



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 studiepoeng

Fakultet for realfag og teknologi

Hovedveileder: Thomas Kringlebotn Thiis

Optimalisering av inneklima og energiforbruket i halvklimaliserte museumsbygninger

Optimization of indoor climate and energy consumption in half climatized museum buildings

Ines Haga

Master i byggeteknikk og arkitektur
Fakultet for realfag og teknologi

Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på min mastergrad i byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø- og biovitenskaplige universitet (NMBU). Oppgaven tilsvarer 30 studiepoeng og er skrevet våren 2019. Masteroppgaven omhandler optimalisering av inneklime og energiforbruk i halvklimaliserte museumsbygninger. Det er gjennomført målinger i et halvklimalisert museumsbygg og utført simuleringer for å finne en løsning på problemstillingen.

Jeg ønsker å takke min hovedveileder ved NMBU, Thomas Kringlebotn Thiis, for oppgaven, god veiledning og tilbakemeldinger underveis i arbeidet. Jeg vil videre takke Borgarsyssel museum for at jeg fikk utføre målinger i museumsbygningen Snekkenes, og Line Kjølberg for informasjon og hjelp i bygningen. Takker også medstudent Karoline Havnes for samarbeidet med termograferingen av Snekkenes.

Avslutningsvis vil jeg rette en stor takk til min samboer som har støttet meg hele veien og for hjelp med måleutstyr og korrekturlesing. Også en stor takk til mine foreldre som har vært viktige støttespillere gjennom hele min skolegang og for korrekturlesing.

Til slutt, takk til mine medstudenter for fem fantastiske år på Ås.

Norges miljø- og biovitenskaplige universitet

Ås, 13. mai 2019

Ines Haga

Sammendrag

I dagens samfunn er det stort fokus på bevaring av historiske gjenstander og bygninger da de er av stor betydning for kulturarven. Bevaring av gjenstander i historiske bygninger har lenge vært en utfordring, og flere historiske bygninger har ikke den standarden som kreves for optimal bevaring. Det er i mange tilfeller ikke mulig å installere et ventilasjonsanlegg for å kontrollere inneklimate av estetiske grunner, at bygget er verneverdig eller fredet. Gjenstander blir derfor alt for ofte ødelagt eller angrepet av muggsopp ved oppbevaring i historiske bygninger.

Denne masteroppgaven ser på hvordan man kan bedre forholdene for gjenstandene inne i et halvklimalisert museumsbygg ved bruk av minst mulig energi. Det undersøkes også om en forenklet beregningsmetode for muggvekstrisiko er tilstrekkelig sammenlignet med en numerisk simulering. For å finne svar på dette er det gjort målinger av ute- og inneklimate i tømmerhuset Snekkenes på Borgarsyssel museum i Sarpsborg kommune i Østfold. Målingene er gjort ved hjelp av en værstasjon plassert utenfor bygget og fem temperatur- og RF målere innendørs.

Museet har frem til i dag hatt problemer med muggvekst på gjenstandene i Snekkenes på vinterhalvåret med panelovnene på 6 °C. Ved hjelp av simuleringsprogrammet WUFI og bruk av målte klimadata er det dokumentert at oktober og november er månedene med størst risiko for muggvekst. For å finne hvilke forhold som ikke gir risiko for muggvekst ble inneklimate endret i månedene oktober og november. Det kan konkluderes med at alle rom i 1. etasje bør ha en settpunkttemperatur på 18 °C i september, oktober og november. Grunnet stor infiltrasjon på loftet vil ikke en avfukter ha særlig positiv effekt her, og en temperaturøkning vil kreve for mye energi.

Energiforbruket er beregnet i simuleringsprogrammet IDA ICE og totalt simulert energiforbruk til romoppvarming i Snekkenes er 10 956,0 kWh for månedene september, oktober og november. Resten av året er det ifølge simuleringene ikke risiko for muggvekst og romoppvarming er da ikke nødvendig.

Abstract

Preserving historical artifacts and buildings have always been a priority in today's society and is of great significance for cultural heritage. Although preserving these artifacts in historical buildings might be challenging due to outdated or non-existent standards for indoor climate control. The buildings might also have esthetic limitations, or they can be protected as a building with historical value. Changes like ventilation systems or further alterations to the structure would in these cases not be an option. Problems with mold growth inside old historical buildings are often the cause of destroyed or damaged artifacts.

This master thesis focuses on how to improve the conditions for artifacts inside a half climatized museum building whilst using a minimum amount of energy, and if a simplified calculation method for mold growth risk is sufficient enough compared to a numerical simulation. To answer this, measurements have been taken by one weather station outside and five temperature- and Relative Humidity gauges inside of a log house called Snekkenes at Borgarsyssel museum in Sarpsborg county in Østfold.

In the past this museum have had problems with mold growth on the artifacts in Snekkenes during autumn and winter with electrical radiators set on 6 °C. While using the simulation program WUFI and measured climate data, it's stated that October and November are the two months with highest risk of mold growth. In order to find which indoor conditions that is less likely to provide a risk of mold growth, the indoor climate was altered in the months of October and November. A conclusion can be drawn that all the rooms on the ground floor of Snekkenes should have a set point temperature of 18 °C in September, October and November. Due to high infiltration in the attic, a dehumidifier will likely not have a positive effect and a temperature increase will require too much energy.

The simulation program IDA ICE has calculated a total energy consumption of 10 956,0 kWh to reach desired temperature in Snekkenes over the period of September, October and November. According to simulations, there are no risk of mold growth other than these months, and heating will not be necessary.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag.....	III
Abstract.....	V
Innholdsfortegnelse	VII
Figurliste.....	IX
Tabelliste	X
Forkortelser	XI
Definisjoner.....	XI
1 Innledning.....	1
1.1 Problemstilling.....	1
1.2 Bakgrunn.....	1
1.2.1 Historisk bakgrunn	2
1.3 Avgrensning	3
2 Teori	5
2.1 Laftede tømmerhus	5
2.2 Fukt.....	7
2.2.1 Fukttransport i materialer	7
2.2.2 Relativ luftfuktighet.....	8
2.2.3 Fukt i uteluft	8
2.2.4 Fukt i inneluft.....	9
2.2.5 Molliers diagram.....	9
2.2.6 Termisk inneklime	10
2.3 Muggsopp	11
2.4 Energi.....	11
2.5 Kuldebroer	12
2.6 WUFI.....	13
2.7 IDA ICE.....	14
2.8 ET-Kurver.....	14
2.9 Forenklet beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater.....	15
2.10 ASHRAE's inneklimeklasser for museer	16
3 Metode	17

3.1	Snekkenes	17
3.2	Datainnsamling	18
3.2.1	Uteklima	18
3.2.2	Inneklima	19
3.2.3	Efergy e2 trådløs energimåler	21
3.3	Termografering	22
3.4	Variasjon av innetemperatur	22
3.5	Simuleringer	23
3.5.1	Klimafilmer	23
3.5.2	WUFI	24
3.5.3	IDA ICE	27
3.6	ET-Kurver	30
3.7	Forenklet beregningsmetode av risiko for muggvekst	30
3.8	Vanndampinnholdet i luften	32
4	Resultater	33
4.1	Simuleringer i WUFI	33
4.1.1	Risiko for muggvekst	33
4.1.2	Bruk av TMY-data	35
4.1.3	Simulert maleri på yttervegg	35
4.1.4	Endret inneklima	35
4.2	IDA ICE	38
4.2.1	Validering av simuleringen	38
4.3	Termografering	41
4.4	Forenklet beregningsmetode av risiko for muggvekst	43
4.5	ET-kurver	44
4.6	Validering av IDA ICE	46
4.7	Energiforbruk estimert av IDA ICE	47
4.8	Vanndampinnholdet i luften	47
4.9	Anbefaling fra ASHRAE	48
5	Diskusjon	49
6	Konklusjon	53
7	Videre arbeid	55
8	Referanser	57
9	Vedlegg	59

Figur 4-11 Termograferingsbilder hvor maleriene er tatt ned. e) viser overflatetemperatur bak øvre del av det store maleriet. f) viser overflatetemperatur bak nedre del av det store maleriet. g) viser overflatetemperatur bak det lille maleriet.	42
Figur 4-12 Energiforbruket ved en gitt utetemperatur for å holde en innetemperatur på 6 °C.....	44
Figur 4-13 Energiforbruket ved en gitt utetemperatur for å holde en innetemperatur på 12 °C.....	44
Figur 4-14 Energiforbruket ved en gitt utetemperatur for å holde en innetemperatur på 16 °C.....	45
Figur 4-15 Energiforbruket ved en gitt utetemperatur for å holde en innetemperatur på 20 °C.....	45
Figur 4-16 Beregnet og simulert daglig energiforbruk i januar.	46
Figur 4-17 Lineær sammenheng mellom vandampinnholdet inne på loftet og i uteluften.	47
Figur 4-18 Simulert temperatur og RF over ett år med en settpunkttemperatur på 20 °C i Werenskioldsalen.	48

Tabelliste

Tabell 2-1 Inneklimaklassene ASHRAE har definert, med tillatt variasjon i temperatur og RF i både korte perioder og for sesongene (ASHRAE, 2011).	16
Tabell 3-1 Plassering av loggere og fargekodene.	20
Tabell 3-2 Temperatur og tidsperioden for variasjon av innetemperatur.	22
Tabell 3-3 Hvilke år klimadataene for standardåret er hentet fra.	23
Tabell 3-4 Inndata i WUFI.	25
Tabell 3-5 Oppbygning av ytterveggene som ble undersøkt gjennom simuleringer i WUFI.	26
Tabell 3-6 Klima og konstruksjon for de fire ulike scenarioene.	26
Tabell 3-7 Areal og volum av rommene i Snekkenes.	27
Tabell 3-8 Inndata i IDA ICE.	28
Tabell 3-9 Oppbygning av konstruksjonselementene.	28
Tabell 3-10 Månedlig gjennomsnitt av temperatur og RF både inne og ute.	31
Tabell 4-1 Antall dager med risiko for muggvekst i løpet av ett år ved målt klimadata.	33
Tabell 4-2 Antall dager med risiko for muggvekst ved bruk av TMY-data.	35
Tabell 4-3 Antall dager med risiko for muggvekst med et maleri på yttervegg.	35
Tabell 4-4 Timer med risiko for muggvekst ved en settpunkttemperatur på 16 °C i Werenskioldsalen.	35
Tabell 4-5 Timer med risiko for muggvekst ved en settpunkttemperatur på 16 °C i Empiresalen.	36
Tabell 4-6 Timer med risiko for muggvekst ved en settpunkttemperatur på 16 °C på Kontoret.	37
Tabell 4-7 Timer med risiko for muggvekst ved en settpunkttemperatur på 16 °C i Sal vest.	37
Tabell 4-8 Overflatetemperatur på ulike steder av maleriene og ytterveggen.	42
Tabell 4-9 Temperaturene som ble brukt i beregningen av konstruksjonens temperaturfaktor (f^*).	43
Tabell 4-10 Dimensjonerende temperaturfaktor (f_{dim}) for hver måned.	43
Tabell 4-11 Lineær tilnærming i ET-kurvene.	46
Tabell 4-12 Simulert energiforbruk ved settpunkttemperatur 6, 16 og 18 °C.	47
Tabell 4-13 Energiforbruket over ett år ved en settpunkttemperatur på 20 °C.	48

Forkortelser

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
IDA ICE	IDA Indoor Climate and Energy
ET-kurve	Energi-Temperatur-kurve
RF	Relativ luftfuktighet
WUFI	Wärme Und Feuchte Instationär

Definisjoner

Energiforbruk	Antall kWh som brukes i en bygning over en gitt tidsperiode.
Halvklimatisert museumsbygning	I denne oppgaven definert som en bygning med romoppvarming ved lav temperatur over en kort periode av året.
Isoplett	Linje hvor overflatetemperatur og RF er plottet sammen for å vise grenseverdiene for muggvekstrisiko.
Klima	Værmønsteret i et område eller et sted, som nedbørsmengde, temperatur, solstråling og vindhastighet (Store norske leksikon, 2019).
Overflatetemperatur	Temperaturen på selve overflaten ved for eksempel på vegg eller gjenstand.
Settpunkttemperatur	Innetemperaturen i rommet.
Vanndampinnhold	Mengden vanndamp i luften per volumenhet (g/m^3).

1 Innledning

1.1 Problemstilling

Problemstillingen i denne masteroppgaven er:

Hvordan unngå muggvekst i halvklimaliserte museumsbygninger ved bruk av minst mulig energi.

Disse forskningsspørsmålene skal besvares:

- Når oppstår det risiko for muggvekst og hvilke tiltak skal iverksettes?
- Kan en forenklet metode være tilstrekkelig for beregning av risiko for muggvekst?
- Hvor mye energi kreves for å hindre videre muggvekst?

For å finne svar på dette ble bygningen Snekkenes på Borgarsyssel museum i Sarpsborg brukt som case studie og det ble gjennomført numeriske simuleringer av varme, fukt og energi. Målinger fra en værstasjon og temperatur- og RF målere ble brukt som inndata.

1.2 Bakgrunn

I dagens samfunn er det stort fokus på å bevare historiske gjenstander og bygninger. Det er viktig å ta vare på historien for å kunne vise hvordan mennesker levde før i tiden og hvordan samfunnet og teknologien har utviklet seg.

Bevaring av gjenstander i historiske bygninger har lenge vært en utfordring, og flere historiske bygninger har ikke den standarden som kreves for optimal bevaring. Det kreves et kontrollert innklima med liten variasjon i relativ luftfuktighet og temperatur. Installasjon av et ventilasjonsanlegg er i flere tilfeller ikke mulig å gjennomføre grunnet fredet eller verneverdige bygg, eller av estetiske grunner. Derfor blir gjenstander alt for ofte ødelagt eller angrepet av muggsopp ved oppbevaring i historiske bygninger.

Klimaet er i stadig forandring, men hvordan påvirker dette bevaring av museumsgjenstander og antikvariske bygninger?

I en studie av Kramer et al. (2012) konkluderes det med at fremtidige klimaendringer vil føre til lavere temperatur innendørs, som igjen vil føre til høyere relativ luftfuktighet. Store svingninger i relativ luftfuktighet vil føre til økende risiko for muggvekst og mekanisk nedbrytning av objektene (Kramer et al., 2012).

I dagens samfunn er det fokus på å redusere energiforbruket. Energisparingen går ofte ut over bevaring av museumsgjenstander. Ved et strengt kontrollert inneklima for museumsgjenstander går energikostnadene opp. Kramer et al. (2015) har sammenlignet energiforbruket med ASHRAE inneklimaklasser. De konkluderte med at man sparer mye energi ved å gå ned en inneklimaklasse, uten at dette påvirker gjenstandene i stor grad (Kramer et al., 2015).

Det er flere museer rundt om i landet som har samlet bygninger fra sitt lokale område og fra ulike tidsperioder. Friluftsmuseet Borgarsyssel i Sarpsborg er ett av disse, og her finner man antikvariske bygninger og gjenstander som skal gi et tverrsnitt av Østfolds kulturhistorie fra middelalderen og frem til i dag (Jensen, u.å).

1.2.1 Historisk bakgrunn

Borgarsyssel museum ble stiftet i 1921 og ligger i Sarpsborg kommune i Østfold. Museet fikk navnet Borgarsyssel etter fellesbetegnelsen på de disktriktene som i middelalderen ble styrt av tinget i Borg. Distriktene tilsvarer omtrent det vi i dag kjenner som Østfold fylke. Friluftsmuseet har en rekke antikvariske bygninger og gjenstander fra middelalderen og frem til i dag. Formidlingsbygget Olavs Hall som ble bygget i 2016 er det nyeste bygget til museet og er åpent for publikum hele året.

Det første bygget som kom til museet i 1921 var Snekkenes, en empire trebygning fra siste halvdel av 1700-tallet. Snekkenes var opprinnelig hovedbygning på Brekke bruk, Os i Rakkestad. Den var i sin tid sorenskriverbolig frem til 1846 og senere brukt av husmannsfamilier og videre som skole (Jensen, u.å).

I museets guidehefte står det om utstillingen i Snekkenes (Jensen, u.å). To store saler preger bygget, den ene med sin strenge empirestil, den andre som viser salen på Borregaard hovedgård etter ombyggingen i 1702. I et annet rom ser man et sorenskriverkontor med møbler fra 1800-tallet. Museet har også innredet et eget rom til ære for Ingeborg og Bjørn Frøland som testamenterte hele sitt innbo til museet i 1943 (Aune, 2000). Møblene i Snekkenes er i stilartene empire, barokk og rokokko. Loftet er innredet til spesialutstillinger om jordbruk, skogbruk, jakt og fiske (Jensen, u.å).

I en rapport fra en befaring på Borgarsyssel 04.05.16 ble det dokumentert muggsopp på en rekke gjenstander i Snekkenes. Det ble derfor gjennomført en grundig gjennomgang av gjenstandene og muggsoppen ble fjernet. På to av gjenstandene ble det tatt vekstprøver med Mycotape og prøvene ble sendt til Mycoteam for analyse.

Strøm ble først installert i Snekkenes på 1980-tallet og energiforbruket går kun til belysning og romoppvarming. Bygget har ikke innlagt vann eller andre fasiliteter enn panelovner og lys. Museet har frem til i dag satt panelovnene på 6 °C i vinterhalvåret, men de ønsker å forbedre forholdene for gjenstandene uten bruk av for mye energi.



Figur 1-1 Bilde av Snekkenes i Sarpsborg. Bildet er hentet med tillatelse fra Østfoldmuseene. (u.å). *Snekkenes, Borgarsyssel Museum*. Flickr. Tilgjengelig fra: <https://www.flickr.com/photos/ostfoldmuseene/>. (Sett 05.04.2019)

Flere friluftsmuseer og kulturhistoriske museer i Norge har bygninger som tilsvarer Snekkenes. Det er derfor interessant å optimalisere inneklimate og energiforbruket i Snekkenes for å vise hvilke tiltak som kan gjøres i slike bygninger for å forhindre risiko for muggvekst.

1.3 Avgrensning

På grunn av tidsmessig avgrensning i masteroppgaven er det gjort noen forenklinger. Det bygningsfysiske er i fokus, ikke det biologiske, i form av at ulike muggsopparter med ulike krav til vekstforhold ikke er studert nærmere. Snekkenes er stengt for publikum store deler av året så det ses derfor ikke på komfort. I simuleringene er det kun simulert yttervegger, da dette er det mest kritiske området i forhold til muggvekst. Viser simuleringen at det ikke er risiko her kan man forutsette at det ikke er risiko for muggvekst ellers i rommet.

2 Teori

Teorien er i hovedsak hentet fra flere av Byggforsk sine byggeblader, samt Trehus håndbok 5, og skal belyse den aktuelle teoretiske bakgrunnen for denne oppgaven. Temaer som blir presentert er laftede tømmerhus, fukt, termisk inneklima, muggsopp, energi i bygninger, kuldebroer, simuleringsprogrammene (WUFI og IDA ICE), ET-kurver, beregning av risiko for muggvekst og ASHRAE- retningslinjer.

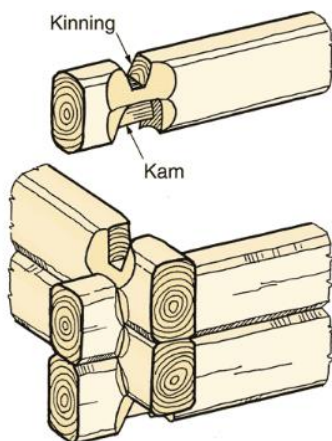
2.1 Laftede tømmerhus

Lafting har vært en kjent byggemåte helt siden oldtiden og var utbredt over hele Norge (Thue, 2019). Bygningene stod mer spredt og bortgjemt i Norge sammenlignet med resten av Europa og var derfor ikke utsatt for brann i like stor grad. Dette var en stor medfaktor til at man kan finne flere bevarte trehus i Norge.

Ett av disse bevarte trehusene er Snekkenes som nå står på Borgarsyssel museum i Sarpsborg. Snekkenes er et typisk laftet hus fra Østfold (Aune, 2000). Det er brukt laftetømmer med stående kledning og inngangen er plassert midt på den ene langveggen.

Lafting går ut på å plassere tømmerstokker vannrett over hverandre. Mest brukt var stokker av furu, da den inneholder mer kjerneved med harpiksstoffer som øker holdbarheten i treverket. Tettvokst gran i god kvalitet er også godt egnet da den har bedre kvalitet på yteveden enn furu. Lengden på stökkene var avgjørende for rommets størrelse (Clementz & Flatland, u.å).

Lafteknuten er der tømmerstökkene møtes i et hjørne eller i sammenslåing mellom to vegger. Stökkene blir lagt annenhver gang, en halv stokkehøyde høyere enn den andre. Stökkene er hugget med et over- og underhugg som knytter dem sammen og holder konstruksjonen stabil. Det finnes flere ulike måter å knytte disse sammen på, eksempel i figur 2-1 (Clementz & Flatland, u.å).



Figur 2-1 Nov med kam og kinninger. Nov er selve sammenflettingen av tømmerstökkene. Bildet er hentet med tillatelse fra SINTEF Byggforsk. (2006). 523.291 Laftede vegger. Byggforskserien. Figur 441. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/365/laftede_vegger (lest 17.03.2019).

Et laftet hus vil ha en naturlig ventilasjon i form av infiltrasjon og trenger derfor ikke et ventilasjonssystem som for eksempel et bindingsverkshus må ha. Tømmerveggene bidrar til en jevn temperatur og beskytter mot ekstrem kulde og varme. Tykkelsen på tømmeret kan variere, men en tømmervegg på 200 mm har en U-verdi på omkring $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Clementz & Flatland, u.å).

Mellom stukkene isoleres det for å oppnå en tilstrekkelig lufttetthet.

Isolasjonsmaterialene som ble brukt var husmose, klede eller stoff. I dagens tømmerhus er det mer vanlig å bruke husmose, saueull, linull, polyesterfiber og diffusjonsåpne tettelisten. For å forhindre råteskader over tid er det viktig at isolasjonen ikke hindrer fukttransport (Clementz & Flatland, u.å). Vertikal belastning på veggene er et annet tiltak for å oppnå tilstrekkelig tetthet. Med et krav på 100 kg/m^2 belastning på veggene ble tekking med torv eller tykk skifer ofte løsningen (Clementz & Flatland, u.å).

Bestandigheten til tømmeret er begrenset når det kommer til slagregn og det er viktig at veggene får muligheten til å tørke for å unngå råteskader. Store mengder slagregn er grunnen til at de fleste laftede tømmerhusene på Vestlandet ble dekket med utlektet kledning, mens i indre strøk som Østlandet, Midt-Norge og Sør-Norge hvor det er relativt lite slagregn, var det ikke behov for å dekke til tømmeret (Clementz & Flatland, u.å).

2.2 Fukt

Fukt i bygninger kan føre til store skader. Ifølge Byggforskserien 421.132 har 75 % av byggskadene en sammenheng med fukt (SINTEF Byggforsk, 2018). Det er da snakk om skader som muggvekst, råte, telehiv, korrosjon, svelling og saltvandring i materialer og konstruksjoner (SINTEF Byggforsk, 2018). Kunnskap om hvordan fukt transporteres kan forebygge mange av disse skadene.

2.2.1 Fukttransport i materialer

Fukt transporteres gjennom en konstruksjon både i damp og væskeform. Gjennom en vegg skjer denne transporten hovedsakelig gjennom vanndampdiffusjon, vanndamptransport i luftstrøm (fuktkonveksjon), kapillærsuging og væskestrømning (SINTEF Byggforsk, 2018).

Når damptrykket er ulikt på hver sin side av en konstruksjon vil trykkforskjellen drive damp gjennom konstruksjonen, dette kalles vanndampdiffusjon. Vanndampen vil transporteres fra høyere til lavere damptrykk.

Fuktkonveksjon går ut på det samme som vanndampdiffusjon, men her er det forskjell i lufttrykk som fører til fukttransporten. Fukten vil bevege seg fra høyere til lavere trykk. Luftstrømmen kan holde på mye vann som i møte med en kald overflate kan kondensere. Generelt transporteres det mye større mengder fukt i en konstruksjon gjennom luftlekkasjer enn ved dampdiffusjon.

Kapillærsuging er når vann transporteres gjennom porer i materialet. Dette skjer innad i materialet og mellom dem ved direkte kontakt.

Væskestrømning er når fritt vann fører til skade, som for eksempel vannlekkasjer.

Vanndamptransport (g) gjennom materialet beregnes etter ligning 1. Lav g gir et mer damptett material (SINTEF Byggforsk, 2018).

Vanndamptransport:

$$g = \delta_p * \frac{\Delta p_v}{d} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})] \quad (1)$$

- $\Delta p_v = p_{v2} - p_{v1}$ er differansen i damptrykk på de to sidene av materialet (Pa).
- δ_p = materialets vanndamppermabilitet (kg/msPa).
- d = materialtykkelsen (m).

2.2.2 Relativ luftfuktighet

Relativ luftfuktighet (RF) oppgis i prosent, og er mengden vanndamp luften inneholder ved en gitt temperatur, i forhold til den maksimale vanndampmengden luften kan inneholde ved samme temperatur. Ved 100 % RF har luften nådd metningspunktet og kan ikke holde på mer fuktighet. Temperaturen ved metning (100 % RF) kalles duggpunktstemperaturen. Bli temperaturer lavere enn duggpunktet dannes det kondens på overflaten. Dette blir nærmere forklart i kapittel 2.2.5.

Relativ luftfuktighet (Edvardsen & Ramstad, 2014):

$$RF = \frac{v}{v_{sat}} * 100 \% \quad (2)$$

- v = vanndampinnholdet.
- v_{sat} = vanndampinnhold ved metning.

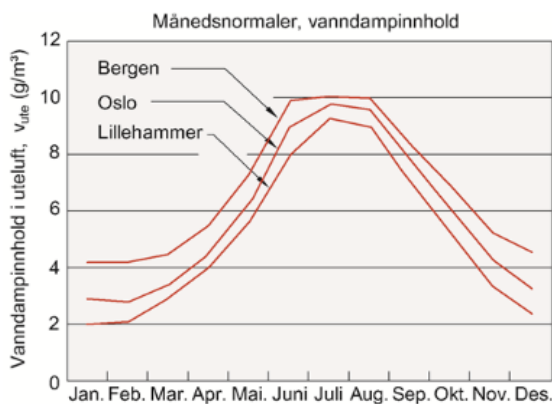
En annen ligning for utregning av RF er (Bolton, 1980):

$$RF = 100 * \frac{\exp(\frac{a * T_d}{b + T_d})}{\exp(\frac{a * T}{b + T})} \quad (3)$$

- T_d = duggpunkttemperatur
- T = Temperatur
- a = 17,67
- b = 243,5

2.2.3 Fukt i uteluft

Vanndampinnholdet og damptrykket i uteluften varierer med geografi og årstid. Når lufttemperaturen er høy, kan luften holde på mer fuktighet enn når luften er kald. Dette er grunnen til at RF er lav om sommeren og høy på vinteren. Figur 2-2 viser variasjonen i vanndampinnhold i uteluft over ett år. Vanndampinnholdet er betraktelig større om sommeren enn om vinteren.



Figur 2-2 Variasjon i vanndampinnholdet i uteluft over ett år. Grafen er hentet med tillatelse fra SINTEF Byggeforsk. (2018). 421.132 *Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*. Byggeforskserien. Figur 3. Tilgjengelig fra: https://www.byggeforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag#113 (lest 13.03.2019).

2.2.4 Fukt i inneluft

Vanndampinnholdet i inneluften avhenger av bruk og ventilasjon. Vanlig fukttilskudd i forhold til uteluften ligger i en bolig på mellom 2 - 6 g/m³. Ved bruk av ligning 4, kan man finne hvor mye fukt inneluften inneholder. Dette kan igjen fortelle hvor mye vann som vil kondensere inne i konstruksjonen når luftstrømmer møter på lavere temperaturer.

Vanndampinnholdet i inneluften:

$$v_{inne} = v_{ute} + \Delta v \quad [\text{g/m}^3] \quad (4)$$

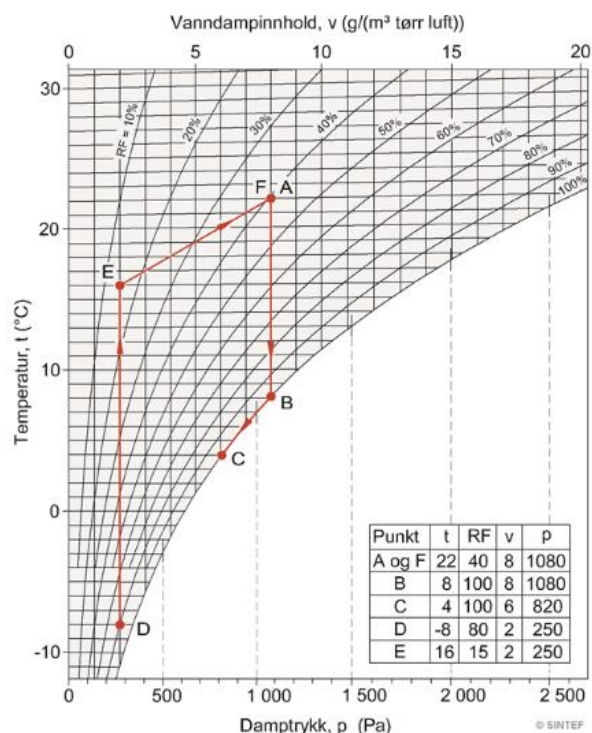
- v_{ute} = vanndampinnholdet i uteluften (g/m³).
- Δv = fukttilskuddet, $v_{inne} - v_{ute}$ (g/m³).

2.2.5 Molliers diagram

Molliers diagram er et luftfuktighetsdiagram som kan brukes til å finne vanndampinnholdet i luften ved kjent RF og temperatur, duggpunkt og kondensmengde. Ved vurdering eller overslagsberegning av faren for kondens kan også diagrammet brukes ved å se på fuktinnholdet i luften.

Figur 2-3 viser eksempler på bruk av Mollier diagrammet. Inneluften er 22 °C og RF 40 % (punkt A), vanndampinnholdet er da på 8 g/m³. Senkes temperaturen vil RF stige og ved en RF på 100 % er duggpunktet nådd. Duggpunktstemperaturen er da 8 °C.

Senkes temperaturen fra 8 °C (punkt B) til 4 °C (punkt C) ved vannmetning (100 % RF) blir noe av vanndampen omgjort til kondens. Diagrammet viser at denne forandringen gir $(8 - 6) \text{ g/m}^3 = 2 \text{ g/m}^3$ kondens (SINTEF Byggforsk, 2018).



Figur 2-3 Molliers diagram som viser sammenhengen mellom temperatur, RF, vanndampinnhold og damptrykk. Bildet er hentet med tillatelse fra SINTEF Byggforsk. (2018). 421.132 *Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*. Byggforskserien. Figur 25. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag#i13 (lest 13.03.2019).

2.2.6 Termisk inneklime

Termisk inneklime består av de fysiske faktorene lufttemperatur, strålingstemperatur, lufthastighet og RF (SINTEF Byggforsk, 2017). Lufttemperaturen ses på som den viktigste faktoren innendørs. Temperaturen påvirker komforten, men også RF med tanke på kondens. Som nevnt tidligere kan varm luft holde på mer fukt enn kald luft. Senkes temperaturen vil RF øke og kondens kan oppstå. Overflatene gir fra seg strålingsvarme som påvirker komforten. Kald yttervegg eller et vindu om vinteren gir fra seg kald stråling som kan oppfattes ubehagelig. For høy lufthastighet i oppholdssonen oppfattes som trekk. Friskluftsventiler og dårlig tette vinduer er noe av det som kan skape denne trekken. Grensen for trekk er 0,15 m/s på vinterstid (Edvardsen & Ramstad, 2014).

Temperaturen vil variere ulike steder i rommet. Høy temperatur ved tak, lav ved gulv og lavere ved yttervegg enn midt i rommet. Variasjonen vil alltid være tilstede og skyldes variasjon i utetemperatur, strålingsforhold og overgangsmotstand (Edvardsen & Ramstad, 2014).

U-verdien på vindu og yttervegg har betydning for hvor stor variasjonen i temperatur er. Lav U-verdi gir mindre varmetap gjennom vegg og vindu og temperaturforskjellen vil derfor være mindre. Kuldebroer er også med på å senke temperaturen på overflaten. Kuldebroer blir videre forklart i kapittel 2.5.

2.3 Muggsopp

Muggsopp kan vokse på alt organisk materiale med forutsetning av at faktorene tid, vann, næring og temperatur er tilstede. Ulike muggsopparter har ulike krav til vekstvilkår, men de fleste artene har gode vekstforhold ved en RF over 80-85 % og en temperatur mellom 25-30 °C på materialoverflaten innendørs (SINTEF Byggforsk, 2005). Muggsopp kan også vokse ved lavere RF. Om temperaturen er over 25 °C kan RF være så lav som 76 % for at risikoen for muggvekst er tilstede. Kondens og høy RF kan skyldes ulike faktorer som manglende uttørking etter bygging, dårlig ventilasjon, kuldebroer eller vannlekkasjer (Mattsson, 2016).

Muggsopp er en hurtigvoksende sopp som ikke bryter ned trevirket men kan gi misfarging, lukt og helseproblemer. De danner et farget belegg på fuktutsatte materialer, ofte grønn, svart eller gul (Mattsson, 2016).

I forbindelse med rengjøring av gjenstandene i Snekkenes ble det tatt vekstprøver med Mycotape av to museumsgjenstander og sendt til Mycoteam for analyse. Prøvene var tatt av sofaen i Empiresalen (prøve nr 8) og en stol fra Kontoret (prøve nr 7) (vedlegg A). Svarrapporten viser at det er rik vekst av storsporet strålemugg (*Aspergillus glaucus*) (Mattsson, 2016). Dette er en sopp som trives i rom med høy RF og kan vokse på eksempelvis papir, papp og skinn (vedlegg B).

2.4 Energi

I dagens samfunn er det høyt fokus på energisparing og energien skal helst være fornybar og komme fra sol, vann- eller vindkraft. I bygninger som bygges i dag er det høyt fokus på energieffektivisering, veggene har mer isolasjon og luftlekkasjene er minimale. Samtidig har krav til inneklime og komfort blitt strengere. Dette har ført til at energiforbruket på romoppvarming har gått ned mens energiforbruket på kjøling og ventilasjon har gått betraktelig opp de siste årene.

Grovt beregnet fordeles energiforbruket på tre hovedpunkter, romoppvarming, belysning, utstyr og apparater, samt oppvarming av tappevann (Edvardsen & Ramstad, 2014). Mesteparten av energiforbruket i bygninger går til romoppvarming. Eldre bygninger med lite isolasjon og store luftlekkasjer har betydelig høyere årlig energiforbruk. Enova hevder i sin rapport «Enovas byggestatistikk 2017» i figur 4-13 at kulturbygg konstruert før 1950-tallet har et gjennomsnittlig årlig energiforbruk på 190 kWh/m² (Enova, 2017).

2.5 Kuldebroer

SINTEF definerer kuldebro som:

“En del av omsluttende konstruksjon der den ellers ensartede varmemotstanden endres betydelig av en eller flere av punktene nedenfor:

- a) Hel eller delvis gjennomtrengning av den omsluttende konstruksjonen av materialer med høyere varmekonduktivitet.
- b) En endring av konstruksjonens tykkelse.
- c) En forskjell mellom innvendig og utvendig areal, som ved overganger mellom vegg/gulv/tak” (Gustavsen et al., 2008).

Kuldebroer kan skape problemer med kondens på overflater. Ved en kuldebro er temperaturen på overflaten vesentlig lavere enn romtemperaturen. Når temperaturen går ned øker RF så kondens kan oppstå som beskrevet i kapittel 2.2.5. Det rådes derfor ikke å sette gjenstander i nærheten av en kuldebro. Gjenstandene vil isolere bort varmen og faren for kondens og videre muggvekst er vesentlig større. (Gustavsen et al., 2008)

En kuldebroverdi sier noe om hvor stort varmetapet er.

Varmegjennomgangskoeffisient er et annet ord for kuldebroverdi og har enheten W/mK. For beregning av kuldebroverdi brukes formlene for varmestrøm (ligning 5) og kuldebroverdi (ligning 6) (SINTEF Byggforsk, 1999a).

Varmestrøm:

$$\Phi = U * \Delta\theta * A \quad [\text{W}] \quad (5)$$

- U = U-verdien til konstruksjonen.
- $\Delta\theta$ = forskjellen i temperatur inne og ute.
- A = arealet til området beregningen foregår.

Lineær kuldebroverdi:

$$\psi = \frac{\phi - U_0 * A * \Delta\theta}{L * \Delta\theta} \quad [\text{W/mK}] \quad (6)$$

- Φ = varmestrøm.
- U_0 = U-verdi til tilsvarende vegg uten kuldebro.
- A = arealet.
- L = lengden.
- $\Delta\theta$ = forskjell i temperatur inne og ute.

Kuldebroer er med på å senke komforten innendørs og øker energibehovet.

Utbedring av kuldebroer ved å etterisolere yttervegger er tiltak som vanligvis gjøres. Isolasjonen fungerer da som en kuldebrobryter og vil redusere virkningen av kuldebroen (Gustavsen et al., 2008). I eldre tømmerhus er lafteknuten og etasjeskille typiske kuldebroer.

2.6 WUFI

WUFI er et simuleringsprogram som simulerer fukt og varmetransport gjennom flerlags bygningskomponenter. Fraunhofer institut für Bauphysik (IBP) i Tyskland utviklet programmet og WUFI er en forkortelse for Wärme Und Feuchte Instationär, oversatt blir det varme og fuktighetstransversjon (WUFI, 2018).

Programmet utfører beregninger av hygrotermiske forhold i bygningskomponenter ved naturlige klimaforhold, og undersøker hvordan fuktforholdene i en konstruksjon utvikler seg over tid. Det ses blant annet på uttørkingstid av byggfukt, kondensfare, risiko for fuktskader og muggvekst (Jan Vincent Thue, 2007).

Inndata i WUFI er konstruksjonsdetaljer (orientering, høyde, oppbygning), materialegenskaper, innledende forhold (byggfukt, temperatur) og klimaforhold (temperatur, RF, solstråling, vind). Gjennom disse dataene finner WUFI dynamisk temperatur, fuktighet og varme- og fuktstrømmer. Resultatene av simuleringen kommer i form av grafer, og en kan gjennom disse si noe om risikoen for kondens og muggvekst i konstruksjonen. (Charisi, 2018)

WUFI har flere begrensninger som må tas hensyn til. Programmet ser bare på fluks gjennom vegg horisontalt, fra inne til ute luft og omvendt. Man kan derfor ikke se på vertikal sirkulasjon i et luftlag i vegg og programmet bruker kun tidsintervaller på 1 time. Ønskes det å se på endringer hvert minutt over en periode på en måned kan dette regnes om på følgende måte: antall minutter i en måned (30 dager * 24t * 60 min = 43200 min), oppgi minutter som timer for å få dager (43200 t / 60 min = 720 dager). WUFI vil anta at tidsperioden på en måned er 720 dager.

Formlene som ligger til grunn for WUFI simuleringene er fukttransport (ligning 7) og varmetransport (ligning 8) (Karagiozis et al., u.å). Høyresiden av ligningene angir transportmekanismene til varme og fukt, mens venstresiden angir lagringsvilkårene av varme og fukt.

$$\text{Fukttransport:} \quad \frac{\partial w}{\partial \varphi} * \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla * (D_{\varphi} \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{\text{sat}})) \quad (7)$$

$$\text{Varmetransport:} \quad \frac{\partial H}{\partial T} * \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla * (\lambda T \nabla) + h_v \nabla * (\delta_p \nabla (\varphi p_{\text{sat}})) \quad (8)$$

- $\frac{\partial w}{\partial \varphi}$ = materialets fuktlagringskapasitet (J/m³K).
- $\frac{\partial H}{\partial T}$ = materialets varmelagringskapasitet (kg/m³).
- φ = relativ luftfuktighet (0-1).
- T = temperatur (K).
- D_{φ} = væskeledningskoeffisient (kg/ms).
- δ_p = materialets vanndamppermabilitet (kg/msPa).
- h_v = latent varme for fase endring (J/kg).
- p_{sat} = mettet damptrykk (Pa).
- λ = termisk ledningsevne (W/mK).

2.7 IDA ICE

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) er et simuleringsprogram for inneklima som ble utgitt i 1998. Programmet er utviklet av EQUA simulation AB som er et Svenskeid selskap som arbeider med å utvikle simuleringsverktøy (EQUA, u.å-a).

Ved bruk av IDA ICE får man muligheten til å simulere det termiske inneklimate og energiforbruket til en hel bygning. Inneklimasimuleringen gir blant annet temperatur og RF for hvert enkelt rom. Energisimuleringen beregner energiforbruket med hensyn til orientering av bygget, antall varmekilder og behovet for oppvarming. Begge simuleringene er tidsavhengige og kan simuleres over et helt år. Modellen deles opp i dynamiske soner som kan studeres individuelt eller helhetsmessig. Programmet er også tilpasset lokale krav som klimadata, standarder, spesielle systemer, spesialrapporter og produkt- og materialdata (EQUA, u.å-b).

En av fordelene med IDA ICE er at modellen kan bygges og simuleringene kan gjøres i samme program. Modeller kan også importeres fra vanlige 2D- og 3D CAD-filer eller IFC-modeller generert av for eksempel ArchiCAD, Revit eller AutoCAD (EQUA, u.å-b). Dette gjør arbeidet med oppbygging av modellen enda enklere.

2.8 ET-Kurver

Energi-Temperatur-kurver (ET-kurver) er en erfaringsgraf som viser energien som blir brukt som funksjon av utetemperaturen (Arnstad, 2004). Denne kan være et godt hjelpemiddel for å avdekke unormalt energiforbruk og gi en motivasjon til å spare energi. Ved bruk av slike kurver blir det mer synliggjort hva energien går til og energioppfølging blir enklere.

Det spesifikke energiforbruket (q) kan regnes ved hjelp av ligning 9.

Spesifikt energiforbruk (q):

$$q = \frac{\text{netto forbruk [kWh]}}{\text{oppvarmet gulvareal [m}^2\text{]}} \quad (9)$$

Enheten er kWh/m² pr uke, dag, måned eller år. Avviket mellom beregnede verdier og ET-kurven kan være ± 10% (Arnstad, 2004).

2.9 Forenklet beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater.

Byggforskbladet «471.111 beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater» inneholder en forenklet metode for beregning av risiko for kondens og muggvekst, og er basert på standarden NS-EN ISO 13788. Kondens oppstår når RF på overflaten er 100 % og muggvekst kan oppstå ved en RF over 80 %.

Prinsippet i beregningene er å sammenligne konstruksjonens temperaturfaktor (f^*) med den dimensjonerende temperaturfaktor (f_{dim}) for aktuell innvendig luftfuktighet (SINTEF Byggforsk, 1999b). Ligningene 10 og 11 viser hvordan konstruksjonens temperaturfaktor og dimensjonerende temperaturfaktor beregnes (SINTEF Byggforsk, 1999b). Siden temperaturen varierer gjennom året kan man regne ut den dimensjonerende temperaturfaktoren for hver måned og den måneden med høyest verdi er da den mest kritiske.

For å finne den dimensjonerende temperaturfaktoren er det beskrevet to fremgangsmåter, en forenklet og en fullstendig beregning. Beregningene for dimensjonering mot muggvekst og kondens er ulike, men ligningen for den dimensjonerende temperaturfaktoren er lik i begge tilfellene (ligning 11).

Konstruksjonenes temperaturfaktor:

$$f^* = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (10)$$

- θ_{si} = innvendig overflatetemperatur.
- θ_e = Temperatur ute.
- θ_i = Temperatur inne.

Dimensjonerende temperaturfaktor:

$$f_{dim} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (11)$$

- $\theta_{si,min}$ = laveste akseptable overflatetemperatur.

Konstruksjonens temperaturfaktor må være større eller lik dimensjonerende temperaturfaktor for å unngå fuktproblemer (ligning 12). Er ikke kravet oppfylt må det gjøres endringer i konstruksjonen eller inneklimaet må reguleres. Snekkenes er et verneverdig bygg så endringer i konstruksjonen er utelukket.

$$f^* \geq f_{dim} \quad (12)$$

2.10 ASHRAE's inneklimaklasser for museer

American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers (ASHRAE) ble grunnlagt i 1894 og arbeider med bygge-systemer, energieffektivitet, innendørs luftkvalitet, kjøling og bærekraft i byggebransjen (ASHRAE, u.å). De har produsert flere håndbøker som inneholder retningslinjer for inneklima.

ASHRAE har definert inneklimaklasser for museer, biblioteker, arkiver og gallerier. Disse klassene er AA, A, B, C og D, der A er delt inn i 2 undergrupper, Ad (større daglige svingninger, men ingen sesongjusteringer) og As (sesongjusteringer, men mindre daglige svingninger), som vist i tabell 2-1.

Ifølge tabell 3 i ASHRAE handbook 2011 HVAC applications er anbefalt RF 50 % og temperatur mellom 15 til 25 °C for best bevaring av museumsgjenstander (ASHRAE, 2011). Variasjonen i luftfuktighet og temperatur varierer mellom inneklimaklassene og er vist i tabell 2-1. Inneklimaklassen AA er den strengeste klassen og D den dårligste for bevaring av gjenstander. Ved å gå fra klasse A til B spares mye energi og er det ikke snakk om sensitive gjenstander, vil ikke en nedgang fra klasse A til B gjøre større skade (Kramer et al., 2015). Dette er en vurdering man må ta etter hvor sårbare gjenstandene er. Inneklimaklasse D kan forutsettes for uoppvarmede og halvklimaliserte tømmerbygninger i Norge.

Tabell 2-1 Inneklimaklassene ASHRAE har definert, med tillatt variasjon i temperatur og RF i både korte perioder og for sesongene (ASHRAE, 2011).

Maksimale svingninger og gradienter i kontrollerte rom			Fordeler og ulemper
Inneklimaklasser	I korte perioder	Sesong justeringer	
AA	± 5 % RF, ± 2°C	Uendret RF, ± 5 °C	Ikke risiko for mekanisk skade på de fleste gjenstander og malerier
A	Ad	± 5 % RF, ± 2°C	Ikke risiko for mekanisk skade på gjenstander, malerier, fotografier og bøker, men risikoen er litt større for høyt sårbare gjenstander
	As	± 10 % RF, ± 2 °C	
B	± 10 % RF, ± 5 °C	± 10 % RF, opp 10 °C men ikke over 30 °C	Moderat risiko for mekanisk skade på høyt sårbare gjenstander, liten risiko for de fleste malerier, fotografier, noen gjenstander og bøker
C	RF innenfor 25 – 75 % hele året og normal temperatur under 25 °C og som sjeldent overstiger 30 °C		Høy risiko for mekanisk skade på høyt sårbare gjenstander. Moderat risiko på de fleste malerier, fotografier, gjenstander og bøker
D	RF lavere enn 75 %		Stor risiko for mekaniske skader på gjenstander og malerier grunnet store variasjoner i RF

3 Metode

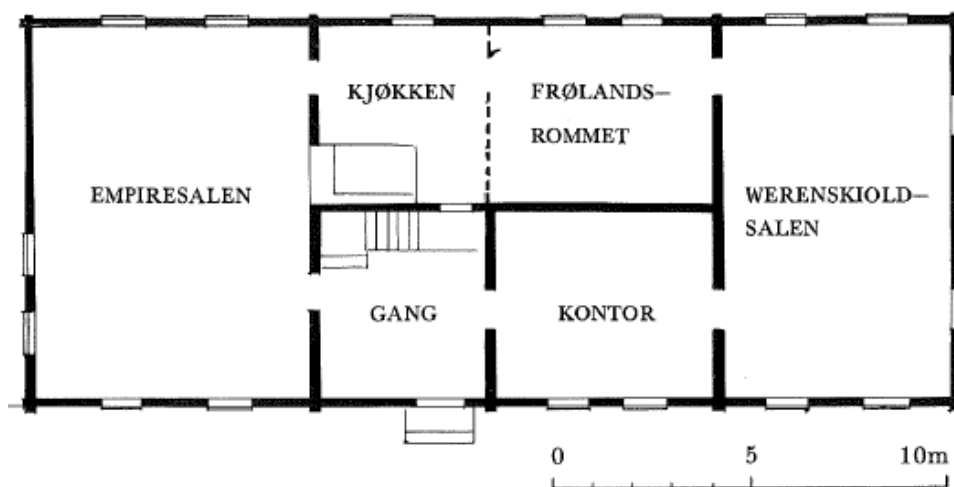
I denne masteroppgaven er det valgt å bruke kvantitative metoder for å finne en optimalisering av inneklimate ved bruk av minst mulig energi i halvklimaliserte museumsbygninger. Det er brukt en værstasjon og temperatur- og RF målere for å dokumentere klimaet og det er disse målingene som ligger til grunn for simuleringene som gjøres. En energimåler har også blitt montert og disse dataene brukes for å komme frem til energiforbruket ved eventuelle tiltak. Alle målinger er tatt i og ved Snekkenes i Sarpsborg (59°16'42"N 11°7'25"E).

3.1 Snekkenes

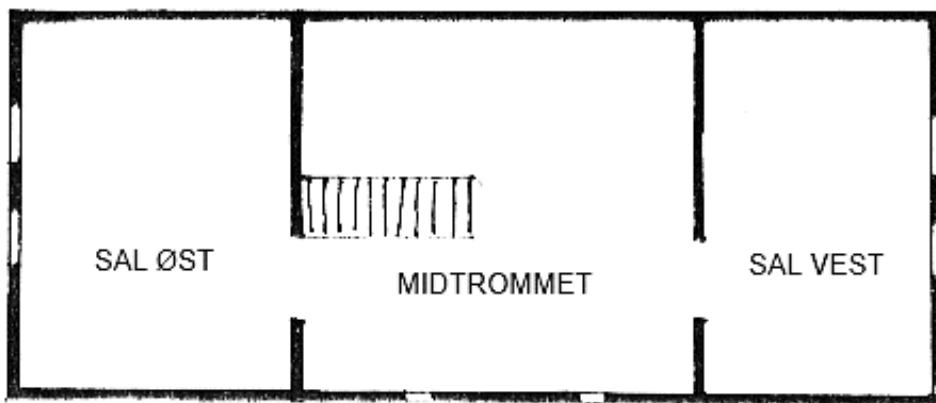
Snekkenes er et laftet tømmerhus fra slutten av 1700-tallet med utlektet kledning og med synlige laftekasser. På innsiden av tømmerveggene er det brukt ulike overflatebehandlinger. I Frølandsrommet er det oppspent tapet og i salene er det brukt moderne trefiberplater med tapet og maling for å illustrere hvordan rommet så ut i sin tid.

Strøm ble først installert på 1980-tallet. Panelovner står for romoppvarmingen og bygget inneholder flere lyskilder som gir lys til utstillingen og noe varme. Det er ikke innlagt vann eller andre fasiliteter i Snekkenes.

Grunnflaten er på ca 250 m² og romfordelingen har blitt noe forandret gjennom årene. I dag består første etasje av to store saler, kjøkken, kontor, gang og Frølandsrommet (figur 3-1). Loftetasjen består av 3 rom (figur 3-2). Første rommet opp trappen kalles «Midtrommet», og de to øvrige kalles «Sal øst» (mot museumsområdet) og «Sal vest» (mot Vollgata).



Figur 3-1 Plantegning over 1. etasje i Snekkenes slik det er per dags dato (Jensen, u.å).



Figur 3-2 Plantegning over loftet i Snekkenes slik det er per dags dato (tilsendt via mail fra museet).

3.2 Datainnsamling

I slutten av april 2018 ble en værstasjon og temperatur- og RF målere plassert på Borgarsyssel museum. Disse har logget klimaet både inne og ute frem til 6. februar 2019. For å måle hvor mye strøm som blir brukt i Snekkenes ble en energimåler plassert i sikringsskapet i Midtrommet 7. januar 2019.

3.2.1 Uteklima

Værstasjonen (figur 3-3) ble plassert på gressplenens sør-øst for Snekkenes den 27. april 2018. Denne måler vind (både retning (°) og hastighet (m/s)), solstråling (W/m^2), nedbør (mm), temperatur (°C) og RF (0-1). Det var viktig at vind- og solsensoren stod i vater. For å få dette til, ble værstasjonen plassert på tre planker og kilet opp til utstyret stod i vater. Kilene og stativet til værstasjonen ble videre skrudd sammen og til slutt ble stålstag med krok slått ned i bakken for å holde det hele stødig på plass.



Figur 3-3 Værstasjon.



Figur 3-4 Plassering av sensorer.

Værstasjonen bestod av vindmåleren «ATMOS 22 Ultrasonic Anemometer», regnmåleren «ECRN-100 Precipitation», solmåleren «PYR Solar Radiation», temperatur- og RF måleren «VP-4 Humidity/Temp/Barometer» og loggeren EM60 fra METER Group. Figur 3-4 viser sensorenes plassering på værstasjonen.

1. ATMOS 22 Ultrasonic Anemometeret er plassert på toppen og måler vindhastighet (m/s) og vindretning (°). Vinden går fritt gjennom og vindhastigheten måles. Retningsmerke (N) må peke mot geografisk nord, ikke den magnetiske.
2. PYR Solar Radiation måler solstråling i W/m² fra et synsfelt på 180 °. Sensoren må stå vannrett og peke mot den magnetiske nord og har en nøyaktighet på ± 5% (Meter Environment, 2017).
3. VP-4 Humidity/Temp/Barometer, også kalt ATMOS 14 måler relativ luftfuktighet (0-1), temperatur (°C) og atmosfærisk trykk (kPa).
4. ECRN-100 Precipitation måler nedbørsmengden i mm. Apparatet er veldig følsomt med sine to tippeskjeer som tipper ved hver 0,2 mm nedbør.
5. EM60 er loggeren som de fire instrumentene er koblet til. Denne logger målingene hvert 10 minutt. Batteriene lades opp av solcellepanel og bør derfor stå vendt mot sør for å få mest mulig sollys.

Klimadata lastes inn på pc via programmet Zentra utility. Her kan man få ut alle måledataene i Excel-format, endre hyppigheten av målingene og det vises en oversikt over sensorene og batterikapasitet.

3.2.2 Inneklima

Inne i Snekkenes er det plassert 5 temperatur- og RF loggere, se tabell 3-1 for plassering. 4 av disse loggerne er fra Easylog (figur 3-5) mens den siste er fra Tinytag (figur 3-6). Loggerne ble fargekodet og måler temperatur (°C), relativ luftfuktighet (%) og duggpunktstemperatur (°C).



Figur 3-5 Loggerne fra Easylog, med fargekode.



Figur 3-6 Tinytag (Tinytag, u.å).

Plasseringen av loggerne varierer noe fra rom til rom som illustrert i figurene 3-7 og 3-8. I Empiresalen og Werenskioldsalen ble de plassert på en spiker ca. 5 cm fra taket, omtrent midt i rommet. Loggeren på Kontoret ble plassert på pleksiglassveggen. På loftet ble en lagt på kisten i Midtrommet og en ble hengt på innerveggen i Sal vest.

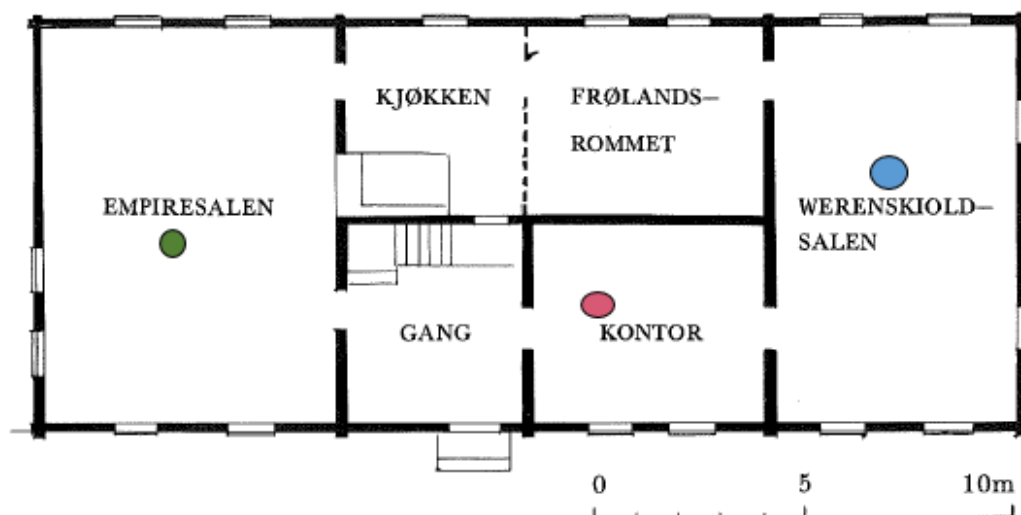
Loggerne fra Easylog er utstyrt med en USB plugg og ved hjelp av programmet EasyLog USB lastes dataene ned. I dette programmet aktiveres, avsluttes og vises resultatene fra loggeren. Målingene vises i form av grafer som inneholder temperatur, luftfuktighet og duggpunktstemperatur.

Målingene fra Tinytagen ble tilsendt via mail fra museet.

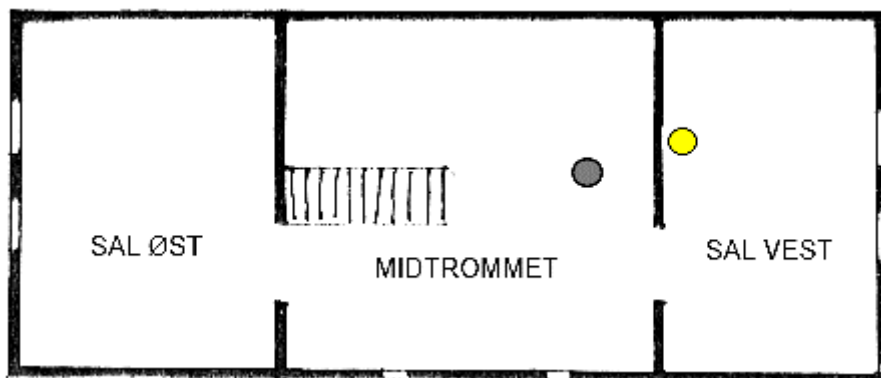
Loggerne ble satt til å måle en gang hver time, noe som ble vurdert tilstrekkelig for denne bygningen med liten variasjon i temperatur og RF, spesielt når bygget er lite brukt på høst og vinterstid.

Tabell 3-1 Plassering av loggerne og fargekodene.

Rom	Farge
Empiresalen	Grønn
Kontor	Rosa
Werenskioldsalen	Blå
Loft «Midtrommet»	Grå
Loftsrom «Sal vest»	Gul



Figur 3-7 Plassering av USB-loggere i 1. etasje (Jensen, u.å).



Figur 3-8 Plassering av loggere på loftet (tilsendt via mail fra museet).

3.2.3 Efergy e2 trådløs energimåler

Efergy e2 trådløs energimåler er et instrument som måler byggets totale strømforbruk (Clas Ohlson, 2019). Energimåleren er brukt for å måle månedlig forbruk (kWh) i Snekkenes og ble montert 7. januar 2019.

Det var viktig at dato og klokkeslett på måleren stemte overens med tid og dato på pc-en for korrekt overføring av data. Programmet eLink brukes ved innhenting av målinger og for å se historikk. Energiforbruket vises for hver time, dag, uke og måned. Oversikten bidrar til forståelse av når energiforbruket er høyt og bør reduseres.

De tre sensorene skal klemmes rundt hver sin fase. Det var vanskelig å komme til ved strømmåleren, så sensorene ble montert rundt ledningene ut av hovedsikringen, vist i figur 3-9. Feilkilder her er om måleren er montert riktig i sikringsskapet og siden den kun måler strømmen og ikke spenningen kan måleresultatene ha noe avvik om spenningen varier.



Figur 3-9 Energimåleren montert i sikringsskapet.

3.3 Termografering

Termografering er å registrere den infrarøde strålingen fra en overflate ved hjelp av et varmekamera. Ved å termograferer får man et bilde (termogram) som viser temperaturforskjeller på overflater. Dette er en effektiv måte å finne luftlekkasjer, kuldebroer og manglende varmeisolasjon i bygninger (Edvardsen & Ramstad, 2014).

Termografering ble i denne oppgaven brukt for å lokalisere kuldebroer og for å få frem overflatetemperaturen på yttervegg i Werenskioldsalen. Masterstudent Karoline Havnes (2019) ved NMBU utførte termograferingen med termograferingskameraet Flir t620bx (Havnes, 2019). To av maleriene i Werenskioldsalen ble tatt ned for å termograferer veggene bak maleriene. Dette for å sammenligne temperaturen med og uten maleri på veggene. Et maleri vil isolere noe og temperaturen bak maleriet vil derfor være noe lavere, som igjen vil føre til økt risiko for muggvekst.

3.4 Variasjon av innetemperatur

Museet har frem til i dag hatt panelovnene i Snekkenes innstilt på 6 °C, kun på høst og vinterstid. For å undersøke hvor mye energi som må til for å øke temperaturen i Snekkenes, og for å se hvordan dette påvirker inneklimaet ble temperaturen økt gradvis fra 6 °C til 20 °C. Temperaturene i forsøket og datoer for temperaturøkning er vist i tabell 3-2. Når forsøket var ferdig ble temperaturen igjen senket til 6 °C.

Tabell 3-2 Temperatur og tidsperioden for variasjon av innetemperatur.

Økt temperatur til (°C)	Tidsperiode	Antall dager
6	07.01.19 – 21.01.19	14
12	21.01.19 – 28.01.19	7
16	28.01.19 – 01.02.19	4
20	01.02.19 – 12.02.19	12

Temperaturene og energimålingene som ble tatt i denne perioden brukes til å lage ET-kurver. ET-kurvene kan benyttes for å kartlegge hvor mye energi som må brukes for å opprettholde en gitt innetemperatur i Snekkenes.

3.5 Simuleringer

3.5.1 Klimafilene

Klimafilene for ute og inneklimate har blitt laget av måledataene fra værstasjonen og temperatur- og RF målerne. Uteklimatefilene inneholder informasjon om temperatur, RF, nedbør, vindretning, vindhastighet, solstråling og lufttrykk. Inneklimatefilene inneholder informasjon om temperatur og RF ute og inne.

Det ble også laget en egen klimafil med kun TMY-data (Typical Meteorological Year). Dataene (temperatur, RF, vindretning, vindhastighet, solstråling og atmosfærisk trykk) er hentet fra Photovoltaic geographical information system (European commission, 2017) og nedbørsdata er hentet fra Shiny weather data (Shiny weather data, u.å). Tabell 3-3 viser hvilket år dataene er hentet fra for hver enkelt måned.

Tabell 3-3 Hvilke år klimadataene for standardåret er hentet fra.

European Commission		Shiny wether data
Måned	År	År
Januar	2014	2016
Februar	2006	2016
Mars	2011	2016
April	2014	2016
Mai	2012	2016
Juni	2012	2016
Juli	2015	2016
August	2010	2016
September	2011	2016
Oktober	2006	2016
November	2006	2016
Desember	2014	2016

Siden det er ikke gjort målinger i Sarpsborg over et helt år er TMY-data lagt inn i klimafilene med måledata for perioden 6. februar til 27. april.

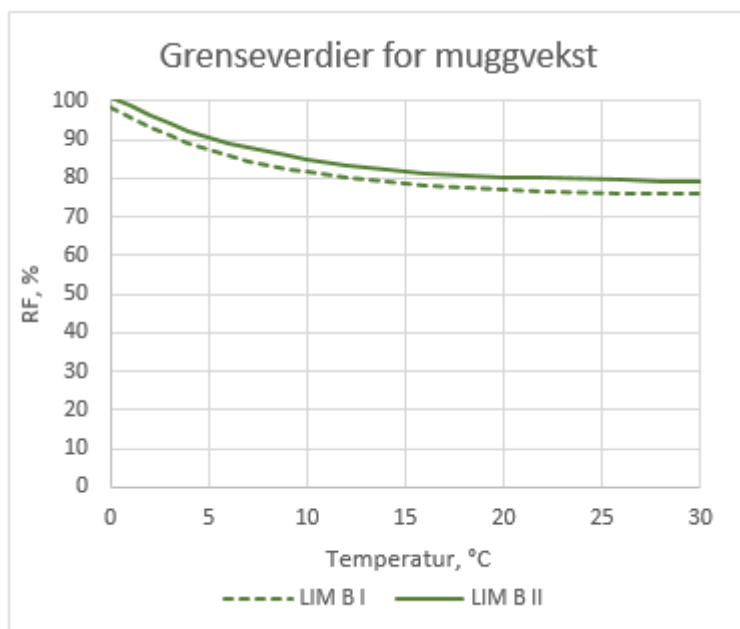
De ulike simuleringprogrammene krever ulikt format på klimafilene. Klimafilene som brukes i WUFI må være i .wac-format og IDA ICE krever .epw-format samt data over et helt år.

Ved bruk av klimafilene i simuleringprogrammet WUFI kartlegges det når på året og til hvilken tid på døgnet det er risiko for muggvekst. I IDA ICE brukes klimafilene til simulering av inneklimate og energiberegninger.

3.5.2 WUFI

Det finnes flere måter å simulere muggvekst på. I en artikkel skrevet av Lie (2019) er det testet 4 ulike metoder å undersøke mengden muggvekst over tid på ubehandlet utvendig panel. Lie konkluderer med at den originale VTT modellen ga best estimat sammenlignet med målte data, med en marginal ledelse over WUFI VTT (Lie et al., 2019). Modellen WUFI VTT er en videreutvikling av originalen og ble utviklet i et samarbeid mellom det Finske forskningsinstituttet VTT og Fraunhofer IBP i Tyskland (WUFI, u.å).

I motsetning til Lie som ser på mengde muggsopp i sine modeller, er det i denne masteroppgaven interessant å undersøke under hvilke forhold det oppstår muggvekst og når på året dette skjer i Snekkenes. Det ble med bakgrunn av dette valgt å bruke simuleringsprogrammet WUFI Pro 4.1 IBP for å undersøke når forholdene ligger til rette for muggvekst. Fem ulike rom er blitt simulert i WUFI: Werenskioldsalen, Kontoret, Empiresalen, Sal vest og Midtrommet. Inndata i simuleringsprogrammet er vist i tabell 3-4 og simuleringen blir i hovedsak brukt for å dokumentere hvilke dager som har risiko for muggvekst. Fra WUFI får man temperatur og RF på veggoverflaten som sammenlignes med grenseverdiene som er vist i figur 3-10. Risiko for muggvekst vises i WUFI i form av punkter over stiplet linje, men man kan ikke direkte se hvilken dag dette gjelder. Dagene og timene med risiko for muggvekst finner man ved å eksportere temperatur og RF-data til Excel sammen med dato og timer for målt periode, for så å sammenligne når temperatur og RF kombinert er over grenseverdiene.



Figur 3-10 Grenseverdier for muggvekst.

LIM «lowest isopleth for mould» er en modell for når det er risiko for muggvekst (Sedlbauer, u.å). Denne modellen er illustrert i figur 3-10. Forskjellen mellom LIM B I (stiplet linje) og LIM B II (heltrukket linje) er materialet muggsoppen vokser på. LIM B I gjelder for lett nedbrytbare materialer som tapet og gips, mens LIM B II gjelder for plasttyper, mineralske byggematerialer og isolasjonmidler som ikke tilhører klasse I (Sedlbauer, u.å). Muggsoppen vokser hovedsakelig på gjenstander i Snekkenes det ses derfor på verdier over LIM B I (stiplet linje) i vurderingen om når det er risiko for muggvekst.

Tabell 3-4 Inndata i WUFI.

		Inndata
Konstruksjon	Oppbygning	Se tabell 3-5
	Orientering	Werenskioldsalen: Nordvest Empiresalen: Sydøst Kontoret: Nord Sal vest: Nordvest Helning: 90 grader Bygningshøyde: lav bygning, høyde inntil 10 m
	Overflaters overgangskoeff.	
	Ytre overflate (til venstre)	Varmemotstand: Yttervegg (0,0588 m ² K/W) Sd-verdi [m]: ingen overflatebehandling Kortbølget strålingsabsorpsjonstall: Treverk (gran) brunmalt (0,8) Regnvannabsorpsjonstall: i henhold til konstruksjonstype/helning
	Indre overflate (til høyre)	Varmemotstand: Yttervegg (0,125 m ² K/W) Sd-verdi [m]: ingen overflatebehandling
	Startbetingelser	Startfuktighet i konstruksjonen: I hvert enkelt sjikt Starttemperatur i konstruksjonen: Middelvei over konstruksjonen Starttemperatur i konstruksjonen: 6 °C
Innstillinger	Tid/profil	Werenskioldsalen: 28.04.18 - 05.02.19 Empiresalen: 16.05.18 - 05.02.19 Kontoret: 18.06.18 - 05.02.19 Sal vest: 28.04.18 - 05.02.19
	Numerikk	Alt unntatt de 3 punktene under hygrotermiske spesialinnstillinger er huket av.
Klima	Ute (venstre side)	Klimadata fra værstasjon og TMY
	Inne (høyre side)	Klimafil for hvert enkelt rom, laget av målingene inne

Tabell 3-5 Oppbygning av ytterveggene som ble undersøkt gjennom simuleringer i WUFI.

Rom	Materiale fra ute til inne	Tykkelse [mm]
Werenskioldsalen	Gran longitudinalt	25
	Luftsjikt	25
	Gran longitudinalt	200
	Luftsjikt	25
	Trefiberplate	15
Empiresalen	Gran longitudinalt	25
	Luftsjikt	25
	Gran longitudinalt	200
	Luftsjikt	25
	Trefiberplate	15
Kontoret	Gran longitudinalt	25
	Luftsjikt	25
	Gran longitudinalt	200
	Luftsjikt	15
	Gran longitudinalt	15
Sal vest	Gran longitudinalt	25
	Luftsjikt	25
	Gran longitudinalt	200

Målt klima ble også sammenlignet med TMY-data for å se hvordan væråret 2018-2019 har vært sammenlignet med et gjennomsnittår. Dette for å se om det målte klimaet avviker mye fra normalen.

Det er også simulert en situasjon med et maleri på yttervegg i Werenskioldsalen. Ytterveggen er da bygget opp likt som i tabell 3-5, men med to ekstra sjikt på innsiden, 1 cm luft og et tynt lag med kraftpapp. Dette gjøres for å se om risikoen for muggvekst øker ved å henge et maleri på veggen i dette rommet.

For å teste ulikt inneklime i Snekkenes ble WUFI brukt for å finne nødvendig settpunkttemperatur for å unngå muggvekst. Settpunkttemperaturen i oktober og november ble endret til 16 og 18 °C og ny RF i rommet ble beregnet ved å bruke ligning 3 i kapittel 2.2.2. Det nye klimaet ble videre lagt inn i inneklimefilen og brukt i simuleringene i WUFI. Programmet viser da om det er risiko for muggvekst med endret klima.

For å oppsummere er WUFI brukt for å undersøke fire ulike scenarier som vist i tabell 3-6. Scenario 1 er for å finne når det er risiko for muggvekst i Snekkenes, scenario 2 er Werenskioldsalen simulert med TMY-data, scenario 3 er med et maleri på yttervegg i Werenskioldsalen og scenario 4 er med endret inneklime.

Tabell 3-6 Klima og konstruksjon for de fire ulike scenarioene.

Scenario	Konstruksjon	Uteklime
Scenario 1	Yttervegg	Målt klima
Scenario 2	Yttervegg	TMY
Scenario 3	Maleri på yttervegg	Målt klima
Scenario 4	Yttervegg	Endret inneklime i oktober og november

3.5.3 IDA ICE

IDA ICE er ett av de største simuleringsprogrammene for bygninger, og er godt egnet for energisimulering (Hilliaho et al., 2015). I denne masteroppgaven blir IDA ICE 4.8 brukt for å simulere temperatur og RF i de ulike rommene og energiforbruket til Snekkenes.

Modellen er bygd opp av soner og hver sone tilsvarer ett av rommene i Snekkenes. I virkeligheten har Snekkenes saltak, men som en forenkling har modellen flatt tak. Figur 3-11 viser 3D-modellen fra IDA ICE og målene tilsvarer virkeligheten, med unntak av høyden på loftet som er tilpasset slik at volumet av rommene tilsvarer virkeligheten. Størrelsene på rommene er vist i tabell 3-7 og det er plassert totalt 13 panelovner i modellen. Ytterveggene har en U-verdi på $0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$ som er basert på målingene til Karoline Havnes (2019) og bygget opp som i tabell 3-9. Inndataen i programmet er nærmere beskrevet i tabell 3-8.



Figur 3-11 3D-modellen fra IDA ICE.

Tabell 3-7 Areal og volum av rommene i Snekkenes.

Sone / Originalnavn	Areal [m ²]	Volum [m ³]
Sone 1 / Empiresalen	72,38	192,53
Sone 2 / Kjøkken	22,27	54,78
Sone 3 / Kontor	27,79	73,92
Sone 4 / Frølandsrommet	27,5	69,3
Sone 5 / Werenskioldsalen	57,22	160,21
Sone 6 / Sal øst	72,38	188,18
Sone 7 / Midtrommet	100,1	260,26
Sone 8 / Sal vest	57,22	148,77
Sone 9 / Gang	22,5	58,5
Totalt	459,36	1206,45

Infiltrasjonstallet sier noe om hvor store luftlekkasjer det er i et bygg (Store norske leksikon, 2009). Infiltrasjonstallet er ikke lett å fastsette uten omfattende målinger. I «veiledning om energisparing i gamle hus» skrevet av riksantikvaren, er det satt som tiltak å redusere infiltrasjonen fra 10 til 5 h⁻¹ i gamle trebygninger (Riksantikvaren, 2013). Siden Snekkenes er et gammelt og trekkfullt tømmerhus er det derfor valgt å bruke en infiltrasjon på 10 ACH (air changes per hour) i simuleringen.

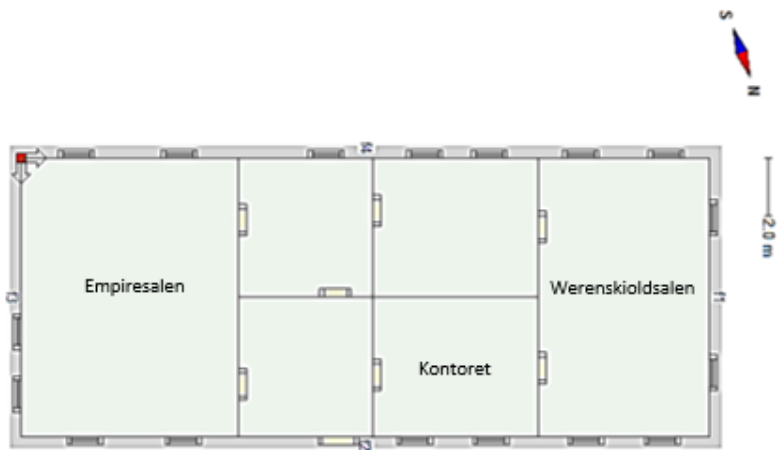
Tidsperiode for lysbruk i Snekkenes er satt fra kl 11⁰⁰ -15⁰⁰ hver helg. Tidspunktet er satt på bakgrunn av at bygget kun er åpent for besøkende mellom kl 11⁰⁰ -15⁰⁰ høst og vinter. Bygget er åpent for publikum på sommerstid, men som en forenkling er dette ikke tatt med i simuleringen. Snekkenes har ikke lufteventiler eller annet ventilasjonssystem installert, så dette er ikke valgt i modellen. Det er heller ikke lagt inn personer eller annet ekstra utstyr i modellen.

Tabell 3-8 Inndata i IDA ICE.

		Inndata
Global data	Lokasjon	Sarpsborg
	Klima	Klimadata fra værstasjon og TMY
	Vind profil	Forstadsområde
Standard (oppbygning)	Konstruksjons-Elementer	Se tabell 3-9
	Virkningsgrad elektrisk varme	1 COP
Orientering		Se figur 3-12
Infiltrasjon	Infiltrasjonsenhet	ACH
	Lufttetthet	10 ACH (building)
	Trykk	50 Pa
HVAC system		Har ikke ventilasjonssystem

Tabell 3-9 Oppbygning av konstruksjonselementene.

Bygningsdel	Oppbygning	Tykkelse	U-verdi
Yttervegg	Trefiberplate 15 mm Luft 10 mm Tømmer 200 mm Luft 10 mm Panel 25 mm	260 mm	0,47 W/m ² K
Innervegg	Trefiberplate 15 mm Luft 10 mm Tømmer 180 mm Luft 10 mm Trefiberplate 15 mm	230 mm	0,53 W/m ² K
Etasjeskille	Wood joist floor 245mm (example)	303 mm	0,16 W/m ² K
Tak	Trebord 60 mm Luft 25 mm Takstein 22 mm	107 mm	1,2 W/m ² K
Kjeller (krypkjeller)	Joist floor against crawlspace (example)	357 mm	0,11 W/m ² K
Vindu	1 pane glazing, clear, 4 (example)		5,8 W/m ² K
Dør	Treverk	40 mm	2,2 W/m ² K



Figur 3-12 Orientering av Snekkenes i forhold til himmelretning.

Det gjøres to ulike typer simuleringer i IDA ICE. Den første er inneklimasimulering for å validere simuleringen av temperatur og RF ved hjelp av målingene med en settpunkttemperatur på 6 °C. Den andre er energisimulering for å se hvor mye energi som brukes ved en gitt settpunkttemperatur over en periode på ett år. De ulike settpunkttemperaturene som er brukt er 6, 16, 18 og 20 °C.

3.6 ET-Kurver

ET-kurver er en metode for energioppfølging og viser hvordan energien blir brukt som en funksjon av utetemperaturen. I den forbindelse ble energimåleren installert og resultatene danner grunnlaget for ET-kurvene.

Energimåleren målte totalt energiforbruk i Snekkenes hver time i perioden 07.01.19 til 12.02.19. ET-kurvene lages ved å plote energiforbruket sammen med utetemperaturen. Energiforbruket på y-aksen og utetemperaturen på x-aksen. Hver ET-kurve representerer energiforbruket ved en viss utetemperatur når innetemperaturen er satt.

Som beskrevet tidligere i kapittel 3.4 «Variasjon av innetemperatur» ble temperaturen økt gradvis i en periode. ET-kurvene er derfor laget for innetemperaturene 6, 12, 16 og 20 °C.

ET-kurvene brukes for å finne hvor mye energi som må til for å holde en bestemt innetemperatur i Snekkenes.

3.7 Forenklet beregningsmetode av risiko for muggvekst

Byggforskbladet «471.111 beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på invendige overflater» brukes for å beregne risikoen for muggvekst i Snekkenes. Det skal undersøkes om denne forenklete beregningsmetoden gir et godt nok estimat av risikoen for muggvekst sammenlignet med simuleringen i WUFI.

Som vist i teorien skal konstruksjonens temperaturfaktor (f^*) være større eller lik den dimensjonerende temperaturfaktor (f_{dim}) for å unngå risiko for muggvekst (ligning 12). Dimensjonerende temperaturfaktor ble regnet ut for hver måned, og måneden med høyest verdi er den mest kritiske.

Tabell 3-10 viser gjennomsnittlig månedsmiddel for temperatur og RF som er brukt i beregningene. Det er ikke gjort målinger inne i januar, februar, mars og april og det er derfor bare beregnet dimensjonerende temperaturfaktor for de resterende månedene.

I beregningene av dimensjonerende temperaturfaktor brukes figur 3-13 og den viser vanndampinnholdet i luften ved metning (v_{sat}) ved ulike temperaturer.

Vanndampinnholdet i luften er avgjørende for minste tillatte overflatetemperatur.

Fukttilskudd klassene er vist i figur 3-14, det er valgt å bruke fukttilskudd klasse 1 i beregningen. Fukttilskudd klassen brukes videre for å finne inneluftens fukttilskudd.

Tabell 3-10 Månedlig gjennomsnitt av temperatur og RF både inne og ute.

Måned	Gjennomsnittsverdi		Gjennomsnittsverdi	
	Temp inne	RF inne	Temp ute	RF ute
Mai	17	0,56	15,9	0,61
Juni	20,1	0,51	17,7	0,59
Juli	24,41	0,49	21,4	0,61
August	19,5	0,59	16,6	0,72
September	15,1	0,66	13,3	0,73
Oktober	10,4	0,71	8,1	0,78
November	8	0,74	4,1	0,86
Desember	6,4	0,63	-0,2	0,86

θ °C	v_{sat} g/m ³	θ °C	v_{sat} g/m ³	θ °C	v_{sat} g/m ³
30	30,36	10	9,40	-10	2,14
29	28,78	9	8,83	-11	1,97
28	27,24	8	8,28	-12	1,81
27	25,80	7	7,76	-13	1,66
26	24,40	6	7,27	-14	1,52
25	23,04	5	6,80	-15	1,39
24	21,80	4	6,37	-16	1,27
23	20,60	3	5,96	-17	1,16
22	19,45	2	5,57	-18	1,06
21	18,35	1	5,20	-19	0,97
20	17,29	0	4,84	-20	0,88
19	16,33	-1	4,48	-21	0,80
18	15,40	-2	4,13	-22	0,73
17	14,50	-3	3,82	-23	0,67
16	13,65	-4	3,52	-24	0,61
15	12,82	-5	3,24	-25	0,55
14	12,09	-6	2,99	-26	0,50
13	11,37	-7	2,75	-27	0,46
12	10,68	-8	2,53	-28	0,41
11	10,03	-9	2,33	-29	0,38

Figur 3-13 Vanddampinnhold ved metning (v_{sat}) ved ulike temperaturer. Tabellen er hentet med tillatelse fra SINTEF Byggforsk. (1999). 471.111 *Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater*. Byggforskserien. Tabell 74. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/2758/beregningsmetode_for_aa_unngaa_kondens_eller_muggvekst_paa_innvendige_overflater (lest 08.01.2019).

Fuktilskudd klasse	Bygningstype
1	Lager
2	Kontor, butikk
3	Bolig med få beboere
4	Bolig med mange beboere, idrettshall, kjøkken, kantine
5	Spesielle bygninger: f.eks. vaskeri, bryggeri, svømmehall

Figur 3-14 Fuktilskudd klassene ved beregning av inneluftens fuktilskudd. Tabellen er hentet med tillatelse fra SINTEF Byggeforsk. (1999). 471.111 *Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater*. Byggeforskserien. Tabell 73. Tilgjengelig fra: https://www.byggeforsk.no/dokument/2758/beregningsmetode_for_aa_unngaa_kondens_eller_muggvekst_paa_innvendige_overflater (lest 08.01.2019).

3.8 Vanndampinnholdet i luften

Hensikten med å sammenligne vanndampinnholdet i inneluften med uteluften er for å se om en avfukter vil ha en positiv effekt i Snekkenes. En avfukter vil føre til lavere RF i rommet, som igjen vil senke risikoen for muggvekst. Ligning 2 blir løst med hensyn på vanndampinnholdet (v) og vanndampinnholdet i inneluften og uteluften sammenlignes. I denne beregningen er det brukt målt temperatur og RF for både inne og ute og det maksimale vanndampinnholdet i luften ble funnet ved hjelp av figur 3-13.

4 Resultater

4.1 Simuleringer i WUFI

For å finne risikoperioder for muggvekst i Snekkenes ble det gjennomført fire forskjellige simuleringer i WUFI. I første scenario ble det kun brukt målte klimadata, i scenario to ble data fra TMY (typical meteorological year) brukt i Werenskioldsalen, i scenario tre ble det simulert et maleri på yttervegg i Werenskioldsalen og i siste scenario ble klimafilene endret for å finne hvilken innetemperatur som ikke gir risiko for muggvekst i de ulike rommene.

Klimafilene har noen feilkilder som ikke påvirker resultatene i stor grad. I midten av oktober ble det oppdaget en defekt på vindsensoren som resulterte i verdiavvik. Måleresultatene fra vindsensoren i perioden 03.06.18 til 26.10.18 kunne derfor ikke brukes. Årsaken til defekten er ikke kjent, men en ny fungerende vindsensor ble montert 26.10.18. Snø og is på værstasjonen har også vært en annen feilkilde. Da de siste målingene skulle hentes 06.02.19 var værstasjonen dekket av snø og is. Dataene ble likevel benyttet da det ikke ville ha påvirket resultatene grunnet lav risiko for muggvekst i denne perioden.

4.1.1 Risiko for muggvekst

WUFI ble brukt for å finne når på året det er risiko for muggvekst i Snekkenes ved bruk av målt klima.

Antall dager med risiko for muggvekst er definert etter hvilke datoer som har høyere verdier enn grenseverdiene på den stiplede linjen i figur 4-1. Muggvekstrisikoen kan vare bare noen få timer i løpet av en dag, men telles fremdeles som en hel dag.

Sal vest og Midtrommet har størst risiko for muggvekst. Tabell 4-1 viser at disse rommene har muggvekstrisiko i 35 dager i løpet av et år. Werenskioldsalen og Kontoret har omtrent like stor risiko for muggvekst, Kontoret har risiko bare en dag mer enn Werenskioldsalen. Empiresalen er rommet med lavest risiko for muggvekst med risiko i kun 4 dager i løpet av ett år. Variasjonen i antall dager skyldes orienteringen til rommene. Rom vendt mot syd har mindre risiko enn rom vendt mot nord. Risikoen er størst i månedene oktober og november, men ser av tabell 4-1 at Kontoret og Sal vest/ Midtrommet også har noe risiko i september og desember.

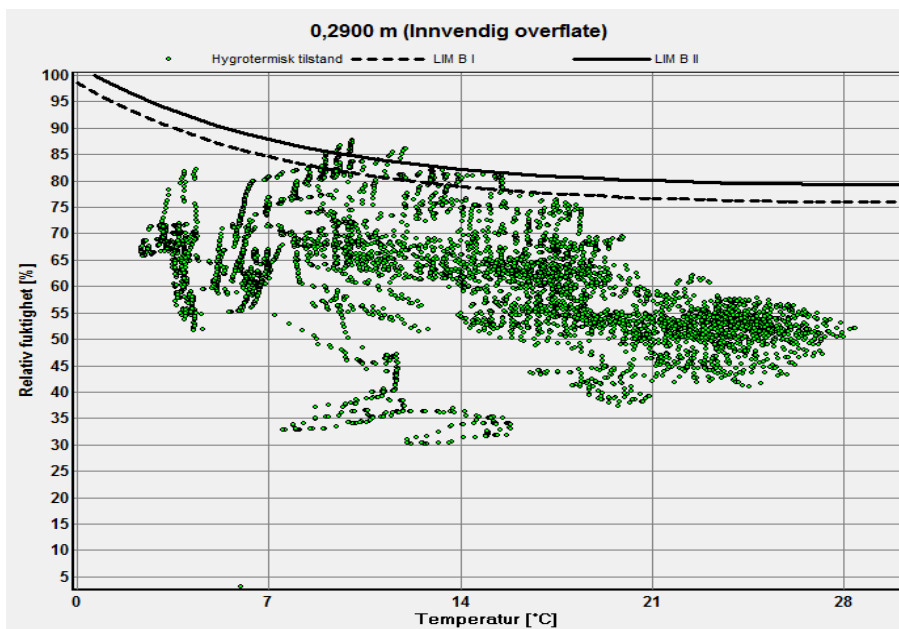
Tabell 4-1 Antall dager med risiko for muggvekst i løpet av ett år ved målt klimadata.

Sted	Risiko for muggvekst							
	September		Oktober		November		Desember	
	Dager	Timer	Dager	Timer	Dager	Timer	Dager	Timer
Werenskioldsalen	-	-	9	118	6	120	-	-
Empiresalen	-	-	4	41	-	-	-	-
Kontoret	2	28	10	143	4	55	-	-
Sal vest / Midtrommet	1	2	12	160	16	303	6	85

Analyse av uteklimaet i risikoperiodene viser at det har regnet kvelden eller dagen før og sol samme dag som risikoen for muggvekst oppstår. Luftfuktigheten i Snekkenes har da økt i løpet av kvelden og når solen skinner øker temperaturen som i kombinasjon med høy RF vil føre til kritiske verdier.

Midtrommet og Sal vest har ifølge simuleringene like forhold og vil heretter omtales som like, derfor ses det kun på Sal vest av disse to rommene videre i masteroppgaven.

En isoplett over risiko for muggvekst i Werenskioldsalen, hvor overflatetemperatur og RF er plottet sammen er vist i figur 4-1. Isoplettene for de andre rommene er vist i vedlegg C. Muggvekstrisikoen er vist i form av at punkter ligger over LIM B I (stiplet linje). Denne linjen symboliserer den laveste grensen for muggvekst ved materialer som tapet, gipsplater og lett nedbrytbare materialer.



Figur 4-1 Det er risiko for muggvekst i Werenskioldsalen.

4.1.2 Bruk av TMY-data

Tabell 4-2 viser at det ifølge simuleringen er 18 dager med risiko for muggvekst i Werenskioldsalen med bruk av TMY-data fra Photovoltaic geographical information system og Shiny weather data, som forklart i kapittel 3.5.1 Klimafilere. Oktober og november er også her månedene med størst risiko for muggvekst.

Tabell 4-2 Antall dager med risiko for muggvekst ved bruk av TMY-data.

Sted	Risiko for muggvekst					
	September		Oktober		November	
	Dager	Timer	Dager	Timer	Dager	Timer
Werenskioldsalen	1	4	9	131	8	164

4.1.3 Simulert maleri på yttervegg

Ved å simulere et maleri på yttervegg i Werenskioldsalen øker risikoen for muggvekst med 6 dager i forhold til simulering uten maleri på veggen. Risikoen for muggvekst er totalt 21 dager i løpet av et år ved å henge et maleri på yttervegg, vist i tabell 4-3. Oktober og november er også her månedene med størst risiko for muggvekst.

Tabell 4-3 Antall dager med risiko for muggvekst med et maleri på yttervegg.

Sted	Risiko for muggvekst					
	September		Oktober		November	
	Dager	Timer	Dager	Timer	Dager	Timer
Werenskioldsalen						
Yttervegg med maleri	2	8	10	133	9	163
Yttervegg uten maleri	-	-	9	118	6	120

4.1.4 Endret inneklime

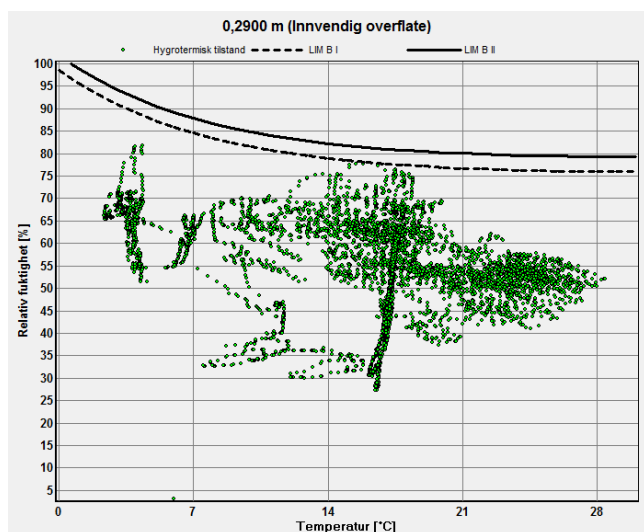
Inneklimeet er endret i oktober og november siden disse månedene har størst risiko for muggvekst. Klimafilene ble endret ved å sette en ny settpunkttemperatur i oktober og november til 16 og 18 °C. Ligning 3 fra teorien ble brukt for å regne ut hva RF i rommet vil bli med ny innetemperatur. Det nye klimaet ble så brukt i simuleringsprogrammet WUFI.

Werenskioldsalen har risiko for muggvekst ved en settpunkttemperatur på 16 °C ifølge simuleringen i WUFI. Risikoen er tilstede 5 timer i løpet av 14. oktober som vist i tabell 4-4.

Tabell 4-4 Timer med risiko for muggvekst ved en settpunkttemperatur på 16 °C i Werenskioldsalen.

Dato og klokkeslett	Overflatetemperatur	RF
14.10.2018 14:00	16,22	77,90
14.10.2018 15:00	16,35	79,94
14.10.2018 16:00	16,17	79,03
14.10.2018 17:00	16,17	78,85
14.10.2018 18:00	16,11	77,99

Når settpunkttemperaturen økes til 18 °C i oktober og november er det ikke lenger risiko for muggvekst i Werenskioldsalen. Dette vises i figur 4-2 ved at ingen punkter ligger over stiplet linje.



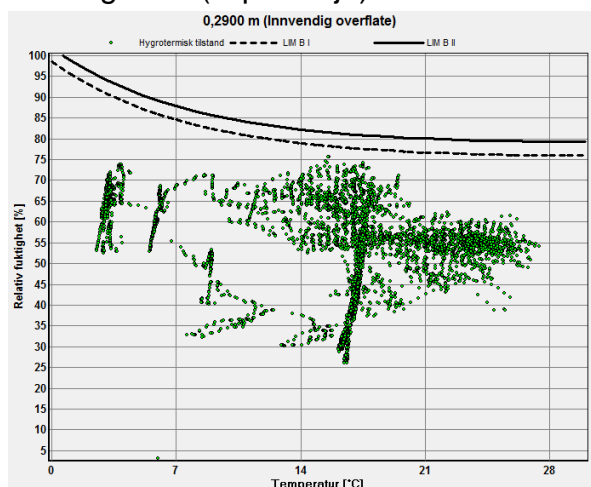
Figur 4-2 Det er ikke risiko for muggvekst i Werenskioldsalen ved settpunkttemperatur på 18 °C.

Resultater fra WUFI viser at det er risiko for muggvekst i Empiresalen ved settpunkttemperatur 16 °C. Av tabell 4-5 vises det at risikoen for muggvekst er tilstede 3 timer 1. november.

Tabell 4-5 Timer med risiko for muggvekst ved en settpunkttemperatur på 16 °C i Empiresalen.

Dato og klokkeslett	Overflatetemperatur	RF
01.11.2018 15:00	16,35	79,94
01.11.2018 16:00	16,17	79,03
01.11.2018 17:00	16,17	78,85

Når settpunkttemperaturen økes til 18 °C ser man av figur 4-3 at alle punktene ligger under grafen (stiplet linje) så risikoen for muggvekst er ikke lenger tilstede.



Figur 4-3 Det er ikke risiko for muggvekst i Empiresalen ved en settpunkttemperatur på 18 °C.

På Kontoret er det også risiko for muggvekst ved en settpunkttemperatur på 16 °C. Klimadataene er kun endret i oktober og november, men som vist i tabell 4-6 er det risiko for muggvekst i september. Det må derfor i dette rommet også gjøres tiltak i september. Ved å sette opp settpunkttemperaturen til 18 °C i timene som er vist i tabell 4-6, vil risikoen forsvinne.

Tabell 4-6 Timer med risiko for muggvekst ved en settpunkttemperatur på 16 °C på Kontoret.

Dato og klokkeslett	Overflatetemperatur	RF
18.09.2018 15:10	15,92	78,29
18.09.2018 16:10	16,00	78,29
18.09.2018 17:10	16,33	78,29
18.09.2018 18:10	16,38	77,86
18.09.2018 19:10	16,43	77,64
19.09.2018 00:10	16,66	77,89
19.09.2018 01:10	17,00	78,37
19.09.2018 02:10	17,06	78,48
19.09.2018 03:10	17,05	78,20
19.09.2018 04:10	17,02	77,79
19.09.2018 05:10	17,03	77,61
19.09.2018 15:10	17,10	77,67
19.09.2018 16:10	17,39	77,80
19.09.2018 17:10	17,46	77,77
19.09.2018 18:10	17,48	77,73
19.09.2018 19:10	17,50	77,70
19.09.2018 20:10	17,51	77,68
19.09.2018 21:10	17,52	77,66

På loftet er det minimal risiko for muggvekst med en settpunkttemperatur på 16 °C. Det er kun risiko i 3 timer som vist i tabell 4-7, to timer i september og en time i januar.

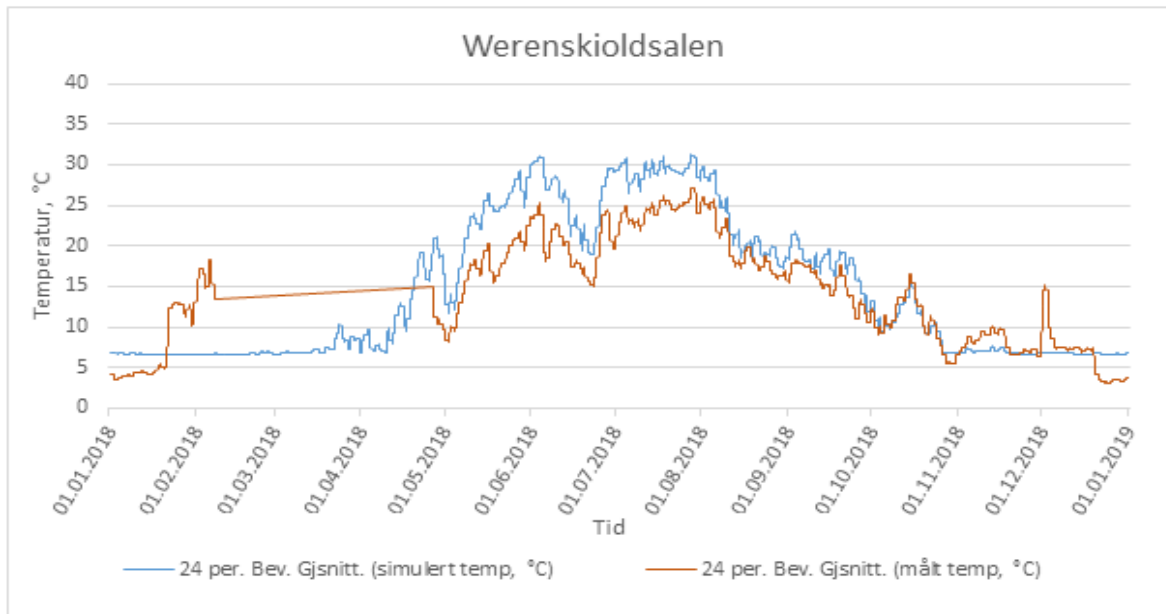
Tabell 4-7 Timer med risiko for muggvekst ved en settpunkttemperatur på 16 °C i Sal vest.

Dato og klokkeslett	Overflatetemperatur	RF
18.09.2018 13:00	16,61	78,10
18.09.2018 14:00	16,99	78,14
01.01.2019 02:00	4,13	89,19

4.2 IDA ICE

4.2.1 Validering av simuleringen

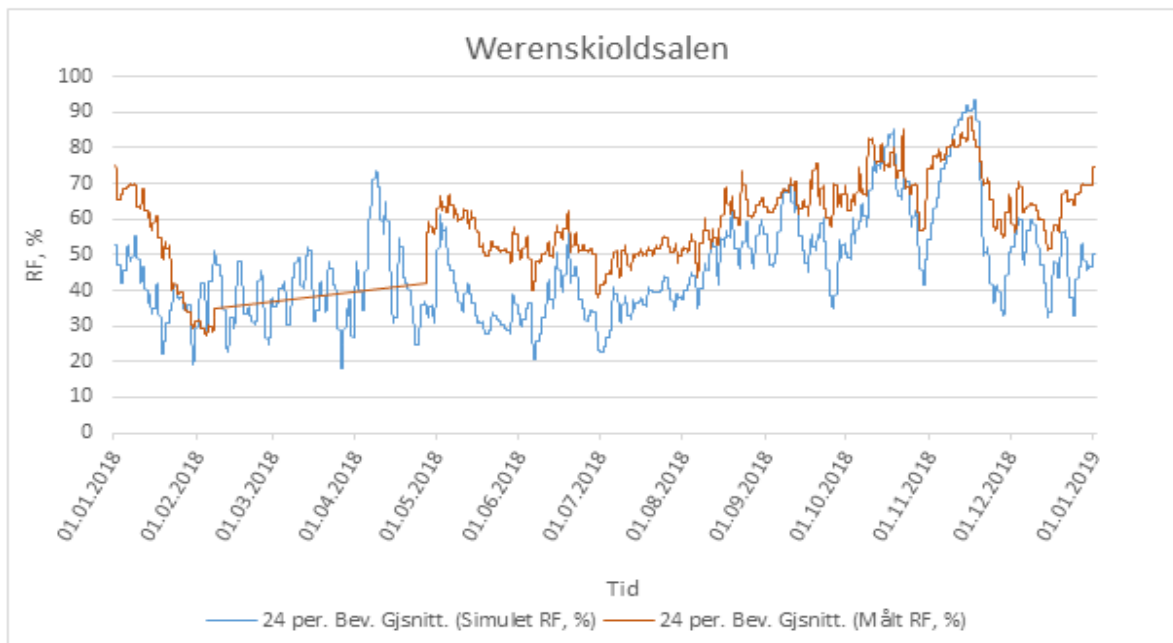
Målt og simulert temperatur i Werenskioldsalen er vist i figur 4-4. Den målte temperaturen er lavere enn den simulerte ved en settpunkttemperatur på 6 °C. Grafene følger hverandre, men avviket er større på sommeren enn på høsten.



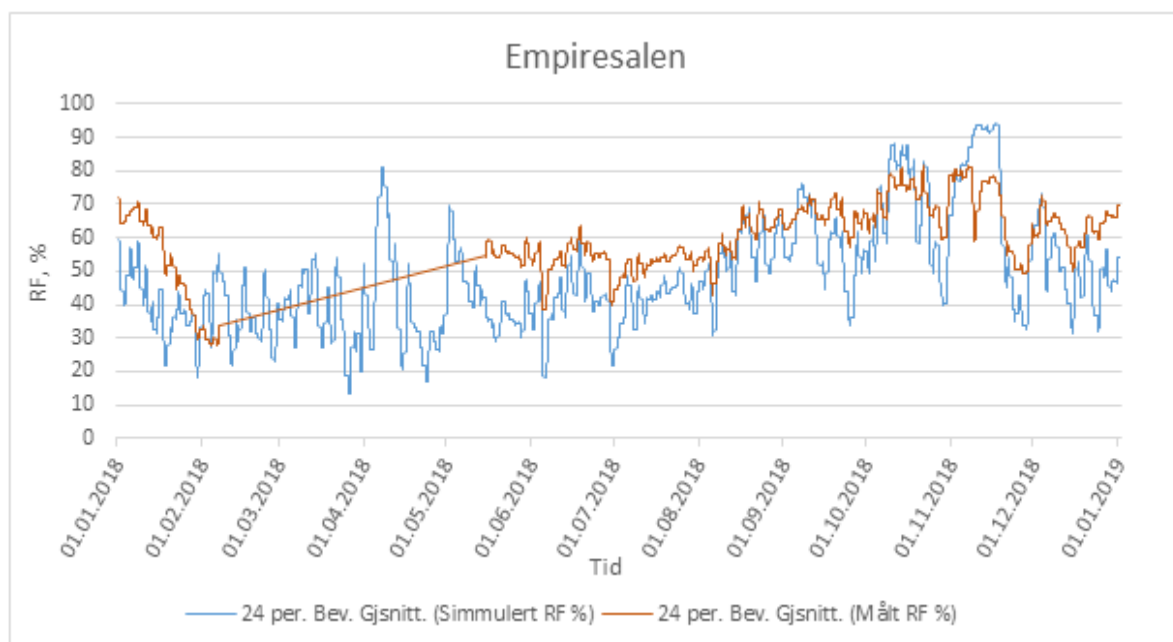
Figur 4-4 Målt og simulert temperatur i Werenskioldsalen.

Figurene 4-5 til 4-8 viser at målt RF ligger høyere enn simulert RF i alle rom. På høsten er avviket mindre enn om sommeren på grunn av at simuleringen er gjennomført uten personer i bygget. Avviket om sommeren kommer av at bygget da er åpent for publikum, som produserer ekstra fuktighet og bidrar til at RF i rommet øker. Snekkenes ble stengt for vinteren 19. august 2018 og som man kan se av grafene blir avviket mindre etter dette tidspunktet i alle rom.

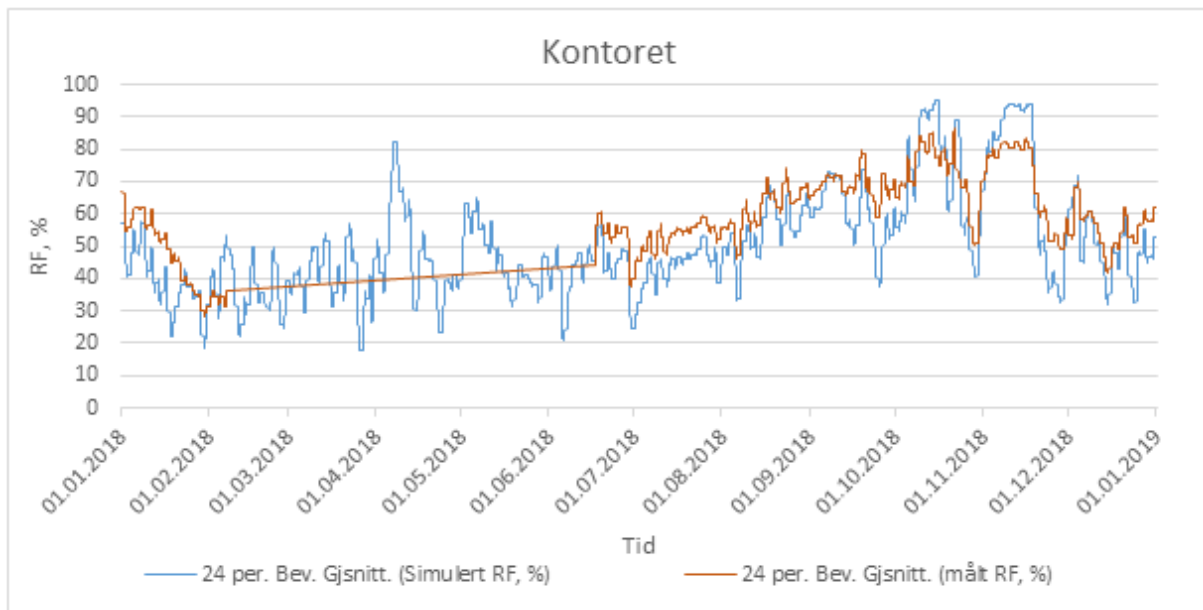
Kontoret er det rommet med minst avvik gjennom hele året. Rommet ligger mot nord og har derfor mindre solinstråling og dette kan være en faktor for at avviket er mindre i dette rommet. Werenskioldsalen er også delvis vendt mot nord, men avviket er større her enn på Kontoret. Størrelsen på rommene kan trolig være noe av grunnen til dette, da Werenskioldsalen er dobbelt så stort som Kontoret.



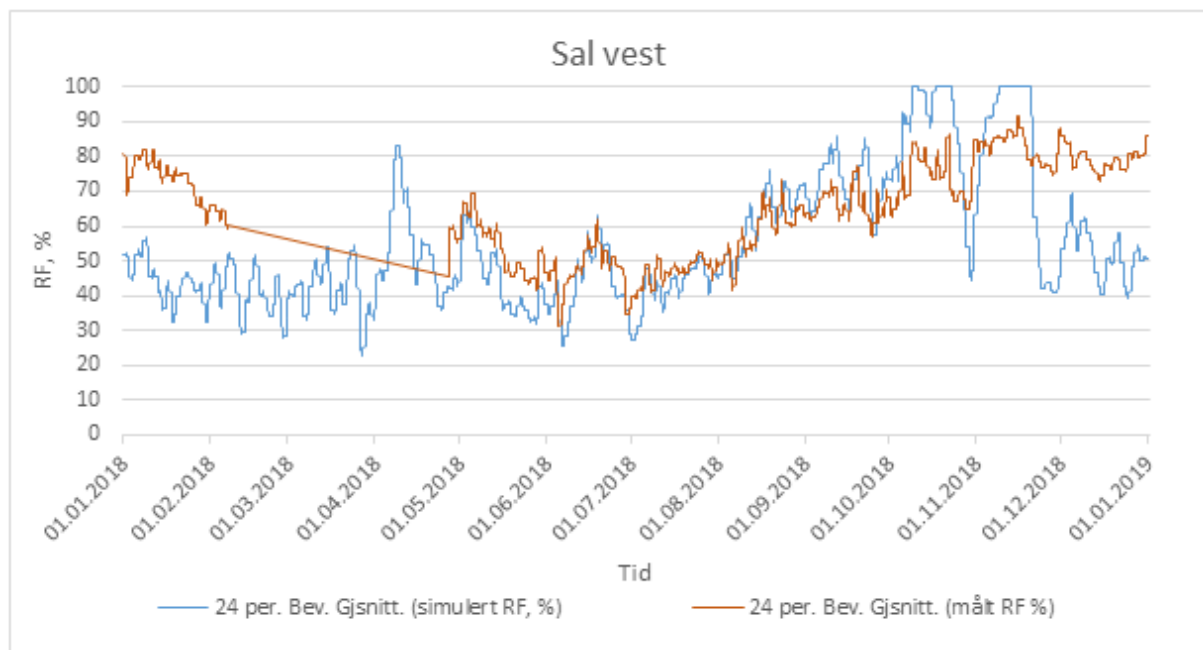
Figur 4-5 Forskjellen mellom målt og simulert RF i Werenskioldsalen.



Figur 4-6 Forskjellen mellom målt og simulert RF i Empiresalen.



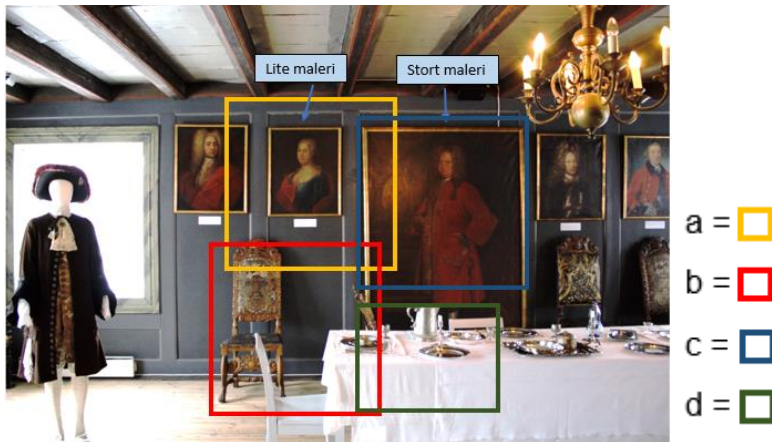
Figur 4-7 Forskjellen mellom målt og simulert RF på Kontoret.



Figur 4-8 Forskjellen mellom målt og simulert RF i Sal vest.

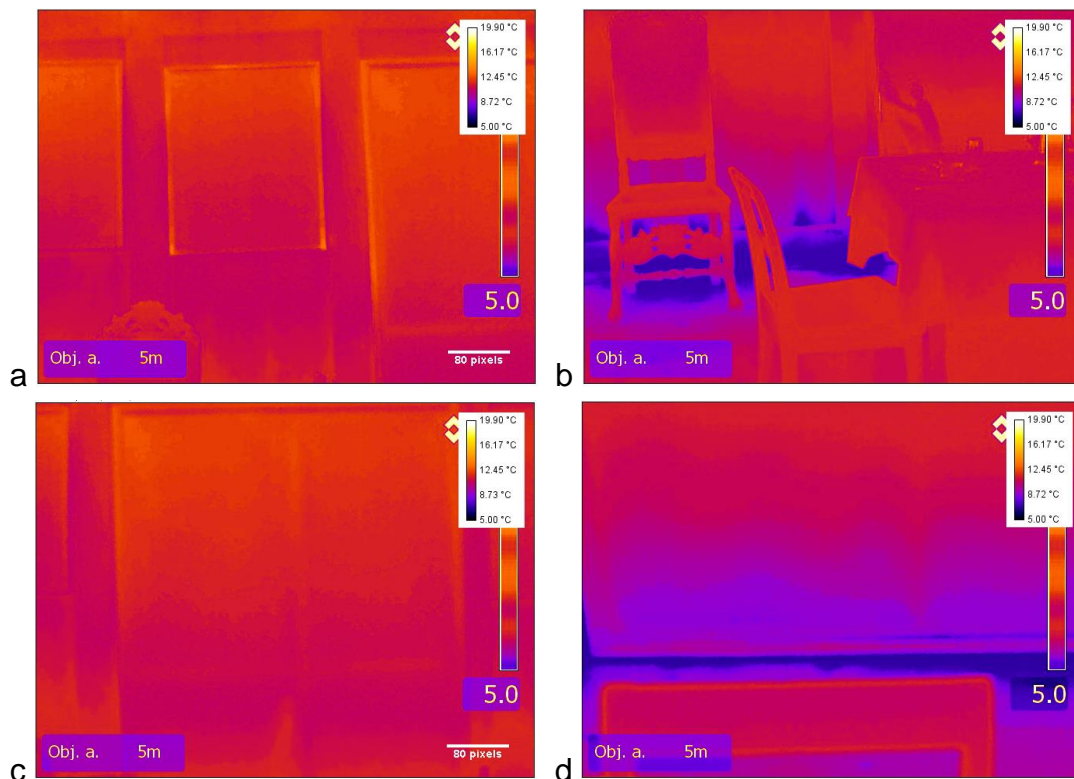
4.3 Termografering

Alle termograferingsbilder er tatt av masterstudent Karoline Havnes (2019), men bearbeidet av forfatter.

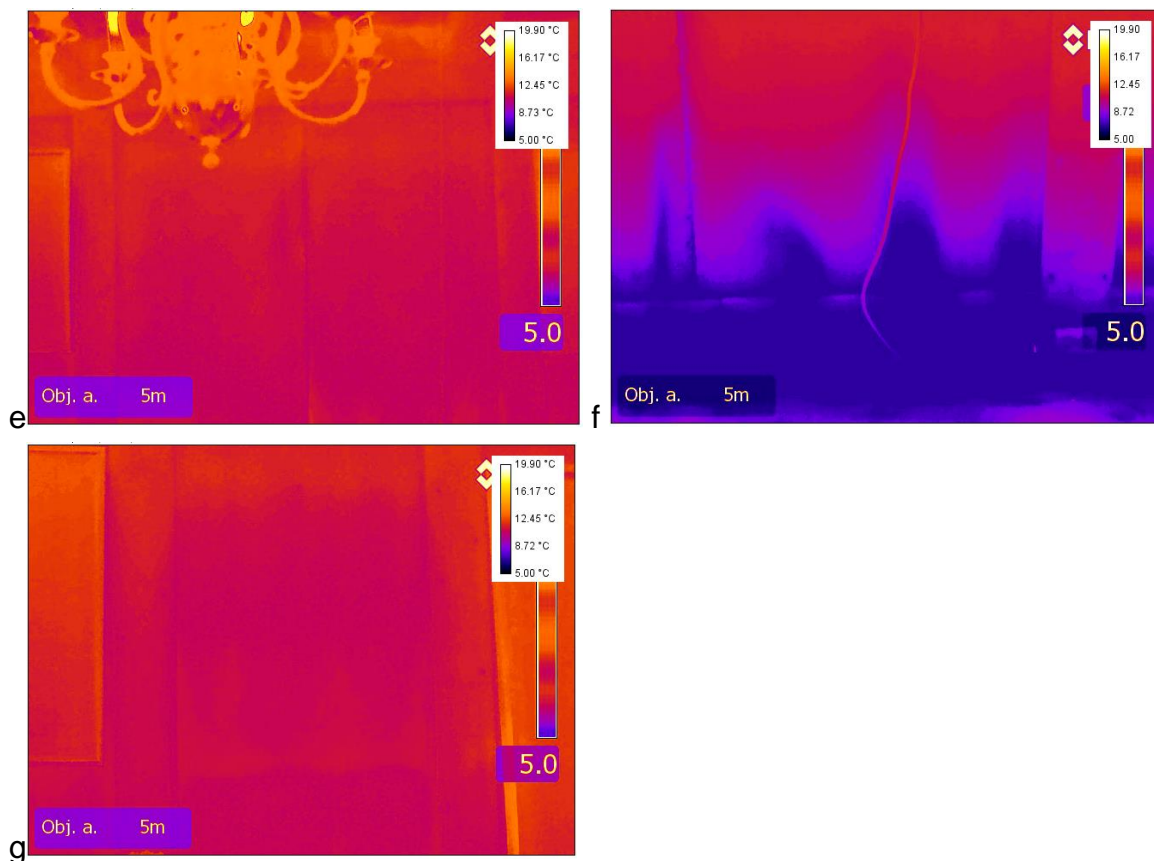


Figur 4-9 Bilde av langvegg i Werenskioldsalen med markering av termograferingsbildene a-d.

Området som termograferingsbildene a-d er tatt tilsvarende de fargede rammene vist i figur 4-9. Termograferingsbildene viser variasjonen i temperatur på yttervegg i Werenskioldsalen. Temperaturen er høyest oppunder taket og synker gradvis mot gulvet som vist i tabell 4-8. Variasjonen i temperaturen i rommet kunne vært mindre ved bruk av en vifteovn som sørger for mer luftsirkulasjon.



Figur 4-10 Termograferingsbilder med maleriene på vegg. a) viser overflatetemperatur på yttervegg og det lille maleriet. b) viser overflatetemperatur på yttervegg mot gulvet. c) viser overflatetemperatur på øvre del av det store maleriet. d) viser overflatetemperatur på nedre del av det store maleriet.



Figur 4-11 Termograferingsbilder hvor maleriene er tatt ned. e) viser overflatetemperatur bak øvre del av det store maleriet. f) viser overflatetemperatur bak nedre del av det store maleriet. g) viser overflatetemperatur bak det lille maleriet.

Det ble fjernet to malerier fra veggen og bildene e-g viser overflatetemperaturen på veggen bak maleriene. Maleriene som ble fjernet var det store maleriet og det mindre maleriet til venstre som vist i figur 4-9. Overflatetemperaturene er listet opp i tabell 4-8 og viser at temperaturen på veggen bak maleriene er ca 0,5 °C lavere enn temperaturen på selve maleriet.

Tabell 4-8 Overflatetemperatur på ulike steder av maleriene og ytterveggen.

Hvor	Plassering	Temperatur på overflate [°C]
Yttervegg	Ved taket	12,0
	Midt på veggen	10,6
	Ved gulvet	6,8
Stort maleri	Øverst	12,0
	Midten	10,8
	Nederst	8,5
Lite maleri	Øverst	12,0
	Midten	11,47
	Nederst	10,92
Vegg bak stort maleri	Øverst	11,6
	Midten	10,6
	Nederst	8,25
Vegg bak lite maleri	Øverst	11,5
	Midten	10,70
	Nederst	10,90

4.4 Forenklet beregningsmetode av risiko for muggvekst

Overflatetemperaturene som er brukt i beregningen av konstruksjonens temperaturfaktor (f^*) er funnet ved hjelp av termograferingsbilder tatt 6. februar av masterstudent Karoline Havnes (2019). Overflatetemperaturene som ble brukt er vist i tabell 4-9.

Tabell 4-9 Temperaturene som ble brukt i beregningen av konstruksjonens temperaturfaktor (f^*).

	Temperatur [°C]	
	Ved gulvet	Ved taket
Overflatetemperatur (θ_{si})	6,8	12
Utetemperatur (θ_e)	-4,3	-4,3
Innetemperatur (θ_i)	15	15
f^*	0,58	0,84

Som vist i tabell 4-9 er f^* større ved taket enn nede ved gulvet. Området ved gulvet er det mest kritiske stedet på veggen grunnet lavest f^* .

Resultatene for dimensjonerende temperaturfaktor (f_{dim}) er vist i tabell 4-10 og er beregnet i henhold til ligning 11 fra teorikapittelet.

Tabell 4-10 Dimensjonerende temperaturfaktor (f_{dim}) for hver måned.

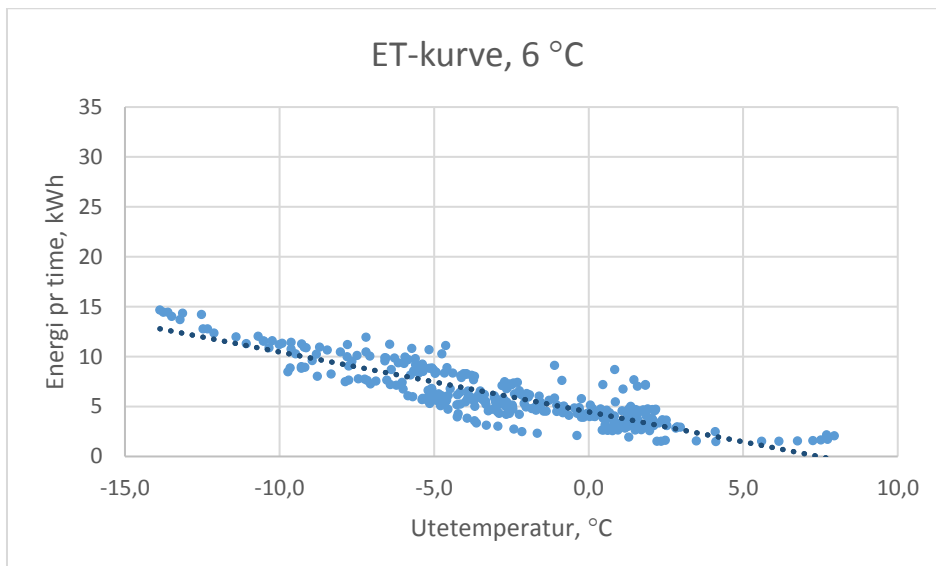
Måned	f_{dim}	f^* ved gulvet	f^* ved taket
Mai	-3,54		
Juni	-2,37		
Juli	-1,79		
August	-0,89		
September	-0,16		
Oktober	0,82		
November	1,51		
Desember	1,09		

November har høyest f_{dim} og er derfor den mest kritiske måneden. Oktober og desember har også høyere verdi enn f^* ved gulvet, så risiko for muggvekst er også tilstede i disse månedene. Når f^* ble høyere oppe ved taket er det ikke lenger risiko for muggvekst i oktober, men det er fremdeles risiko i november og desember.

4.5 ET-kurver

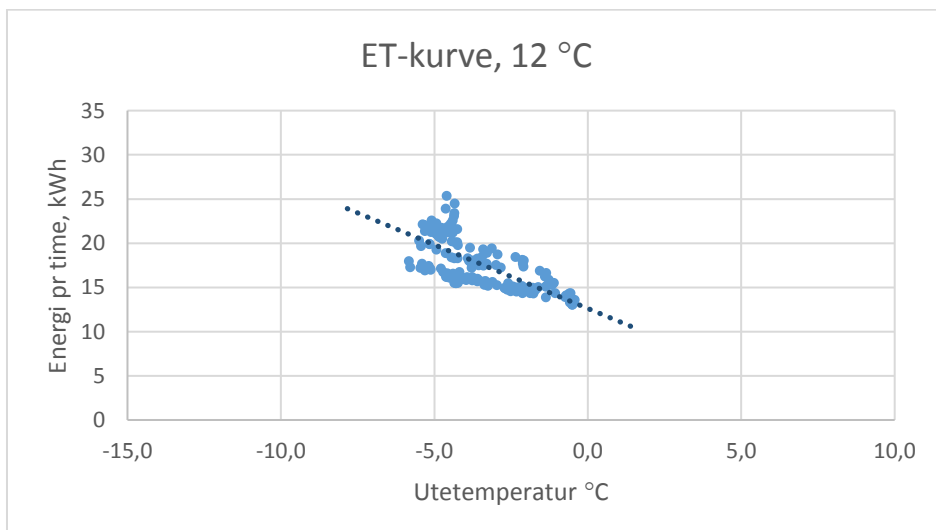
Det er laget ET-kurver for temperaturene 6, 12, 16 og 20 °C. Kurvene viser energiforbruket ved en gitt utetemperatur og brukes for å finne hvor mye energi som må til for å holde en bestemt innetemperatur.

Energiforbruket ved ulike utetemperature og en innetemperatur på 6 °C er vist i figur 4-12. Energiforbruket går ned når utetemperaturen går opp.



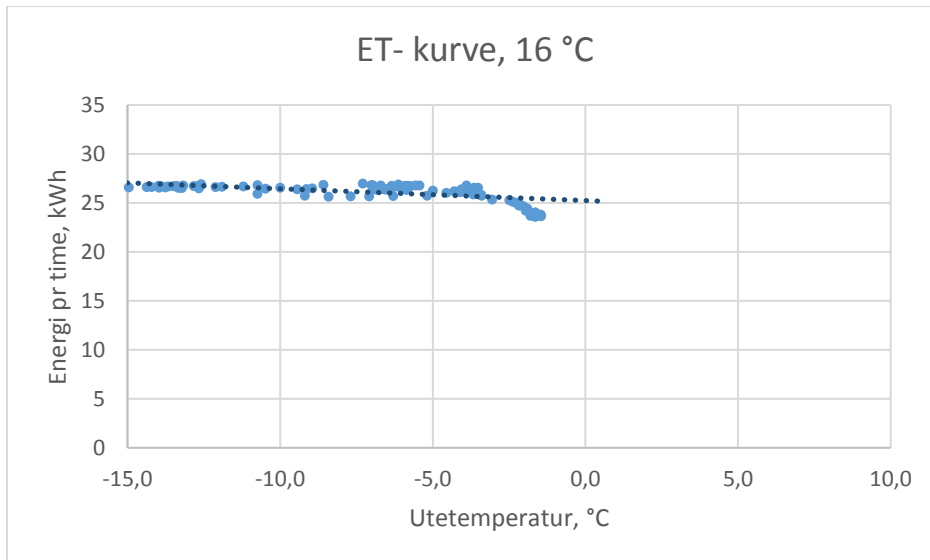
Figur 4-12 Energiforbruket ved en gitt utetemperatur for å holde en innetemperatur på 6 °C.

Panelovnene i Snekkenes klarer å holde en innetemperatur på 12 °C. Dette vises i form av at energiforbruket går ned når utetemperaturen stiger, vist i figur 4-13.



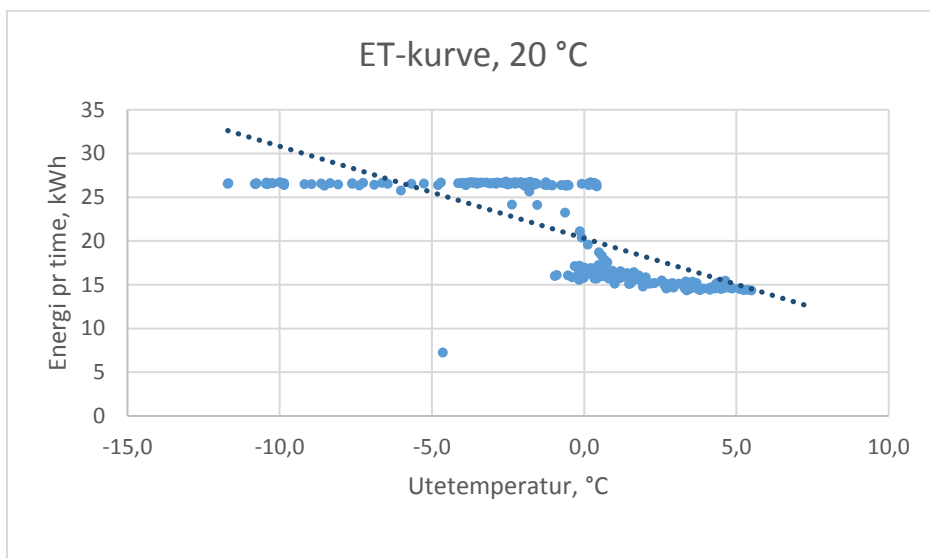
Figur 4-13 Energiforbruket ved en gitt utetemperatur for å holde en innetemperatur på 12 °C.

Kurven i figur 4-14 er relativt flat og dette kan tyde på at panelovnene ikke klarer å holde på innetemperaturen. Fra $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ går energiforbruket ned når utetemperaturen øker, dette tyder på at ved en høyere utetemperatur enn $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ klarer panelovnene og holde en innetemperatur på $16\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figur 4-14 Energiforbruket ved en gitt utetemperatur for å holde en innetemperatur på $16\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Panelovnene klarer ikke å holde en innetemperatur på $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hvis utetemperaturen er lavere enn $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, vist i figur 4-15. Ved en utetemperatur over $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ går energiforbruket raskt ned til 15 kWh og holder seg videre stabilt. Hoppet i energiforbruket skyldes at noen panelovner ble slått av grunnet målinger i Snekkenes gjort av masterstudent Karoline Havnes (2019) i forbindelse med hennes masteroppgave.



Figur 4-15 Energiforbruket ved en gitt utetemperatur for å holde en innetemperatur på $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Determinasjonskoeffisienten (R^2) er et mål på hvor godt energiforbruket kan forklares ved hjelp av utetemperaturen (Sæbø, 2014). R^2 er et tall mellom 0 og 1 og en verdi nærme 1 gir en god lineær tilnærming. Av tabell 4-11 kan man se at den lineære tilnærmingen er best ved settpunkttemperatur 6 °C og at tilnærmingen ved 16 °C er veldig dårlig. Det velges derfor å kun bruke ET-kurven for 6 °C videre i oppvaven.

Tabell 4-11 Lineær tilnærming i ET-kurvene.

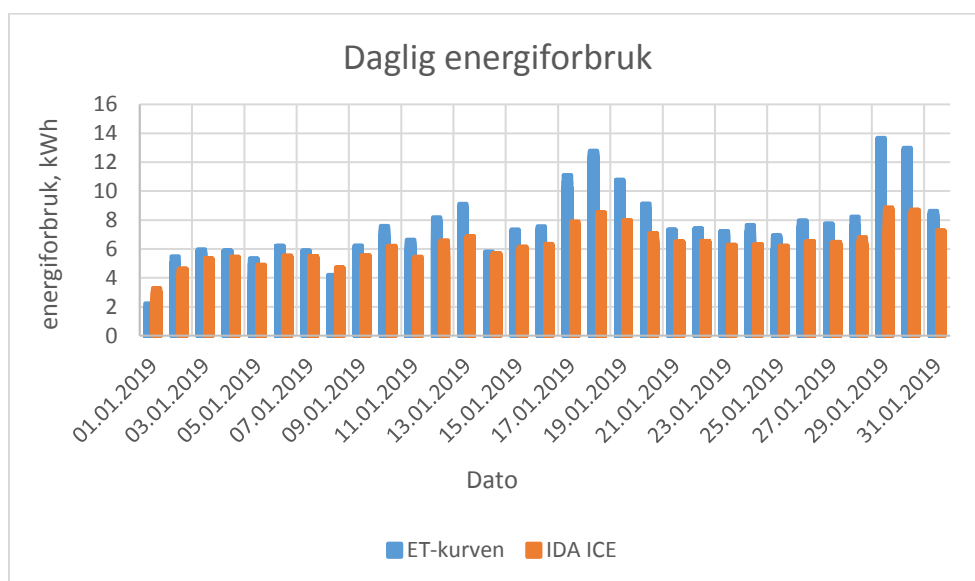
Settpunkttemperatur	R^2
6	0,76
12	0,50
16	0,37
20	0,55

4.6 Validering av IDA ICE

ET-kurven for 6 °C brukes for å regne ut energiforbruket i januar da denne har best tilnærming. Ligningen for den lineære linjen til ET-kurven er hentet fra kurven og er $y = -0,6001x + 4,4671$, hvor x er utetemperaturen. Energiforbruket i januar blir da på 4578,1 kWh.

Når energiforbruket simuleres i IDA ICE ved samme settpunkttemperatur på 6 °C får man et energiforbruk på 4217,0 kWh i januar. Simuleringen gir et lavere estimert energiforbruk enn beregnet ut fra ET-kurven, som også er vist i figur 4-16.

Forskjellen mellom beregnet og simulert energiforbruk i januar er 361,1 kWh. ET-kurver har en usikkerhet på $\pm 10\%$ (Arnstad, 2004) og forskjellen mellom beregnet og simulert energiforbruk er innenfor denne usikkerheten. IDA ICE gir dermed et godt estimat av energiforbruket og kan videre brukes ved andre settpunkttemperaturer.



Figur 4-16 Beregnet og simulert daglig energiforbruk i januar.

4.7 Energiforbruk estimert av IDA ICE

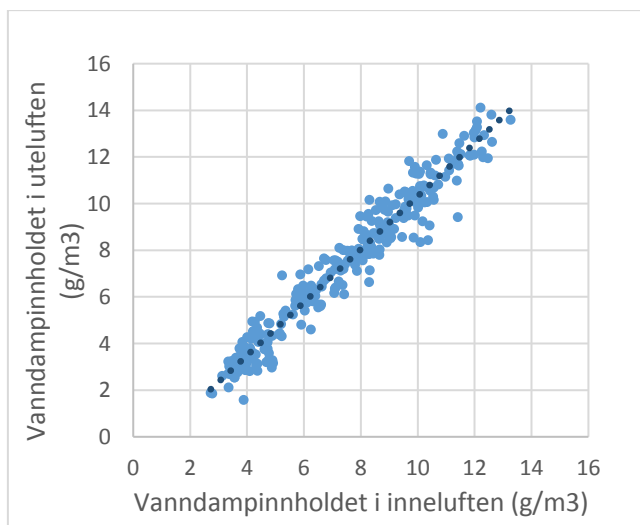
Det er kun påvist risiko for muggvekst i månedene september, oktober og november. Resten av året er det derfor ikke nødvendig med romoppvarming, tiltak gjøres derfor kun i disse tre månedene. En settpunkttemperatur på 16 °C i disse månedene gir et totalt energiforbruk på 9124,1 kWh og 10 956,0 kWh ved en settpunkttemperatur på 18 °C, som vist i tabell 4-12. Resultatene viser at det ikke er behov for 18 °C i hele 1. etasje i september. Det er kun Kontoret som har behov for dette. Ved kun romoppvarming på Kontoret i september blir energiforbruket 9563,3 kWh for de tre månedene. Sammenlignes dagens årlige energiforbruk på 15 788,2 kWh vil en økning av temperaturen til 18 °C i september, oktober og november senke energiforbruket, og samtidig minke risikoen for muggvekst.

Tabell 4-12 Simulert energiforbruk ved settpunkttemperatur 6, 16 og 18 °C.

Måned	Energiforbruk ved ulike settpunkttemperaturer [kWh]			Minimum energiforbruk [kWh] Ved redusert oppvarming i enkelte rom
	6 °C	16 °C	18 °C	18 °C
Jan-aug + des	13734,8	-	-	-
September	-	812,1	1490,0	97,3
Oktober	410,4	3395,0	4073,0	4073
November	1643,0	4917,0	5393,0	5393
Totalt	15 788,2	9124,1	10 956,0	9563,3

4.8 Vanndampinnholdet i luften

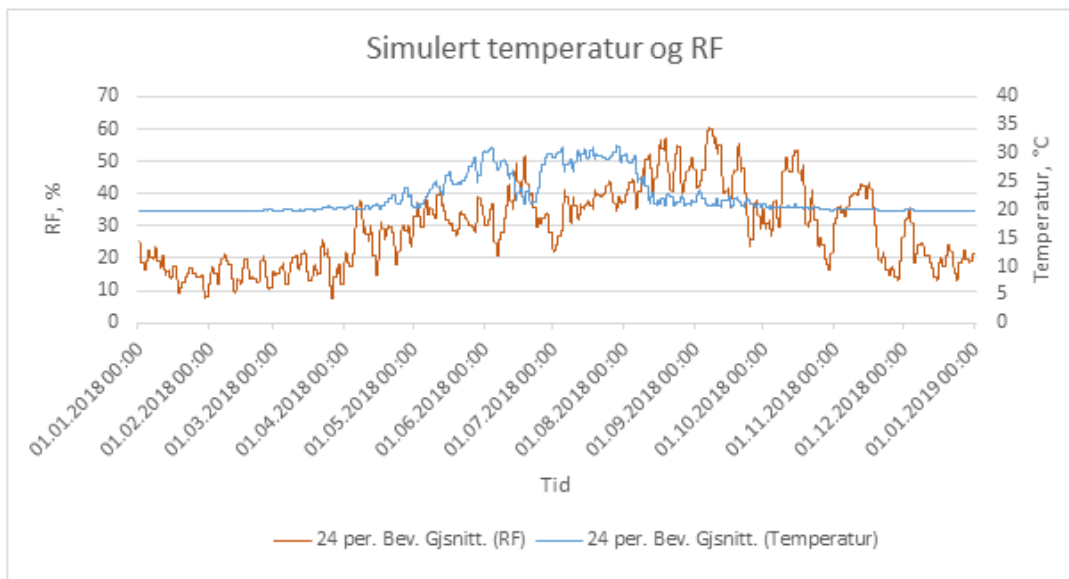
Vanndampinnholdet i inneluften på loftet ble sammenlignet med uteluften og det viser seg at vanndampinnholdet i luften er den samme, vist i figur 4-17. Snekkenes har et kaldt loft og har derfor høy infiltrasjon som fører til at fuktigheten i inneluften vil tilsvare uteluften. Vanndampinnholdet i inneluften i Werenskioldsalen ble også sammenlignet med uteluften, det viser seg at også her er vanndampinnholdet likt. På grunn av stor infiltrasjon vil ikke en avfukter ha særlig positiv effekt i Snekkenes.



Figur 4-17 Lineær sammenheng mellom vanndampinnholdet inne på loftet og i uteluften.

4.9 Anbefaling fra ASHRAE

Anbefalingen fra ASHRAE er en RF på 50% og en temperatur mellom 15-25 °C. I IDA ICE ble det derfor simulert med en settpunkttemperatur på 20 °C over en periode på ett år for å se hvordan dette påvirker temperatur og RF i Werenskioldsalen. Ved denne settpunkttemperaturen er RF høyere enn 50 % i noen perioder i juli og fra september til november, vist i figur 4-18. Resten av året er RF mye lavere enn 50 %. For lav RF kan føre til skade på gjenstandene ved at treverket tørker og sprekker. Innetemperaturen bør også holdes stabil, noe som vil kreve mye energi. Tabell 4-13 viser at det totale årlige energiforbruket ville blitt på 45 883,0 kWh ved en settpunkttemperatur på 20 °C hele året.



Figur 4-18 Simulert temperatur og RF over ett år med en settpunkttemperatur på 20 °C i Werenskioldsalen.

Tabell 4-13 Energiforbruket over ett år ved en settpunkttemperatur på 20 °C.

Måned	Settpunkttemperatur 20 °C [kWh]
Januar	7486,0
Februar	6654,0
Mars	6116,0
April	3578,0
Mai	962,9
Juni	370,4
Juli	0,0
August	993,5
September	2267,0
Oktober	4667,0
November	5828,0
Desember	6961,0
Totalt	45 883,8

5 Diskusjon

I dette kapitlet blir resultater fra målinger, simuleringer og beregninger diskutert.

Slik klima har vært det siste året (2018-2019) viser det seg gjennom simuleringer i WUFI at Snekkenes har risiko for muggvekst i september, oktober, november og delvis i desember. Oktober og november er månedene med flest dager med muggvekstrisiko (tabell 4-1). Noe som stemmer overens med samtaler med museet, hvor de hevder at muggproblemene oppstår om høsten.

I 1. etasje er det Kontoret og Werenskioldsalen som har størst risiko for muggvekst. Dette skyldes trolig at rommene er nordvendt og får derfor mindre sollys og påfølgende lavere temperatur, som igjen fører til høyere RF i rommet. Det at Kontoret har høyere risiko for muggvekst enn Werenskioldsalen skyldes at Werenskioldsalen ligger mer nord-vest og får dermed mer sollys enn Kontoret. Empiresalen ligger mer mot sør og som vist i tabell 4-1 har dette rommet lavest risiko for muggvekst. Orienteringen til rommene i forhold til himmelretningen har derfor noe å si for risikoen for muggvekst. Rom vendt mot sør har betydelig mindre risiko enn nordvendte rom.

På loftet er det ifølge simuleringen størst risiko for muggvekst med risiko 35 dager i løpet av ett år. Snekkenes har et kaldt loft og har derfor høy infiltrasjon som fører til at vandampinnholdet i inneluften tilsvarer vandampinnholdet i uteluften, vist i figur 4-17. Det er derfor ikke hensiktsmessig med avfukter hvor denne ikke vil ha en særlig positiv effekt. Simuleringen i IDA ICE viser at ved å øke temperaturen til 16 °C i oktober og november på loftet vil muggproblemet forsvinne, med unntak av 3 timer, vist i tabell 4-7. Justering av temperaturen på loftet vil trolig kreve mye energi, siden loftet ikke er isolert og har stor infiltrasjon. En temperaturøkning vil derfor også være lite hensiktsmessig.

Analyseres uteklimaet i risikoperioden kan man se at det har regnet dagen eller kvelden før muggvekstrisikoen oppstår og det er sol samme dag. RF i Snekkenes har da økt i løpet av kvelden, og når solen skinner øker temperaturen. Økt temperatur i kombinasjon med høy RF vil føre til kritiske verdier.

Werenskioldsalen ble også simulert med TMY-data for å validere denne mot målte data. Risikoen for muggvekst i Werenskioldsalen ved bruk av TMY-data ga en risiko på 18 dager som er en økning på 3 dager sammenlignet med målte data. Siden variasjonen er liten vil det si at TMY-data er pålitelig og kan brukes for å forklare når risikoen for muggvekst oppstår i Snekkenes. Årlige variasjoner i været vil alltid forekomme, men væråret 2018-2019 ga mindre risiko for muggvekst enn et gjennomsnittså.

For å eliminere risikoen for muggvekst i Snekkenes er det mest hensiktsmessig å øke innetemperaturen. Det er derfor gjort endringer i inneklimafilene for å simulere risikoen for muggvekst i de ulike rommene med nytt klima. Endringene som ble gjort var å øke innetemperaturen i Snekkenes til 16 °C og 18 °C kun i oktober og november. Ved å øke settpunkttemperaturen til 16 °C i disse månedene blir mye av risikoen for muggvekst borte, men det er fremdeles noe risiko i alle rommene. I Werenskioldsalen og Empiresalen må man opp til en innetemperatur på 18 °C i oktober og november før risikoen forsvinner helt. Kontoret får derimot kun problemer i september ved å endre settpunkttemperaturen til 16 °C i oktober og november. Dette betyr at tiltak også må gjøres i september på Kontoret. Grunnen til at Kontoret i motsetning til Werenskioldsalen får problemer i september er orienteringen av rommet, hvor Kontoret kun har yttervegg mot nord. Av tabell 4-6 kan man se at ved å sette opp temperaturen til 18 °C i risikodagene i september vil problemet forsvinne. Kontoret må derfor ha en temperatur på 18 °C i september og 16 °C i oktober og november.

En forenklet beregningsmetode av risiko for muggvekst ble brukt for å undersøke om dette gir god nok estimering sammenlignet med en numerisk simulering. Den forenklete beregningsmetoden er hentet fra byggforsksbladet «471.111 Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater» som baserer seg på standarden NS-EN ISO 13788. Denne beregningen ved bruk av f^* ved gulvet gir en risiko for muggvekst i oktober, november og desember som vist i tabell 4-10. Beregningen viser her at hovedproblemet er i november og dette samsvarer ikke med simuleringen i WUFI hvor oktober er den mest kritiske måneden.

Konstruksjonens temperaturfaktor (f^*) varierer ulike steder på veggene som vist i tabell 4-9, og dette påvirker resultatet av når det er risiko for muggvekst. f^* steg når den ble beregnet med hensyn til overflatetemperaturen ved taket, og det ble ifølge beregningen ikke lenger risiko for muggvekst i oktober. Noe som ikke samsvarer med simuleringen i WUFI hvor oktober er måneden med flest risikodager. Dette viser at når overflatetemperaturen stiger, stiger også f^* og da blir det enklere å oppfylle kravet om at konstruksjonens temperaturfaktor skal være større eller lik dimensjonerende temperaturfaktor (ligning 12). Ved å velge f^* ved gulvet ser man derfor på et mer kritisk sted og er på sikker side hvis kravet i ligning 12 er oppfylt. At konstruksjonens temperaturfaktor varierer forteller at det er behov for mer informasjon om temperaturvariasjonen på veggene. En annen faktor som kan ha påvirket beregningen er at det er valgt en overflatetemperatur ved gulvet, men romtemperaturen er målt ved taket. Det vil her konkluderes med at denne forenklete metoden ikke er tilstrekkelig for beregning av risikoen for muggvekst. For å kunne si noe mer konkret om risikoen for muggvekst er det behov for mer informasjon om temperaturvariasjonene på veggene. Et tiltak for å minke variasjonen er å øke luftsirkulasjonen i rommet. Da kan den varme luften spres jevnere i rommet.

Overflatetemperaturerne som er brukt i beregningen fra byggforsksbladet er hentet ut av termograferingsbildene. Tabell 4-8 viser at forskjellen i overflatetemperaturen er ca 0,5 °C mellom maleriet og veggen bak maleriet. Temperaturforskjellen var mindre enn først antatt, og skyldes at maleriene henger med et lite luftrom fra veggen. Hadde temperaturforskjellen vært større hadde det vært et tydelig tegn på at risikoen for muggvekst vil øke ved å henge et maleri på yttervegg. Dette ble imidlertid bevist i WUFI, hvor et maleri på yttervegg i Werenskioldsalen ble simulert. Risikoen økte med 6 dager sammenlignet med simulering uten maleri. Økningen skyldes at et maleri isolerer noe, og temperaturen bak maleriet vil derfor være noe lavere. Som forklart i teorien kan kaldluft holde på mindre fuktighet enn varmluft, så RF bak maleriet vil øke, og dette vil føre til større risiko for muggvekst.

Energiforbruket til Snekkenes er i denne masteroppgaven beregnet ved hjelp av to ulike metoder. Den ene metoden gir en estimering av energiforbruket ved hjelp av ET-kurver, den andre ved hjelp av energisimulering i IDA ICE. Flere av ET-kurvene har for få målinger og gir derfor for dårlig estimat av energiforbruket. Som vist i tabell 4-11 er determinasjonskoeffisienten (R^2) lav for settpunkttemperaturene 12, 16 og 20 °C. Den eneste ET-kurven som kan brukes er kurven for settpunkttemperatur 6 °C siden denne har en bedre tilnærming og er mer pålitelig grunnet flere målinger. Beregningen ut ifra ET-kurven er sammenlignet med resultatet fra IDA ICE ved samme settpunkttemperatur på 6 °C. Sammenligningen viser at IDA ICE gir et lavere estimat av energiforbruket i Snekkenes enn ET-kurven. Forskjellen i estimert energiforbruk er på 361,1 kWh, som er innenfor usikkerheten på $\pm 10\%$ for ET-kurver. IDA ICE gir derfor pålitelige estimater av energiforbruket og kan brukes for andre settpunkttemperaturer.

Selv om risiko for muggvekst er lav i alle rom ved 16 °C vil det være hensiktsmessig å øke temperaturen til 18 °C. WUFI tar ikke hensyn til temperaturvariasjonene på veggen og man vet ikke hvor på veggen overflatetemperaturen og RF er hentet fra i programmet. Det vil på bakgrunn av disse feilkildene være tryggest å øke temperaturen til 18 °C for å øke sannsynligheten for å forhindre videre muggvekst. En økning i settpunkttemperatur fra 16 °C til 18 °C i oktober og november vil ikke føre til stor økning av energiforbruket i Snekkenes, vist i tabell 4-12. Resultatene viser at temperaturen bør være 18 °C i alle rom i 1. etasje i oktober og november og at Kontoret i tillegg bør ha en temperatur på 18 °C i september. Dette gir et totalt energiforbruk på 9563,3 kWh på romoppvarming for å unngå muggvekst. Som en forenkling velges det å anbefale at alle rom i 1. etasje har en innetemperatur på 18 °C i september, oktober og november. Det er da ikke nødvendig med romoppvarming resten av året. Energiforbruket øker da til 10 956,0 kWh, men dette er likevel en reduksjon i energiforbruket sammenlignet med dagens årlige energiforbruk på 15 788,2 kWh. Ved å gjøre dette tiltaket reduseres derfor årlig energiforbruk samtidig som risikoen for muggvekst fjernes.

For å kunne følge anbefalingen fra ASHRAE bør et klimaanlegg med funksjonene kjøling, oppvarming, avfukter og befukter installeres for å holde et så stabilt inneklima som mulig. Denne anbefalingen er lite hensiktsmessig å følge i Snekkenes, grunnet verneverdig bygg. Skal Snekkenes plasseres i en av ASHRAE's inneklimaklasser, vist i tabell 2-1, vil den før tiltak plasseres i klasse D. Snekkenes har ifølge målingene stor variasjon i RF og har derfor stor risiko for mekaniske skader på gjenstander. Ved å utføre tiltaket med å øke innetemperaturen til 18 °C i september, oktober og november vil Snekkenes kunne plasseres i klasse C. Temperaturen vil da normalt være under 25 °C og ha en RF mellom 25-75 %.

6 Konklusjon

Konklusjonen baseres på målingene gjort i Snekkenes og gjelder for tilsvarende tømmerbygg i Østfold, med lik U-verdi og lekkasjetall. Problemstillingen har vært «hvordan unngå muggvekst i halvklimaliserte museumsbygninger ved bruk av minst mulig energi». For å svare på dette er det utarbeidet tre forskningsspørsmål.

Når oppstår det risiko for muggvekst og hvilke tiltak skal iverksettes?

Ifølge simuleringene i WUFI oppstår risikoen for muggvekst i Snekkenes i månedene september, oktober og november. Innnetemperaturen bør derfor i disse månedene være på 18 °C i alle rommene i 1. etasje for å hindre videre muggvekst. En vifteovn kan også brukes i disse månedene for å minske temperaturvariasjonen i rommene. På loftet er det vist at tiltak er lite hensiktsmessig. En avfukter har ingen særlig positiv effekt grunnet store luftlekkasjer og en temperaturøkning vil kreve for mye energi.

- Muggvekstrisiko oppstår i september, oktober og november og tiltaket for disse månedene er å øke innnetemperaturen til 18 °C i alle rom i 1. etasje og eventuelt bruk av vifteovn for luftsirkulasjon.

Kan en forenklet metode være tilstrekkelig for beregning av risiko for muggvekst?

Det kan konkluderes med at den forenklete metoden vist i byggforskbladet «471.111 Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater» ikke gir et godt nok estimat angående risikoen for muggvekst. Metoden gir ikke riktig estimat for hele risikoperioden og måneden med størst risiko samsvarer ikke med resultatene fra simuleringprogrammet WUFI. Det er også vist at det er variasjoner i konstruksjonens temperaturfaktor som viser at det er nødvendig med mer informasjon om temperaturvariasjonen på yttervegg.

- Den forenklete beregningsmetoden underestimerer risikoen for muggvekst.

Hvor mye energi kreves for å hindre videre muggvekst?

Det er kun behov for romoppvarming i Snekkenes i månedene september, oktober og november. Ved en innnetemperatur på 18 °C i disse månedene vil det totale årlige energiforbruket på romoppvarming i Snekkenes være 10 956,0 kWh. Dette er en reduksjon av energiforbruket sammenlignet med dagens årlige energiforbruk på 15 788,2 kWh. En økning av temperaturen til 18 °C i september, oktober og november vil derfor senke det totale årlige energiforbruket og samtidig minke risikoen for muggvekst.

- Årlig energiforbruk på romoppvarming i Snekkenes blir 10 956,0 kWh.

7 Videre arbeid

I denne masteroppgaven er det funnet ut når risikoen for muggvekst i Snekkenes oppstår og hvor mye energi som kreves for å unngå videre muggvekst. Det hadde vært interessant å sammenligne resultatene i denne oppgaven med et tilsvarende bygg med et annet klima og lokasjon. Dette for å se om plassering av bygningen har noe å si for når på året risikoen for muggvekst oppstår og hvilke tiltak som bør gjøres.

Klimaet er i stadig forandring og det er usikkert hvordan fremtidig klima vil påvirke bevaringen av museumsgjenstander rundt om i verden. Det hadde derfor vært interessant å undersøke hvordan forholdene i Snekkenes blir påvirket av eventuelle klimaendringer.

Som tidligere forklart i diskusjonen er det et behov for mer informasjon om den indre variasjonen av temperatur og RF i et rom. Det bør forskes videre på dette for å få mer konkrete anbefalinger om hvor gjenstander bør plasseres for å unngå risiko for muggvekst.

8 Referanser

- Arnstad, E. (2004). Energioppfølging i næringsbygg - en innføring. *Enova håndbok 2004:3*.
- ASHRAE. (2011). *Heating, ventilating and air-conditioning applications*. SI utg.
- ASHRAE. (u.å). *About ASHRAE*. Tilgjengelig fra: <https://www.ashrae.org/about> (lest 20.03.2019).
- Aune, I. (2000, 17. juni 2000). Snekkenes - den første bygningen som kom til Borgarsyssel museum. *Sarpsborg Arbeiderblad* s. 4-5.
- Bolton, D. (1980). The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, 108:1047.
- Charisi, S. (2018). *Forelesningsnotat fra TBA 331 på canvas, lecture2_2018.pdf*. Upublisert manuskript.
- Clas Ohlson. (2019). *Efergy e2 trådløs energimåler*. Tilgjengelig fra: <https://www.clasohlson.com/no/Efergy-e2-tr%C3%A5dl%C3%B8s-energim%C3%A5ler-/Pr364500000#moreinfo> (lest 04.01.19).
- Clementz, C. A. & Flatland, R. (u.å). Laft og lafting. *FOKUS på tre nr. 44*.
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, T. Ø. (2014). *Trehus, Håndbok SINTEF byggforsk 5*: SINTEF akademisk forlag.
- Enova. (2017). Enovas byggestatistikk 2017.
- EQUA. (u.å-a). *About EQUA*. Tilgjengelig fra: <https://www.equa.se/en/about-us/about-equa> (lest 24.01.19).
- EQUA. (u.å-b). *IDA Indoor Climate and Energy*. Tilgjengelig fra: <https://www.equa.se/en/ida-ice#> (lest 24.01.19).
- European commission. (2017). *Photovoltaic geographical information system*. Tilgjengelig fra: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html (lest 29.01.19).
- Gustavsen, A., Thue, J. V., Blom, P., Dalehaug, A., Aurlien, T., Grynning, S. & Uvsløkk, S. (2008). *Kuldebroer – Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk*.
- Havnes, K. (2019). *Mapping of surface moisture and thermal transmittance of historical building walls with the use of thermography and in-situ measurements*: NMBU.
- Hilliaho, K., Lahdensivu, J. & Vinha, J. (2015). Glazed space thermal simulation with IDA-ICE 4.61 software—Suitability analysis with case study. *Energy & Buildings*, 89: 132-141. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.12.041.
- Jan Vincent Thue, M. O. o. A. G. (2007). *WUFI 1D Pro 4.1 Brukermanual pdf*: NTNU. Tilgjengelig fra: <http://www.wufi.no/WUFI1D-4.1-Bruker-v3.1.pdf> (lest 24.09.18).
- Jensen, I. (u.å). *Borgarsyssel museum*. Guidehefte (red.).
- Karagiozis, A., Künzel, H. & Holm, A. (u.å). WUFI-ORNL/IBP - A north American hygrothermal model.
- Kramer, R. P., Martens, M. H. J., van Schijndel, A. W. M. & Schellen, H. L. (2012). *A proposed method to assess the damage risk of future climate change to museum objects in historic buildings*. Oxford ;.
- Kramer, R. P., Schellen, H. L., van Schijndel, A. W. M. & Building, P. (2015). Energy impact of ASHRAE's museum climate classes : a simulation study on four museums with different quality of envelopes. *6th International Building Physics*

- Conference (IBPC 2015), 14-17 June 2015, Torino, Italia (IBPC 2015): 1317-1322.
- Lie, S. K., Thiis, T. K., Vestøl, G. I., Høibø, O. & Gobakken, L. R. (2019). Can existing mould growth models be used to predict mould growth on wooden claddings exposed to transient wetting? *Building and Environment*. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.01.056.
- Mattsson, J. (2016). *Borgarsyssel og Snekkenes - analyserapport*. Mycoteam.
- Meter Environment. (2017). *METER Legacy Canopy Environment Sensors*. Tilgjengelig fra: <https://www.metergroup.com/environment/articles/buy-browse-meter-legacy-canopy-environment-sensors/#pyr> (lest 30.01.19).
- Riksantikvaren. (2013). Råd om energisparing i gamle hus. *Veileder*.
- Sedlbauer, K. (u.å). Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components. *Fraunhofer Institute for Building Physics*.
- Shiny weather data. (u.å). *Shiny weather data*. Tilgjengelig fra: <https://rokka.shinyapps.io/shinyweatherdata/> (lest 13.02.19).
- SINTEF Byggforsk. (1999a). 471.016 *Kuldebroer. Metode for å bestemme kuldebroverdi*. Byggforskserien. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/2606/kuldebroer_metoder_for_aa_bestemme_kuldebroverdi#i3 (lest 13.03.2019).
- SINTEF Byggforsk. (1999b). 471.111 *Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater*. Byggforskserien. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/2758/beregningsmetode_for_aa_unngaa_kondens_eller_muggvekst_paa_innvendige_overflater (lest 08.01.2019).
- SINTEF Byggforsk. (2005). 701.401 *Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for inneklimate*. Byggforskserien. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/3231/muggsopp_i_bygninger_forekomst_og_konsekvenser_for_inneklimate (lest 28.01.2019).
- SINTEF Byggforsk. (2017). 421.501 *Terisk inneklimate. Betingelser, tilrettelegging og målinger*. Byggforskserien. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/193/termisk_inneklimate_betingelser_tilrettelegging_og_maalinger#i11 (lest 19.03.2019).
- SINTEF Byggforsk. (2018). 421.132 *Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*. Byggforskserien. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag#i13 (lest 13.03.2019).
- Store norske leksikon. (2009). *Infiltrasjonstap*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/infiltrasjonstap> (lest 05.04.2019).
- Store norske leksikon. (2019). *Klima*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/klima> (lest 02.05.2019).
- Sæbø, S. (2014). *F19.1 Om Determinasjonskoeffisienten R² og R output - Statistikk grunnkurs (NMBU)*. YouTube.
- Thue, J. V. (2019). *Laft*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/laft> (lest 26.02.19).
- Tinytag. (u.å). *Tinytag View 2 TV-4501*. Tilgjengelig fra: <https://www.geminidataloggers.com/data-loggers/tinytag-view-2/tv-4501>.
- WUFI. (2018). *WUFI home*. Tilgjengelig fra: <https://wufi.de/en/> (lest 24. 09.18).
- WUFI. (u.å). *WUFI Mould Index VTT*. Tilgjengelig fra: <https://wufi.de/en/2017/03/31/wufi-mould-index-vtt/> (lest 19.02.19).

9 Vedlegg

Vedlegg A: Tabell hentet fra svarrapport fra Mycoteam.



Vedlegg B: Mail om Storsporet strålemugg fra Mycoteam.





Vedlegg C: Isopletter av risikoen for muggvekst fra WUFI

Vedlegg A: Tabell hentet fra svarrapport fra Mycoteam.

Prøvenr	Prøvested	Resultater
1 (125836:169803)	Tablå BrM 13832G, bakside før rens	Penselstrålemugg (<i>Aspergillus penicillioides</i>) - Rik vekst
2 (125846:169806)	Tablå BrM 13832G, bakside etter rens	Muggsopp (uidentifisert) - Moderat vekst
3 (125844:169804)	Tablå BrM 13832G, bakside	Slimsopp (uidentifisert) - Rik vekst
4 (125845:169805)	Tablå BrM 13832G, forside før rens	Penselstrålemugg (<i>Aspergillus penicillioides</i>) - Rik vekst Kondensmuggsopper (<i>Cladosporium</i> sp.) - Moderat vekst
5 (125848:169808)	Tablå BrM 13832G, forside etter rens	Muggsopp (ulike arter) - Sparsom vekst
6 (125847:169807)	Tablå BrM 13832J, forside	Ingen tegn til soppvekst
7 (125849:169809)	Stol BrM 4595, bakside av sete	Storsporet strålemugg (<i>Aspergillus glaucus</i>) - Rik vekst
8 (125850:169810)	Sofa i empire salen, bakside	Storsporet strålemugg (<i>Aspergillus glaucus</i>) - Rik vekst

Vedlegg B: Mail om Storsporet strålemugg fra Mycoteam.

 Mycoteam <post@mycoteam.no>
on. 20.02.2019 12:57
Du 

Hei

Storsporet strålemugg (*Aspergillus glaucus*) forekommer av og til i forbindelse med fuktskader i bygninger, og da gjerne på gjenstander som lagres i kjellerrom med høy relativ luftfuktighet. I fuktige arkiv vokser den ofte på papir, papp og skinn. Den forekommer også ofte på lagret syltetøy og tørrfor.

Jeg har for eksempel påvist den innvendig i plassbygde garderobeskap og på gjenstander som folk dytter til lagring under sengen. Dette er da gjerne møbler som står mot yttervegger slik at det blir litt kjøligere og mer stillestående luft her, og dermed høyere relativ luftfuktighet når romluften avkjøles og kondensering. Rommene den vokser i er gjerne relativt varme, men med kjøligere "lommer" der soppen etablerer seg.



Håper dette er til litt hjelp.

Cathrine Marie Whist
Avdelingsleder LAB

+47 95 20 50 93
cathrine@mycoteam.no

MYCOTEAM AS
Forskningsveien 3 B
Postboks 5, Blindern,
N-0313 Oslo

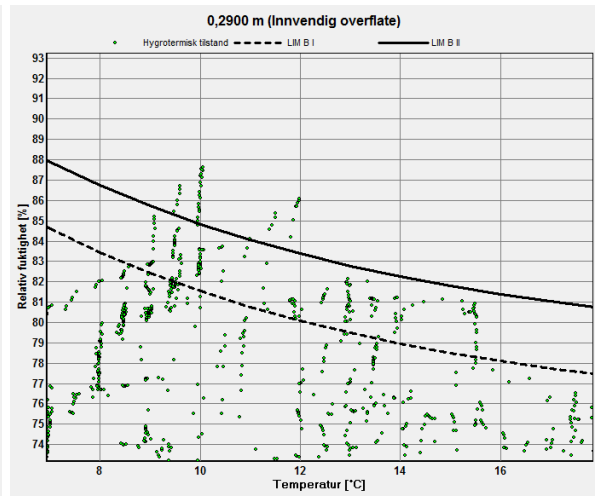
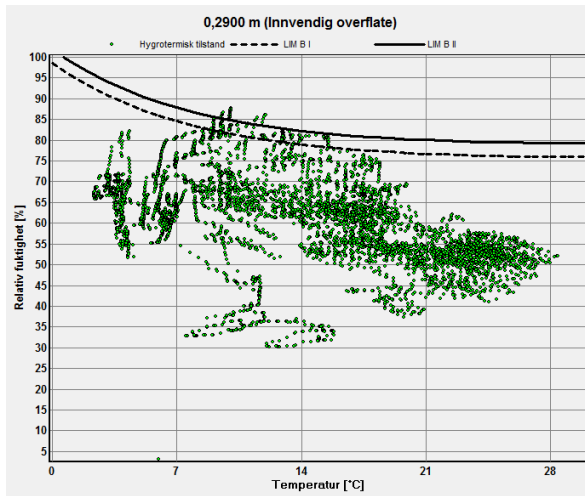
+47 469 75 500
www.mycoteam.no

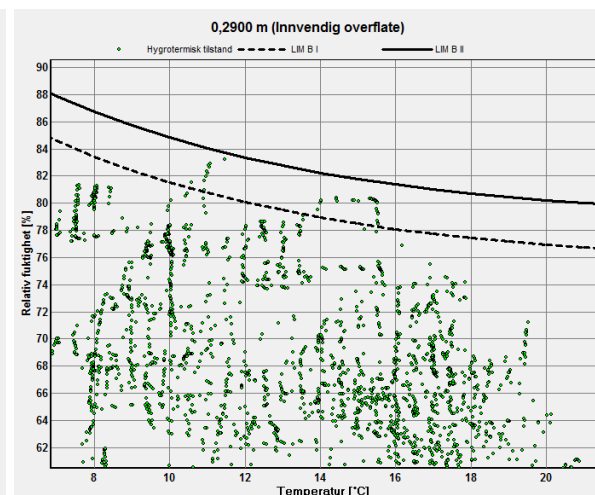
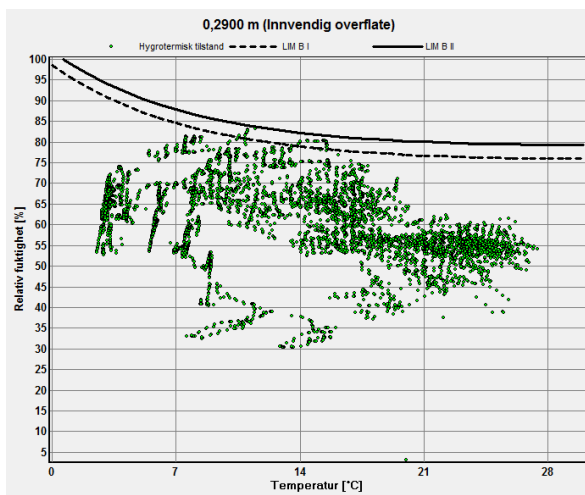
Vedlegg C: Isopletter av risikoen for muggvekst fra WUFI

NB! Bildene til høyre er et nærbilde av forholdene som gir muggvekst.

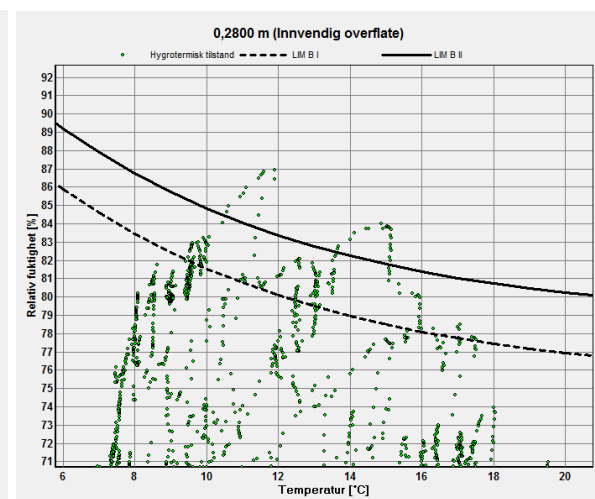
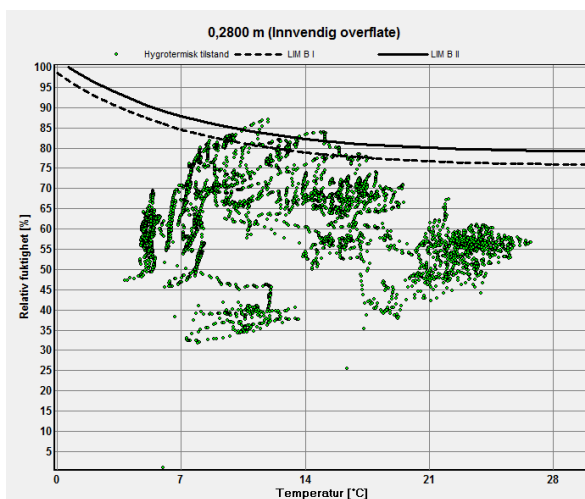
Werenskioldsalen:



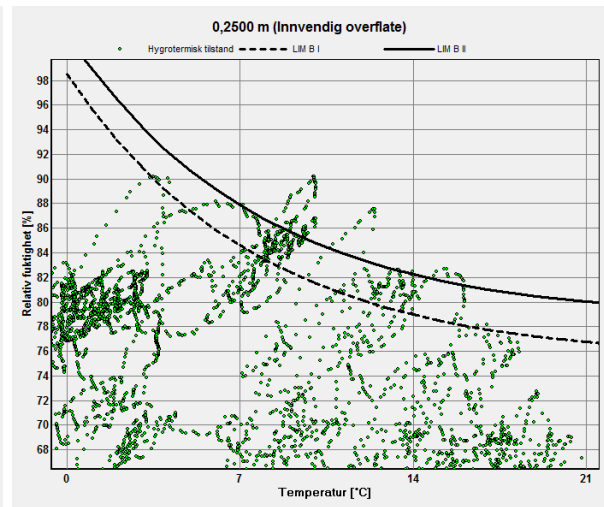
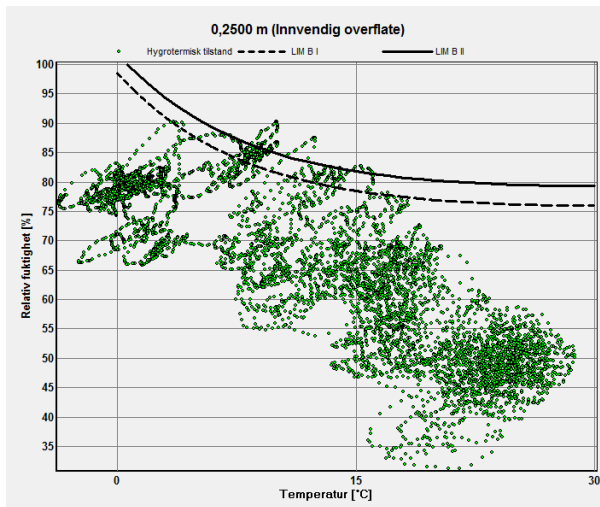
Empiresalen:



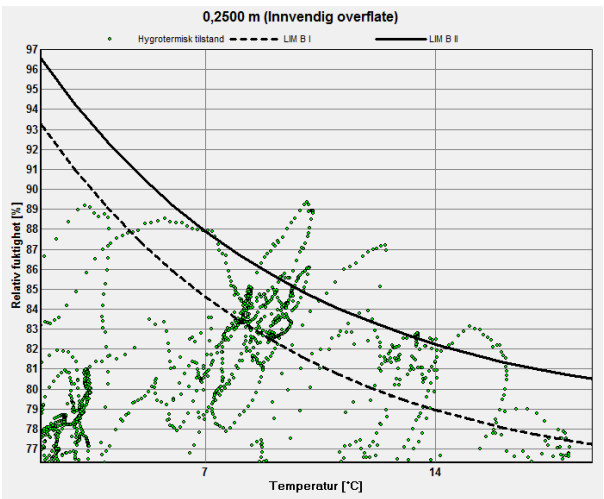
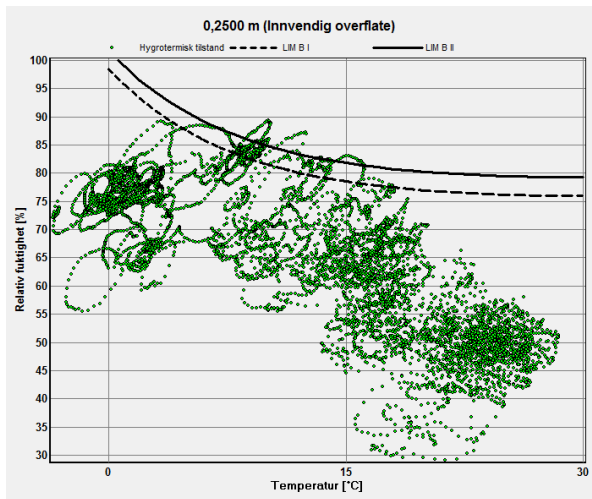
Kontoret:



Sal vest:



Midtrommet:





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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway