndampkonsentrasjonen i poresystemet lik vanndampkonsentrasjonen i luften; fuktinnholdet i materialet innstiller seg i likevekt med omsluttende luft. Dersom materialet i utgangspunktet inneholder mer fukt enn luft, vil vanndampmolekylene diffundere motsatt vei, ut av materialet.

Idet damp trenger inn i et materiale, vil diffusjonstallet reduseres fordi den frie luftmengden blir redusert. I porer med radius større enn ca 10^{-6} m skjer diffusjonen som i fri luft. I porer som har mindre radius enn dampmolekylene frie veilengde (ca 40×10^{-9} m) bestemmes ikke molekylbevegelsene av sammenstøt mellom molekyler, men av sammenstøt mot poreveggene. Den transporterte dampmengden bestemmes av antallet molekyler som treffer poreåpningen, altså dampens partialtrykk og den midlere molekylhastighet. Denne transportmekanismen kalles effusjon, og det drivende potensialet kan uttrykkes ved p_v/T . For porestørrelser mellom de ovennevnte grensene, er begge fukttransportmekanismene av betydning. Men ettersom vanndamptrykker drivpotensial for begge, kan de i praktisk bygningsfysikk betraktes som ett.

Fukttransporten i dampfasen kan uttrykkes med vanddamppermeabiliteten for materialet:

$$\delta_p = \frac{D_p}{\mu} \quad (4)$$

der μ er relativ fuktmotstand, som bestemmes av blant annet det frie gjennomstrømningstverrsnittet i porene. Denne faktoren er uavhengig av temperaturen, men antas å den øker når fuktinnholdet øker og poresystemet fylles med vann i væskeform.

3.2.4 Væsketransport

Ved fuktinnhold i det kapillære området, blir væsketransport dominerende og større enn vanddamptransport. Væsketransporten skjer ved en kombinasjon av overflatekryping og kapillærledning. Samlet væsketransport g_w beskrives gjerne som en potensialstrøm med fuktinnholdet w som drivpotensial og en transportkoeffisient D_w som varierer med fuktinnholdet:

$$g_w = -D_w(w) \cdot \nabla w \quad (5)$$

der g_w er væskestrømtetthet ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$), ∇w er gradient i fuktinnhold (kg/m^3 per m), og D_w er fuktdiffusivitet (m^2/s). Denne ligningen tar ikke høyde for at D_w varierer avhengig av om det er snakk om vanntransport ved fri oppsuging eller omfordeling av oppsugd vann i materialet.

Darcys lov for laminær strømming i vannmettede materialer beskriver også væsketransport i porøse materialer:

$$g_w = K_1 \cdot \nabla s \quad (6)$$

Der K_1 er permeabilitetskoeffisient ($\text{kg}/(\text{mPas})$) og s er kapillært undertrykk (Pa). Permeabilitetskoeffisienten er tilnærmet konstant i et vannmettet materiale, er den sterkt avhengig av fuktinnholdet ved lavere fuktinnhold.

Poreradiens størrelse har innvirkningen på kapillær fuktvandring. Svært liten poreradie (noen få nm) gir liten sugeshastighet og dermed svært små vannmengder som transporteres. Ved store porer blir sugekraften så liten at man i praksis ser vekk ifra den kapillære virkningen (øvre grense på ca 1 mm).

3.3 VARMETRANSPORT

Temperatur er et uttrykk for molekylene energitilstand, og der det er temperaturforskjell vil det oppstå transport av energi fra høyere til lavere energinivå. Det skilles mellom de forskjellige varmetransportmekanismene

- konduksjon
- konveksjon
- stråling

Varme kan også overføres ved entalpi-transport (strømning av gass eller væske) og faseendringer (latent varme).

3.3.1 Konduksjon

Ved konduksjon brer varmen seg gjennom stoff (både fast stoff, væske og gass) ved molekylbevegelser. Varmere molekyler med større kinetisk energi, overfører noe av denne til kaldere, energifattigere molekyler gjennom sammenstøt. Varmetransporten ved konduksjon beskrives gjerne med Fouriers varmeledningslov

$$q_x = \frac{dQ_x}{dA \cdot dt} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (7)$$

der q_x er varmestrømstettheten ($J/m^2 \cdot s$), dQ_x varmemengden (J) som strømmer gjennom flaten med arealet dA (m^2) i løpet av tiden dt (s). $\partial T/\partial x$ (K/m) er temperaturgradienten, og λ angir termisk konduktivitet ($W/(m \cdot K)$) (materialavhengig). Termisk konduktivitet varierer i mange materialer i de ulike akseretningene. For porøse materialer, er den avhengig av porøsiteten der den øker med økt fuktinnhold.

I materialporer skjer egentlig varmeoverføring både via konduksjon, konveksjon og stråling. For praktiske hensyn fastsettes λ ved målinger der man beandler porøse materialsjikt som homogene sjikt, og regner all varmetransport som konduktiv.

3.3.2 Konveksjon

Konveksjon betegner varmeoverføring som skjer mellom en overflate og et strømmende fluid når disse har ulik temperatur. Karakteristisk her er at partikler eller molekyler i mediet forflyttes. Denne typen varmetransport er en sammensatt prosess der både grensesjiktet ved materialoverflaten og fluidets strømning bidrar til varming/kjøling. Konveksjon avhenger av fluidets art, tilstand, temperatur og strømningsform, samt av overflatens temperatur, orientering, form, ruhet og dimensjon. I bygningsfysikk er fluidet som regel luft. Det skilles mellom fri og tvungen konveksjon. Fri konveksjon drives av oppdriftskrefter på grunn av temperaturforskjeller, mens tvungen konveksjon skyldes ytre påvirkning som vind eller

mekanisk ventilasjon. Utformingen av mekanisk ventilasjon vil i stor grad bestemme hvordan luften i et rom strømmer. Nærmest overflater regner man likevel med fri konveksjon. Her er luftstrømmen mye mindre enn ellers i rommet og lufthastigheten nesten null. Dette skyldes innerste luftlaget som nærmest kleber til overflaten og danner det *laminære grensesjiktet*. Dette medfører at både fukt- og varmestrøm bremses kraftig opp i overgangen mellom luft og overflate.

Varmetransporten ved konveksjon q_{cv} (W/m^2) fra en materialoverflate til et fluid er gitt ved

$$q_{cv} = h_c \cdot (T_s - T_a) \quad (8)$$

Der T_s og T_a er overflatens og fluidets temperatur (K), og h_c er konvektivt varmeovergangstall ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$).

3.3.3 Stråling

Stråling er elektromagnetiske bølger som brer seg med lysets hastighet. En overflates utstråling skjer over et spekter som avhenger av flatens temperatur, der høyere temperatur gir kortere bølgelengder. Vi skiller i bygningsfysikken mellom langbølget (omgivelsestemperatur) og kortbølget (sol-) stråling. Varmestråling kan skje gjennom de fleste gasser, og enkelte væsker og faste stoffer. I motsetning til konveksjon og konduksjon, kan stråling foregå i vakuum. Emisjonen (varmeutstrålingen) fra en overflate skjer i alle retninger, og i alle flater, hulrom og porer. Den totale emisjonen E (W/m^2) er gitt ved

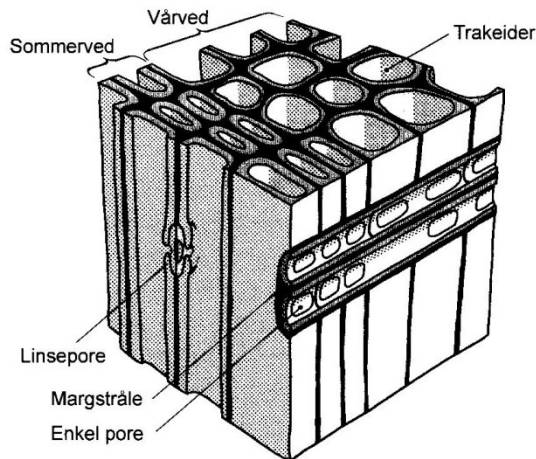
$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (9)$$

der ε er overflatens emissivitet ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), σ er Stefan-Boltzmanns konstant ($= 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$) og T er overflatens temperatur.

3.4 TRE

3.4.1 Struktur og oppbygging

Treet har en svært komplisert og inhomogen oppbygging, med store variasjoner innenfor både treslag og enkelttre. Treets viktigste kjemiske sammensetning utgjøres av cellulose (skjelett), hemicellulose (nett) og lignin (kittstoff). Sammen danner disse en fiberstruktur av langstrakte celler.

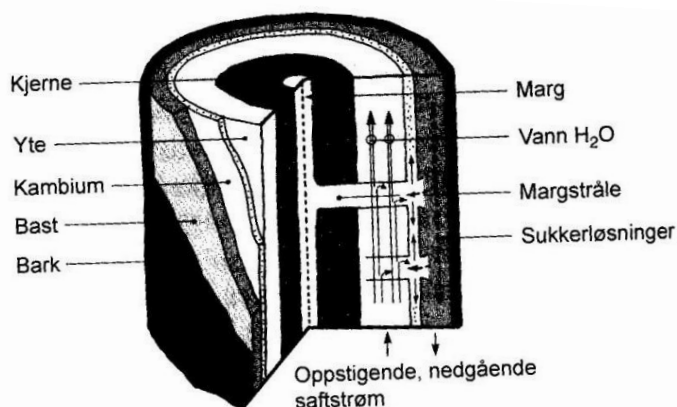


Figur 10: Fiberstrukturen i bartrær
(Edvardsen et al. 2006)

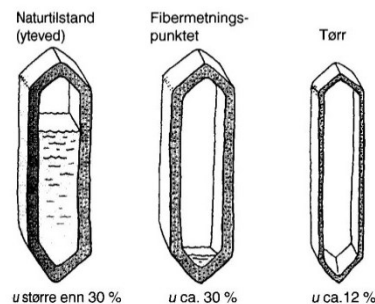
Trakeidene går i trevirkets lengderetning og har som formål å transportere vann fra røttene til trekrona, samt stive av veden. I bartrær utgjør trakeidene 95% av treets volum. Hos gran er disse fibre 2-5 mm lange, med et tverrmål på 1/100 av lengden. Trakeidene er ferdig utviklet etter noen få uker, og er etter vekstperioden for døde celler å regne. På grunn av ulike funksjoner, er trakeidene noe ulikt utformet. De lyse cellene som dannes om våren har tynne vegger og store hulrom for å kunne transportere væske. De mørkere cellene som vokser om sommeren, skal stive av veden og har derfor tykkere vegger og mindre hulrom. (Norsk treteknisk institutt)

Fargeforskjellen mellom vår vårveden og sommerveden gjør årringene synlige. Bredden på vårveden varierer med klima, mens sommerveden er jevn og upåvirket. Den nye veden dannes i det levende cellelaget kambium, som ligger mellom basten (ansvarlige for transport av næring fra nålene/bladene nedover) og veden. Kjerneveden er den innerste og eldste delen av treet. I mange sorter er den ikke nødvendig for tilstrekkelig vannforsyning, og blir satt ut av funksjon. I gran kjennetegnes kjerneveden ved et noe lavere vanninnhold enn yteveden. Celler som går tvers på trestammen, margstråleceller, leder byggestoffer fra basten innover.

Porer mellom cellene muliggjør væsketransport. Mellom levende celler er det enkle porer, mens døde celler er forbundet med linseporer (Edvardsen et al. 2006).



Figur 11: Tressnitt og væskestrøm
(Edvardsen et al. 2006)



Figur 12: Fuktinnholdet u , % av tørrvekt
(Edvardsen et al. 2006)

3.4.2 Fuktinnhold

Fuktighet i tre eksisterer i to former: fritt og bundet vann. Fritt, eller kapillært, vann finnes i flytende form i cellehulrommene i treet. Bundet, eller hygroskopisk, vann er knyttet til cellulosen i celleveggene med hydrogenbindinger. Summen av fritt og bundet vann er trevirkets fuktighet, som angis i prosent av trevirkets vekt i absolutt tørr tilstand. I en tørkeprosess vil først det frie vannet fordampe. Når det frie vannet er borte er det kun igjen fukt i celleveggene, og treet fuktighet er da på ca. 30 %. Denne tilstanden kalles fibermetningspunktet (Figur 13).

Fibermetningspunktet er en kritisk verdi; fuktbevegelser oppstår når fuktinnholdet er lavere enn dette punktet. Utvidelse av trematerialet, kalles svelling, mens minkingen kalles krymping. Ved fuktendringer endrer celleveggene dimensjon. Fuktbevegelser gir størst utslag i tangentiell retning. Nesten alle de fysiske egenskapene hos tre er sterkt påvirket av fuktinnholdet. Når innholdet av bundet vann øker vil også diffusjonsraten (for bundet vann) øke, den mekaniske styrken reduseres, og termisk og elektrisk konduktivitet øker. Alle disse endringene er lineære frem til celleveggene er mettet. Etter fibermetningspunktet vil ikke økt fuktinnholdet påvirke disse egenskapene nevneverdig.

Fuktkapasiteten til et materiale beskriver endringen i materialets fuktinnhold ved endring i den omsluttende luftas fuktinnhold. Figur 13 viser fuktkapasiteten for treverk som funksjon av RF. Fuktkapasiteten varierer svært mye med fuktinnholdet. Som regel er den høy ved svært lav og svært høy RF.

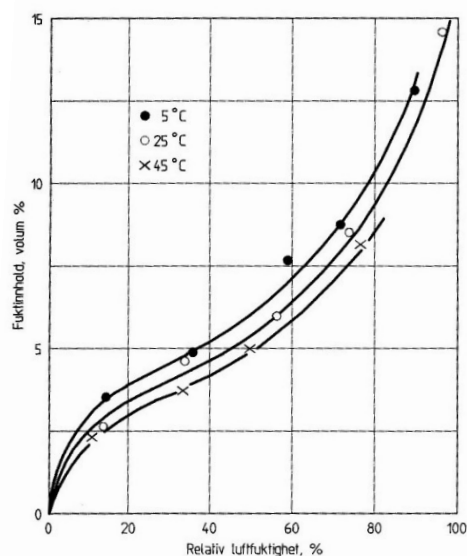
Det er en klar sammenheng mellom styrke og densitet. I absolutt tørr tilstand har celleveggen hos alle treslag tilnærmet samme densitet (1560 kg/m³). Dermed er det forholdet mellom cellevegg og hulrom som avgjør densiteten. Hos bartrær er densitet styrt av forholdet mellom sommerved og vårved. Høyere andel sommerved med tykkere cellevegger, gir høyere densitet. I tørr tilstand har norsk gran en gjennomsnittlig densitet på 430 kg/m³, og ved 12 % fuktinnhold omkring 460 kg/m³.

3.4.4 Sorpsjon

Sorpsjon er samlebetegnelsen på fuktutveksling mellom materialer og omsluttende luft. Absorpsjon og adsorpsjon er opptak av fukt fra luften rundt, mens desorpsjon er fuktavgivelse. Adsorpsjon er fuktopptaket som skjer kun i materialoverflaten, mens absorpsjon handler om fukten som går inn i volumet. I praksis er det vanskelig å skille mellom disse. (Time 1998)

3.4.5 Likevektsfukt og sorpsjonsisotermen

Trevirke er et hygroskopisk noe som betyr at med tiden vil treet innstille seg på en likevektsfuktighet med den omsluttende luften. Likevektsfuktigheten i trevirket øker med økende RF i luften, og er ellers i mindre grad påvirket av temperatur og trets tørkehistorikk. Forholdet mellom RF og likevektsfuktigheten ved en gitt temperatur refereres til som sorpsjonsisoterm. (Figur 14)

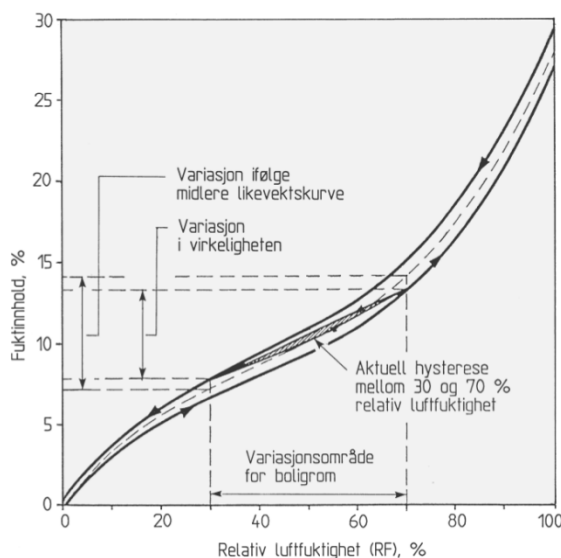


Figur 14: Sorpsjonsisoterner for gran ved forskjellige temperaturer (Geving & Thue 2002)

Sorpsjonsisotermen har en relativ sterk stigning i starten, eller ved de laveste fuktinnholdene.

Dette tilsvarer de første adsorberte molekyllagene der bindingskreftene er svært store. Stigningen avtar deretter og et stykke er likevektsfukten omtrent proporsjonalt økende med RF. Her er fuktopptaket hovedsakelig avhenging av dampmolekylene. Ved høy RF begynner kurven igjen å stige på grunn av at kapillærkondensasjon kommer inn i bildet. Sorpsjonskurvene er eksperimentelt bestemt.

Likevektsfuktigheten i treet avhenger også av om trevirket oppfuktes eller tørkes. Ved enhver bestemt RF vil trefuktigheten ved absorpsjon (oppfukting) bli lavere enn ved desorpsjon (uttørking). Dette fenomenet kalles hysteres. Ved vekslende RF følger likevektsfuktigheten en overgangskurve som ligger mellom absorpsjon- og desorpsjonsisotermene. Hystereseffekten fører til redusert forskjell i trefukten mellom to nivåer. (Figur 15)



Figur 15: Hysteres, absorpsjonsisoterm og desorpsjonsisoterm (Geving & Thue 2002)

Likevektsfuktigheten trevirket får i den ferdige bygningen, avhenger av konstruksjonen den brukes i og hvilke type lokale det brukes i. Den er i høyeste grad variabel, spesielt i takt med sesongvariasjonene i luftens fuktinnhold.

3.4.6 Latent sorpsjonsvarme

Vann i trevirke følger normalt de klassiske termodynamiske lovene. Det innebærer at faseendring mellom damp og væske medfører fordampings-/kondensasjonsvarme. Når vandampmolekyler absorberes i trevirke, frigjøres energi tilsvarende kondensasjonsvarme for vann. Og motsatt; når vandampmolekyler desorberer fra treet kreves en fordampingsvarme For vann utgjør denne energien 2477 kJ/kg ved 20 °C.

Vannmolekyler som er bundet til celleveggen er analogt med vann i fast fase (is) som har enda lavere entalpi enn væske. Energien som kreves for å løsrive disse molekylene er langt høyere enn fordampingsvarmen (Time 1998).

3.4.6 Termiske egenskaper

Tre har lav varmeledningsevne sammenlignet med andre materialer. Isolasjonsevnen avhenger av densiteten, der lavere densitet isolerer bedre. Varmeledningsevnen er proporsjonalt stigende med vanninnholdet og temperaturen. Langs fiberretningen er varmeledningen 2-3 ganger så stor som på tvers. For isolasjonen er det naturligvis omvendt.

Varmekapasiteten til tre er også avhengig av vanninnholdet og temperaturen. Ved 17 °C har tørt trevirke en varmekapasitet $c = 1,2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$, mens tre med et fuktinnhold på 12 % har $c = 1,6 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ (Glass & Zelinka 2010)

3.4.7 Permeabilitet

Fukttransport i tre inntreffer som væskestrøm (over fibermetningspunktet) og som diffusjon (hygroskopisk område). Diffusjonen i det hygroskopiske området foregår som dampdiffusjon i porene, eller diffusjon av bundet vann gjennom celleveggene. Ficks diffusjonslover (3) brukes gjerne for å beskrive fukttransporten i tre, til tross for at det er bred enighet om at diffusjon ikke er den eneste transportmekanismen i det hygroskopiske området.

3.4.8 Massivtre

Massivtreelementer er lameller satt sammen til elementer ved hjelp av lim, skruer, spiker, dybler eller strekkstag. Til bygningsformål er det helst anvendt krysslimte og tredyblede elementer. Massivtreelementenes historie begynte med trebruer på 70-tallet. Tidlig på 90-tallet ble de tatt i bruk til bygningsformål ved sveistiske universitet. I dag brukes elementene som etasjeskillere, bærende vegger, tak og andre konstruksjonsdeler.

Man har sett mye massivtre brukt i bygging de siste årene. Foruten å gi mange muligheter og høy grad av fleksibilitet, er massivtre et fornybart materiale med gode miljøegenskaper. Trematerialer bruker lite fossil energi i produksjonen, har lang levetid og binder samtidig store mengder CO₂ gjennom sin levealder (Trefokus 2014).

Testhusene på Søråsjordet består av krysslimte massivtreelementer. Her ligger lamellene lagvis i 3-9 lag, der hvert lag er krysslågt i forhold til det underliggende. Limet som brukes er diffusjonsåpent, og påvirker dermed ikke fukttransporten gjennom materialet.

4 KONKLUSJON

Det er enighet om betydningen av innendørs luftfuktighet når det gjelder å opprettholde en komfortabel, sunn og varig bygning. Ved å utnytte fuktbufring og latent varme i eksponerte treoverflater er det muligheter for å ivareta et godt inneklima samtidig som samlet energibehov reduseres.

Eksperimentet i konferanseartikkelen viste at testmodulen med innvendig trekledning klarte å dempe de verste svingningene i luftfuktigheten. Der RF umiddelbart føk til 100 % i modulen med tett overflate, nådde den 70-80 % i modulen med trekledning. I tiden mellom fuktpåkjenningene ser man også at RF er vesentlig lavere i modul B (< 30 %) enn i modul A (35 %) der treverket avgir fukt til rommet. En temperaturøkning i treoverflatene på 1–1,5 °C registreres som følge av latent varme i forbindelse med vannets faseendring fra damp til væske. Simuleringene viser også at det er omtrent 10 % å spare på oppvarmingsbehovet i modul A sammenlignet med modul B.

Sammenligningen mellom målingen og simuleringen viser at det er større samsvar mellom resultatene for tilfellene i modul B. Den kan tyde på at fuktutvekslingen mellom inneluften og tykke massivtreelementer er for komplekst for simuleringsprogrammet å håndtere.

5 VIDERE ARBEID

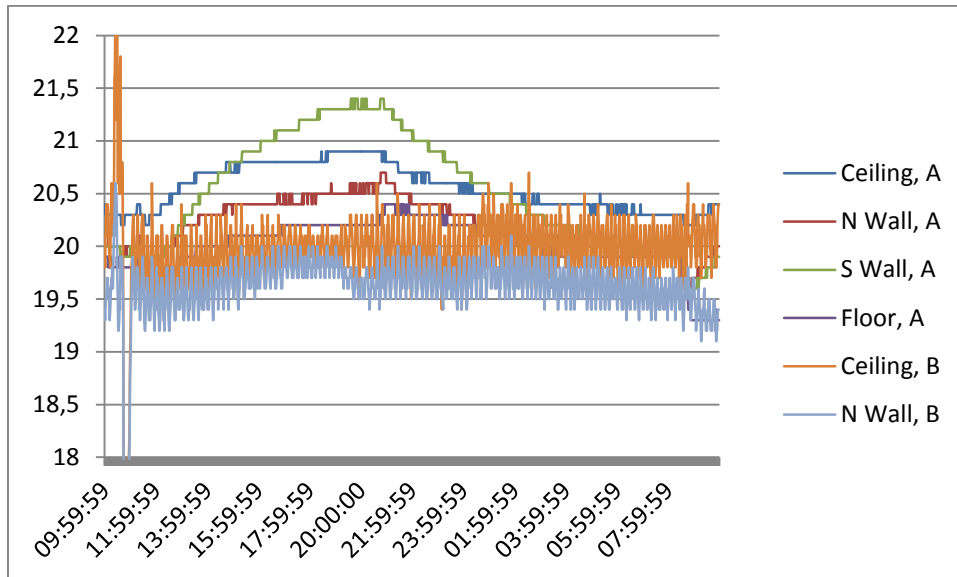
I fremtidige undersøkelser hadde det vært interessant og fått målt og sammenlignet det faktiske energiforbruket (til oppvarming) i de to modulene. En bedre og mer omfattende måling av trefukten, i ulike dybder, kunne fortalt mer om hvordan fukten blir tatt opp og avgitt av treverket.

5 LITTERATUR

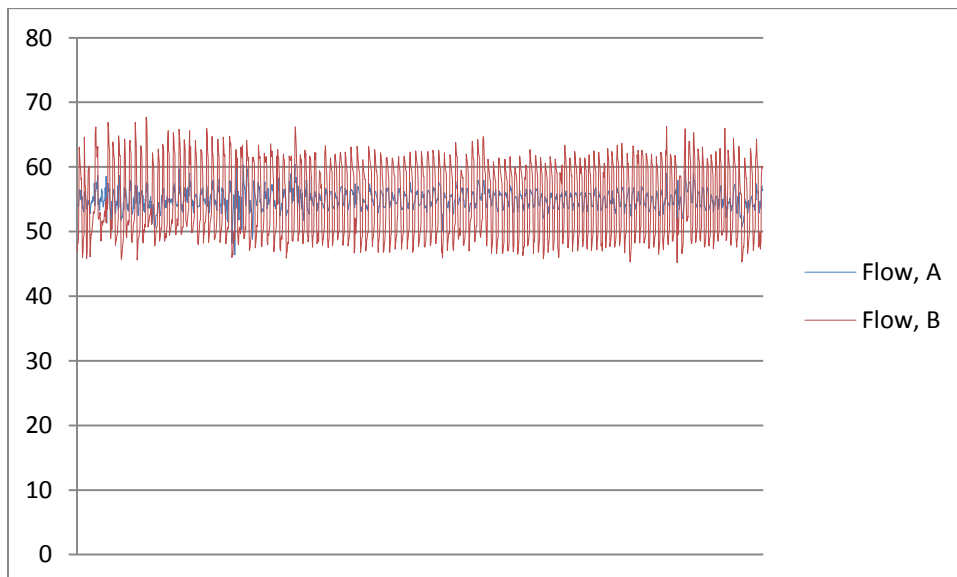
- Edwardsen, K. I., Haug, T. & Ramstad, T. Ø. (2006). *Trehus*. 9. utg. utg. Håndbok / [Norges byggforskningsinstitutt]. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Geving, S. & Thue, J. V. (2002). *Fukt i bygninger*. Håndbok (Norges byggforskningsinstitutt : trykt utg.). Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Norsk treteknisk institutt (2009) *Teknisk håndbok 4. Treteknisk håndbok*. Oslo: Norsk treteknisk institutt.
- Siau, J. F. (1984). *Transport processes in wood*. Springer series in wood science. Berlin ; New York: Springer-Verlag. ix, 245 p. s.
- Wadsö, Lars (1993). *Studies of Water Vapor Transport and Sorption in Wood*. Phd thesis. Department of Building Materials, Lund University, Lund, Sweden
- Glass, S. V. & Zelinka S. L (2010) *Wood Handbook, Chapter 04: Moisture Relations and Physical Properties of Wood*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 4-1 - 4-19. Chapter 4.
- TreFokus - Bygge med tre - Massivtre (2014) [ONLINE] Available at: <http://www.trefokus.no/fullstory.aspx?m=22>. [Accessed 2014].

VEDLEGG

VEDLEGG 1: DATA FRA SØRÅSFELTET, CASE 1

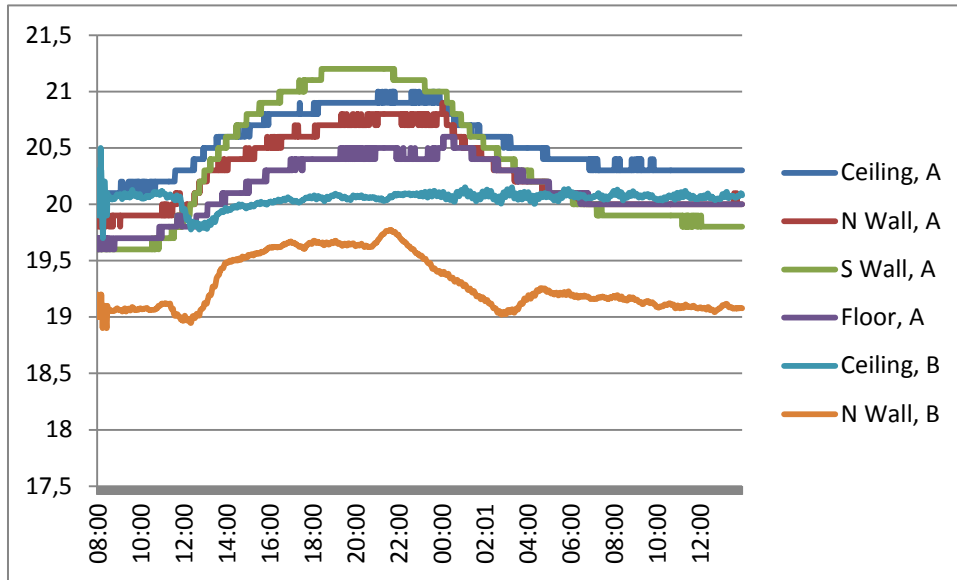


Overflatetemperaturer, °C

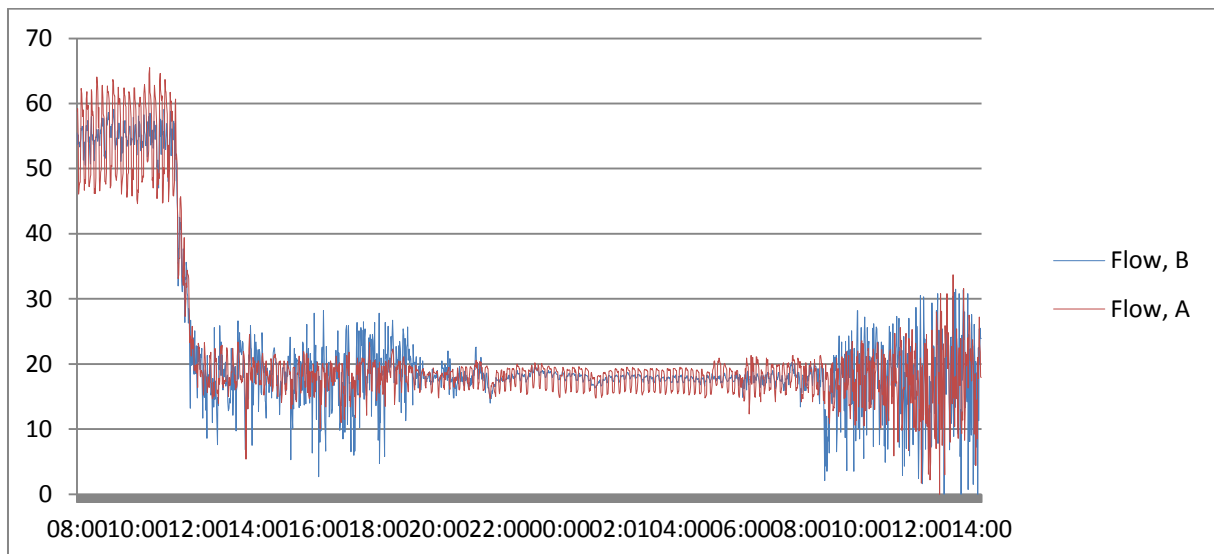


Luftrykk avtrekk, Pa

VEDLEGG 2: DATA FRA SØRÅSFELTET, CASE 2

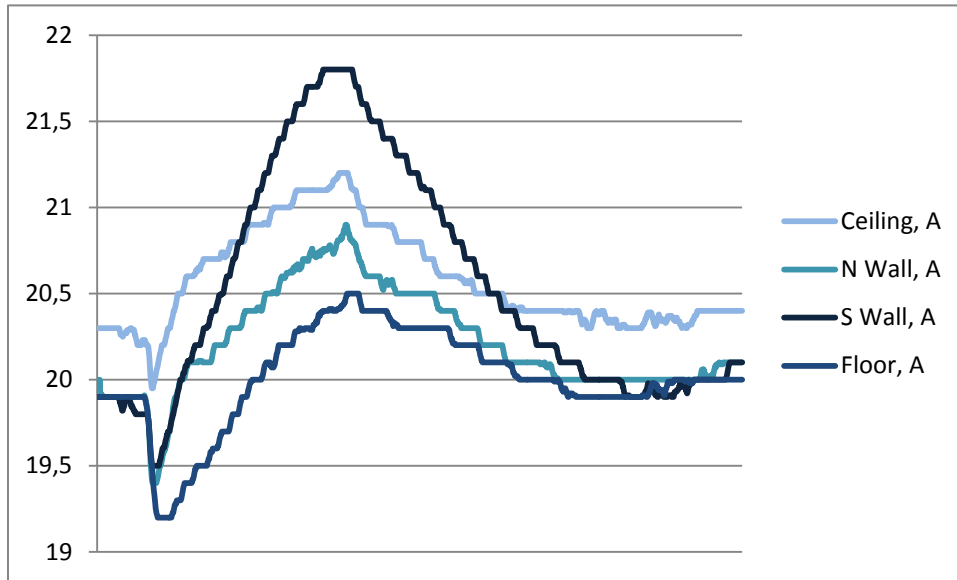


Overflatetemperaturer, °C

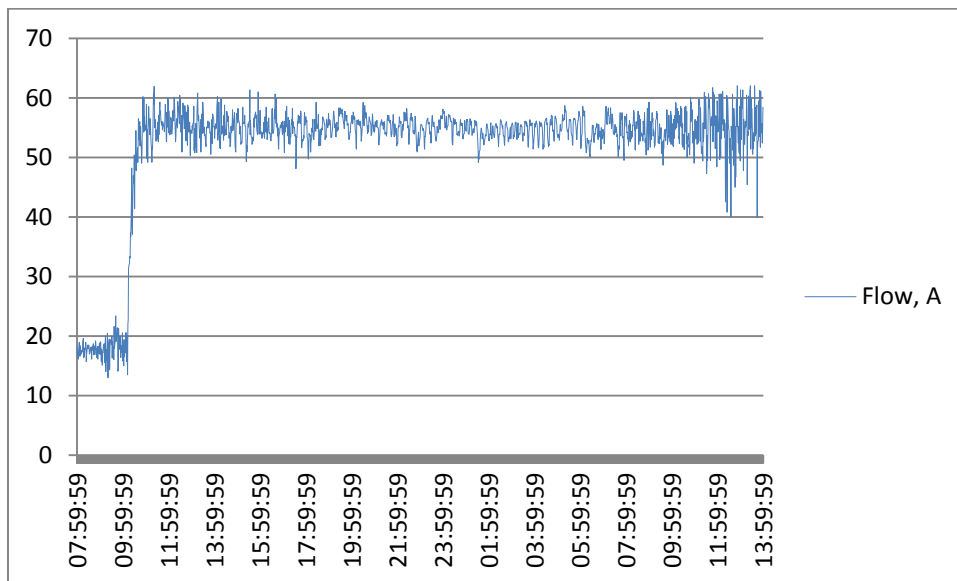


Luftrykk avtrekk, Pa

VEDLEGG 3: RÅDATA FRA SØRÅSFELTET, CASE 3

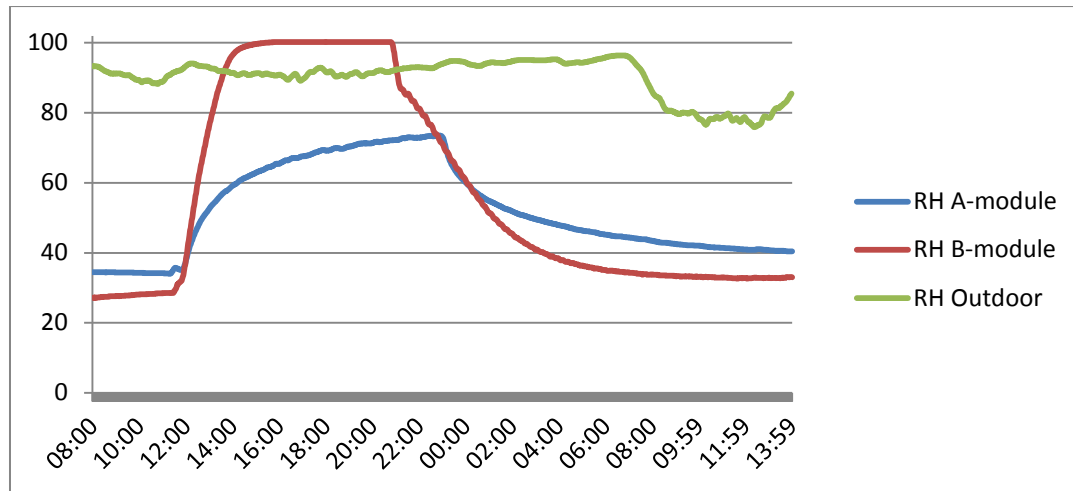


Overflatetemperaturer, °C

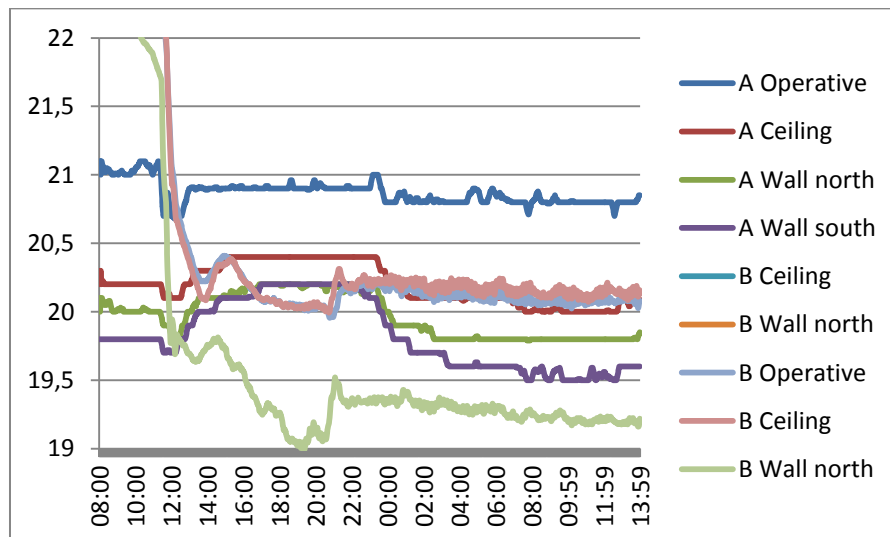


Luftrykk avtrekk, Pa

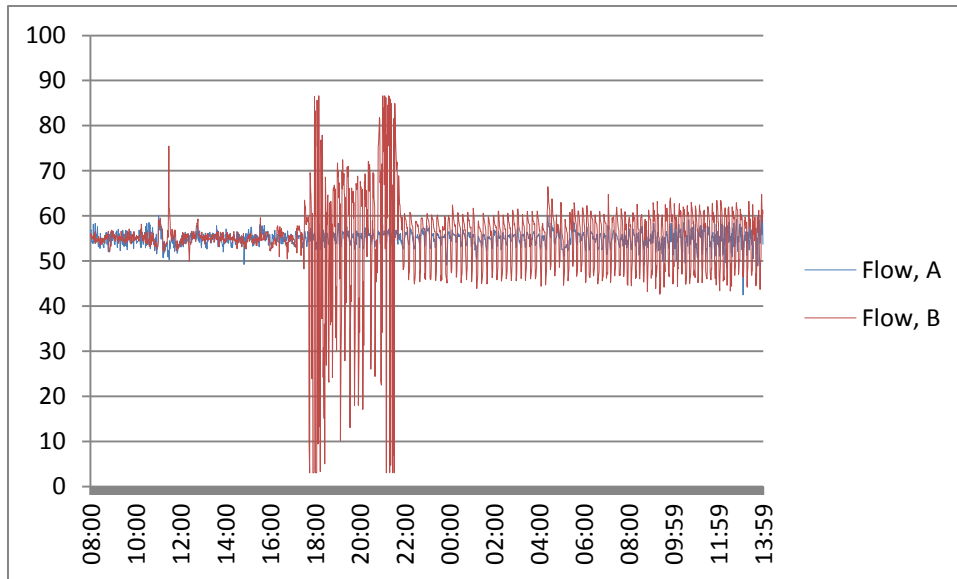
VEDLEGG 4: DATA FRA SØRÅSFELTET, CASE 4



RF, %

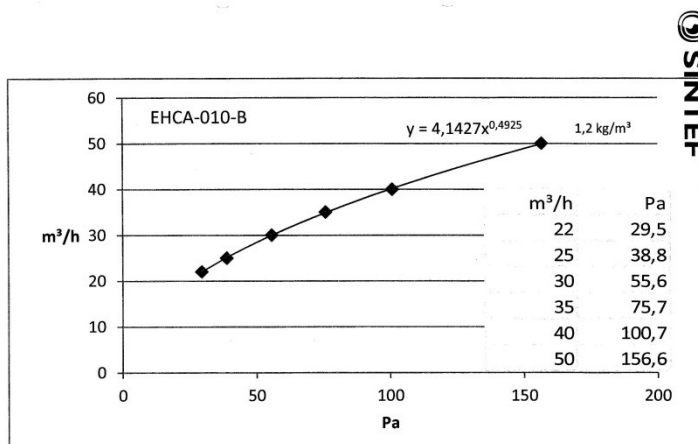
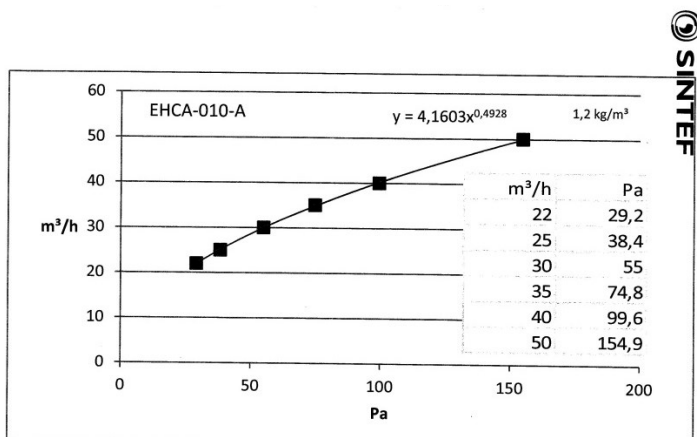


Overflatetemperaturer, °C



Lufttrykk avtrekk, Pa

VEDLEGG 5: BEREGNING AV VENTILLASJONS RATEN



Sammenhengen mellom lufttrykket og luftveksling i henholdsvis modul A og B (Aurlien 2014)