

Josefine Helena Bruvik Bjørck

**NTNU**  
Norwegian University of  
Science and Technology  
Faculty of Engineering  
Department of Civil and Environmental Engineering

Josefine Helena Bruvik Bjørck

# Innvendig etterisolering av massive murvegger

Analyse av laboratorieforsøk og numeriske  
beregninger

June 2019





Norwegian University of  
Science and Technology

# Innvendig etterisolering av massive murvegger

Analyse av laboratorieforsøk og numeriske beregninger

**Josefine Helena Bruvik Bjørck**

Bygg- og miljøteknikk

Submission date: June 2019

Supervisor: Stig Geving

Co-supervisor: Jon Ivar Knarud

Norwegian University of Science and Technology  
Department of Civil and Environmental Engineering



## Sammendrag

Økende fokus på energieffektivisering av den eksisterende bygningsmassen har ført til at man ønsker å etterisolere bygg for å redusere energibruken knyttet til oppvarming. I Norge ble det mellom 1850 og 1940 bygget uisolerte teglfasader som fortsatt brukes i dag og u-verdien til disse ytterveggene tilsier et stort potensial for energibesparelse. Utvendig etterisolering er ved riktig gjennomføring et effektivt og fuktsikkert tiltak, men på grunn av verneverdige fasader er det ofte ikke gjennomførbart. Innvendig etterisolering reduserer uttørkingsmulighetene for veggen og reduserer temperaturen i murvangen. Dette kan igjen føre til frostsprengning, muggvekst eller råte i trebjelker. Det er ønskelig å finne løsninger på innvendig etterisolering som minimerer faren for fuktskader.

I den forbindelse er det satt opp et laboratorieforsøk hos NTNU og SINTEF hvor en testvegg bestående av ni veggfelt er plassert i en klimasimulator. De ni veggfeltene består av en massiv murvange med en innfelt trebjelkeende og ulik innvendig isolering. Det er brukt to typer teglstein og tre ulike isolasjonsmaterialer, samt montert en smart dampsperre på de fleste av veggfeltene. Klimasimulatoren utsetter testveggen for en periode med kaldt klima med slagregns påkjønning på en side og varmt inneklime på den andre siden, etterfulgt av en tørkeperiode. Formålet med forsøket er å undersøke hvordan ulik innvendig etterisolering påvirker de hygrotermiske forholdene i veggfeltene og vurdere risikoen for fuktskader. Dette gjøres gjennom å måle temperatur og relativ fuktighet i veggfeltene ved bruk av fastmonterte sensorer. I tillegg til laboratorieforsøket er det gjennomført et sett med simuleringer i beregningsverktøyet WUFI® 2D av det samme laboratorieforsøket.

Resultatene fra laboratorieforsøket viser i likhet med eksisterende litteratur at innvendig isolering øker den relative fuktigheten i veggen og gir økt risiko for fuktskader sammenlignet med et uisolert veggfelt med samme klimapåkjønning. Resultatene viser også at teglstein med høyere sug gir økt relativ fuktighet i veggen i forhold til teglstein med lavere sug. Det er også observert at slagregns påkjønningen står for en stor andel av fuktinnholdet i veggfeltene og forsinker uttørkingsperioden betraktelig. Det vil derfor kunne antas at tilstrekkelig regnbeskyttelse vil kunne være et effektivt tiltak mot fuktskader. Ved sammenligning av veggfelt med og uten smart dampsperre er det ikke observert noe tydelig forskjell i uttørking, som igjen tyder på at den smarte dampsperran tilpasser vanndampmotstanden etter relativ fuktighet. Det er likevel verdt å nevne at det generelt i forsøket er observert lite tørking i veggfeltene i løpet av den totale klimasekvensen. En lengre tørkeperiode vil derfor være fordelaktig for videre vurdering av dampsperran. Resultatene av simuleringene viser et avvik fra målingene i laboratoriet og jevnt over et noe lavere fuktinnhold, men med justering av absorpsjonsevnen til mørtelen i de horisontale fugene ble de mest sammenfallende resultatene oppnådd. Det konkluderes derfor med at numeriske beregningsverktøy som WUFI® 2D kan, med nok inndata, gi resultater som er tilstrekkelig nøyaktige ved sammenligninger av ulike løsninger for innvendig isolering. Det vil likevel ikke anbefales som eneste verktøy ved beslutninger vedrørende innvendig isolering av murfasader.



## Abstract

There is an increasing focus in today's society to reduce the energy use and therefore also an urge for energy efficiency measures in the existing building stock. One of these measures is adding insulation to the existing building envelope to reduce the energy use for heating. Between 1850 and 1940, there was built a lot of the uninsulated brick buildings in Norway that are still in use. The building envelope of these buildings have a low thermal resistance compared to modern houses, and the energy use for heating could be considerably reduced by adding insulation. Adding exterior insulation would be preferable, but due to the fact that many of these buildings have historical value and are listed for their exterior appearance, adding exterior insulation is not always an option. In these cases, interior insulation will be the only option for increasing the thermal resistance of the walls. Internal insulation increases the risk of humidity-related damages since it reduces the temperature in the walls and decreases the wall's ability to dry out moisture. Increased humidity in the walls can then lead to mold growth and dry rot in embedded wood beams, and lowered temperature can lead to frost weathering as well.

In continuance with previous studies on the topic, a test wall-experiment has been set up in the NTNU and SINTEF laboratory. The test wall consists of nine massive brick wall panels with three different interior insulations. Some of the panels are laid with a high suction brick and some with a low suction brick and most of the panels also have a smart vapor barrier. The wall is placed in a climatic simulator containing two chambers, representing an outdoor and an indoor climate. During the experiment the wall is first exposed to a cold climate with driving rain and later a warmer, drying period. The purpose of the experiment is to study the hydrothermal performance of the wall panels and evaluate the risk of humidity-associated damages. The results show that the experiment is in consensus with existing literature. The relative humidity in the walls increases with increasing internal insulation and the temperature drops as well. They also show that the wall panels with high suction bricks have a considerably higher relative humidity compared to the low suction bricks. In addition to these findings, the results show that most of the humidity in the wall panels probably originate from the driving rain. The drying period was too short to record sufficient drying of the wall panels, but in the time available there were no apparent difference between the wall panels with and without the smart vapor barrier. This suggest that the smart vapor barrier works and adapts to the surrounding relative humidity. In addition to the laboratory experiment, a series of simulations of the same experiments have been executed in WUFI® 2D, a numerical simulation software. Even after an extensive collection of input data for the materials used in the simulation, the results from the simulation deviates from the laboratory experiment with a generally lower relative humidity, and some deviating temperatures. An adjustment to the mortar absorption in the calculation due to findings in a correlating material test, made the simulation result a lot more similar to the laboratory results. In conclusion; simulations made with WUFI® 2D can, with sufficient and correct input data, calculate comparable results to laboratory experiments and be a valuable tool in comparing different solutions for interior insulation. Nevertheless, it should not be the only basis when evaluating interior insulation in an existing brick building.





## **Forord**

Rapporten er en avsluttende masteroppgave våren 2019 ved Bygg- og miljøteknikk på NTNU. Oppgaven er skrevet ved Instituttet for Bygg- og miljøteknikk, innenfor hovedprofilen Bygnings- og Materialteknikk.

Arbeidet med masteroppgaven har gitt meg innsyn i hvordan man setter opp et laboratorieforsøk og erfaring med arbeid og behandling av store datamengder. Arbeidet har vært utfordrende, men det har også vært givende å arbeide med kombinasjonen teori og praksis. Det å arbeide med rådata har gitt en viktig erfaring når det kommer til vurdering av forskning og kilder generelt.

Jeg vil gjerne takke min hovedveileder Stig Geving og god hjelp til å finne retning og avgrensinger på oppgaven. Takk også for all tilbakemelding underveis på utforming og videre arbeid.

Laboratorieforsøket og de numeriske beregningene er gjort i tilknytning en doktorgradsavhandling tilhørende doktorgradsstipendiat Jon Ivar Knarud. Tusen takk for uvurderlig hjelp gjennom hele arbeidet. Tusen takk for tålmodigheten med alle spørsmål og for at jeg fikk ta del i ditt arbeid.



## Innhold:

1	Innledning.....	1
1.1	Bakgrunn .....	1
1.2	Formål.....	2
1.3	Forskningsspørsmål .....	2
1.4	Avgrensning.....	2
1.5	Oppbygning .....	3
2	Teori.....	5
2.1	Regn på teglsteinfasade .....	5
2.2	Potensielle skader og effekter av innvendig isolering .....	6
2.3	Fukt i materialer.....	8
2.3.1	Porer og poresystemer .....	8
2.3.2	Fuktbinding i materialer .....	9
2.3.3	Fuktinnhold.....	11
2.3.4	Sorpsjon .....	13
2.3.5	Kapillærsuging.....	14
2.4	Fukttransport i porøse materialer.....	15
2.4.1	Transport i gassfase .....	15
2.4.2	Transport i væskefase .....	17
2.5	Heftsone.....	18
3	Laboratorieforsøk .....	19
3.1	Metode .....	19
3.1.1	Beskrivelse av forsøk.....	19
3.1.2	Veggfelt og sensorplassering.....	23
3.1.3	Materialer.....	26
3.1.4	Målemetode .....	30
3.2	Resultater og analyse .....	33
3.2.1	Veggfelt 1, 2, 3 .....	34
3.2.2	Veggfelt 4, 5 og 6 .....	40
3.2.3	Veggfelt 7, 8, 9 .....	46
3.2.4	Generelle observasjoner.....	49
4	Forventet relativ fuktighet uten slagregn.....	51
5	Simulering i WUFI® 2D .....	55
5.1	Metode .....	56
5.1.1	Beregningsverktøyet WUFI® 2D.....	56
5.1.2	Begrensninger .....	57

5.1.3	Inndata .....	59
5.2	Resultater og analyse .....	65
5.2.1	Simulering uten regnpåkjenning.....	66
5.2.2	Simulering med slagregn .....	67
5.2.3	Simulering av rød teglstein.....	75
5.2.4	Generelle observasjoner fra simuleringene .....	78
6	Diskusjon .....	79
7	Konklusjoner og videre arbeid .....	83
7.1	Konklusjon.....	83
7.2	Videre arbeid .....	84
8	Referanseliste.....	85
9	Vedlegg.....	88

## Figurliste

Figur 1: Fukting ved slagregn og tørking av murfasade [38] .....	5
Figur 2: Viser hvordan temperaturen i vegg forandrer seg ved innvendig isolering. Skillevegger som vist her skaper kuldebroer ved innvendig isolering [37]. .....	6
Figur 3: Frostskader i eldre teglsteinsfasade [9]. Bildet viser hvordan gjentatte fryse- og tinesykluser kan føre til frostsprengning. ....	6
Figur 4: Figuren til venstre viser et materiale som ikke blir fuktet av vandrdåpen. Figuren til høyre viser et material som blir fuktet. Figuren til høyre har en mindre fukteinkel enn figuren til venstre. Illustrasjonen er basert på en figur i [21]. ....	10
Figur 5: viser hvordan menisker former seg i porene. Det blå er fukthinnen som skapes i poreoverflaten. Figuren er basert på en illustrasjon i [21] .....	10
Figur 6: er hentet fra SINTEF Byggforsk og viser de ulike fasene i oppfuktingen av et materiale [23] .....	12
Figur 7: Fuktisotermer for et generelt porøst materiale [22] .....	13
Figur 8: Sorpsjonskurve for et generelt materiale som illustrerer forskjellen mellom desorpsjon og adsorpsjon [49] .....	13
Figur 9: viser forholdet mellom fuktinnhold og kapillært sug (til venstre) og forholdes mellom kapillært sug og relativ fuktighet (til høyre). Figurene er hentet fra [23] .....	14
Figur 10: Viser veggfeltene på utvendig/kald side av klimasimulatoren. Bilde i midten viser et veggfelt med gul teglstein og bilde til høyre viser rød teglstein .....	19
Figur 11: Klimasimulatoren på laboratoriet til NTNU og SINTEF Byggforsk. Døren til venstre går inn til kammeret med uteklima og døren til høyre går inn til kammeret med inneklima. Testveggen er satt mellom to kammerene .....	20
Figur 13: Viser innvendig/varm side av klimasimulatoren og hvordan trebjelkeenden er satt inn i veggfeltene og hvordan bjelkesensorene er montert i bjelkeenden. Bilde til høyre viser også et veggfelt hvor isolasjonsplater av fenolskum er montert. Bildene under viser veggfeltene ferdig montert med gipsplate og tetting rundt bjelkeenden. Bildet nederst til venstre er rørene hvor noen av temperatur- og RF sensorene ligger. ....	21
Figur 14: viser oppbygningen av de ni veggfeltene og plasseringen til veggfeltene i testvegen. Figuren viser også sensorplassering av de ulike sensorene. Temperatur- og RF sensorene er merket som «RF», Sahlén sensorene med «SA» og fuktmålerne i bjelkeenden med «B». Alle de isolerte veggfeltene har også en gipsplate montert på innsiden av dampsperran og det er 10 mm klaring mellom bjelkeenden og det bakenforliggende murverket. ....	24

Figur 15: viser sensorplasseringene i de ni veggfeltene. Veggfelt 1 er nede i hjørnet til venstre og veggfelt 9 er øverst i høyre hjørne. Temperatur- og RF-sensorene er merket med "RF", Sahlén sensorene er merket med "SA" og fuktmålerne i bjelkeenden er merket med «B» foran tallet til sensoren. Bjelkeenden er illustrert med stiplet linje.....	25
Figur 16: Rustika rød og Glatt oker lys fra Bratsberg Teglverk.....	26
Figur 17: Prinsippet for smart dampsperre. Når konstruksjonen er tørr vil dampsperran være damp tett. Ved høy RF i konstruksjonen vil dampsperran tilpasse seg og bli mer dampåpen for tørke ut fukt via diffusjon. [47] .....	29
Figur 18: Forholdet mellom fuktinnhold i bjørk og relativ fuktighet. Grafen er hentet fra produsenten av Sahlén sensoren .....	32
Figur 19: Forholdet mellom fuktinnhold i gran i vekt-% og relativ fuktighet [21].....	32
Figur 20: Temperatur- og RF-sensorene i veggfelt 1. På grunn av operasjonsfeil i laboratoriet har sensorene logget i ulike tidssteg gjennom klimasekvensen. Det er derfor flere datapunkter i begynnelsen av klimasekvensen. Dette gjør at det ikke er lik avstand mellom timene på horisontalaksen .....	34
Figur 21: viser temperatur- og RF-sensorene i veggfelt 2. Veggfelt 2 er referansetilfellet i forsøket. Alle tre sensorene er plassert i rør i den nedre delen av veggfeltet. ....	35
Figur 22: viser Sahlén sensorene i veggfelt 2. Sensorene er plassert i horisontalfuger. SA5 er plassert 52 mm fra innvendig side på nedre del av veggen. SA6 er plassert 52 mm fra utvendig side i midten av veggfeltet. Veggfelt 2 er referansetilfellet i forsøket. ....	36
Figur 23: viser fuktinnholdet i bjelkeenden i veggfelt 2. 16,2 vekt-% tilsvarer en RF= 80% og 32 vekt-% tilsvarer RF =100% .....	37
Figur 25: viser temperatur- og RF-sensorer i veggfelt 3. De tre sensorene er plassert i rør på den nedre delen av veggfeltet. Sensor RF25 ligger ytterst i veggen omtrent 100 mm fra utvendig side, og RF24 ligger nærmest innvendig side ca. 100 mm fra innv .....	38
Figur 26: viser Sahlén sensorene i veggfelt 3. SA8 er plassert i en vertikalfuge utenfor trebjelkeenden i midten av veggfeltet. SA7 er plassert i en vertikalfuge i en steins avstand fra innvendig side i nedre del av veggfeltet. ....	39
Figur 27: Temperatur- og RF sensorer på veggfelt 4,5 og 6. Sensorene er plassert på innsiden av murverket. Sensor 16 på veggfelt 4, sensor 43 på veggfelt 5 og sensor 1 på veggfelt 6. ....	40
Figur 29: Temperatur- og RF sensorer i veggfelt 4. Sensor 4 og 5 er plassert i horisontalfuger nær var side. Sensor 4 sitter i den øvre delen av veggen og sensor 5 i den nedre delen. ....	41

Figur 28: Viser Sahlén sensorene som er montert i veggfelt 4. Alle sensorene er plassert i horisontalfuger nær varm side av veggen. Sensor 9 og 10 er plassert på nedre del av veggen og sensor 12 på øvre del av veggen.....	42
Figur 30:Sahlén sensorer plassert i en horisontalfuge nær varm side på nedre del av veggen. Sensor 10 er montert i veggfelt 4, sensor 13 i veggfelt 5 og sensor 15 i veggfelt 6.....	43
Figur 31: Sahlén sensorene 11, 14, 16. Alle tre er plassert i en horisontalfuge nær kald side av veggen. Sensorene er plassert i hhv. veggfelt 4, 5 og 6.....	44
Figur 32: Fuktmålerne i bjelkeendene i veggfelt 4,5 og 6.....	45
Figur 33: Temperatur- og RF sensorer på veggfelt 7,8 og 9. Sensorene er plassert på innsiden av murverket. Sensor 51 på veggfelt 7, sensor 7 på veggfelt 8 og sensor 49 på veggfelt 9. ....	46
Figur 34:Sahlén sensorer på veggfelt 7,8 og 9. Sensorene er plassert i en horisontalfuge nærmere kald side. Sensor 18 på veggfelt 7, sensor 19 på veggfelt 8 og sensor 20 på veggfelt 9 .....	47
Figur 35: Fuktmålerne i bjelkeenden. Grafen viser fuktinnholdet i bjelkeendene i veggfelt 7, 8 og 9 .....	48
Figur 36: Temperaturen gjennom bygningskomponenten hvor tykkelsen på lagene tilsvarer varmemotstanden.....	52
Figur 37: WUFI 2D display. Bildet til venstre viser oppsettet av til WUFI 2D. Bildet til høyre viser hvordan en kan hente ut resultat ut fra gridet til veggfeltet. ....	56
Figur 38: viser innstilt temperatur, relativ fuktighet og mengden regn i hver av de 8 regnpåkjenningene i simuleringen i WUFI® 2D . I laboratorieforsøket ble temperaturen gjennom hele perioden innstilt til 11°C i korte perioder som et antifrostiltak for ventilene. Dette er droppet fra simuleringen i WUFI® 2D.....	59
Figur 39: Resultater fra simuleringen av veggfelt 2 uten regn. Det er i figuren vist data hentet ut fra samme plassering som sensorene B2, SA5 og RF3 har i den virkelige veggen. ....	66
Figur 40: Figuren til venstre er målingene fra sensor RF2 fra laboratorieforsøket. Figur til høyre viser resultatene fra simuleringen av veggfelt 2 med regnpåkjenning fra samme punkt som RF2 er plassert. ....	67
Figur 41: Figuren til venstre er målingene fra sensor RF2 fra laboratorieforsøket. Figur til høyre viser resultatene fra simuleringen av veggfelt 2 med regnpåkjenning og justert absorpsjonskoeffisient i mørtelen i horisontalfugene fra samme punkt som RF2 er plassert. .	68
Figur 42: viser fuktinnholdet i veggfelt 2 ytterst i murvangen i laboratorieforsøket (til venstre) og relativ fuktighet ved samme plassering i simuleringen med justert heftsone (til høyre).....	68

Figur 43: Til venstre er fuktinnholdet i vekt-% registrert i sensor SA13 og SA14 i laboratorieforsøket og figuren til høyre viser sammenligning av simulering med og uten heftsone-justering for veggfelt 5 ved sensor SA13 og SA14. ....	69
Figur 44: Sammenligning av målingene fra laboratoriet (til venstre) og resultater fra simulering i WUFI (til høyre) ved sensor RF43 i veggfelt 5.....	70
Figur 45: viser veggfelt 5 simulert med og uten dampsperre. Figuren viser resultater hentet fra innsiden av murverket ved RF43 og i bjelkeenden B5.....	71
Figur 46: Resultater fra laboratoriet (til venstre) og WUFI simulering (til høyre). Fra sensor SA16 (øverst) og RF1 (nederst). SA16 er plassert i den ytterste horisontale mørtelfuger og RF1 er plassert på innsiden av murverket i veggfelt 6. Legg merke til at SA16 er oppgitt i fuktinnhold i vekt-% fra laboratorie-målingene. ....	72
Figur 47: viser simulering av veggfelt 4 med justert heftsone (øverst til venstre) ved RF4 og RF16. Siden SA12 og SA9 er plassert i samme dybde som RF4 kan simuleringen sammenlignes her også. Resultater fra laboratoriet ved SA12 (nederst til venstre) og SA9 i (nederst i høyre hjørne) samt RF4 og RF16 (øverst til høyre) er lagt ved for sammenligning. Legg merke til at målingene fra Sahlén sensorene er i fuktinnhold i vekt.%. ....	73
Figur 48: Bjelkeende 4 simulert i WUFI® 2D og resultatene fra samme bjelkeende i laboratoriet oppgitt i fuktinnhold i vekt-% .....	74
Figur 49: sammenligner simuleringresultater (til venstre) og resultatene fra laboratoriet (til høyre). Det er gjort tre simuleringer med rød teglstein som er presentert gjennom de fire sensorplasseringene i veggfelt 7. Øverst er SA18, deretter SA17, nest nederst er RF51 og nederst B7. ....	76





# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for arbeidet med denne masteroppgaven er det økende fokuset på energibesparing og tiltak for besparing innen byggsektoren. For å kunne nå de fastlagte målene til FN, om å begrense global oppvarming til 1,5 °C, må verden redusere CO<sub>2</sub>-utslippet med 45% av 2010-nivå innen 2030 og innen 2050 må netto utslipp være null [1]. I Norge ligger om lag 40% av netto sluttforbruk av energi i bygningsmassen og flere av de rimeligste tiltakene for energisparing kan gjøres i boliger og yrkesbygg [2]. Dette tilsier at det er stort potensiale for energieffektivisering i den eksisterende norske bygningsmassen. Blant tiltakene for å kunne utnytte dette potensialet er etterisolering.

De fleste uisolerte teglfasadene som fortsatt er i bruk i Norge i dag ble bygget mellom 1850 og 1940. Frem til ca. 1890 ble veggene bygget massive og ble etter det gradvis erstattet av hultmurer. Det var først rundt 1940 at det ble vanligere å isolere ytterveggene [3]. U-verdien for disse ytterveggene er betydelig lavere enn ytterveggene i dagens nybygg. Gjennomsnittlig u-verdi på yttervegger på fleretasjes bygning fra før 1945 er 0.9 W/m<sup>2</sup>K [4]. Så potensialet er stort sammenlignet med dagens minstekrav for yttervegger i TEK 17 på 0.22 W/m<sup>2</sup>K [5].

Utvendig etterisolering er ved riktig gjennomføring effektivt og innebærer liten risiko for fuktskader. Det er likevel ikke alle tilfeller der man kan ta i bruk utvendig etterisolering. En andel av bygningene som bør energi effektiviseres har verneverdige fasader og vil ikke kunne isoleres utvendig. Da blir innvendig etterisolering det eneste alternativet. Innvendig etterisolering er utfordrende og innebærer en risiko for frost- og fuktskader da den reduserer uttørkingsevnen til veggen og kan forsterke kuldebroene i ytterveggen [6]. Risikoen for fuktskader øker også ved slagregnpåkjønning [7]. Det er også en andel av de aktuelle byggene som har trebjelker innfelt i murvangene. Ved innvendig etterisolering får de innfelte bjelkekeendene lavere temperatur gjennom året og blir dermed mer utsatt for fuktskader. Rasmussen [8] fant at ved å etterisolere med 95 mm isolasjon ville temperaturen i trebjelkeenden reduseres fra 10°C til 7°C ved en innetemperatur på 20°C og en utetemperatur på 0°C. Konsekvensen av for fuktig miljø ved trebjelkeender kan være råte som tilsier at bjelkene må byttes ut [9].

Det er likevel erfart at etterisolering er et såpass effektivt virkemiddel for energibesparelse at det er ønskelig å finne fuktsikre løsninger for det [10]. Det er gjort flere studier innen temaet, men det er enda ikke nok kunnskap til å kunne lage standardiserte løsninger for innvendig isolering. Et mulig verktøy videre er bruken av numeriske beregningsverktøy for testing av ulike løsninger.

## 1.2 Formål

På bakgrunn av at innvendig etterisolering ofte er eneste alternativ til etterisolering av eldre murfasader så er det, i forbindelse med et doktorgradsarbeid, satt opp et forsøk i laboratoriet til NTNU og SINTEF. Forsøket består av å utsette en massiv murvegg for slagregnspåkjenning i kombinasjon med kaldt klima på en side og varmt «inneklimate» på den andre siden. Dette gjøres i en klimasimulator. Murveggen som testes er delt inn i 9 felter med ulike oppbygning, hvor det er brukt to ulike teglsteiner og tre ulike isolasjonsmaterialer og smart dampsperre. Det er også innfelt en trebjelkeende i midten av hvert felt. Formålet med denne masteroppgaven er å analysere sensormålinger fra laboratorieforsøket, se hvordan det relative fuktighetsnivået påvirkes av slagregnspåkjenningen og se på hvordan de ulike oppbygningene og de ulike teglsteinene påvirker fuktforholdene. Videre er formålet å undersøke muligheten for å lage en modell i et numerisk beregningsverktøy for å simulere forsøket og gi sammenlignbare resultater. Dette blir gjort for å verifisere bruken av numeriske beregninger til å teste ulike løsninger for innvendig isolering av murte fasader.

## 1.3 Forskningsspørsmål

På bakgrunn av formålet med oppgaven har følgende forskningsspørsmål blitt formulert:

- Hvordan vil de hygrotermiske forholdene i en massiv murvegg, utsatt for en gitt klimasekvens og slagregn avvike fra hverandre ut fra type teglstein og type isolasjon? Og vil en smart dampsperre bidra til lavere relativ fuktighet (RF) i denne typen yttervegger?
- Vil en kunne simulere, med et numerisk beregningsverktøy, massive murte veggfelt med innvendig isolasjon utsatt for en gitt klimasekvens med tilstrekkelig nøyaktighet? Og kan numeriske beregninger brukes til å kvalitetssikre løsninger for innvendig isolering av massive murvegger?

## 1.4 Avgrensning

Opgaven ser på hvordan denne typen massive murvegger oppfører seg i et forenklet klima, ikke i et reelt klima. Det vil derfor ikke være grunnlag i denne oppgaven for å kommentere hvordan de ulike isolasjonsmaterialene vil fungere ved bruk i etterisolering av tidligere uisolerte reelle bygg. Det er i beregningsdelen valgt ut et utvalg av veggfeltene i forsøket som er simulert og et utvalg av varierende parametere. Det er derfor ikke komplett simulering av laboratorieforsøket i klimasimulatoren. Dette er grunnet begrenset tilgang på materialdata samt tidsbegrensning.

## 1.5 Oppbygning

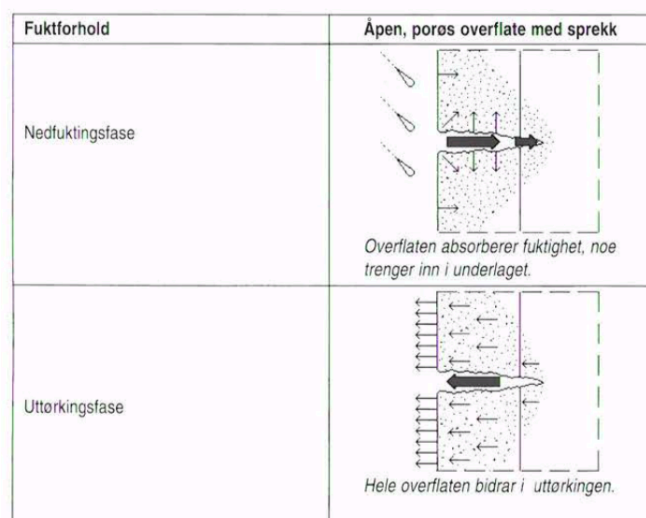
Oppgaven består av tre hoveddeler. Først en teoridel for å gi tilstrekkelig teorigrunnlag om temaet og utfordringene knyttet til innvendig etterisolering. Videre presenteres laboratorieforsøket med metode for behandling av måledata og en resultatdel. Laboratorieforsøk-kapittelet er etterfulgt av en beregning av relativ fuktighet i veggfeltene uten slagregns påkjønning og er ment å se i sammenheng med resultatene fra laboratorieforsøket. I den tredje hoveddelen presenteres de numeriske beregningene med metode og resultat. Det er valgt å slå sammen resultat og analyse i kapittelet om laboratorieforsøket og kapittelet om de numeriske beregningene. Dette er for å sikre en ryddig presentasjon av funnene og styrke lesbarheten til oppgaven. Det er til sist en felles diskusjonsdel og konklusjon som sammenfatter funnene i de to delene.



## 2 Teori

### 2.1 Regn på teglsteinfoasade

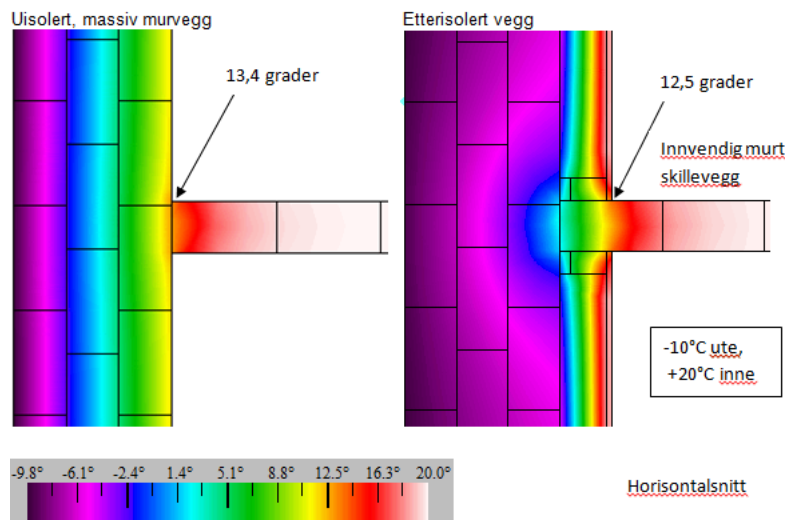
Mengde regn på en vertikal fasade avhenger av orientering [7], beskyttelse og overdekning samt regnintensiteten og vind. Av regnet som treffer fasaden vil noe renne av fasaden, noe vil trenge inn i sprekker/riss og noe vil bli kapillært sugd opp av fasaden. Murstein og mørtel har relativt høyt kapillært sug som fører til at tilnærmet alt av slagregn som treffer fasaden vil bli absorbert. Det vil derfor ikke legge seg en vannfilm over fasaden som forlenger nedfuktingen, og uttørking kan begynne rett etter regnskyll er avsluttet [11]. Det vil selvfølgelig her være variasjoner avhengig av type teglstein og mørtel. Rød, brun teglstein har generelt lavere kapillært sug og noe av regnet vil renne av, mens lyse, oker teglsteiner har høyere sug og tilnærmet alt av regnet vil bli sugd opp [9]. Av vannet som er tatt opp i veggen vil en del av det bli transportert videre innover i konstruksjonen på grunn av materialets kapillære sugsevne. Akkumulert vann kan føre til skader på konstruksjonen og det er derfor viktig å sikre at konstruksjonene har tilstrekkelig uttørkingsmuligheter [12].



Figur 1: Fukting ved slagregn og tørking av murfasade [38]

## 2.2 Potensielle skader og effekter av innvendig isolering

Innvendig isolering reduserer muligheten for uttørking av konstruksjonen og bidrar dermed til økt risiko for fuktskader. Isolering innvendig av yttervegger gir redusert varmetap og bidrar til lavere temperatur i ytre del av vegg. Temperaturen reduseres med 1.5-2 °C om vinteren i vegger som i utgangspunktet var uisolerte [9]. Redusert uttørking i kombinasjon med lavere temperatur vil kunne forårsake frostsprengning og saltutslag [13].



Figur 2: Viser hvordan temperaturen i vegg forandrer seg ved innvendig isolering. Skillevegger som vist her skaper kuldebroer ved innvendig isolering [37].

Frysing i vegg vil kunne forekomme ved lav nok temperaturer hvis fuktinnholdet i steinen er høyere enn den kapillære metningen [14]. Fryse- og tinesykluser kan forekomme på fasader med en orientering som er utsatt for mye slagregn og lengre perioder med hvor frysepunktet nås på kvelden/natten og etterfølges av tining i løpet av dagen. Absorpsjonen til teglsteinen vil også ha en stor betydning for frostbestandigheten til teglveggen, hvor høy absorpsjon gir lavere frostbestandighet [15]. Spesielt ved innvendig etterisolering bør teglet ha en adekvat frostbestandighet slik at den tåler den reduserte temperaturen og uttørkingen i den ytre delen av vangen.



Figur 3: Frostskafer i eldre teglsteinsfasade [9]. Bildet viser hvordan gjentatte fryse- og tinesykluser kan føre til frostsprengning.

Det er store variasjoner i U-verdien til eldre teglvegger og den avhenger av mange faktorer som fuktighet i veggen, type mørtel og oppbygning [16]. Massive vegger har dårligere uttørkingsevne og vil derfor innebære større risiko å etterisolere innvendig enn hultmurer som har bedre uttørking [17]. De Mets, Tilmans og Loncour [18] fant at egenskapene til mursteinen hadde større effekt på den relative fuktigheten mellom isolasjonslaget og murveggen enn dampåpenheten til isolasjonsmaterialet. Selv med lik absorpsjonsevne vil den kapillære ledningen til steinen ha stor effekt på mengden vann som når inn til innsiden av murveggen.

Redusert uttørking i kombinasjon med regn og vind vil også kunne resultere i høyt vanninnhold som igjen kan resultere i sommerkondens. Fukt som er sugd opp i teglet vil drives innover i veggen ved oppvarming av ytre side og kondensere på innvendig side, som igjen kan forårsake soppdannelse [9].

Muggvekst vil også kunne være en effekt av redusert uttørking og senket temperatur. Muggvekst kan forekomme hvis kritisk RF-nivå overstiges i lengre perioder. Det er noe variasjon i litteraturen om hva den kritiske relative fuktigheten er, men i et spenn på 80-95% RF vil muggvekst kunne forekomme avhengig av omgivende temperatur, eksponeringstid, overflate og type materiale [7]. Ved en relativ fuktighet over 80% og en temperatur på mellom 5-50°C vil muggvekst kunne forekomme etter uker/måneder. Mellom 0-5°C vil muggveksten gå sakte og kun forekomme ved RF over 90% [19].



## 2.3 Fukt i materialer

Vanndampinnholdet i luften angis som vanndampkonsentrasjon,  $v$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], også kalt luftens absolutte fuktinnhold, eller som partialtrykk,  $p_v$  [Pa] [20]. For hver temperatur finnes det en øvre grense for hvor mye vanndamp luften kan holde på. Denne øvre grensen kalles metningsinnholdet [21]. Metningsinnholdet øker med temperaturen, som betyr at luften kan holde på mer vanndamp ved økt temperatur og omvendt. Vanndampinnhold likt som metningsinnholdet kalles duggpunktet. Ved videre økning av vanndampinnholdet eller ved reduksjon av temperaturen vil noe av vanndampen skilles ut som kondens. Et vanndampinnhold som er lavere enn metningsinnholdet kan uttrykkes gjennom relativ fuktighet. Relativ fuktighet angir forholdet mellom vanndampkonsentrasjonen og metningsinnholdet for luften:

$$RF = \phi \cdot 100\% = \frac{v}{v_{sat}} \cdot 100\%$$

Fuktinnhold er relatert til det materialet som fukten er tatt opp i. Det vil derfor ikke nødvendigvis være hensiktsmessig å anvende vanndampkonsentrasjonen eller fuktinnhold som en absolutt størrelse når man ser på en hel bygningskomponent med flere materialer. Ved å bruke relativ fuktighet sikres en kontinuitet gjennom materialoverganger og vil derfor ofte være mer hensiktsmessig å bruke [22].

Alle materialer som ikke har helt lukkede poresystemer, som metall og glass, vil ha ta opp fukt og dermed ha et fuktinnhold. Fukten kan være tilført i produksjonen, omgitt av fuktig luft eller i kontakt med fritt vann. Hvor mye fukt som blir tatt opp avhenger av tilgang på fukt i omgivelsene, materialtypen, poresystemet og typen fuktbinding. Tidligere fuktpåvirkninger kan også ha en innvirkning [21].

### 2.3.1 Porer og poresystemer

Porenes form, størrelse og fordeling vil være avgjørende for materialets fuktopptak. En kan gruppere materialer i fire kategorier basert på material og porestruktur [21];

- > Ingen porer (f.eks. metall). Tar ikke opp fukt og er dermed ikke-hygroskopiske
- > Kontinuerlig faststoff med lukkede porer (f.eks. skumglass). Svært begrenset opptak av fukt på grunn av lukket poresystem, men vil fortsatt kunne betegnes som hygroskopiske.
- > Både faststoff og poresystem er kontinuerlige (f.eks. teglstein og tre). De fleste bygningsmaterialer faller innunder denne kategorien.
- > Diskontinuerlig faststoff (f.eks. mineralull, sand). Alle fibermaterialer og stoffer i korn og pulverform er i denne kategorien.

Mengden fukt som kan tas opp i et material bestemmes av porøsiteten, som angir andelen porevolumet utgjør av totalvolumet til materialprøven [21]. Med porevolum menes den luftfylte delen av et tørt porøst material.

$$Porøsitet = 1 - \frac{\rho_{prøven}}{\rho_{materialets\ faststoff}}$$

Materialegenskapene er bestemt av den gjensidige virkningen mellom grunnmaterialet og det tilstøtende medium i materialets poresystem. Det vil si vannet i poresystemet har en virkning på materialets mekaniske, kjemiske og fysikalske egenskaper [23].

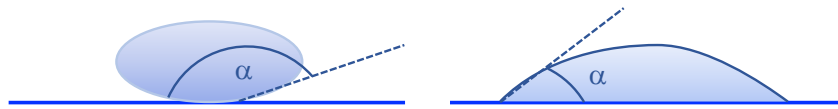
### 2.3.2 Fuktbinding i materialer

Når vann bindes i et materiale gir vannet fra seg energi. Energimengden er større jo sterkere bindingen er. Egenskapene til materialet og vannet endres i ulik grad ut fra hvilken type binding som skapes mellom de to [23]. En skiller mellom kjemisk og fysikalsk binding

Kjemisk bundet vann er fast fiksert i materialet og det skapes ofte et nytt materiale, mens fysikalske bindinger kan ofte reverseres og vannmolekylene består i bindingen [21].

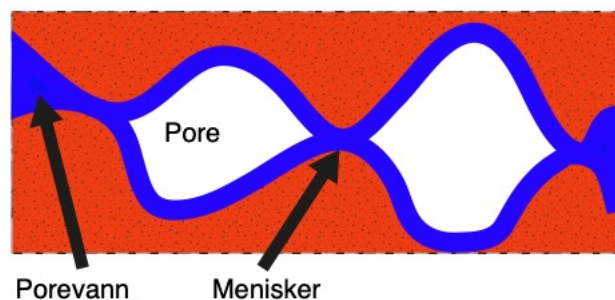
Fysikalsk binding deles opp i osmotisk binding, adsorptiv binding og kapillærkondensasjon. Osmotisk binding skyldes at det er salter tilstede som fører til redusert vandamptrykk. Det er vanskelig å skille mellom osmotisk binding og adsorptiv binding, så de ses gjerne under ett [21]. Adsorptiv binding skyldes tiltrekningskrefter mellom molekylene i det faste stoffets overflatelag og vann- eller vandampmolekyler. På grunn av vannmolekylets dipole struktur vil vannmolekyler ha en større tiltrekningskraft enn oksygen og nitrogenmolekyler i porene. Selv om den adsorptive bindingen ikke er like sterk som den kjemiske bindingen, kreves det fortsatt mye energi å få frigjort de første vannmolekylene som blir absorbert i poreveggen. I dannelsen av en vannhinne bestående av flere lag med vannmolekyler i poreveggen vil vannmolekylene lenger ut i vannhinnen ha svakere binding enn de innerste, første vannmolekylene [21].

Det vil stabilisere seg en statistisk balanse mellom vannhinnen og luft utenfor inne i poren, tilsvarende som for en fri vannflate. Vannmolekyler vil likevel kunne løsrive seg fra hinnen ved store temperatursvingninger. Det samme gjelder vandampmolekyler i luften som vil kunne festes til hinnen. Tykkelsen på hinnen avhenger av den omgivende relative fuktigheten og vil øke med økt relativ fuktighet og redusert temperatur. Tiltrekningskreftene på overflaten av faststoffet avhenger av materialet. Hvor sterk adhesjonskrefter et materiale har kan uttrykkes gjennom fuktevinkelen,  $\alpha$ . I et tørt materiale vil absorpsjon være den dominerende prosessen i fuktupptak, men med høyere fuktinnhold vil etterhvert vil kapillærkondensasjon ta over [21].



Figur 4: Figuren til venstre viser et materiale som ikke blir fuktet av vandrdåpen. Figuren til høyre viser et material som blir fuktet. Figuren til høyre har en mindre fuktevinkel enn figuren til venstre. Illustrasjonen er basert på en figur i [21].

Kapillærkondensasjon er en sekundær virkning av adhesjonskreftene. Tykkelsen på de adsorberte molekyllagene øker med økende RF og den luftfylte delen av porene blir mindre. Oppbyggingen av lagene skjer derimot ikke jevnt. Etterhvert som vannhinnen på poreveggen blir tykkere vil to motstående porevegger møtes og porene vil være fylt med væske over et område. Adhesjonskreftene tvinger væskeoverflatene som begrenser dette område over i en konkav form, og det danner seg to såkalte menisker. En dobbeltkrum menisk vil ha langt større tiltrekningskraft på de frie vanddampmolekylene enn de plane eller enkeltkrumme vil ha. Kraftpåvirkningen på meniskene gir økt styrke i bindingene mellom vannmolekylene i overflaten og molekyleutvekslingen mellom vannflate og luft avtar. Dermed synker den relative fuktigheten over menisken. Kapillærkondensasjon vil ikke være særlig merkbart ved lav relativ fuktighet. Det er først når RF når 80-90% at det vil gi utslag og virkningen stiger raskt når en nærmer seg RF opp mot 100% [21].



Figur 5: viser hvordan menisker former seg i porene. Det blå er fukthinnen som skapes i poreoverflaten. Figuren er basert på en illustrasjon i [21]

### 2.3.3 Fuktinnhold

Fuktinnhold kan angis på flere forskjellige måter. Det er i denne oppgaven valgt å bruke relativ fuktighet [%], fuktmasse per materialvolum,  $w$ , og tørr vekt-% som er fuktmasse per tørrstoffmasse-enhet. Da angis fuktinnholdet som  $u$ . Sammenhengen mellom fuktinnhold  $w$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] og  $u$  [ $\text{kg}/\text{kg}$ ] er gitt ved:

$$w = \rho_0 \cdot \frac{m_w}{m_0} = \rho_0 \cdot u$$

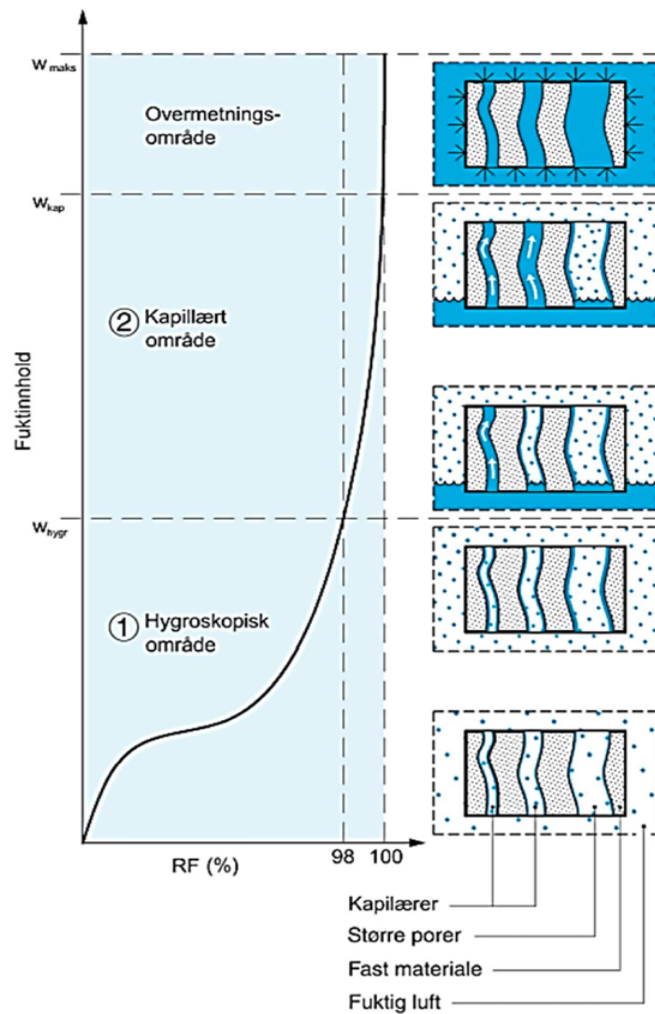
$\rho_0$  = materialets romdensitet i tørr tilstand [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m_w$  = massen av vann som kan fordampe [ $\text{kg}$ ]

$m_0$  = massen av tørrstoff [ $\text{kg}$ ]

Forskjellen i fuktinnhold mellom helt tørt og helt vannmettet materialet er ofte stor. I følge Byggforsk Håndbok 50 – Fukt i bygninger kan en dele opp intervallet i tre delområder; det hygroskopiske området, det kapillære område og overmetningsområdet. Fuktinnholdet i det hygroskopiske område tilsvarer fukt-likevekt med omgivende luft. Det hygroskopiske område avgrenses av den hygroskopiske grense som teoretisk går ved  $\text{RF} = 100\%$ , men i praksis vil en ikke kunne opprettholde en  $\text{RF}$  lik  $100\%$  slik at den reelle grensen går i intervallet  $\text{RF} = 95\text{-}98\%$  og tilsvarende fuktinnhold kalles  $w_{\text{hygr}}$  [21]. Økes fuktinnholdet over denne grensen vil vannet i poresystemet være kontinuerlig og fuktransport ved vannstrømming vil være mulig. Dette punktet kalles kritisk fuktinnhold,  $w_{\text{kr}}$ . Over denne grensen dominerer fuktransport i væskeform, mens damptransport domineres under grensen [21].

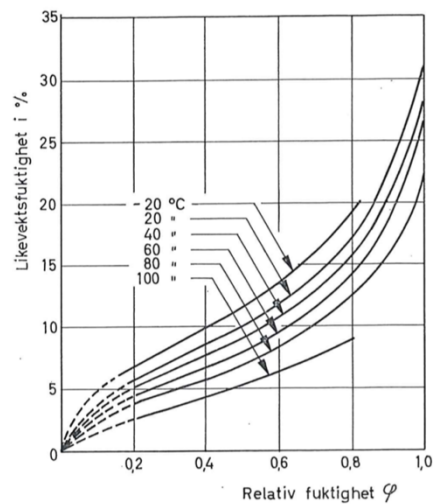
Ved lengre kontakt med fritt vann vil fuktinnholdet i materialet øke frem til kapillær metning,  $w_{\text{kap}}$ . Ved bare kapillærsuging vil normalt ikke fuktinnholdet nå  $w_{\text{maks}}$  som angis av porøsiteten til materialer. Dette er grunnet at noe luft vil være innstengt i porene slik at ikke alle porer er fylt med vann [21]. Området mellom  $w_{\text{kap}}$  og  $w_{\text{maks}}$  kalles overmetningsområde og vil som regel bare kunne oppnås gjennom vakuumering eller koking. Disse tre områdene er typiske for hygroskopiske kapillærsugende materialer, som tegl. For ikke-hygroskopiske materialer og ikke-kapillærsugende materialer vil kun det overmetningsområde være aktuelt. Her forekommer vann i flytende form grunnet kondens hvor duggpunktstemperaturen er nådd [21].



Figur 6: er hentet fra SINTEF Byggforsk og viser de ulike fasene i oppfuktingen av et materiale [23]

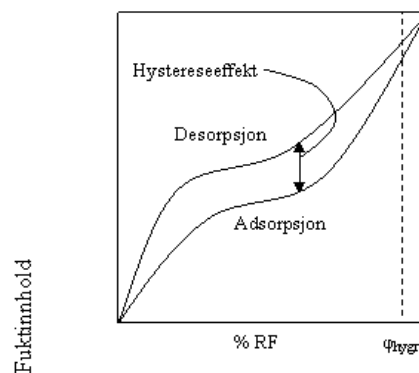
### 2.3.4 Sorpsjon

Med sorpsjon menes her generelt opptak av vanndamp, enten ved absorpsjon, adsorpsjon eller kapillærkondensasjon. Et tørt porøst materiale som kommer i kontakt med vanndamp, vil ta opp en viss mengde fukt. Mengden avhenger av materialets art, temperatur og dampens partialtrykk. Under stasjonære forhold vil det over tid oppnås likevekt slik at damptrykket i materialet er like stort i omgivelsene. Tilsvarende fuktinnhold betegnes gjerne som materialets likevektfukt og vises gjennom materialets fuktisotermer [23].



Figur 7: Fuktisotermer for et generelt porøst materiale [22]

Likevektfuktigheten er i tillegg til omgivende damptilstand avhengig av om fuktnivået er oppnådd gjennom sorpsjon eller desorpsjon. Fuktinnholdet er høyere ved desorpsjon enn sorpsjon. Det finnes flere forklaringer på denne hysteresen. En forklaring er at det under sorpsjon ikke fuktes fullstendig på grunn av tilstedeværelsen av adsorberte luftmolekyler som gjør at fuktvinkelen er større ved sorpsjon enn desorpsjon [21]. En annen forklaring er at den hygrottermiske likevekten tar så pass lang tid at den likevekten man kan observere ikke er det endelige fuktopptaket [23]. Det er likevel viktig å merke seg at denne forskjellen ikke er stor, så det vil ofte være tilstrekkelig å anvende adsorpsjonsisotermer eller en midlere verdi [24]. Sorpsjonskurver for et materiale må alltid bestemmes eksperimentelt, da den kan variere en god del innenfor samme materialtype [21].



Figur 8: Sorpsjonskurve for et generelt materiale som illustrerer forskjellen mellom

### 2.3.5 Kapillærsuging

Hvis et kapillæraktivt, porøst materiale kommer i kontakt med fritt vann vil materialet suge opp vann. Hvis ikke tilgangen til fritt vann avbrytes vil dette opptaket av vann fortsette til kapillær metning er nådd. Kapillærsugingen skyldes adhesjonskreftene mellom materialets poreoverflater og vann. Fukten suges fra fritt vann i stedet for ut av luftens vandampinnhold, som med kapillærkondensasjon [21]. Trange porer har størst sugekraft og vil derfor suge vann fra en grovere pore. I trange porer er strømningsmotstanden stor, som gjør at vanntransporten skjer langsomt. Det er det motsatte tilfellet i grove porer [23].

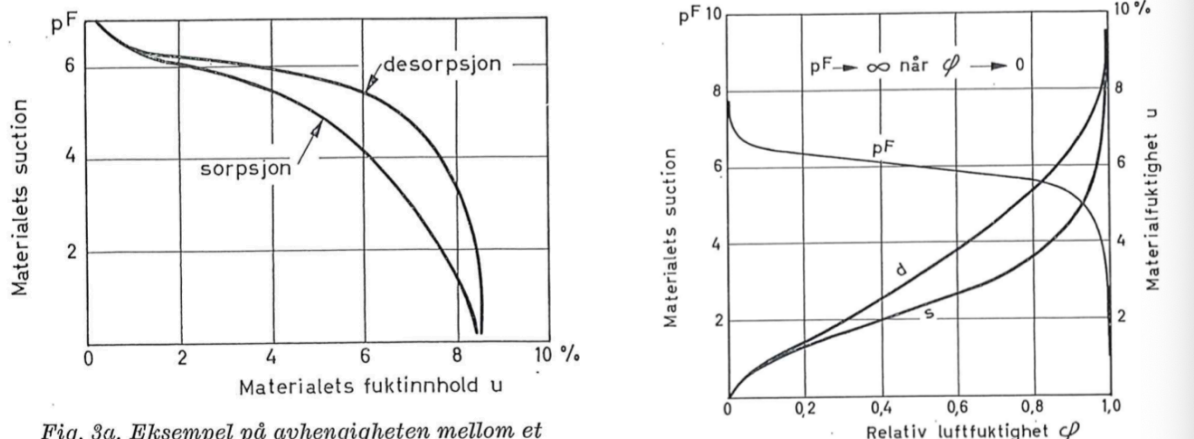


Fig. 3a. Eksempel på avhengigheten mellom et Figur 9: viser forholdet mellom fuktinnhold og kapillært sug (til venstre) og forholdes mellom kapillært sug og relativ fuktighet (til høyre). Figurene er hentet fra [23].

Porevannundertrykket (suction) inkluderer generelt virkningen av kapillærkreftene, gravitasjonskreftene, osmotiske effekter og eventuelt ytre væsketrykk. I et materiale som inneholder en viss fuktmengde og som ikke utsettes for en ytre påvirkning vil fordele fukten slik at de minste porene blir fylt opp først. Økes fuktinnholdet vil stadig grovere porer fylles opp og undertrykket i porevannet reduseres tilsvarende. Sugekraften til et materiale er størst når materialet er tørt for da er de minste porene med størst sugekraft ikke fylt. Med gradvis høyere fuktinnhold vil sugekraften til materialet reduseres [21].

Absorbert vannmengde,  $G$

$$G = A_w \cdot \sqrt{t} \quad [21]$$

$G$  = absorbert vannmengde [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$A_w$  = vannabsorpsjonskoeffisient [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$ ]

$t$  = tiden materialet er eksponert for fritt vannopptak på overflaten [s]

## 2.4 Fukttransport i porøse materialer

Fuktigheten i byggematerialer transporteres i både dampfasen og i væskefasen. Fukttransporten i dampfasen kan foregå som en molar massestrøm på grunn av totaltrykkgradienter eller i molekylær form som effusjon og diffusjon på grunn av partialtrykkgradienter eller som termosdiffusjon på grunn av temperaturgradienter. Fukttransporten i væskefasen skjer som molare strømmer grunnet totaltrykkgradienter forårsaket av statisk væsketrykk, vindtrykk eller kapillartrykk [23]. Fukttransporten i byggematerialer er som oftest en kombinasjon av både væske og gass. Størrelsen på bidragene er vanskelig å anslå på grunn av kompleksiteten til fukttransporten.

I porøse bygningsmaterialer er vanndamp diffusjon, overflatekryping og kapillær ledning de dominerende formene for fukttransport [25]. I et bygningsmateriale er det flere andre transportmekanismer som kan ha en effekt på fukttransporten i bygningsmaterialene som konveksjon og osmose, men disse antas å ha et mindre bidrag i forhold til de tre nevnte mekanismene [25].

### 2.4.1 Transport i gassfase

Et porøst materiale vil innstille seg i likevekt med omgivende luft. Hvis materialet er tørrere enn luften rundt, vil vanndampmolekyler diffundere inn i materialporene. Er tilfelle omvendt, at luften er tørrere enn materialet vil diffusjonen av vanndamp skje ut av materialet. Diffusjon i porøse materialer er drevet av følgende potensialer; gradienter i massekonsentrasjon, temperatur og totaltrykk. Det er likevel vanlig å se bort fra temperatur og totaltrykk når man beregner diffusjon i et porøst materiale, da disse antas små i forhold til diffusjon drevet av massekonsentrasjonsforskjeller [24]. Under isoterme forhold kan diffusjon uttrykkes gjennom Ficks diffusjonslov [21]:

$$g = -D_p \times \nabla p_v$$

$g$  = dampfluks, diffundert dampmengde per tids-og flateenhet [ $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ ]

$D_p$  = vanndampens diffusjonstall i luft [ $\text{kg}/(\text{m s Pa})$ ] basert på damptrykk

$\nabla p_v$  = gradienten i vanndampens partialtrykk [ $\text{Pa}/\text{m}$ ]

Dampstrømmen går fra høyere damptrykk til lavere og derfor er retningen angitt med minustegn.



$\delta_v$  er vanndamp diffusjonskoeffisienten eller vanndamp permeabiliteten. Den beskriver hvor lett vanndamp kan transporteres gjennom et medium. Ved å relatere vanndamp permeabiliteten til permeabiliteten til luft,  $\delta_a$ , kan vi innføre  $\mu$  som er diffusjonsmotstandsfaktoren som er en dimensjonsløs faktor [21].  $\mu$  er da et uttrykk for hvor mye vanndampdiffusjon blir forhindret i materiale sammenlignet med stillestående luft. Forholdet mellom  $\delta_p$ ,  $\delta_a$  og  $\mu$  er gitt ved:

$$\delta_v = \frac{\delta_{v,a}}{\mu}$$

$$\delta_{v,a} = 1,945 \cdot 10^{-12} \cdot T^{0,81} [25]$$

T = temperatur [K]

Diffusjonsmotstandsfaktoren vil ikke variere ved lav relativ fuktighet, og vil også kunne stort sett betraktes som konstant når vanndamp og væsketransport ikke forekommer samtidig [24]. I det hygroskopiske område derimot bør det tas hensyn til at vanndamppermeabiliteten varierer og dermed også diffusjonsmotstandsfaktoren [21].

### 2.4.2 Transport i væskefase

I det kapillære område vil fuktransporten i porøse materialer domineres av væsketransport. Væsketransporten skjer i en kombinasjon av overflatekryping og kapillær ledning. Overflatekryping skjer ved lavere relativ fuktighet, men blir i beregninger ofte innbakt i vandampdiffusjonen i det hygroskopiske området. Dette på tross av at prosessene kan virke i motsatt retning [25]. Overflatekryping skjer i de porene som ikke er helt fylt med vann. Transporten foregår i den absorberte vannfilmen og drives av variasjon i tykkelsen på vannfilmen hvor vannmolekylene forflytter seg i retning av tynnere film [21]. Siden vannfilmen er avhengig av den relative fuktigheten i poreluften er drivpotensialet for overflatekryping relativ fuktighet. Med stigende relativ fuktighet og i overgangen mellom hygroskopisk og kapillært område er det vanskelig å skille mellom overflatekryping og kapillærsuging. Den samlede væsketransporten kan beskrives som en potensialstrøm hvor vanninnholdet er potensialet [26].

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

$g_w$  = væskestrømtetthet [kg/m<sup>2</sup>s]

$w$  = fuktinnhold [kg/m<sup>2</sup>]

$D_w(w)$  = kapillærtransportkoeffisienten [m<sup>2</sup>/s]

Kapillærsugingen kan forklares ut fra fri overflateenergi og umettede bindingskrefter som opptrer som overflatespenning. Kapillærsugingen oppstår på grunn av kapillarpotensialgradienter som igjen skyldes fuktgradienter, temperaturgradienter og forskjeller i porestrukturen og overflateenergi [23]. Kapillærtransportkoeffisienten gir uttrykk for materialets evne til å transportere fukt og dermed mengden fukt som transporteres på grunn av kapillærsugevenen til materialet. Kapillærtransportkoeffisienten er avhengig av materialets fuktinnhold. Den går mot null når materialet er helt tørt og øker med økende fuktinnhold til en maksverdi ved fullstendig vannmettet materiale. Hvordan kapillærkoeffisienten endres med fuktinnholdet er avhengig av porestrukturen til materialet [23].

Likevektfuktinnholdet er i sorpsjonsisotermen angitt av en øvre og en nedre grense. Dette betyr at det kan være fuktlikevekt innad i et materiale uten at fukten er jevnt fordelt. Dette kan skje hvis likevekt er oppnådd i en del gjennom sorpsjon og i en annen del gjennom desorpsjon. En ujevn fuktfordeling som ikke har noe tilknytning til sorpsjonshysteresen og som heller ikke forårsaker en fukttransport kan oppstå i materialer med jevn porestruktur, f.eks. i tegl [23].

Fukttransport kan i tillegg til kapillært sug være drevet av vindtrykk og vanntrykk. På grunn av overtrykk kan vann bli presset inn i og gjennom materialer. Her vil størrelsen på fukttransporten være avhengig av overtrykkets størrelse og porestrukturen. I tegl vil likevel strømningsmotstanden være såpass stor at det er kapillærkreftene som vil være dominerende i fukttransporten [23].

Fuktovergang fra et materiale til et annet i en bygningskomponent vil avhenge av mottakermaterialets sugeegenskaper, «suction» eller kapillarpotensial ved ulike fuktinnhold. Kapillarpotensialet angir hvilket hydraulisk undertrykk som bindingskreftene forårsaker, men sier ingenting om fukttransporten innad i materialet. Sugeegenskapene er sterk avhengig av fuktinnhold i materialet [21].

## **2.5 Heftsoner**

I et murverk vil heften mellom teglstein og mørtel ha stor betydning for egenskapene og bestandigheten til murverket. Teglsteinens sugeevne vil påvirke heftetableringen mellom teglstein og mørtel. For å oppnå godt samvirke bør teglsteinen med lavt sug ha en mørtel med lav vanntapsmotstand og teglstein med høyt sug bør ha en mørtel med høy vanntapsmotstand [27]. Ved for høyt sug eller for lav vanntapsmotstand i mørtelen vil teglsteinen kunne suge ut for mye av vannet i mørtelen og redusere porøsiteten til mørtelfugen. Hvor mye porøsiteten reduseres med avhenger av teglsteinen, mørtelen og avstanden til overgangen mellom mørtel og teglstein. Det er i overgangen de egenskapene endres mest og det er denne overgangen som kalles heftsonen [28].

Materialundersøkelser gjort i forbindelse med doktorgradsarbeidet som denne masteroppgaven er den del av, viser at absorpsjonskoeffisienten til mørtelen i horisontalfuger øker drastisk ved sammenligning av mørtelprøver som ikke er murt mellom teglstein med høyt sug. Det er verdt å merke at dette kun gjelder horisontalfuger, da det i vertikalfuger er funnet motsatt effekt i fukttransporten mellom teglstein og vertikalfuge [29].

### 3 Laboratorieforsøk

#### 3.1 Metode

For å kunne undersøke de hygrotermiske forholdene i et innvendig isolert murverk er det satt opp en testvegg i en klimasimulator på laboratoriet på NTNU og SINTEF. Testveggen består av ni veggfeltet med en massiv murvange med en innfelt trebjelkeende i midten.

##### 3.1.1 Beskrivelse av forsøk

Testveggen består av ni veggfeltet bestående av en massiv murvange med en innfelt trebjelkeende av gran. En oppbygning som typisk kan oppleve høy relativ fuktighet i bjelkeenden [9]. Formålet med forsøket er se på hvordan variasjoner av denne typen oppbygning påvirker de hygrotermiske forholdene vegg. Veggfeltene er derfor bygget med ulike teglstein og ulike innvendig isolasjon. Det er brukt to typer teglstein, en gul teglstein med høyt sug og en rød teglstein med lavere sug. Begge er murt med kalk sement mørtel. Begge teglsteinene er i standard størrelse med 226 mm lengde, 104 mm bredde og 60 mm høyde. I tillegg er veggfeltene murt i to tykkelser, 1-steins tykkelse og 1 ½ steins tykkelse. Det er brukt tre isolasjonsmaterialer; mineralull, isolasjonsplater av fenolskum og aerogel. Innenfor isolasjonen er det på de fleste av veggfeltene montert en smart dampsperre for å hindre at fukt fra innvendig side slipper inne i konstruksjonen gjennom diffusjon og samtidig kunne tillate tørking innover når det blir høyt fuktnivå i konstruksjonen. Til slutt er det montert en gipsplate på samtlige veggfelt med isolasjon på innsiden. Den innfelte trebjelkeenden av gran er montert med 10 mm klaring fra den bakenforliggende murvangen.



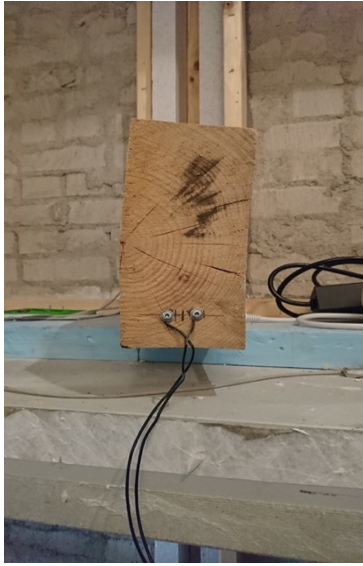
*Figur 10: Viser veggfeltene på utvendig/kald side av klimasimulatoren. Bilde i midten viser et veggfelt med gul teglstein og bilde til høyre viser rød teglstein.*

Videre ble testveggen satt inn i en klimasimulator med to kammer. Klimasimulatoren har mulighet til å ha ulik relativ fuktighet og temperatur i de to kammersene. Det er i tillegg ventiler som gjør det mulig å få til slagregn på veggfeltene. Ventilene er vist i Figur 12. Ved slagregnpåkjenning økes temperaturen i kammeret for å unngå svikt i ventilene. Temperaturen på vannet er også noe høyere enn det man kunne forventet i et reelt klima. Den relative fuktigheten innstilles automatisk til 97% ved slagregnpåkjenning.

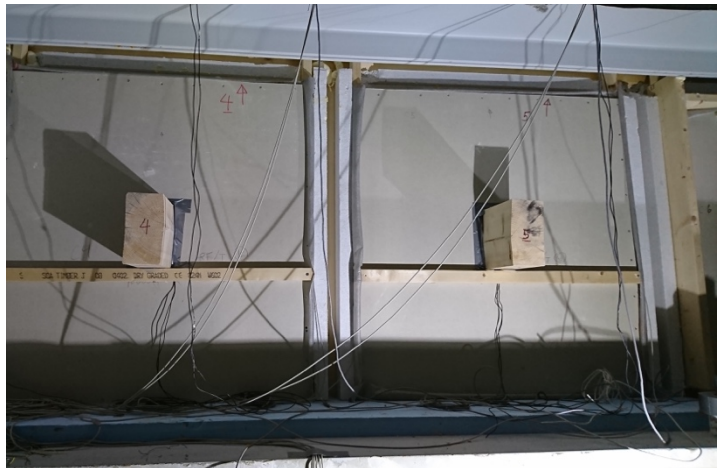


*Figur 11: Klimasimulatoren på laboratoriet til NTNU og SINTEF Byggeforsk. Døren til venstre går inn til kammeret med uteklima og døren til høyre går inn til kammeret med inneklima. Testveggen er satt mellom to kammersene*

I dette forsøket representerer de to kammersene hhv innvendig og utvendig klima. Innvendig klima er forenklet til en konstant temperatur på 23°C og konstant relativ fuktighet på 50 %. For det utvendige klimaet er det laget en klimasekvens hvor en kald periode med høy relativ fuktighet og slagregnpåkjenninger, etterfulgt av en tørkeperiode med høyere temperatur og lavere relativ fuktighet. Det er totalt 8 slagregnpåkjenninger med varierende lengde, 10, 20 eller 40 min. Det er noe usikkerhet knyttet til mengden vann som slippes ut fra ventilene, men et estimat er 47 mm/time. I forkant av klimasekvensen er veggfeltene vært gjennom en tørkeprosess for å kunne starte forsøket med likest mulig utgangspunkt. Klimasimulatoren har da vært innstilt på 35°C på innvendig side og 39°C utvendig side, samt 8% RF. I perioden hvor isolasjonen ble montert var ikke klimasimulatoren på og antatt temperatur var 20°C og relativ fuktighet 30%. Tabell 1 viser klimasekvensen for forsøket. Tabellen viser innstilt temperatur og relativ fuktighet på utvendig side av klimasimulatoren, samt antall minutter med slagregn. I venstre kolonne er dato og tid angitt, samt akkumulerte timer. Dato for start av forsøket er ikke samme tidspunkt som klimasimulatoren ble innstilt på 20°C, men er starttidspunktet for når sensorene begynte å logge data.



Figur 12: Viser innvendig/varm side av klimasimulatoren og hvordan trebjelkeenden er satt inn i veggfeltene og hvordan bjelkesensorene er montert i bjelkeenden. Bilde til høyre viser også et veggfelt hvor isolasjonsplater av fenolskum er montert. Bildene under viser veggfeltene ferdig montert med gipsplate og tetting rundt bjelkeenden. Bildet nederst til venstre er rørene hvor noen av temperatur- og RF sensorene ligger.



Tabell 1

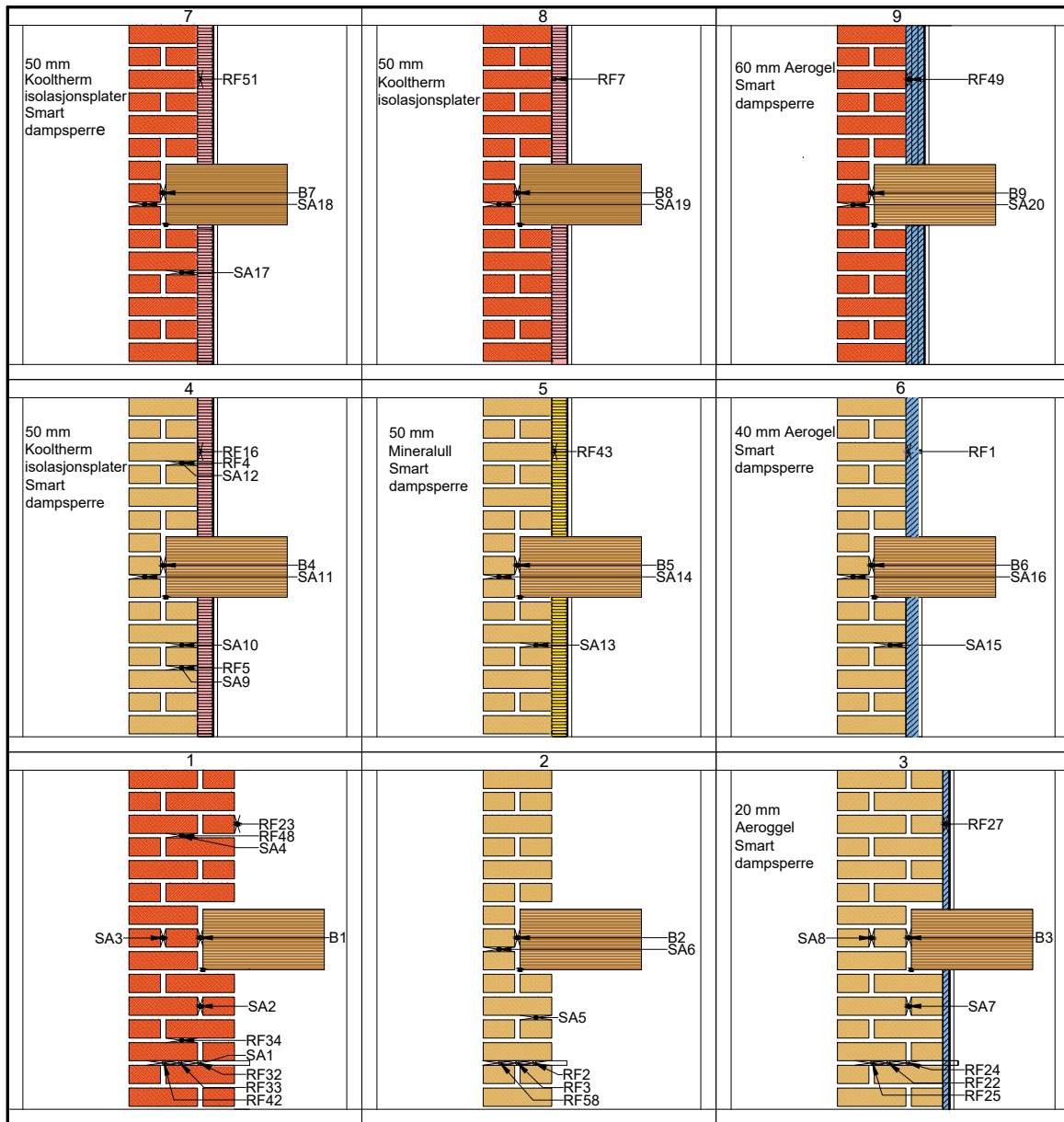
Dato	Tid	Timer	Temperatur [°C]	Relativ fuktighet [%]	Regn [min]
23/11/2018	11:00	0,0	20	30	
03/12/2018	12:00	241,0	5	90	
03/12/2018	13:00	242,0	11	97	10
03/12/2018	13:29	242,5	5	90	
03/12/2018	15:10	244,2	11	97	10
03/12/2018	15:39	244,7	5	90	
05/12/2018	11:47	288,8	11	97	20
05/12/2018	13:49	290,8	5	90	
05/12/2018	16:10	293,2	11	97	20
05/12/2018	16:49	293,8	5	90	
08/12/2018	21:16	370,3	11	97	40
08/12/2018	22:21	371,3	5	90	
09/12/2018	00:17	373,3	11	97	40
09/12/2018	01:21	374,3	5	90	
04/01/2019	16:52	1013,9	11	97	40
04/01/2019	18:04	1015,1	5	90	
04/01/2019	19:52	1016,9	11	97	40
04/01/2019	21:04	1018,1	5	90	
08/02/2019	15:22	1852,4	20	50	
20/03/2019	10:00	2807,0			

### 3.1.2 Veggfelt og sensorplassering

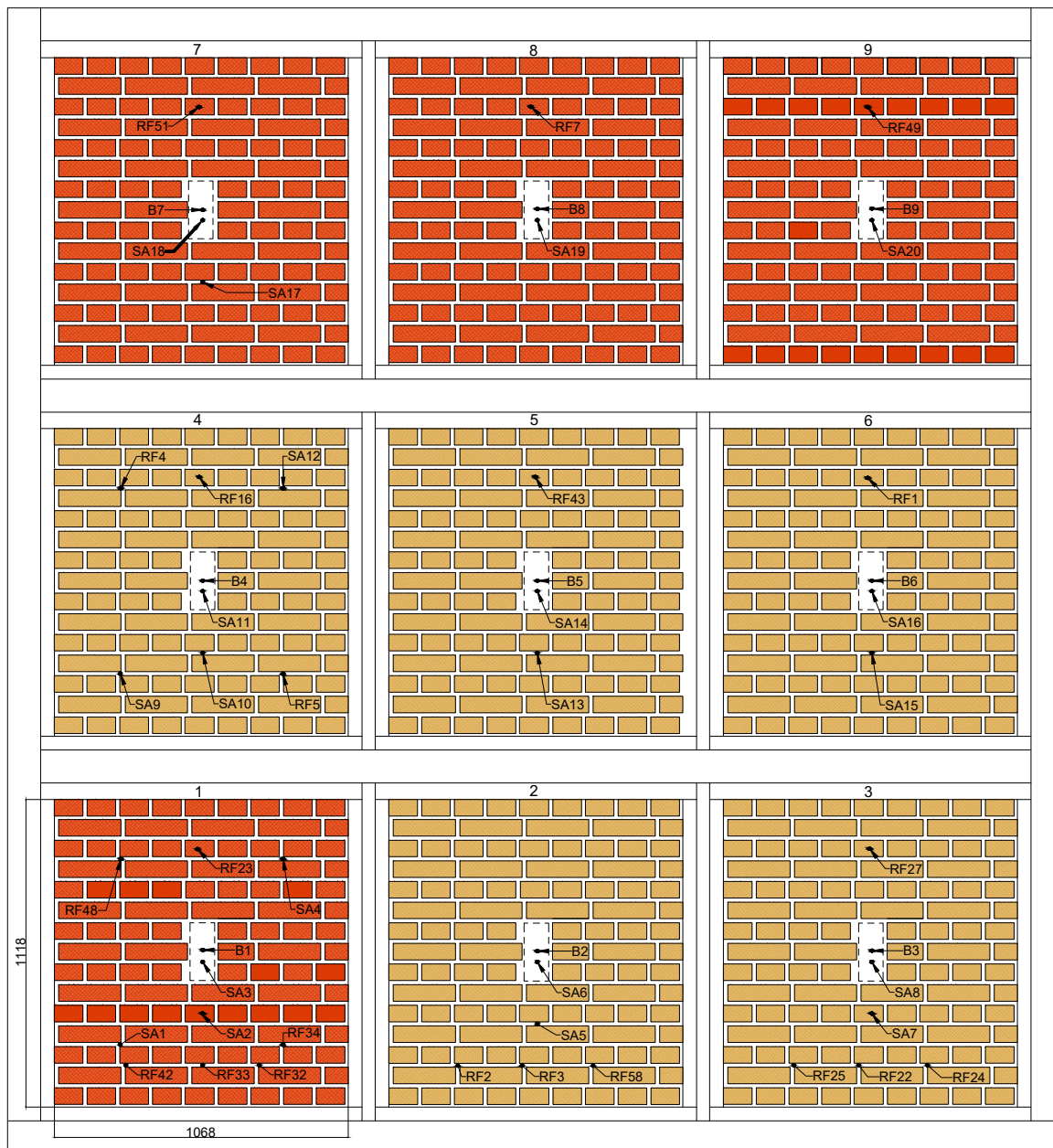
De ni veggfeltene er bygget opp med ulike kombinasjoner av teglstein, tykkelse og isolasjon. Det er i tillegg montert en del sensorer i veggfeltene og totalt er det anvendt tre typer sensorer. Det er montert 21 temperatur- og relativ fuktighet sensorer. De er av typen EE60\_FT1A1. Sensorene måler den relative fuktigheten mellom 0-100%. Nøyaktigheten til sensoren er  $\pm 3\%$  ved RF 10-90% og  $\pm 5\%$  ved RF < 10% og RF >90%. Det er også montert 20 Sahlén-sensorer som måler den elektriske motstanden i en trebit av bjørk inne i sensoren. Den elektriske motstanden endrer seg med fuktinnholdet i trebiten, slik at fuktinnhold i vekt-% kan leses av sensoren. Sahlén sensorene måler fuktinnholdet i trebiten tilsvarende en relativ fuktighet mellom 60-100%. Til sist er det montert 9 fuktsensorer som måler den elektriske motstanden ytterst på hver av bjelkeendene.

Sensorene er murt inn i mørtelfugene og på innsiden av murverket bak isolasjonen. Fuktsensorene i bjelkeendene er skudd inn i treverket, Figur 12 viser hvordan sensorene er montert i bjelkeendene. Figur 13 viser hvordan de ulike veggfeltene er bygd opp og plasseringen av sensorene. Figur 14 viser plasseringen av sensorene horisontalt. Relativ fuktighet og temperatursensorene merkes med «RF» foran nummerering, Sahlén sensorene blir merket med «SA» og fuktsensorene i bjelkeendene merkes med «B»





Figur 13: viser oppbygningen av de ni veggfeltene og plasseringen til veggfeltene i testvegen. Figuren viser også sensorplassering av de ulike sensorene. Temperatur- og RF sensorene er merket som «RF», Sahlén sensorene med «SA» og fuktmålerne i bjelkeenden med «B». Alle de isolerte veggfeltene har også en gipsplate montert på innsiden av dampsperrer og det er 10 mm klaring mellom bjelkeenden og det bakenforliggende murverket. .



Figur 14: viser sensorplasseringene i de ni veggfeltene. Veggfelt 1 er nede i hjørnet til venstre og veggfelt 9 er øverst i høyre hjørne. Temperatur- og RF-sensorene er merket med "RF", Sahlén sensorene er merket med "SA" og fuktmålerne i bjelkeenden er merket med «B» foran tallet til sensoren. Bjelkeenden er illustrert med stiple linje.

### 3.1.3 Materialer

Materialene brukt i forsøket er blitt kartlagt og videre følger en beskrivelse av de meste relevante egenskapene til de anvendte materialene. En større oversikt over materialegenskaper finnes som vedlegg. Materialeegenskapene er funnet gjennom produktdatablader, laboratorietester eller tidligere studier hvor materialene er testet.



Figur 15: Rustika rød og Glatt oker lys fra Bratsberg Teglverk.

Teglsteinene som er brukt er Rustika rød med fargespill og Glatt oker lys, begge fra Bratsberg Teglverk. Begge teglsteinene er beregnet for hard klimabelastning, ifølge leverandøren, og har frostbestandighetsklasse F2. Rustika rød har høyere densitet enn Glatt oker lys og også lavere vannabsorpsjon. Det er derfor antatt at en vil observere et høyere fuktnivå i veggfeltene med den gule teglsteinen. De fleste materialegenskapene i Tabell 2 er testet i forbindelse med denne oppgaven og doktorgrad arbeidet masteroppgaven gjøres i forbindelse med. Når det gjelder Glatt Oker er testene utført med en tilsvarende teglstein. Fullstendig oversikt over materialegenskaper ligger i Vedlegg C.

Tabell 2: Materialeegenskaper til teglsteinene

	Rustika rød	Glatt Oker lys
Mål [mm]	226x104x60	226x104x60
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	2116	1705
Varmekonduktivitet, $\lambda$ [W/mK]	0,69 <sup>[1]</sup>	0,51 <sup>[1]</sup>
Diffusjonsmotstandsfaktoren, $\mu$ [-]	9,688 <sup>[2]</sup>	9,871
Vannabsorpsjonskoeffisient, $A_w$ [kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> ]	0,0461	0,1877
Wsat [kg/m <sup>3</sup> ]	116,7	255,7

<sup>[1]</sup> Verdiene for termisk konduktivitet er hentet fra standard NS-EN 1745:2012 Murverk og murprodukter - Metoder for bestemmelse av termiske egenskaper (NS- EN:1745 2012) [2]

Beregnet ut fra vanddamppermeabiliteten  $\delta_p$  som er hentet fra Murkatalogen perm 1 ut fra densiteten til teglsteinen [27]

Mørtelen som er brukt er en kalk- sement mørtel, KC 50/50 fra Weber med mørtelklasse CS II iht. NS-EN 998-1. Mørtelen er en tørrmørtel som skal blandes med vann for å få en bruksferdig mørtel.

Tabell 3: Materialelegenskaper til mørtelen

Kalk-sement mørtel - KC 50 50	
Densitet (Glatt oker) [kg/m <sup>3</sup> ]	1788
Densitet (Rustika Rød) [kg/m <sup>3</sup> ]	1823
Varmekonduktivitet, $\lambda$ [W/mK]	0,82 <sup>[1]</sup>
Diffusjonsmotstandsfaktoren, $\mu$ [-]	49,645 <sup>[2]</sup>
Kapillær absorpsjonskoeffisient, A2	0,0297
W <sub>sat</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	258,8

<sup>[1]</sup>Hentet fra ytelseserklæringen [30]

<sup>[2]</sup>Beregnet ut fra vanndamppermeabiliteten til en tilsvarende mørtel

De tre isolasjonstypene som er brukt er mineralull, aerogel og isolasjonsplater av fenolskum. Isolasjonen er montert rett på murveggen etter at veggfeltene har vært gjennom en tørkeperiode. Mineralullen er levert av Glava og er montert på ett veggfelt i 50 mm tykkelse. Mineralull er laget av smeltet glass eller stein. Det kan perforeres og tilpasses på stedet uten å redusere isolasjonsevnen og er dermed et fleksibelt isolasjonsmateriale. Termisk konduktivitet for mineralullen brukt i forsøket er 0,035 W/mK. Mineralullen er svært dampåpen med en diffusjonsmotstandsfaktor  $\mu$  lik 1,226.

Aerogel er et fast skum som produseres ved å tørke et skum med silika ved en kritisk temperatur. Det har en svært lav termisk konduktivitet på mellom 0.013-0.024 W/(m K) som avhenger av densitet og porøsitet. Spaceloft® aerogel som er brukt i forsøket oppgir en termisk konduktivitet på 0,014 W/(m K). Det er også funnet gode lydisolerende egenskap i aerogelen, som kan gjøre den sammenlignbar med mineralullen. Aerogel kan også tilpasses på stedet, men har noen utfordringer knyttet til støvdannelse ved behandling av materialet. Aerogel er et dampåpent materiale med en diffusjonsmotstandsfaktor på 4,7. Aerogel er et relativt nytt materiale og det er behov for mer forskning og utvikling av materialet for å kunne garantere for bestandigheten som isolasjonsmateriale i bygg.

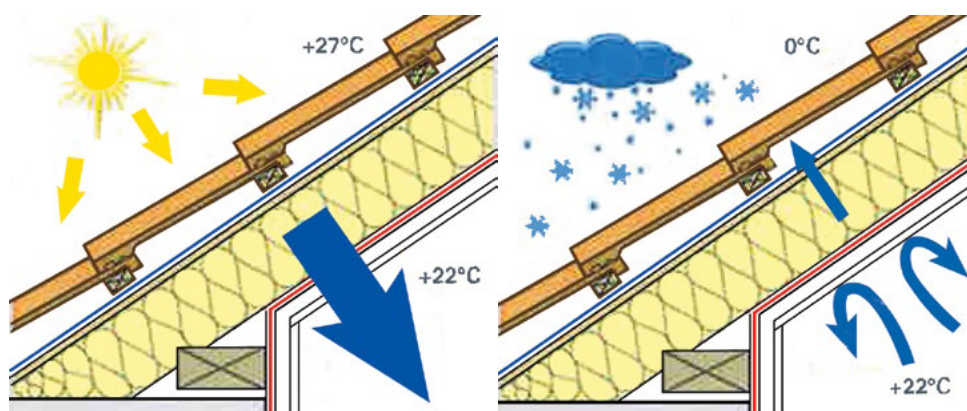
Kooltherm® leveres av Kingspan og er isolasjonsplater laget av stivt fenolskum med belegg på begge sider. Platene leveres i flere tykkelser og kan beskjæres og tilpasses på stedet. Den termiske konduktiviteten ligger mellom aerogel og mineralull på 0,021 W/(m K). Det er i dette forsøket brukt plater med tykkelse 50 mm. Diffusjonsfaktoren  $\mu$  er lik 38 og er dermed en del høyere enn for mineralull og aerogel, men kan fortsatt defineres som dampåpen.

Tabell 4 er en oversikt over den termiske konduktiviteten og dampmotstanden til de tre isolasjonsmaterialene.

Isolasjonsmateriale	Mineralull	Spaceloft aerogel	Kingspan Kooltherm®
Termisk konduktivitet [W/mK]	0,035	0,014	0,021
Diffusjonsmotstandsfaktoren, $\mu$ [-]	1,226	4,7	38

Tabell 4: Materialeegenskaper til isolasjonsmaterialene

Det er som nevnt montert en smart dampsperre på nesten samtlige veggfelt som er innvendig isolert, unntaket er veggfelt 8. Det er ønskelig ved innvendig isolering å opprettholde muligheten for tørking mot den varme siden av konstruksjonen. Med en tradisjonell dampsperre vil ikke fukt i veggen kunne tørke mot innsiden og sannsynligheten for fuktskader i veggkonstruksjonen øker. Det er derfor valgt å teste ut bruken av en smart dampsperre i dette forsøket. Dampsperran som er brukt kommer fra Isola og er av typen Airguard® Smart. Dampsperran varierer dampmotstanden etter omgivende relativ fuktighet. Når konstruksjonen er tørr og har lav relativ fuktighet er dampsperre damptett, men når konstruksjonen er våt og har høy relativ fuktighet er dampsperran dampåpen.



Figur 16: Prinsippet for smart dampsperre. Når konstruksjonen er tørr vil dampsperran være damptett. Ved høy RF i konstruksjonen vil dampsperran tilpasse seg og bli mer dampåpen for tørke ut fukt via diffusjon. [47]

Den tekniske godkjenningen til Isola Airguard® Smart gir en oversikt over  $S_d$ -verdien til dampsperran ut fra den relative fuktigheten på hver av sidene til dampsperran [31]. Oversikten er gjengitt i Tabell 5.

Tabell 5:  $S_d$ -verdi til smart dampsperre

RF på side 1	RF på side 2	Midlere RF	Målt $S_d$ -verdi m
0	25	13	100
33	50	42	48
0	75	43	14
11	76	43	12
33	76	54	8
25	75	63	1,4
12	94	53	0,36
50	94	72	0,18
95	100	98	0,03

### 3.1.4 Målemetode

#### Elektrisk motstand og fuktinnhold

Det er i forsøket montert tre ulike sensorer som måler temperatur og fukt i veggen. Det er montert 21 temperatur- og relativ fuktighet-sensorer (RF), 20 Sahlén-sensorer som måler motstanden i bjørketreet inne i sensoren (SA) og 9 sensorer som er montert i enden av den innfelte bjelkeenden (B). RF-sensorene måler det relative fuktighetsnivået ved sensorens plassering direkte og trenger derfor ikke omgjøres før de kan analyseres. Sahlén sensorene og sensorene montert i bjelkeenden anvender elektriske motstanden i treverket til å måle fuktinnholdet i treverket. Forholdet mellom elektrisk motstand og fuktinnhold er gitt av følgende regresjonsmodell anvendt av Samuelsson [32]:

$$\text{Log}(\text{Log}(R) + 1) = Au + B$$

Hvor  $R$  er den elektriske motstanden og  $u$  er fuktinnholdet i vekt%.  $A$  og  $B$  er materialkonstanter for type treverk. Det er anvendt bjørk i Sahlén sensorene og bjelkeendene er av gran. Materialkonstantene for bjørk og gran er hentet fra et EU-prosjekt utført av VTT Building Technology [33] hvor påliteligheten og nøyaktigheten til håndholdte fuktmålere ble testet ved bruk av den samme regresjonsmodellen som Samuelsson [32] anvendte. Verdiene for  $A$  og  $B$  er hentet fra tabell 5 i rapporten, hvor verdiene for nordisk bjørk og norsk gran er valgt.

#### Temperaturkorrigering

Den elektriske motstanden i treverk minker når temperaturen øker. Regresjonsmodellen til Samuelsson tar utgangspunkt i en temperatur på 20 °C. Det er derfor nødvendig å temperaturkorrigere det beregnede fuktinnholdet med hensyn på målt temperatur i treverket. For å utføre denne korrigeringen er det brukt temperaturkorrigeringen fra Samuelsson sin rapport [32]:

$$u_1 = \frac{u_0 + 0,567 - [0,026 \times (t + 2,8)] + [0,000051 \times (t + 2,8)^2]}{0,881 \times 1,0056^{t+2,8}}$$

Hvor  $u_1$  er temperaturkorrigert fuktinnhold,  $u_0$  er fuktinnholdet som ikke er korrigert for temperatur og  $t$  er målt temperatur ved sensoren i celsius. Målt temperatur ved sensorene er oppgitt som den elektriske motstanden målt av en termostat. Konvertering av den elektriske motstandsmålingen til termodynamisk temperatur gjøres gjennom Steinhart-Hart approksimasjon [34]. Steinhart-Hart likningen er funnet til å være den beste approksimasjonen for omgjøring av temperatur fra elektrisk motstand [35].

Steinhart-Hart likningen inneholder tre parametere som må bestemmes empirisk gjennom en bestemt prosedyre som i seg selv ikke har noen fysisk betydning.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C \ln^3 R$$

Hvor A,B,C er de tre empiriske parameterne. Den elektriske motstanden R er gitt i Ohm og T er temperaturen i kelvin.

For å finne A,B og C må først temperaturen måles ved tre forskjellige temperaturer. Temperaturene burde være minst 10 grader fra hverandre og ha samme differanse mellom seg. Videre brukes følgende uttrykk til å finne A,B og C:

$$\frac{1}{T_1} = A + B \ln R_1 + C \ln^3 R_1, \quad \frac{1}{T_2} = A + B \ln R_2 + C \ln^3 R_2, \quad \frac{1}{T_3} = A + B \ln R_3 + C \ln^3 R_3$$

Forenkler uttrykkene:

$$L_1 = \ln(R_1), \quad L_2 = \ln(R_2), \quad L_3 = \ln(R_3)$$

$$Y_1 = \frac{1}{T_1}, \quad Y_2 = \frac{1}{T_2}, \quad Y_3 = \frac{1}{T_3}, \quad \Rightarrow \quad \gamma_2 = \frac{Y_2 - Y_1}{L_2 - L_1} \quad \gamma_3 = \frac{Y_3 - Y_1}{L_3 - L_1}$$

Løser likningene for A, B og C:

$$C = \left( \frac{\gamma_3 - \gamma_2}{L_3 - L_2} \right) \cdot (L_1 + L_2 + L_3)^{-1}, \quad B = \gamma_2 - C(L_1^2 + L_1 L_2 + L_2^2)$$

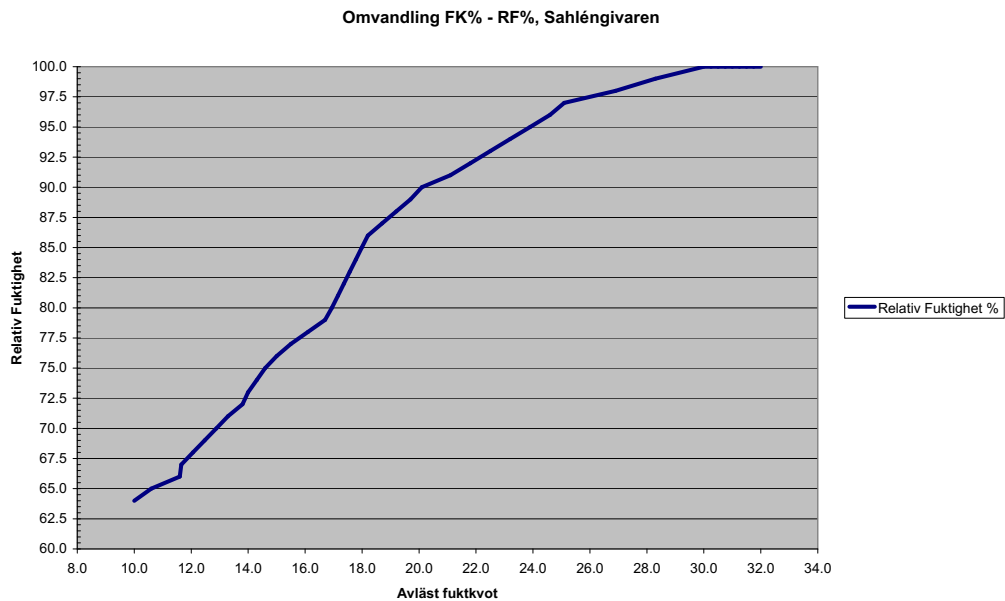
$$A = Y_1 - L_1(B + C L_1^2)$$

Tidspunkter og tidssteg for avlesninger av elektrisk motstand for temperatur-og fuktmålingene samsvarte ikke fullstendig. Temperaturen til temperaturkorrigeringen ble derfor valgt etter nærmeste tilgjengelig tidspunkt for å få til en så pålitelig korrigerings som mulig.



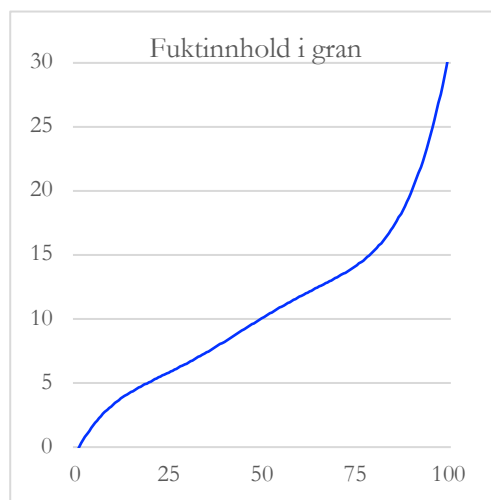
## Fuktinnhold og relativ fuktighet

For å kunne sammenligne Sahlén sensorene og RF-sensorene er det nødvendig å få konvertert fuktinnholdet i treverket til relativ fuktighet. Forholdet mellom fuktinnhold i vekt-% avhenger av treslag og er basert på empiriske data. Forholdet mellom fuktinnholdet trebiten av bjørk i Sahlén sensoren og relativ fuktighet er beskrevet av produsenten til sensoren gjennom grafen i Figur 17. Grunnet manglende data og nøyaktighet i denne konverteringen er det valgt å beholde målingene fra Sahlén sensorene i enheten fuktinnhold [vekt-%], men ved henvisning til denne grafen for sammenligningsgrunnlag mellom de ulike sensorene og simuleringsresultatene.



Figur 17: Forholdet mellom fuktinnhold i bjørk og relativ fuktighet. Grafen er hentet fra produsenten av Sahlén sensoren

Ved konvertering av fuktinnholdet i bjelkeendene til relativ fuktighet er det valgt å bruke forholdet mellom fuktinnholdet i gran og relativ fuktighet presentert i [21]. Grafen i håndbok 50 er rekonstruert gjennom «Graph tracing» [36].



Figur 18: Forholdet mellom fuktinnhold i gran i vekt-% og relativ fuktighet [21]

## 3.2 Resultater og analyse

I dette kapitlet vil det presenteres et representativt utvalg av registrert data fra sensorene gjennom klimasekvensen. Fullstendig oversikt over dataen fra forsøket vil være tilgjengelig som i vedlegg A. Full oversikt over plassering av sensorer i veggfeltene er finnes i kapittel 3.1.2.

Ved valg av type oppbygningen av veggfeltene ble det vektlagt muligheten for sammenligning. Det er derfor lagt opp slik at to eller flere av veggfeltene kan sammenlignes gjennom at en eller to parametere varierer. Denne resultatdelen vil derfor blir lagt opp slik at de ulike veggfeltene som er sammenlignbare blir gruppert og resultatene presentert i de disse gruppene.

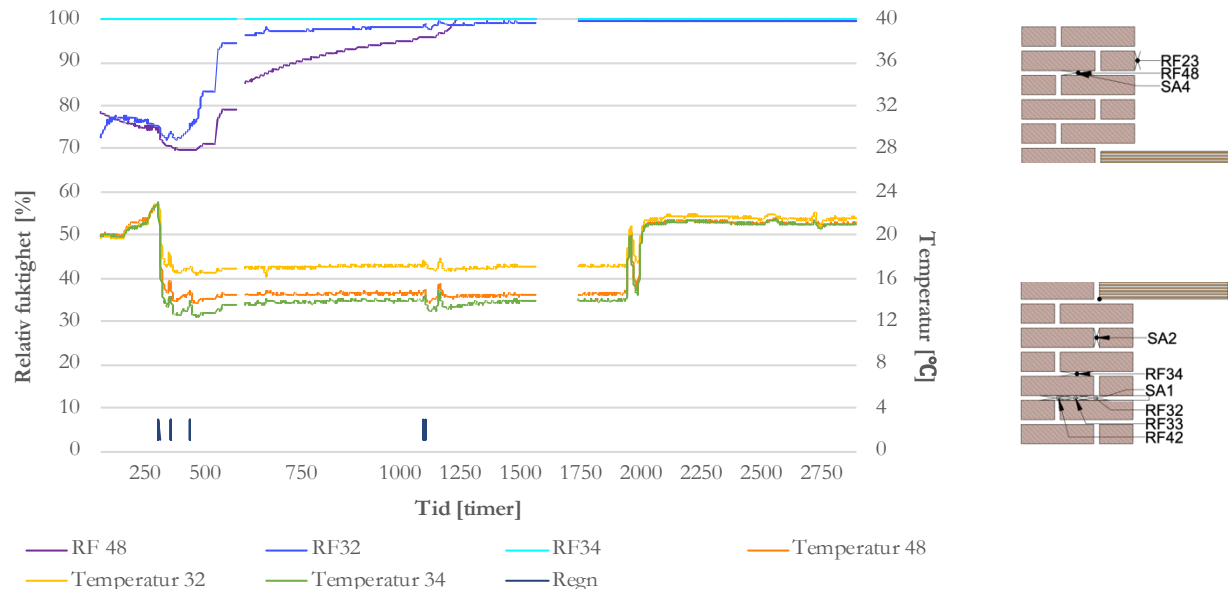
På grunn av operasjonsfeil med loggerne som er koblet til sensorene er det gjennom klimasekvensen logget med ulike tidssteg. Dette varierer fra hvert 5. minutt til annenhver time. Konsekvensen av dette er at det i begynnelsen av klimasekvenser er en del flere datapunkter enn mot slutten av perioden. Dette gjør igjen at tidsstegene på horisontalaksen i grafene i dette kapitlet ikke er jevnt fordelt. Dette vises ved at det er lengre avstand mellom 250 timer og 500 timer enn det er mellom 1250 timer og 1500 timer. Det er også en del manglende data gjennom klimasekvensen grunnet funksjonsfeil med loggeren. Dette gjelder spesielt Sahlén sensorene, men det er også perioder med manglende data hos temperatur- og RF sensorene. Disse periodene er markert på grafene som blanke partier.

Temperatur- og RF sensorene logger relativ fuktighet mellom 0-100% For Sahlén sensorene registrerer som nevnt fuktinnhold i vekt% av tørr bjørk tilsvarende relativ fuktighet mellom 60-100% RF. For å forenkle sammenligningen mellom de ulike sensorene er det valgt å gjøre om fuktinnholdet til relativ fuktighet ved bruk av Figur 17, i teksten. Grafene i resultatdelen er derimot valgt å beholde som fuktinnhold for å unngå tap av korrekt data. Figuren viser at fuktinnhold lik 29,7 tilsvarer 100 % relativ fuktighet.

Ved begynnelsen av klimasekvensen har testveggen vært gjennom en tørkeprosess slik at veggfeltene har et lavt fuktnivå. Sensorene begynner å logge 242 timer før kaldt klima blir innstilt. Gjennom resultatdelen vil det refereres til antall timer det tar før ulike nivåer av relativ fuktighet oppnås, dette er da telt fra kaldt klima er innstilt, så time 0 = time 242 i horisontalaksen. Det relative fuktighetsnivået i veggfeltene ved start varierer noe. De 1-steins tykke veggfeltene starter med en RF mellom 13-20%. Veggfelt 1 og 3 som er 1 ½- steins tykke veggene starter med en høyere relativ fuktighet. Temperatur- og RF sensorene i veggfelt 3 viser en relativ fuktighet på mellom 30-65%. Veggfelt 1 derimot, har ikke tørket tilstrekkelig siden forrige klimapåkjenning. Temperatur- og RF sensorene viser en relativ fuktighet mellom 72-100% RF. Kombinert med at isolasjon og dampspærre ble fjernet siden sist klimapåkjenning i simulatoren, vil det være begrenset med utbytte av dataen som blir logget i veggfelt 1.

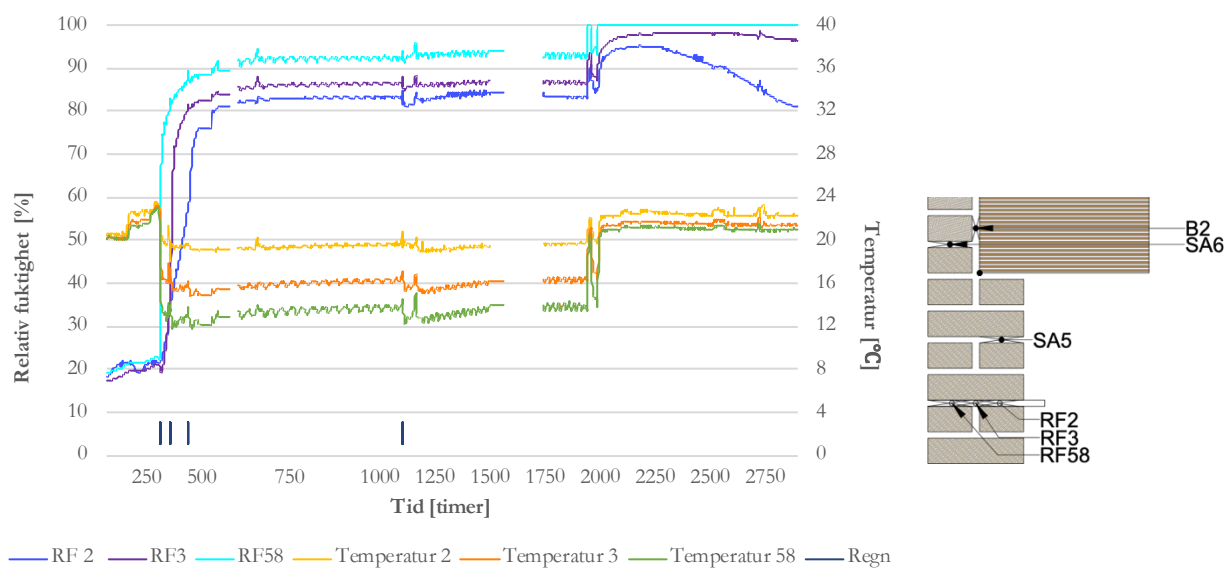
### 3.2.1 Veggfelt 1, 2, 3

De tre nederste veggfeltene er referanseveggfelt uten isolasjon og med oker teglstein, samt de to tykke veggfeltene med 1 ½ -steins tykkelse.



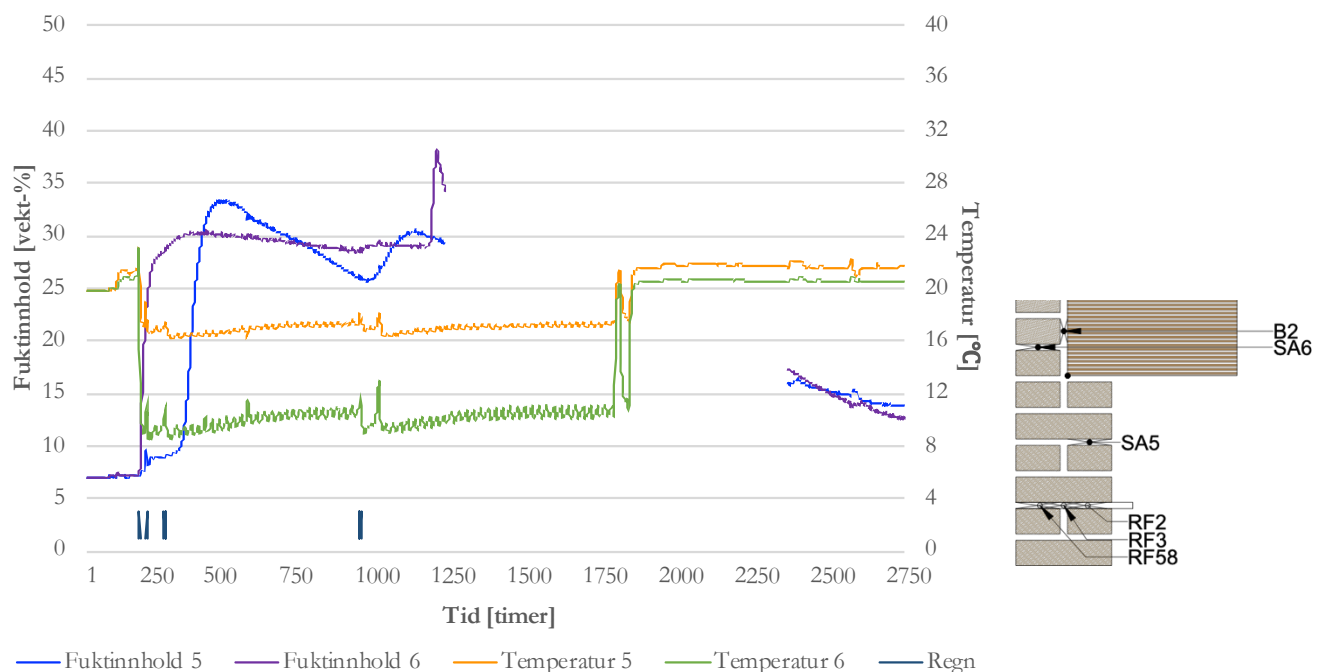
Figur 19: Temperatur- og RF-sensorene i veggfelt 1. På grunn av operasjonsfeil i laboratoriet har sensorene logget i ulike tidssteg gjennom klimasekvensen. Det er derfor flere datapunkter i begynnelsen av klimasekvensen. Dette gjør at det ikke er lik avstand mellom timene på horisontalaksen

Veggfelt 1 er 1 ½-steins tykk og murt med rød teglstein med lavt sug. Testveggen har i forbindelse med tidligere forsøk i klimasimulatoren blitt utsatt for slagregn og veggfelt 1 har i motsetning til de andre veggfeltene ikke tørket tilstrekkelig ut før oppstarten av dette forsøket. Det er derfor registrert et relativt fuktighetsnivå på mellom 72-100% hos temperatur- og RF-sensorene og Sahlén sensorene i dette veggfeltet ved begynnelsen av klimasekvensen. På bakgrunn av dette er det besluttet å ikke montere isolasjon på veggfeltet. Figur 19 viser et utvalg av temperatur- og RF sensorene i veggfeltet. Det er her tydelig at det er mye fukt i veggen fra start til slutt. På grunn av det høye fuktivået fra start og manglende isolasjon anses det ikke som relevant å anvende resultatene fra sensorene i veggfelt 1 i en videre analyse.



Figur 20: viser temperatur- og RF-sensorene i veggfelt 2. Veggfelt 2 er referansetilfellet i forsøket. Alle tre sensorene er plassert i rør i den nedre delen av veggfeltet.

Veggfelt 2 er 1-stein tykk og murt ved oker teglstein med høyt sug. Det er heller ikke på denne montert isolasjon på innsiden av murverket. Veggfeltet skal fungere som et referansetilfelle til de resterende veggfeltene. Veggfeltet har tre temperatur- og RF-sensorer montert i rør bortover veggfeltet ved ulike dybder. RF 2 nærmest varm side får økt relativt fuktighetsnivå etter at kaldt klima er innstilt, men noe saktere enn de andre to sensorene. Den relative fuktigheten stiger opp til 82-84% etter de første 6 slagregnpåkjenningene. Videre på de andre temperatur- og RF-sensorene ser vi at den relative fuktigheten i veggfeltet er økende med avstanden til varm side. RF3 og RF58 viser også lite eller ingen uttørking gjennom tørkeperioden. Ved overgangen til tørkeperioden mot slutten av klimasekvensen øker den relative fuktigheten hos sensorene betraktelig til tross for økt temperatur. Dette kan være grunnet en ventil som ble slitt ut grunnet for mange reguleringer i overgangen mellom kaldt klima og tørkeperioden. Ventilen økte den relative fuktigheten på varm side kraftig i en kort periode. I tørkeperioden ble temperaturen på utvendig side satt opp til 20°C. Temperaturendringen er tydelig hos alle tre sensorene som holder en temperatur nært 20°C til slutten av perioden. Uten isolasjon skulle en kunne forventet bedre uttørking, men det kan tyde på at fuktigheten tilført av funksjonsfeilen til ventilen på varm side og flytende vann i murverket fra slagregnpåkjenningene var såpass betydelig at uttørking av selv referanseveggen vil ta lengre tid enn perioden varer.



Figur 21: viser Sahlén sensorene i veggfelt 2. Sensorene er plassert i horisontalfuger. SA5 er plassert 52 mm fra innvendig side på nedre del av veggen. SA6 er plassert 52 mm fra utvendig side i midten av veggfeltet. Veggfelt 2 er referansetilfellet i forsøket.

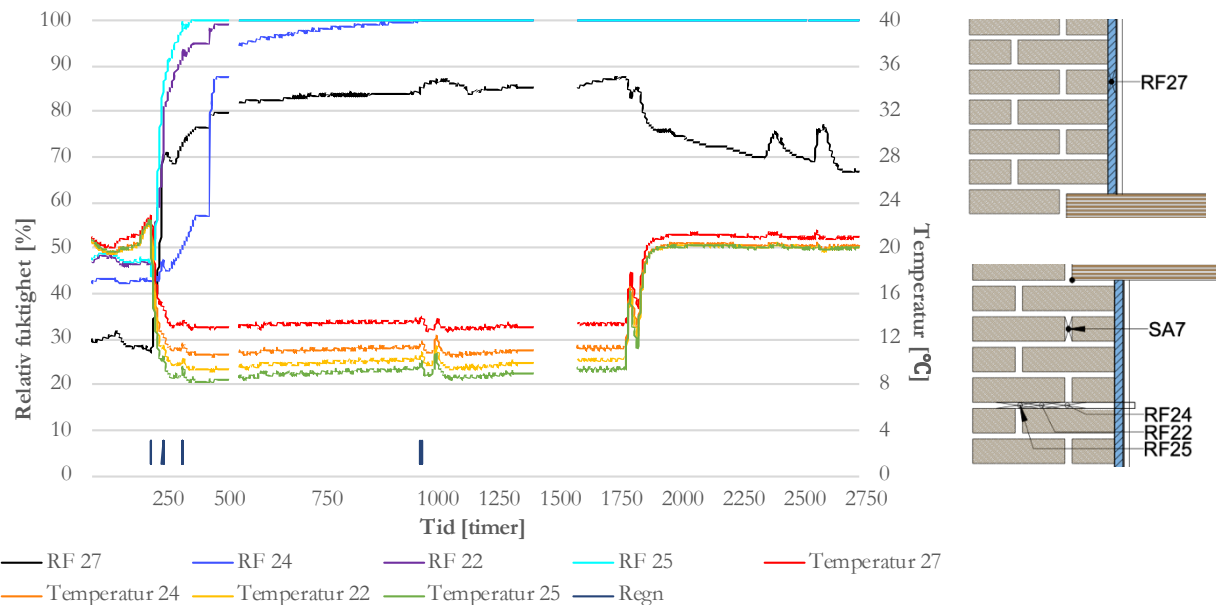
Sahlén sensorene SA5 og SA6, plassert i horisontale mørtelfuger i veggfelt 2, registrerer et fuktinnhold tilsvarende 100% relativ fuktighet etter innstilt kaldt klima. SA6 raskere enn SA5 som er plassert nærmere varm side. Hva som skylder den plutselige endringen i fuktinnhold etter 1150 timer ved SA6 kan ikke forklares ut fra klimasekvensen, da det forekommer en god stund etter siste regnpåkjønning. En mulig forklaring er tilførsel av vann gjennom en sprekk. Det mangler data i overgangen mellom kaldt klima og tørkeperioden, så forløpet til fuktinnholdet er usikkert, men fuktinnholdet i SA5 og SA6 på slutten av tørkeperioden tilsvarer en relativ fuktighet lik hhv 70% og 65 %. Dette er en tydelig lavere relativ fuktighet enn temperatur- og RF-sensorene i samme veggfelt viser på samme tidspunkt. Dette kan skyldes effekten av gravitasjon ettersom temperatur- og RF-sensorene er plassert lenger ned på veggfeltet eller så kan det være en effekt av plasseringen i rør som temperatur- og RF sensorene ligger i, men dette er usikkert. Temperaturen i SA5 er i gjennomsnitt 2,5 grader lavere enn RF2, som ligger i samme dybde i veggen. Denne differansen styrker mistanken om at plasseringen i rør har betydning for avlest data.



Figur 22: viser fuktinnholdet i bjelkeenden i veggfelt 2. 16,2 vekt-% tilsvarer en RF= 80% og 32 vekt-% tilsvarer RF =100%

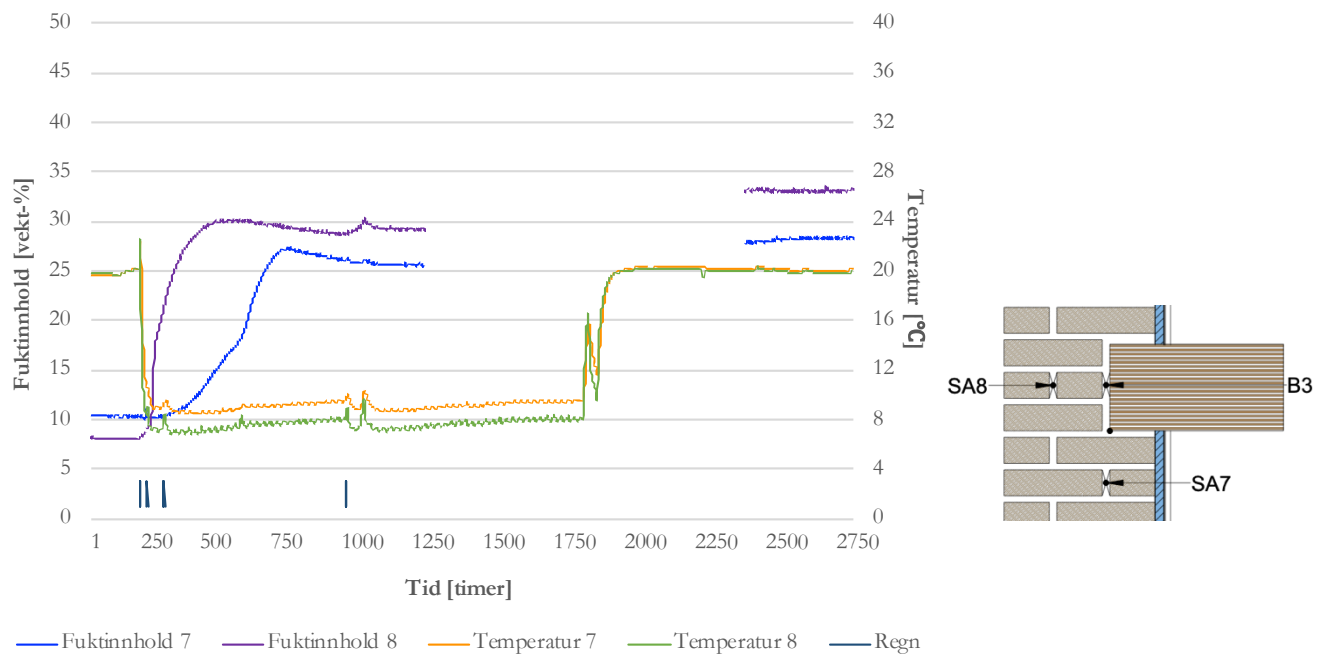
Fuktmåleren i bjelkeenden i veggfelt 2 viser også en tydelig reduksjon i fuktinnhold i løpet av tørkeperioden. Fuktmåleren i bjelken måler på det høyeste et fuktinnhold tilsvarende 90% RF og kommer under 80% RF 250 timer etter at tørkeperioden har begynt. Både fuktmålerne og Sahlén sensorene har i de fleste målingene en mer gradvis økning i fuktinnhold enn temperatur- og RF-sensorene. Dette kan skyldes at fuktmålerne i bjelken og Sahlén sensorene bruker lenger tid på å registrere økt RF fordi treverket rundt sensoren må absorbere fukten før sensoren får registrert fukt [37].

Veggfelt 3 er 1 ½ steins tykk og har 20 mm med aerogel isolasjon. Det er montert en RF-sensor på innsiden av murverket og 3 stykk i rør i ulike dybder, som i veggfelt 2. I likhet med veggfelt 1 er det ved begynnelsen av klimasekvensen målt høyere relativ fuktighet, mellom 30-65%, i sensorene i veggfeltet ved starten av perioden.



Figur 23: viser temperatur- og RF-sensorer i veggfelt 3. De tre sensorene er plassert i rør på den nedre delen av veggfeltet. Sensor RF25 ligger ytterst i vegg omtrent 100 mm fra utvendig side, og RF24 ligger nærmest innvendig side ca. 100 mm fra innv

I veggfelt 3 registrerer RF sensorene i rør relativ fuktighet  $\approx 100\%$  etter at kaldt klima er innstilt. Det tar som forventet lengst tid for sensoren nærmest varm side å oppnå  $RF \approx 100\%$ . Disse tre sensorene viser heller ingen nedgang i relativt fuktighetsnivå gjennom tørkeperioden. Dette samsvarer med sensorene som ligger i rør i veggfelt 2. På innsiden av murverket er RF27 plassert. Den måler en betydelig lavere relativ fuktighet og en høyere temperatur en RF-sensorene i rør. Temperaturdifferansen er forventet med tanke på mengden isolasjon veggfeltet har, men den store differansen mellom RF2 og RF27 kan igjen være en effekt av plasseringen i rør.



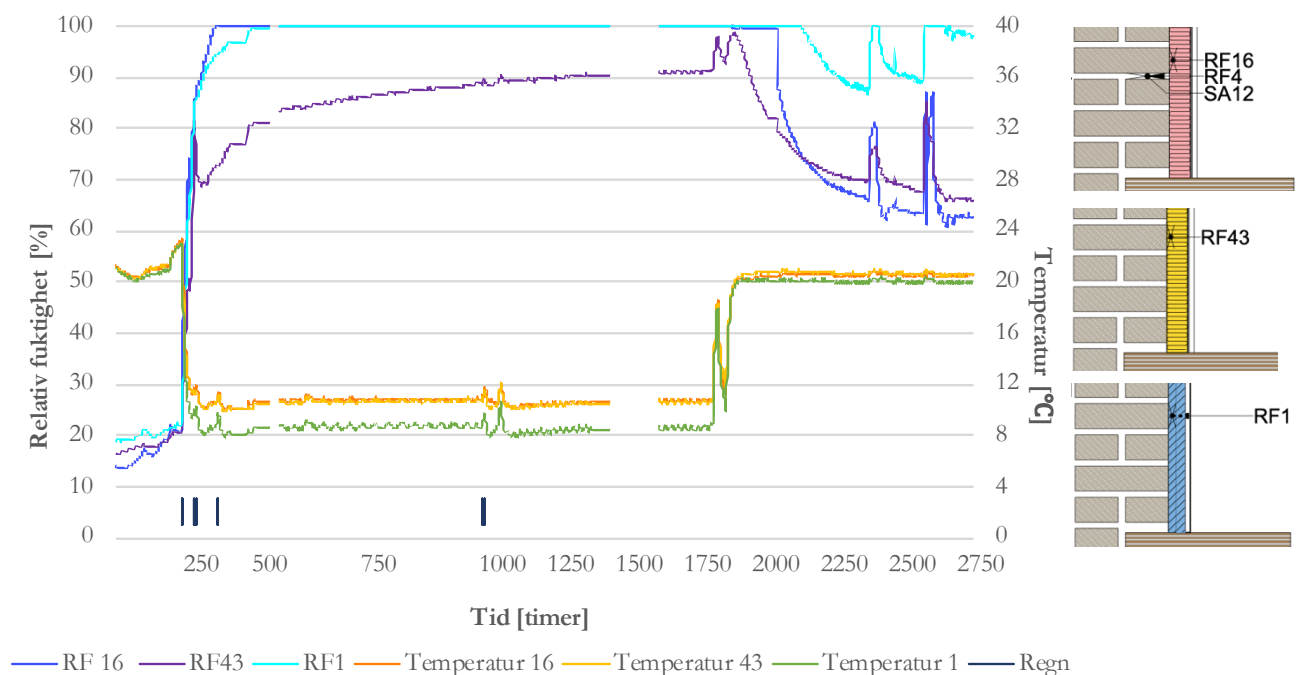
Figur 24: viser Sahlén sensorene i veggfelt 3. SA8 er plassert i en vertikalfuge utenfor trebjelkeenden i midten av veggfeltet. SA7 er plassert i en vertikalfuge i en steins avstand fra innvendig side i nedre del av veggfeltet.

I motsetning til veggfelt 2 er det samsvar mellom temperatur- og RF sensorene og Sahlén sensorene i veggfelt 3 ved slutten av perioden. Dette tyder på at mye av regnvannet er blitt tatt opp i veggen og at det derfor er et høyt fuktinnhold i hele veggen mot slutten av perioden. Sahlén sensorene i veggen er montert i vertikale fuger i to dybder. I likhet med Sahlén sensorene i veggfelt 1 og 2 så mangler det data mellom time 1180 og 2320. Likevel viser den tilgjengelige dataen at den relative fuktigheten overstiger 100%, stabiliserer seg der og viser ingen tegn til uttørring i tørkeperioden.



### 3.2.2 Veggfelt 4, 5 og 6

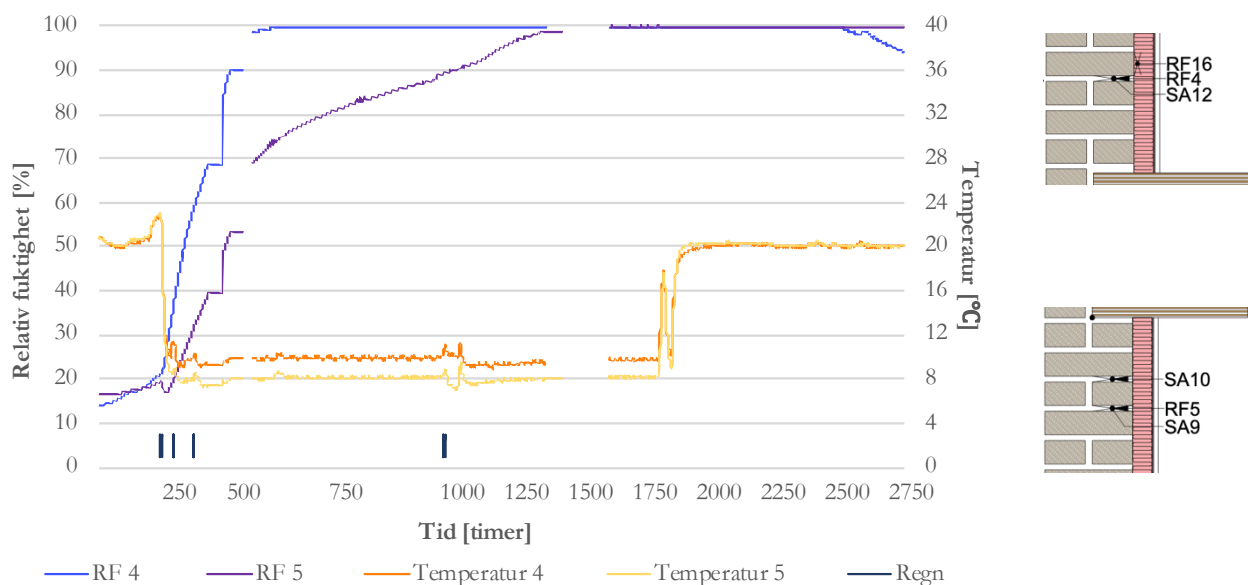
Veggfelt 4, 5 og 6 er murt med den gule teglsteinen med høyt sug. Det er montert smart dampsperre på alle tre felter og de har tre ulike isolasjonstyper. Det er plassert temperatur- og RF- sensorene på innsiden av murverket på samtlige av disse veggfeltene. Det er også montert to Sahlén sensorer på alle tre veggfeltene. Begge montert i en horisontalfuge, en 116 mm fra innvendig side og en 52 mm fra utvendig side. På veggfelt 4 er det i tillegg plassert to temperatur- og RF-sensorer i en horisontalfuge 116 mm fra innvendig side, en på den øvre delen av vegg og en på den nedre delen av veggen. Det er brukt 50 mm Kooltherm isolasjon på veggfelt 4, 50 mm mineralull på veggfelt 5 og 40 mm aerogel på veggfelt 6.



Figur 25: Temperatur- og RF sensorer på veggfelt 4, 5 og 6. Sensorene er plassert på innsiden av murverket. Sensor 16 på veggfelt 4, sensor 43 på veggfelt 5 og sensor 1 på veggfelt 6.

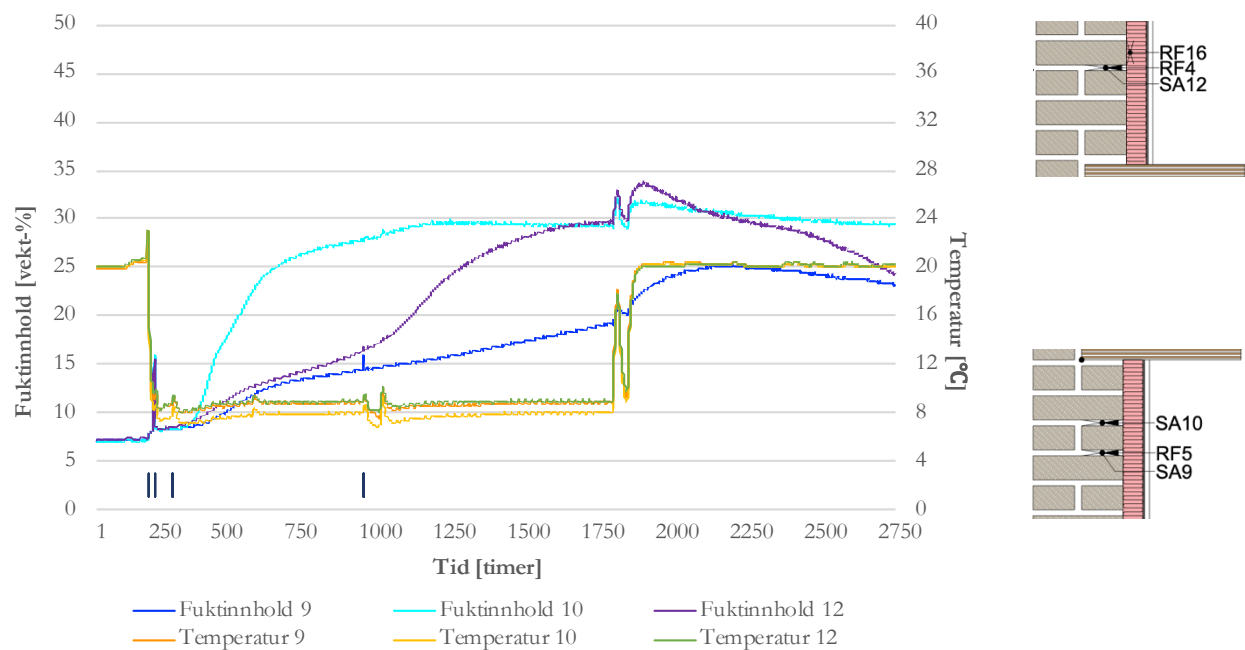
RF sensorene på innsiden av murverket registrerer at veggfelt 4 med Kooltherm oppnår 100 % relativ fuktighet etter 135 timer. Relative fuktighet ligger deretter på 100% gjennom hele perioden med kaldt klima og først ca. 200 timer inn i tørkeperioden registreres det relativ fuktighet under 100%. På slutten av måleperioden registreres det 62 % RF. Veggfeltet med mineralull, veggfelt 5, oppnår ikke 100 % relativ fuktighet, men øker gradvis gjennom perioden med kaldt klima og stabiliserer seg rundt 90 % før tørkeprosessen blir igangsatt. Deretter ser man en klar nedgang i relativ fuktighet. Veggfelt 6 med aerogel viser tilsvarende RF som veggfelt 4 gjennom den kalde perioden og fuktinnholdet virker å være for høyt til at det skjer en uttørring av betydning før klimasekvensen ender. En mulig forklaring på dette kan være at den smarte dampsperrer virker mot sin hensikt ved at den slipper inn fuktighet i konstruksjonen når det relative fuktighetsnivået på innvendig side øker drastisk grunnet den tidligere nevnte ødelagte ventilen. Den smarte dampsperrer får lav vanndampmotstand ved høy relativ fuktighet på minst én av side [31].

Det kan også skyldes sprekker som gjør at mer fukt trenger inn til denne sensoren og gjør at fuktmengden som må tørkes ut er større enn ved de andre sensorene. Det er lavere temperatur registrert i veggfeltet med aerogel enn de to andre veggfeltene på innsiden av murverket. Dette sammenfaller med mer isolasjon på dette veggfeltet og kan også forklare en høyere relativ fuktighet i den kalde perioden. Varmemotstanden til 40 mm aerogel er 20% høyere enn 50 mm Kooltherm og 100 % høyere enn 50 mm mineralull. En skulle derfor forvente en differanse også mellom veggfelt 4 og 5. En mulig forklaring kan være at den termiske konduktiviteten til Kooltherm er sensitiv til fukt og er høyere enn antatt ved høy relativ fuktighet.



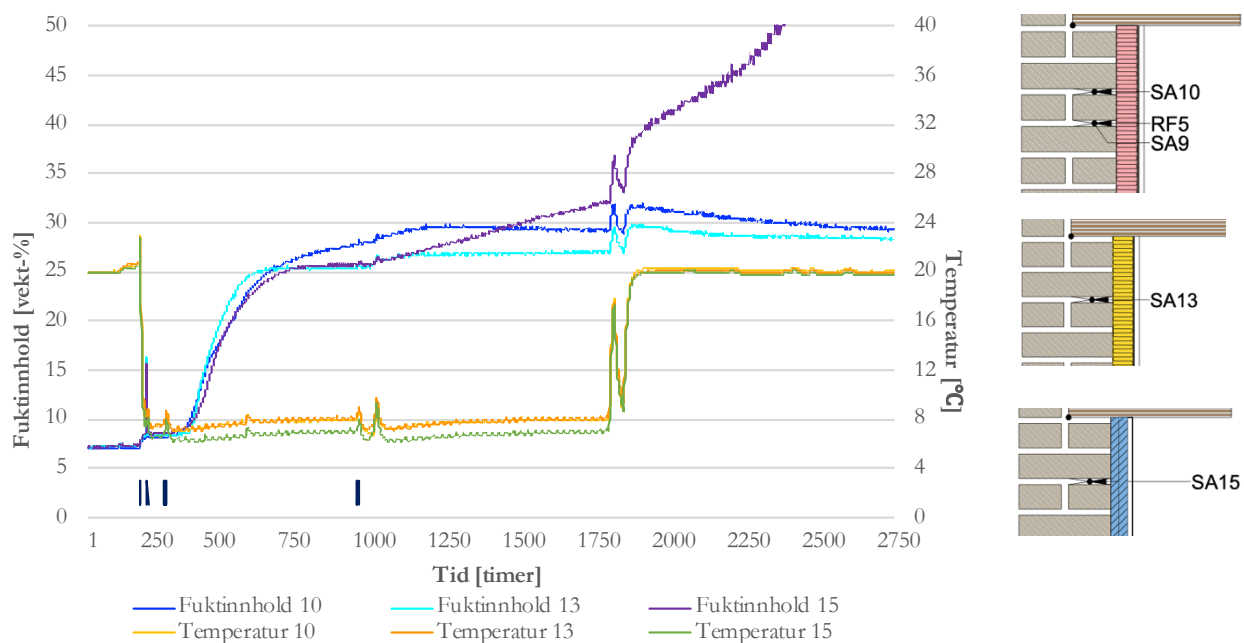
Figur 26: Temperatur- og RF sensorer i veggfelt 4. Sensor 4 og 5 er plassert i horisontalfuger nær var side. Sensor 4 sitter i den øvre delen av veggen og sensor 5 i den nedre delen.

Som nevnt er det to andre temperatur- og RF-sensorer i veggfelt 4, RF 4 og RF5. Det tar 450 timer før RF = 100% i sensor 4. Det er en noe slakere stigning enn RF16 på innsiden av murverket i samme veggfelt. En enda noe slakere oppgang ser vi hos sensor 5. Det tar også mye lenger tid før det relative fuktighetsnivået synker ved sensor 4 etter at tørkeperioden har begynt. Sensor 5 viser ikke tegn til uttørking i det hele tatt i tørkeperioden. Hva som er grunnen til de plutselige hoppene i RF hos sensor 4 og 5 i begynnelsen av perioden kan ikke forklares ut fra klimapåkjenningen. En mulig forklaring er funksjonsfeil hos sensorene.



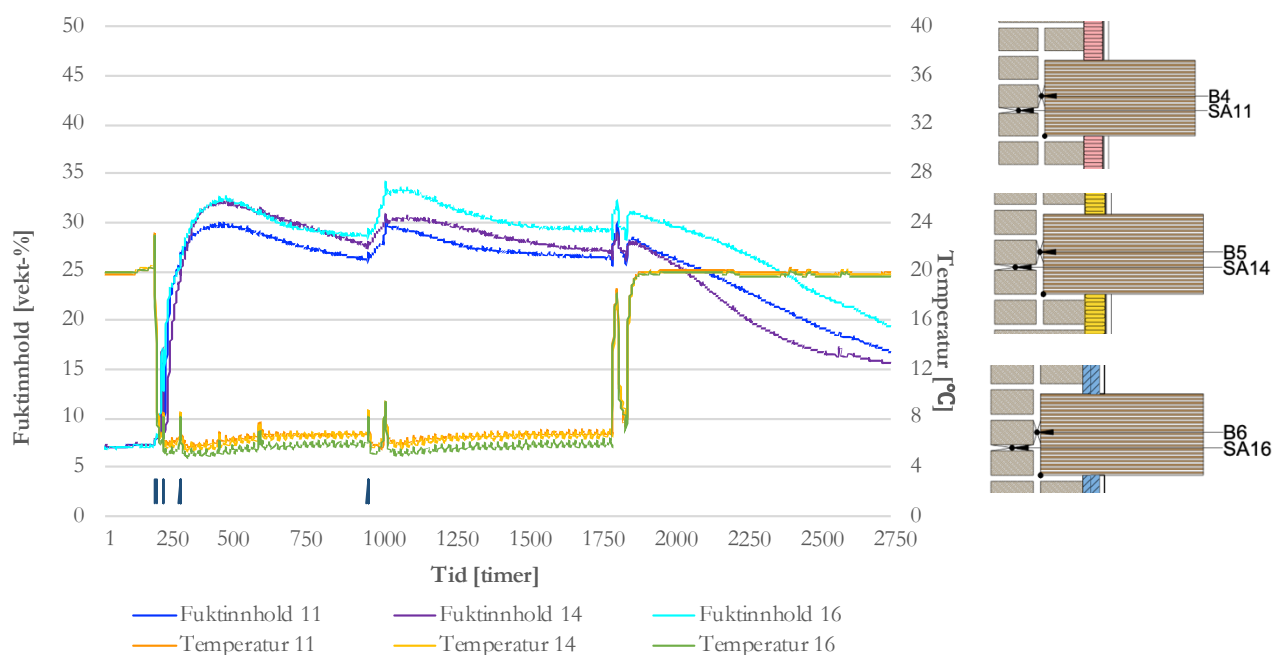
Figur 27: Viser Sahlén sensorene som er montert i veggfelt 4. Alle sensorene er plassert i horisontalfuger nært varm side av veggen. Sensor 9 og 10 er plassert på nedre del av veggen og sensor 12 på øvre del av veggen

SA10 som også er plassert i en horisontalfuge i nedre del av veggfelt 4 viser en tilsvarende slak økning i fuktinnhold, dog noe slakere enn RF4 og RF5. Den viser også liten nedgang i fuktinnhold i løpet av tørkeperioden. SA9 viser et mye lavere fuktnivå enn SA10 som har nesten samme plassering i veggen. Denne forskjellen kan indikere at det finnes betydelige lokale forskjeller i murverket. Dette kan skyldes fordelingen av sprekker og riss i murverket og eventuelt mureteknikk. Forskjellen i uttørkingsgrad mellom sensorene plassert lenger inn i murverket og sensorene som er plassert på innsiden av murverket kan tyde på det tørkes innover, som igjen kan være en indikasjon på at den smarte dampspærren tilpasser seg og åpner opp for diffusjon mot varm side.



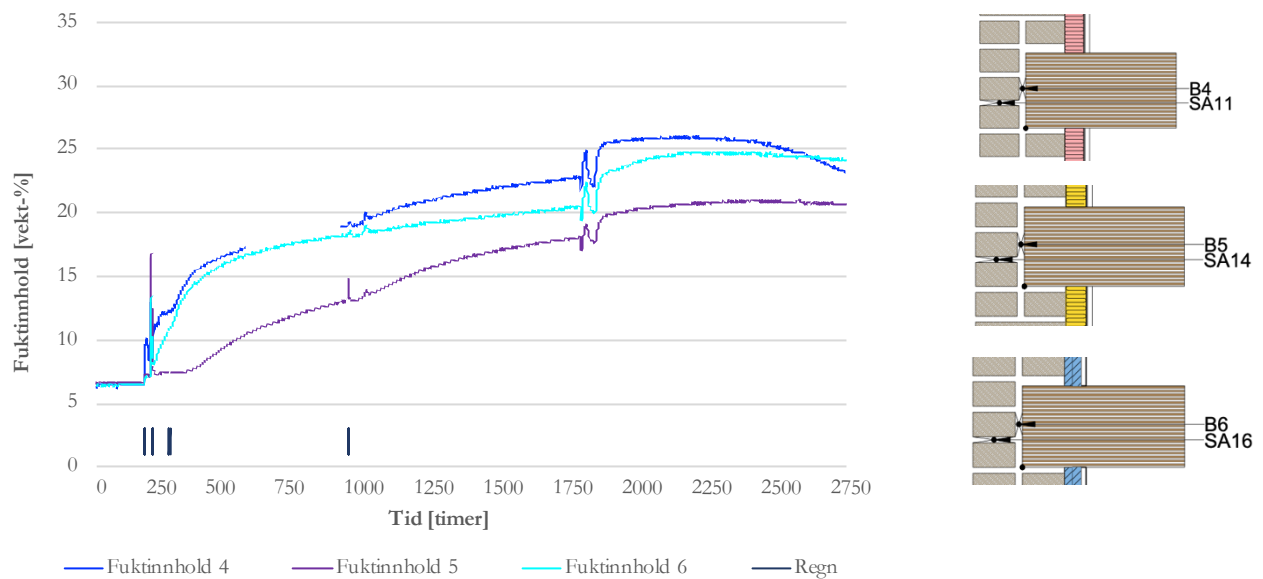
Figur 28: Sahlén sensorer plassert i en horisontalfuge nær varm side på nedre del av vegg. Sensor 10 er montert i veggfelt 4, sensor 13 i veggfelt 5 og sensor 15 i veggfelt 6

Figur 28 viser Sahlén sensorene som har samme plassering på de tre veggfeltene, i en horisontalfuge på nedre del av vegg. SA10, SA13 og SA15 har den samme brå økningen i fuktinnhold omtrent 250 timer etter innstilt kaldt klima. Alle tre måler samtidig også en økning av fuktinnhold etter den siste og lengste slagregnpåkjenningen. Ved sammenligning av målingene fra RF sensoren på innsiden av murverket i veggfeltet oppnås det høyere relativ fuktighet i den horisontale fugen. Det er registreres også lite reduksjon i fuktinnhold hos SA10 og 13 i løpet av tørkeperioden. Grafen til SA15 viser at fuktinnholdet fortsetter å stige etter at tørkeperioden har begynt og stabiliseres aldri. Fuktinnholdet overstiger 50 vekt-% og fortsetter utenfor akse til langt over 100 vekt-% fukt. Ved å sammenligne med Figur 17 ser vi at et slikt fuktinnhold passerer langt over hva som vil være tilsvarende 100% RF. Et slikt resultat antas å være en konsekvens av en ødelagt sensor eller tilsvarende funksjonsfeil. Denne like utviklingen hos alle tre sensorene i fuktinnhold kan tyde på at SA9 sin plassering mot sidekanten av veggfeltet har betydning for fuktinnholdet. I tidligere studier som har inkludert klimasimulatoren har det vært tegn til at slagregnpåkjenningen ikke er helt uniform [37]. Målingen fra SA9 kan støtte opp om denne teorien. Gravitasjon kan også spille inn eller variasjoner i murverket, grunnet utførelse, som gir ulik fuktransport.



Figur 29: Sahlén sensorene 11, 14, 16. Alle tre er plassert i en horisontalfuge nært kald side av veggen. Sensorene er plassert i hhv. veggfelt 4, 5 og 6

SA11 viser fuktinnhold som samsvarer godt med en plassering lengre ut mot kald side. Sensoren er plassert 52 mm fra kald side i en horisontalfuge, i likhet med SA14 og SA16 som er montert på hhv veggfelt 5 og 6. Alle tre sensorene registrerer temperatur tett opp til de innstilte temperaturene på kald side. I tillegg kan en se økning i fuktinnhold raskt etter slagregnpåkjenninger og nedgang i fuktinnhold etter at tørkeperioden har startet.

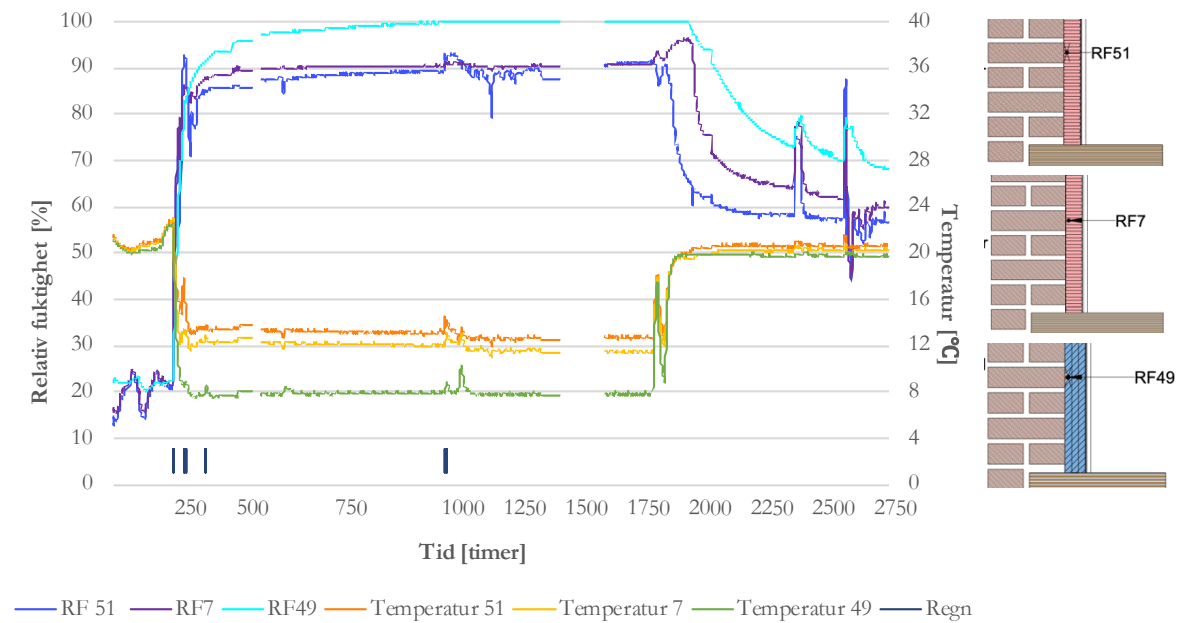


Figur 30: Fuktmålerne i bjelkeendene i veggfelt 4,5 og 6.

Veggfelt 5 med mineralull har et signifikant lavere fuktinnhold enn i to andre veggfeltene. Mineralull er mest dampåpen av isolasjonsmaterialene og har den laveste varmemotstanden av de tre isolasjonssjiktene. Det er dermed forventet at dette veggfeltet vil ha de beste forholdene for tørking av de tre veggfeltene. Alle tre fuktmålerne viser økt relativ fuktighet etter at tørkeperioden har begynt. Dette kan forklares ved at vann fra slagregnpåkjennningene fordamper ved økt temperatur og opprettholder en høy relativ fuktighet i veggen til tross for økt temperatur ved sensorene. Det vil i tillegg dannes differanse i partialtrykk på grunn av ulik temperaturendring i bjelkeenden og den ytre delen av murverket. Dette vil igjen driver mer fukt til bjelkeenden fra den ytre delen og øker den relative fuktigheten ytterligere. Ingen av de tre fuktmålerne viser tørking i noe særlig grad i løpet av tørkeperioden og måler på slutten et fuktinnhold som tilsvarer RF over 90%. Dette er tilstrekkelig høyt til at muggvekst kan kunne forekomme over tid.

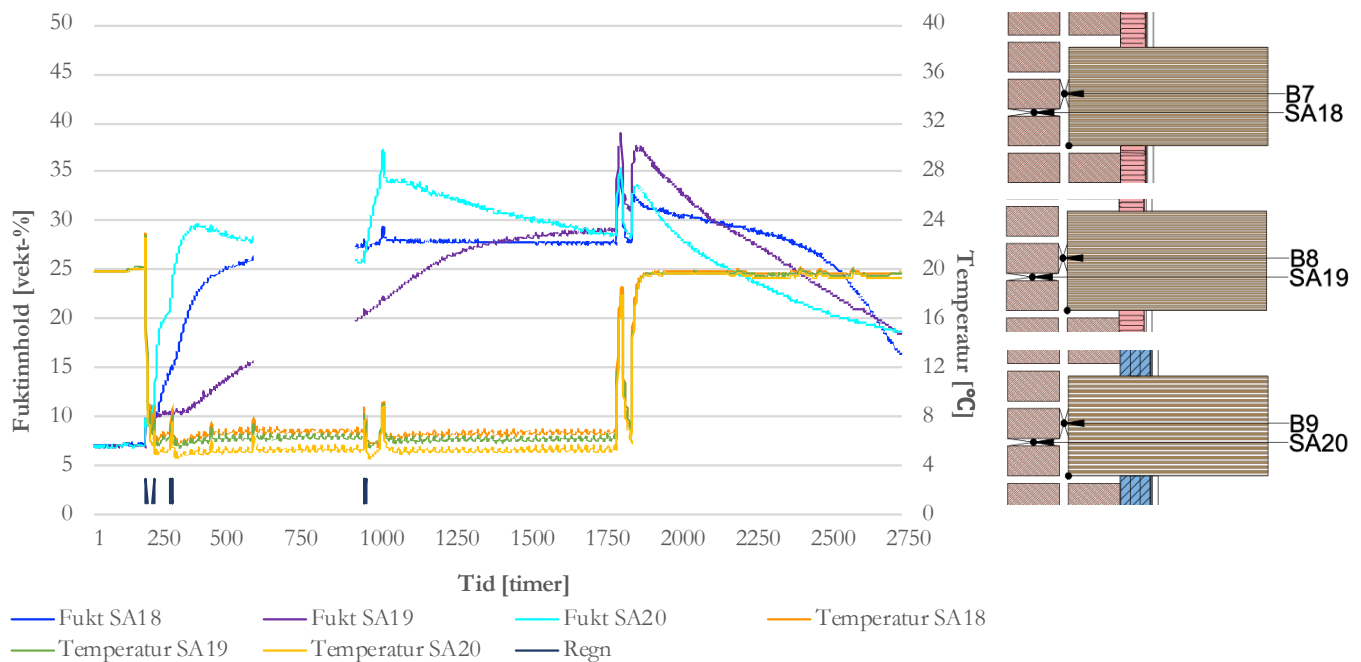
### 3.2.3 Veggfelt 7, 8, 9

Fra Figur 13 ser vi at de tre øverste veggfeltene er bygd opp av samme type teglstein. Rustika rød med lavt sug. Veggfelt 7 og 8 har 50 mm Kooltherm isolasjon og veggfelt 9 har 60 mm aerogel-isolasjon. Det er i disse veggfeltene plassert en RF- sensor på innsiden av murverket, i overgangen mellom murverk og isolasjon.



Figur 31: Temperatur- og RF sensorer på veggfelt 7,8 og 9. Sensorene er plassert på innsiden av murverket. Sensor 51 på veggfelt 7, sensor 7 på veggfelt 8 og sensor 49 på veggfelt 9.

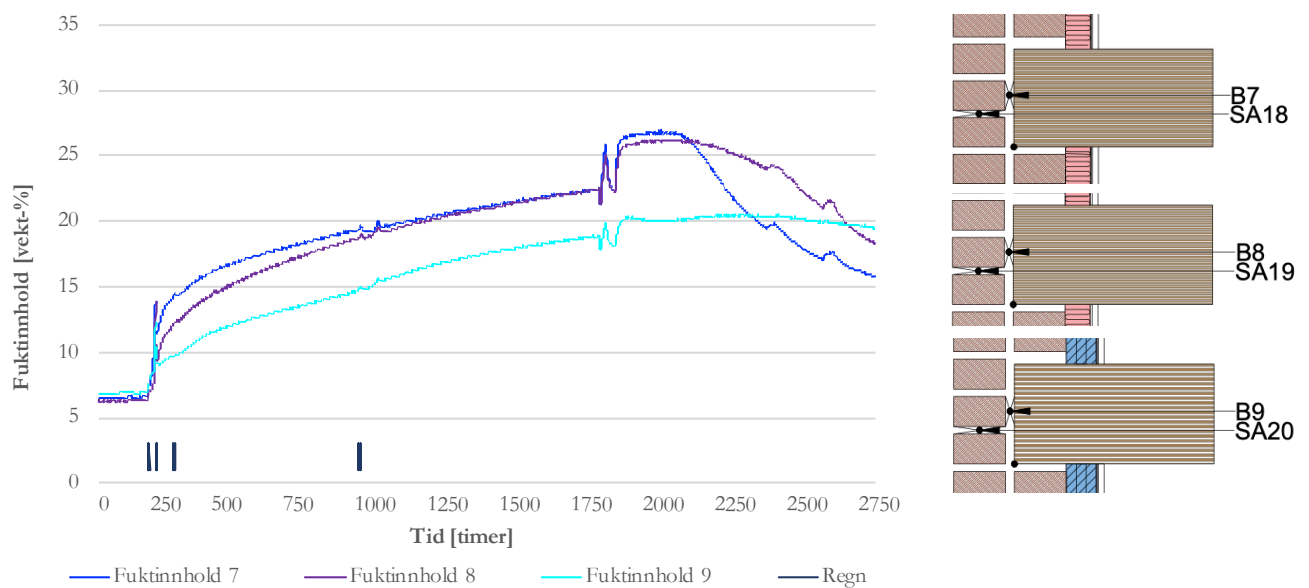
Veggfelt 8 uten dampsperre bruker noe lengre tid på å tørke ut enn veggfeltet med dampsperre og samme isolasjon. Den relative fuktigheten stiger igjen rett etter at varmt klima er innstilt og er antatt grunnet den tidligere nevnte dysfunksjonelle ventilen. Her kan den smarte dampspærren ha hindret fukt fra å trekke inn i veggen, mens veggfeltet uten dampsperre fikk tilført fukt gjennom diffusjon. Dette vil igjen ha ført til at veggfelt 8 hadde mer fukt å tørke ut. Ved slagregnpåkjenning kan en se en antydning til større utslag på relativ fuktighet på veggfelt 7 enn 8. Dette kan skyldes at regnpåkjenningen til klimasimulatoren ikke er helt uniform. Veggfelt 8 uten dampsperre holder en noe lavere temperatur gjennom hele perioden enn det veggfelt 7 med dampsperre gjør. Dette kan forklare det høyere RF-nivået i begynnelsen av måleperioden. Hvorfor veggfeltet holder en lavere temperatur kan ikke forklares. Veggfelt 9 med aerogel og dampsperre oppnår RF = 90% etter 360 timer og målt RF = 98,5 % etter 620 timer. RF  $\approx$  100% vedvarer frem til 160 timer etter at tørkeperioden er begynt og avslutter på 70% RF. RF 49 måler i gjennomsnitt 4°C lavere temperatur enn veggfeltene med Kooltherm gjennom den kalde perioden i samme plassering. Den lave temperaturen forklares med at varmemotstanden i 60 mm aerogel er 68% høyere enn 50 mm Kooltherm. Det vil derfor også være forventet høyere relativ fuktighet i dette veggfeltet.



Figur 32: Sahlén sensorer på veggfelt 7, 8 og 9. Sensorene er plassert i en horisontalfuge nærmere kald side. Sensor 18 på veggfelt 7, sensor 19 på veggfelt 8 og sensor 20 på veggfelt 9

SA18, plassert 52 mm fra yttersiden i murveggen i en horisontalfuge i veggfelt 7, viser i en rask reaksjon på innstilt kaldt klima hvis man tar hensyn til forsinkelsen i lagt Sahlén sensorene. Den raske økningen i fuktinnhold ses ikke hos SA19 i veggfelt 8 som også har samme plassering. SA19 har en mer gradvis økning i fuktinnhold gjennom hele perioden med kaldt klima. SA20 i veggfelt 9 med samme plassering, viser også rask økning av fuktinnhold ved kaldt klima, og en kan tydelig se økning av fuktinnhold etter regnpåkjenning. Spesielt etter de to siste regnperiodene er fuktinnholdet svært høyt i veggfelt 9. Dette samsvarer godt med relativ fuktighet ved RF49 i samme veggfelt. Det tyder på et generelt høyere fuktnivå i veggfelt 9 med aerogel enn i veggfeltene med Kooltherm isolasjonsplater.





Figur 33: Fuktmålerne i bjelkeenden. Grafen viser fuktinnholdet i bjelkeendene i veggfelt 7, 8 og 9

Bjelkesensorene viser et lavere fuktinnhold ved bjelkeenden i veggfelt 9 enn i veggfelt 7 og 8. Dette samsvarer dårlig med de andre sensorene i veggfeltet, men kan være et resultat av at aerogel er mer dampåpen. Eventuelt er det andre forskjeller i oppbygningen av veggen som gir denne forskjellen. Relativ fuktighet overstiger 80% etter 400 timer for veggfelt 7, 310 timer for veggfelt 8 og 830 timer for veggfelt 9. Det er gjennom hele perioden lavere fuktinnhold i bjelkeenden veggfelt 9, med unntak av helt på slutten. Dette kan være en effekt av det høye fuktnivået ellers i veggfelt 9 som gir liten uttørking, men dette er veldig usikkert. Veggfelt 7 med smart dampsperrer tørker mer ut enn veggfelt 8 uten dampsperrer, de ender på hhv 79% RF og 87 % RF.

### 3.2.4 Generelle observasjoner

Laboratorieforsøket viser at det i veggfelt bestående av en massiv murvange uten puss vil det ved 5°C og 90% relativ fuktighet kombinert med slagregnpåkjønning bli høye fuktnivåer gjennom hele veggfeltet. Resultatene viser også at det er store variasjoner i målt relativ fuktighet i samme veggfelt. Grunnen til disse variasjonene kan være flere. Det har blant annet vært funksjonsfeil i klimasimulatoren som ser ut til å ha gitt tydelige utslag på målingene. Spesielt den utslitte ventilen som økte den relative fuktigheten på varm side i overgangen mellom kaldt klima og tørkeperioden har gitt tydelige utslag. Hvor stort utslag denne funksjonsfeilen har gitt er vanskelig å kvantifisere, men det representerer en usikkerhet i forsøket og da spesielt i uttørkingen av veggfeltene. En annen usikkerhet knyttet til klimasimulatoren er regnpåkjønningen. Det kan tyde på ut fra målingene og tidligere forsøk i klimasimulatoren [37] at den ikke er helt uniform. Det er også noe usikkerhet til mengden regn som sprøytes ut av ventilene, som gjør det vanskelig å vurdere opp mot et reelt klima.

En annen grunn til variasjon kan være forskjeller i murverket. Utførelsen av murverket og fugene spesielt kan påvirke materialeegenskapene [38], samt at sprekker og riss kan forekomme som gjør at fukttransport gjennom murvangen ikke er uniform over hele feltet. Dette ser vi observeres i en del av målingene fra forsøket. Det er en del sensorer som har relativt like plasseringer, men som registrerer ganske ulikt fuktinnhold. Dette gjelder sensorene i veggfelt 7, 8 og 9 hvor veggfelt 8 har mye lavere fuktinnhold i SA19 enn det som registreres hos de to andre veggfeltene ved siden av ved samme sensorplassering. Det er lite trolig at det er dampsperran som har en effekt så langt ut i veggfeltet. Det samme er for SA9 og SA10 som er plassert i samme veggfelt og nesten samme plassering, men som viser helt forskjellig forløp.

Selv med flere usikkerheter viser målingene også i stor grad er at mengden isolasjon har en betydning. Bjelkeendene i veggfelt 6 og 9 som begge har høyest varmemotstand av feltene viser minst uttørking av bjelkeendene i tørkeperioden. Disse to veggfeltene har også høyest relativ fuktighet ved nesten samtlige sensorer blant veggfeltene de kan sammenlignes med. Dette samsvarer godt med litteraturen på feltet. Det som også kommer tydelig frem er at veggfeltene murt med den gule teglsteinen med høyt sug har generelt et høyere fuktinnhold enn veggfeltene med den røde teglsteinen.

I bjelkeendene observeres det i flere av de isolerte veggfeltene en økning i relativ fuktighet etter at temperaturen på utvendig side er innstilt på 20°C og RF = 50%. Som nevnt under resultatene for veggfelt 4, 5 og 6 kan dette være på grunn av vann som er kapillært sugd opp i veggen og som bidrar til å opprettholde RF=100% ved økt temperaur, i kombinasjon med en damptrykkgradient som skapes mellom ytre del av murvangen og bjelkeenden. Dette vil kunne resultere i at relativ fuktighet i bjelkeenden øker til tross for økt temperatur. Hvorfor dette ikke skjer i veggfelt 9 er usikkert, og en sammenligning av alle bjelkeendene viser at økningen i relativ fuktighet på dette punktet er størst for veggfeltene med rød teglstein og for veggfeltene

med Kooltherm isolasjonsplater. Så det kan være en sammenheng mellom diffusjonsmotstanden og termisk konduktivitet i materialene og økningen i relativ fuktighet på dette punktet i klimasekvensen.

En siste generell observasjon er at under perioden med kaldt klima oppnår alle fuktmålerne i bjelkene unntatt i veggfelt 1 et fuktnivå som tilsvarer en relativ fuktighet over 80%. Det observeres også et tydelig høyere fuktnivå i feltene med isolasjon. Dette er et fuktnivå som vil kunne føre til mugg og råtedannelse over en lengre periode med temperatur over 5°C og uten tilstrekkelig tid eller forhold til uttørring.

## 4 Forventet relativ fuktighet uten slagregn

For å kunne se på effekten av slagregnet i klimasimulatoren er det nødvendig å skape et referansepunkt for den relative fuktigheten i veggfeltene uten slagregnpåkjønning. Siden første slagregnpåkjønningen starter raskt etter at temperaturen er innstilt på 5 °C vil ikke sensorene kunne gi et slikt referansepunkt. Det er derfor gjort en analyse ved bruk av Glasers metode for å gi et estimat på relativ fuktighet i veggfeltene under samme forhold uten slagregn. Beregningen er gjort i henhold NS-EN ISO 13788:2012 – Bygningskomponenters og bygningsdelers hygrotermiske egenskaper - Innvendig overflatetemperatur for å unngå kritisk overflatefuktighet og kondensasjon i mellomrom - Beregningsmetoder (ISO 13788:2012).

Metoden beregner temperatur- og damptrykkfordeling over en bygningskomponent under stasjonære forhold. Metode er veldig forenklet og har et begrenset bruksområde. Det metoden kan brukes til er å sammenligne bygningskomponenter og sjekke om det under isoterme forhold vil oppstå kondensering i komponenten. Beregningen tar kun hensyn til fukttransport ved vanndampdiffusjon. Prinsippet for beregningen er å dele opp en bygningskomponent i flere sjikt og angi varmemotstanden og  $S_d$ -verdien for alle sjiktene i komponenten. Deretter beregnes temperaturen ved overgangene mellom sjiktene. Temperaturfordelingen er lineær, gitt av stasjonære forhold. Temperaturen på innvendig side er satt til 23°C og 5°C på utvendig side, med hhv RF = 50% og 90%.

$$\theta'_n = \theta_e + \frac{R'_n}{R'_T} (\theta_i - \theta_e)$$

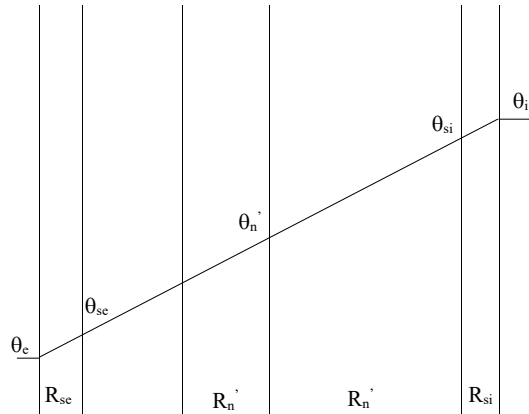
$\theta'_n$  = temperatur ved overgang n

$\theta_e$  = Temperatur på utvendig side

$\theta_i$  = Temperatur på utvendig side

$R'_n$  = Varmemotstand i lag n

$R'_T$  = Total varmemotstand i komponenten



Figur 34: Temperaturen gjennom bygningskomponenten hvor tykkelsen på lagene tilsvarer varmemotstanden

Temperaturen anvendes videre til å finne metningstrykket,  $P_{sat}$  ved overgangene. Damptrykket gjennom komponenten beregnes ved å sette opp en lik figur som Figur 34 hvor tykkelsen på sjiktene tilsvarer  $S_d$ -verdien til sjiktet i forhold til den totale  $S_d$ -verdien til komponenten. Deretter trekkes en rett linje fra damptrykket utvendig til damptrykket innvendig. Hvis dette damptrykket overstiger metningstrykket noe sted i komponenten vil det oppstå kondens. For denne oppgaven er denne beregningen gjort i Microsoft Excel for å mest mulig nøyaktige data, med følgende formel.

$$P = P_e + \frac{P_i - P_e}{S_{d_{tot}}} \cdot S_{d_i}$$

Hvor  $P_i$  og  $P_e$  er hhv partialtrykket på innvendig og utvendig side og  $S_{d,i}$  er  $S_d$ -verdien til det aktuelle sjiktet. For høy relativ fuktighet vil kunne resultere i mugg og råte-skader i organiske konstruksjonsdeler. Derfor vil det kritiske punktet for veggfeltene være bjelkeenden av gran. Det er noe varierende i litteraturen hva som er for høy relativ fuktighet, men ved RF over 80% som månedlig gjennomsnitt vil muggvekst kunne være å forvente ved en temperatur over 5°C [39]. Relativ fuktighet ved begynnelsen på bjelkeenden er hentet ut og er presentert i Tabell 6.

Tabell 6: Temperatur ,metningstrykk, partialtrykk og relativ fuktighet ved enden av trebjelken beregnet med Glasers metode

	Temperatur	P <sub>sat</sub> [Pa]	P [Pa]	RF
Veggfelt 1	14,8	1684	1187	69,1 %
Veggfelt 2	13,0	1495	1188	79,5 %
Veggfelt 3	8,6	1115	802	71,9 %
Veggfelt 4	6,6	972	796	81,8 %
Veggfelt 5	7,3	1018	796	78,1 %
Veggfelt 6	7,3	1019	796	83,0 %
Veggfelt 7	7,2	1017	797	83,4 %
Veggfelt 8	7,2	1017	1107	111,6 %
Veggfelt 9	6,4	959	798	86,4 %

Relativ fuktighet ligger rundt 80% på de fleste av veggfeltene. Unntakene er veggfelt 1 og 3 som har en noe lavere RF grunnet at feltet har 1 ½ steins tykkelse og veggfelt 1 er i tillegg ikke isolert. Veggfelt 9 som har mest isolasjon har som forventet også den høyeste relative fuktigheten blant veggfeltene med dampsperre. Det siste unntaket er veggfelt 8 som overstiger 100% RF. Dette er på grunn av at veggfeltet ikke har en dampsperre og dermed blir den totale S<sub>d</sub>-verdien til feltet lavere enn for de andre feltene. Det er i beregningen brukt S<sub>d</sub>-verdien til den smarte dampsperreren i tørr tilstand. Dette vil nok være i overkant konservativt.

Glaser metoden har som nevnt en del begrensninger, men gir et estimat på hva en kan forvente at den relative fuktigheten ligger på uten slagregnsbelastning. Den fullstendige beregningen ligger vedlagt i Vedlegg B.



## 5 Simulering i WUFI® 2D

Det er ønskelig å redusere usikkerhetene i resultatene fra laboratorieforsøket. Ved å teste veggfeltene i et simuleringsverktøy fjerner man muligheten for at sprekker eller andre ujevnheter i murverket spiller inn på de hygrotermiske forholdene i veggfeltet. Det fjerner også operasjonelle feilkilder som klimasimulatoren har og feil ved logging og drift av maskineriet. Virkningen av slagregnet vil undersøkes gjennom å se på det relative fuktighetsnivået en kan forvente uten slagregn og sammenligne resultatene fra laboratoriet med simuleringsmålinger med slagregnpåkjønning. Det er i denne oppgaven valgt å bruke simuleringsverktøyet WUFI® 2D fra «The Fraunhofer Institute for Building Physics». En programvare som gir muligheten for todimensjonale varme- og fuktsimuleringer gjennom numeriske beregninger.

For å kunne redusere usikkerhetene og sammenligne resultater i WUFI® 2D med resultater fra laboratoriet er det valgt å gjennomføre tre typer simuleringer av veggfeltene;

1. Simulering av utvalgte veggfelt uten slagregnpåkjønning.
2. Simulering av utvalgte veggfelt med tilnærmet lik klimapåkjønning som i klimasimulatoren.
3. Simulering av utvalgte veggfelt med modifikasjoner i oppbyggingen.

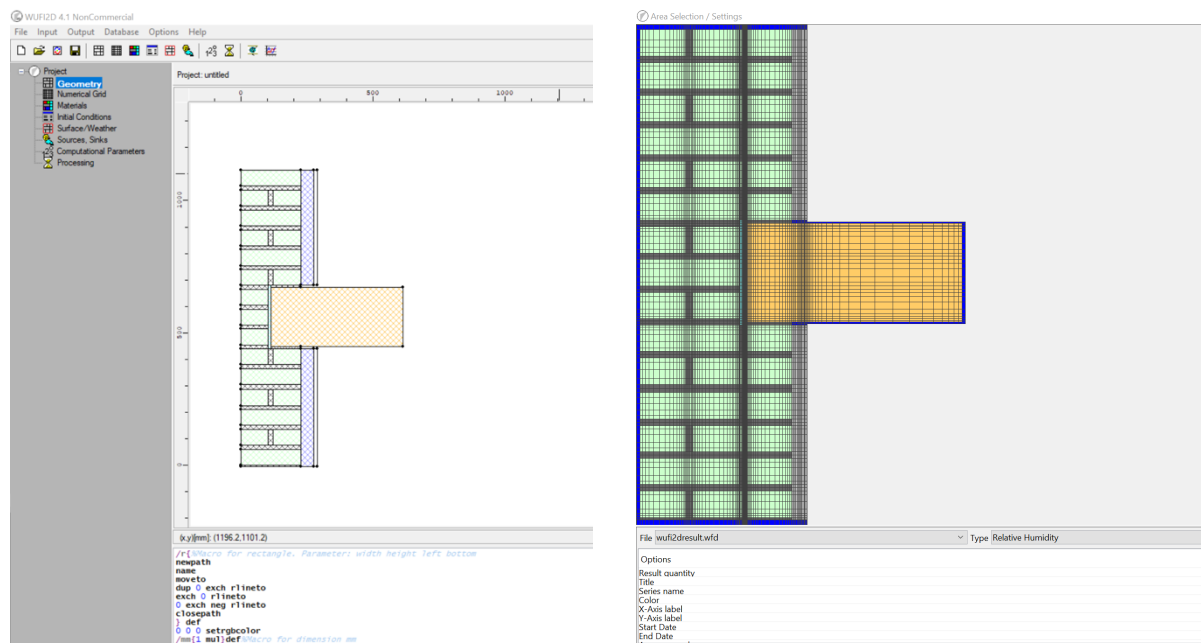


## 5.1 Metode

### 5.1.1 Beregningsverktøyet WUFI® 2D

WUFI® står for «Wärme- und Feuchtetransport instationär» (ikke-stasjonær varme -og fukttransport) og er et simuleringsverktøy som utfører beregninger innen fukt- og varmetransport simultant gjennom en eller to-dimensjonale bygningskomponenter. I beregningen av varmetransport tar programmet hensyn til varmeledning, entalpistrømning gjennom fuktbevegelse i faseendring, kort-bølget solstråling og lang-bølget stråling. Ved beregning av fukttransport tas det hensyn til dampdiffusjon, kapillær ledning og overflatekryping.

WUFI® 2D som er brukt i denne oppgaven tillater brukeren å konstruere bygningskomponenter gjennom å først definere geometrien og videre definere materialegenskapene til de ulike delene av komponenten. WUFI® 2D tilbyr en database med ulike materialer hvor all materialdata er tilgjengelig, samt muligheten til å definere materialer selv. Det er også mulig å ta utgangspunkt i materialene i databasen og redigere enkelte materialegenskaper.



Figur 35: WUFI 2D display. Bildet til venstre viser oppsettet av til WUFI 2D. Bildet til høyre viser hvordan en kan hente ut resultat ut fra gridet til veggfeltet.

Videre defineres «grid» som er det numeriske rutenettet til beregningene. WUFI® generer automatisk et rutenett basert på geometrien til komponenten. Dette rutenettet er finere i overgangen mellom to delkomponenter og grovere i midten av en delkomponent. Dette gjøres for å kunne håndtere større gradienter i overgangen mellom to materialer. Generelt vil det automatiske rutenettet være tilstrekkelig, men her er det også mulig å tilpasse graden av kompleksitet.

For å kunne kjøre en simulering trenger WUFI® at de initiale forholdene defineres. Dette innebærer å fylle inn den temperaturen og det fuktinnholdet materialene skal ha ved

begynnelsen av simuleringen. I neste steg bestemmes randbetingelsene til bygningskomponentene. WUFI® gir muligheten til å definere tre typer randbetingelser; inneklima, uteklima og adiabatisk grense. Overflateegenskapene til inneklima og uteklima må igjen spesifiseres gjennom en rekke parametere. Værdata hentes fra klimadata eller forenklede sinuskurver med temperatur og relativ fuktighet gjennom et år. WUFI® 2D har i likhet med materialdatabasen en database med rekke klimadata fra ulike lokasjoner. Ved behov for et konstruert klima eller klima fra en lokasjon som ikke er tilgjengelig i WUFI® sin database, gir WUFI® deg muligheten til å laste opp egne klimafilere. Det er også mulig å definere konstant temperatur og relativ fuktighet

Til sist må innstillingene for selve bergeningen bestemmes. Dette inkluderer størrelsen på tidssteg (oversatt fra «time step»), antall tidssteg, starttidspunkt og hva som skal beregnes av varme- og fukttransport. Etter at beregningen er gjort kan resultatet visualiseres gjennom «WUFI® 2D motion» hvor varme- og fukttransporten i bygningskomponenten vises kontinuerlig gjennom hele tidsforløpet. Det er også mulig å hente ut data fra spesifikke punkter i komponenten som igjen kan eksporteres som txt.-filer.

### 5.1.2 Begrensninger

Numeriske problemer:

Siden WUFI bruker «finite volumes»-metoden er det avgjørende for gode resultater at det anvendes et passende rutenett. Et rutenett som er fint nok til å håndtere overgangene mellom materialer, men som heller ikke tar for lang tid å beregne. Det betyr at en trenger små ruter ved overgangene, mens det midt i et materiale vil skje mindre endringer og rutenettet kan være grovere for å redusere beregningstiden.

Ujevnheter i materialer

WUFI® 2D har ingen mulighet for å modulere sprekker i teglsteinen. Det er heller ikke mulig å legge inn varierende egenskaper innenfor et enkelt materiale. Dette igjen gjør at det ikke er mulig å simulere for eksempel heftsonen mellom teglstein og mørtel helt realistisk. Det er heller ikke i WUFI® 2D mulig å modellere porestrukturen i materialer, kun gjennomsnittlig porøsitet kan angis.

Smale sjikt

Ved simulering av smale sjikt som membraner vil WUFI® 2D slite med å håndtere den numeriske beregningen. Det er derfor anbefalt av WUFI® 2D å modellere membraner som dampsperre som et belegg med en vanndampdiffusjonsmotstand. Denne funksjonen er derimot begrenset til en konstant vanndampdiffusjonsmotstand slik at en smart dampsperre ikke vil kunne behandles på denne måten. En løsning på dette er å inkludere vanndampdiffusjonsmotstanden i en smart dampsperre i et annet materiale i komponenten.

### Klimasekvens

WUFI® tilbyr en excel-fil hvor du enkelt kan fylle ut temperatur, relativ fuktighet, regnpåkjønning samt andre klimaparametere som gjør at du kan lage en egen klimasekvens. Filen blir videre eksportert til et format som WUFI® 2D kan lese, enten wac. eller kli.. Ved bruk av wac. er det ikke mulig å ha mindre tidssteg enn en time, dermed blir regnpåkjønningen fordelt over en time i stedet for 10, 20 eller 40 min.

### Smart dampspærre

Den smarte dampspærren brukt i laboratorieforsøket varierer dampmotstanden etter relativ fuktighet på begge sider av materialet. I WUFI® er det bare mulig å ha en varierende dampmotstand ut fra en omgivende RF. Det er altså ikke mulig å legge inn at dampmotstanden varierer ut fra ulik RF på innsiden og utsiden av membranen.

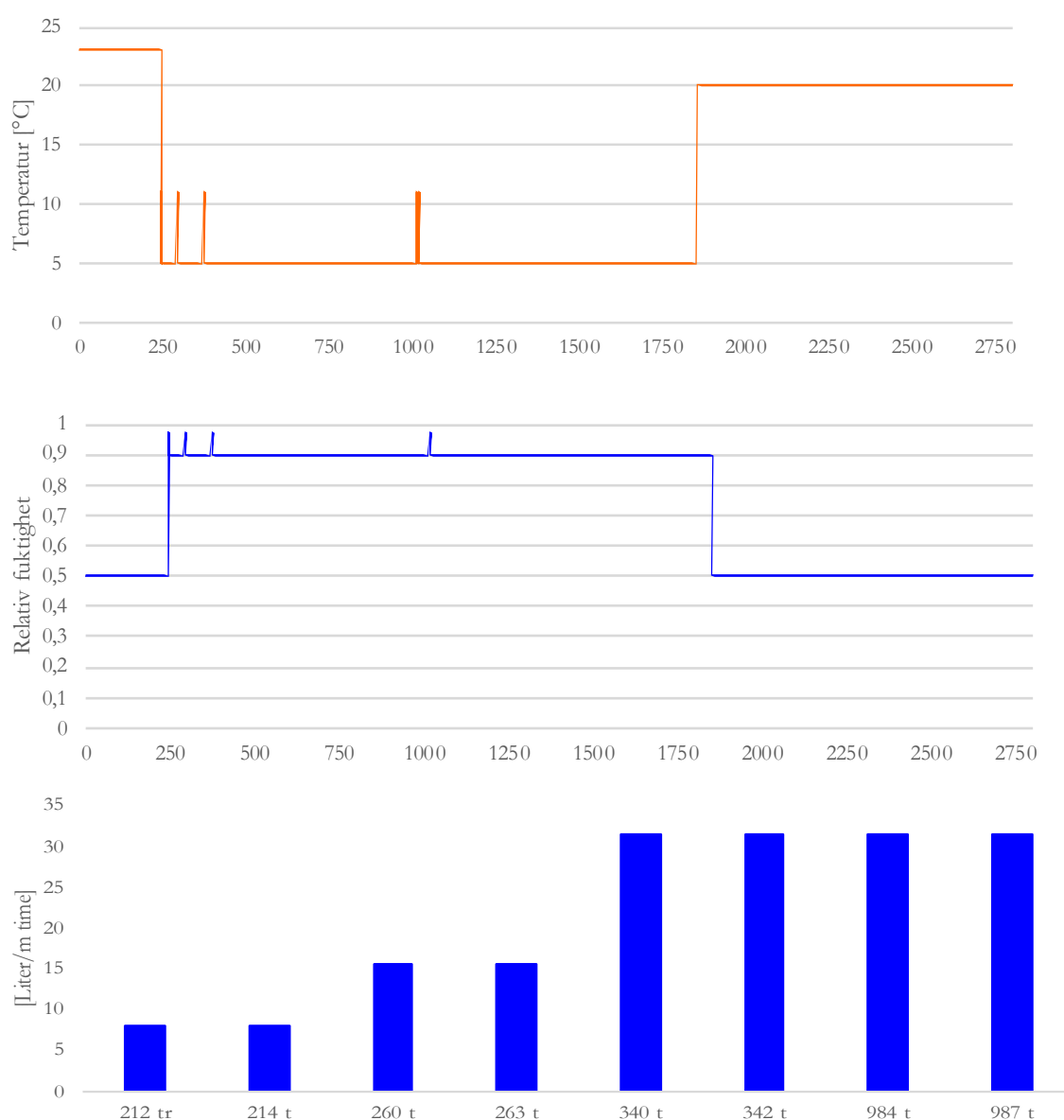
### Mangelfull eller feil inndata

Med mye data som skal legges inn så kan det fort skje feil. Det kan også være feil tilknyttet tolkning av betydningen til de ulike inndataene. Det er også ofte at den nødvendige materialdataen ikke finnes tilgjengelig, det er derfor viktig å justere forventningene til resultatene etter hvor nøyaktig inndataen er. Er det flere usikre parametere bør en ikke forvente et nøyaktig resultat. Selv når man har den nødvendige dataen kan det være usikkerheter knyttet til variasjoner innen materialtypen eller til utførelse. Det kan derfor være vel så nyttig å vite effekten av disse variasjonene i stedet for å beregne et spesifikt numerisk tilfelle med ukjent pålitelighet [22].

### 5.1.3 Inndata

#### Klimasekvens

For å kunne etterligne klimapåkjenningen i klimasimulatoren på NTNU er det valgt å lage en egen forenklet klima-fil til simuleringen i WUFI® 2D. Filen er laget i wac. format med minimum tidssteg på 1 time. Dette gjør at hver av de 8 regnpåkjenningene gjennom perioden er fordelt utover en time. Det er antatt en at klimasimulatoren har en regnpåkjenning tilsvarende 47 liter/m<sup>2</sup> time. De første to regnpåkjenningene er på 10 min er da lagt inn som 8 liter/m<sup>2</sup> time i klimafilen. For å etterligne regnpåkjenningen til ventilene i klimasimulatoren mest mulig, er slagregnet i WUFI® 2D definert som slagregn hvor alt av regnet treffer fasaden. All påvirkning fra sol og vind er fjernet fra klimafilen.



Figur 36: viser innstilt temperatur, relativ fuktighet og mengden regn i hver av de 8 regnpåkjenningene i simuleringen i WUFI® 2D. I laboratorieforsøket ble temperaturen gjennom hele perioden innstilt til 11 °C i korte perioder som et antifrostiltak for ventilene. Dette er droppet fra simuleringen i WUFI® 2D

Det er noe usikkerhet knyttet til temperatur og fuktforholdene i klimasimulatoren før sensorene begynte å logge. Det er derfor antatt et konstant klima likt på varm og kald side før den kalde perioden begynner. Dette er basert på loggen fra sensorene, men vil avvike fra virkeligheten ved at det holdes konstant. Det er også gjort en forenkling ved å definere de initiale forholdene som like i alle materialene i veggfeltet. Det er definert 20% RF i alle materialene i veggfeltene med 1-steins tykkelse og 50% RF i alle materialene i veggfeltene med 1 ½ -steins tykkelse. Denne antakelsen er også basert på data fra sensorene i laboratoriet. Det er i simuleringene definert adiabatisk grenser i toppen og bunnen av veggfeltet. Dette vil være et avvik fra laboratorieforsøket, men varme- og fuktovergang mellom veggfeltet er antatt neglisjerbar.

### **Material inndata**

For å kunne utføre realistiske simuleringer av laboratorieforsøket er det nødvendig å kartlegge materialeegenskapene til materialene i veggfeltene. Det er i WUFI® 2D mulig å konstruere helt egne materialer eller redigere materialer i databasen. Det i arbeidet med denne modellen anvendt begge metoder. I simuleringene er det kun brukt materialer hvor alle materialeegenskapene er kjent fra enten leverandør, laboratorieforsøk utført i forbindelse med doktorgradsarbeidet eller tidligere studier hvor materialeegenskapene har blitt undersøkt. De eneste unntakene er noen materialeegenskaper hos den røde teglsteinen og isolasjonsplatene av fenolskum fra Kingspan, Kooltherm®. Ved testing av den kapillære absorpsjonen til isolasjonsplatene ble det observert mer opptak av fukt enn forventet. Platene fortsatte å ta opp vann selv etter 168 timer. Det var derfor ikke mulig å bestemme fuktinnholdet ved kapillær metning før simuleringene måtte gjennomføres på grunn av tidsbegrensingen til oppgaven. Det samme gjaldt sorpsjonskurven til Kooltherm. For den røde teglsteinen er det heller ikke rukket å utføre all nødvendig materialdata ved laboratorieundersøkelser. Det er likevel gjort antakelser der hvor det mangler korrekt data basert på lignende materialer. På bakgrunn av dette er det i hovedsak fokusert på å simulere veggfeltene hvor materialeegenskapene er antatt å være mest pålitelige og nøyaktige for å kunne verifisere simuleringmodellen opp mot laboratorieforsøket.

I dette underkapittelet vil inndata for materialeegenskapene til materialene brukt i simuleringen presenteres. I Tabell 7 er de grunnleggende materialeegenskapene for materialene i simuleringen satt opp. De grunnleggende egenskapene er definert av WUFI® 2D som minimum for å kunne kjøre en simulering. For de hygrotermiske egenskapene vil det også presenteres hvordan disse defineres i WUFI® 2D. Mer detaljert oversikt over hvilke inndata som er inngått i simuleringen er tilgjengelig i Vedlegg C.

Det er to materialer som er hentet direkte ut av materialdatabasen til WUFI® 2D. Det er gipsplaten og aerogel isolasjon. Gipsplaten som er brukt heter «gypsum board – interior» fra LTH Lund Univeristy sin database. Dampdiffusjonsmotstandsfaktoren,  $\mu$ , er endret for å inkludere dampsperran i gipsplatesjiktet. Aerogelen er hentet fra Fraunhofer-IBP databasen og heter «Aspen Aerogels . Spaceloft Grey». Dette er akkurat det samme produktet som er brukt i laboratorieforsøket.

Tabell 7: Grunnleggende materialeegenskaper som er brukt som inndata for materialene i WUFI® 2D simuleringene

Grunnleggende materialeegenskaper					
	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Porøsitet [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Spesifikk varmekapasitet [J/(kg K)]	Termisk konduktivitet, $\lambda$ [W/(m K)]	Diffusjonsmotstand , tørr, $\mu$
Glatt oker teglstein	1705	0,279	1000	0,51	9,871
Rustika rød teglstein	2116	0,218	1000	0,69	9,68
Kalk sement mørtel	1823/1788	0,27	850	0,82	49,64
Mineralull	60	0,95	850	0,035	1,226
Kooltherm® isolasjonsplater	35	0,99	1500	0,021	38
Spaceloft® aerogel	146	0,92	1000	0,014	4,7
Gipsplate m/Airguard® smart dampsperre	625	0,73	850	0,2	7692,3
Bjelkeende av gran	455	0,75	1500	0,23	4,23

## Sorpsjonskurve

Sorpsjonskurver for et materiale må alltid bestemmes empirisk, da den kan variere en god del innenfor samme materialtype [21]. Likevel tilbyr WUFI® 2D en approksimasjon av sorpsjonskurven hvis denne materialedataen ikke er tilgjengelig.

$$w = w_f \cdot \frac{(b - 1) \cdot \phi}{b - \phi}$$

$w$  = [kg/m<sup>3</sup>] fuktinnhold ved relativ fuktighet lik  $\phi$

$w_f$  = [kg/m<sup>3</sup>] fuktinnhold ved kapillær metning

$\phi$  = relativ fuktighet [-]

$b$  = approksimasjonsfaktor [-]

Ved bruk av denne approksimering trengs kun  $w_f$  og  $w_{80}$  som inndata.  $w_{80}$  er vanninnholdet med  $\phi = 0,8$

## Kapillærtransportkoeffisient, sug, $D_{ws}$

Kapillærtransportkoeffisient, sug, beskriver det kapillære opptaket av vann når overflaten av materialet har tilgang på fritt vann. Siden denne materialegenskapen sjelden er tilgjengelig for de fleste materialer har WUFI® 2D også her en approksimasjon.

$$D_{ws}(w) = 3,8 \cdot \left(\frac{A_w}{w_{sat}}\right)^2 \cdot 1000 \left(\frac{w}{w_{sat}}\right)^{-1}$$

$A_w$  = absorpsjonskoeffisient [kg/m<sup>2</sup>s<sup>1/2</sup>]

$w_{sat}$  = vanninnhold med metning [kg/m<sup>3</sup>]

$w$  = vanninnhold

## Kapillærtransportkoeffisient, redistribusjon, $D_{ww}$

Beskriver spredningen av vann som er sugd opp i materialet etter at tilgangen på fritt vann er borte. Redistribusjonen er dominert av de mindre porene som drar fukt ut fra de større porene.  $D_{ww}$  generes av WUFI® 2D med den samme inndataen som for  $D_{ws}$ ;

$$D_{ww}(0) = D_{ws}(0)$$

$$D_{ww}(w_{80}) = D_{ws}(w_{80})$$

$$D_{ww}(w_{sat}) = D_{ws}(w_{sat})/10$$

Hvor  $w_{80}$  er fuktinnholdet ved 80% RF.

### Diffusjonsmotstandsfaktor, $\mu$ , tørr og fuktavhengig

Vanndampmotstanden til et materiale defineres i WUFI® 2D ved diffusjonsmotstandsfaktor,  $\mu$ . I motsetning til de andre materialegenskapene har ikke WUFI® 2D en approksimasjon av diffusjonsmotstandsfaktoren.  $\mu$  kan utledes fra materialets ekvivalente luftlagstykkelse,  $S_d$ -verdien, som oftere er tilgjengelig materialdata fra produsent.

$$S_d = \mu \cdot s$$

$s$  = tykkelsen på materialsjiktet [m]

Et annet alternativ, hvis ikke  $S_d$ -verdien er tilgjengelig, er å utlede  $\mu$  fra vanndamppermeabiliteten til materialet [21].

$$\mu = \frac{\delta_{v,a}}{\delta_v}$$

$\delta_v$  = vanndamppermeabiliteten til materialet

$\delta_{v,a}$  = vanndamppermeabiliteten til luft

$$\delta_{v,a} = 1,97 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{T^{0,81}}{p} \quad [40]$$

Hvor  $T$  er temperatur i Kelvin og  $p$  er omgivende atmosfærisk trykk i Pa.

Vanndamppermeabiliteten til materialet kan beregnes for ulike fuktinnhold og dermed ulik relativ fuktighet gjennom følgende uttrykk:

$$\delta_v = \frac{1}{R_w T} \cdot \frac{26,1 \cdot 10^{-6}}{c_\delta} \cdot \frac{\left(1 - \frac{w}{w_{sat}}\right)}{0,503 \cdot \left(1 - \frac{w}{w_{sar}}\right)^2 + 0,497} \quad [41]$$

$R_v$  = spesifikk gass konstant for H<sub>2</sub>O [J/(kg K)]

$w(\phi)$  = fuktinnhold ved aktuell relativ fuktighet



### **Termisk konduktivitet, fuktavhengig**

Det er gjort en estimering basert på WUFI® sin formel:

$$\lambda(w) = \lambda_0 \cdot \left(1 + b \frac{w}{\rho_s}\right)$$

$\lambda_0$  = termisk konduktivitet, tørt materiale

$b$  = materialkoeffisient hentet fra WUFI

$\rho_s$  = *materials densitet*

$b = 8$  for teglstein

$b = 4$  for mørtel

$b = 1,5$  for treverk

### **Termisk konduktivitet, temperaturavhengig**

Temperaturavhengig termisk konduktivitet er ikke relevant i det aktuelle temperaturspekteret og er derfor ikke lagt inn i noen av materialene.

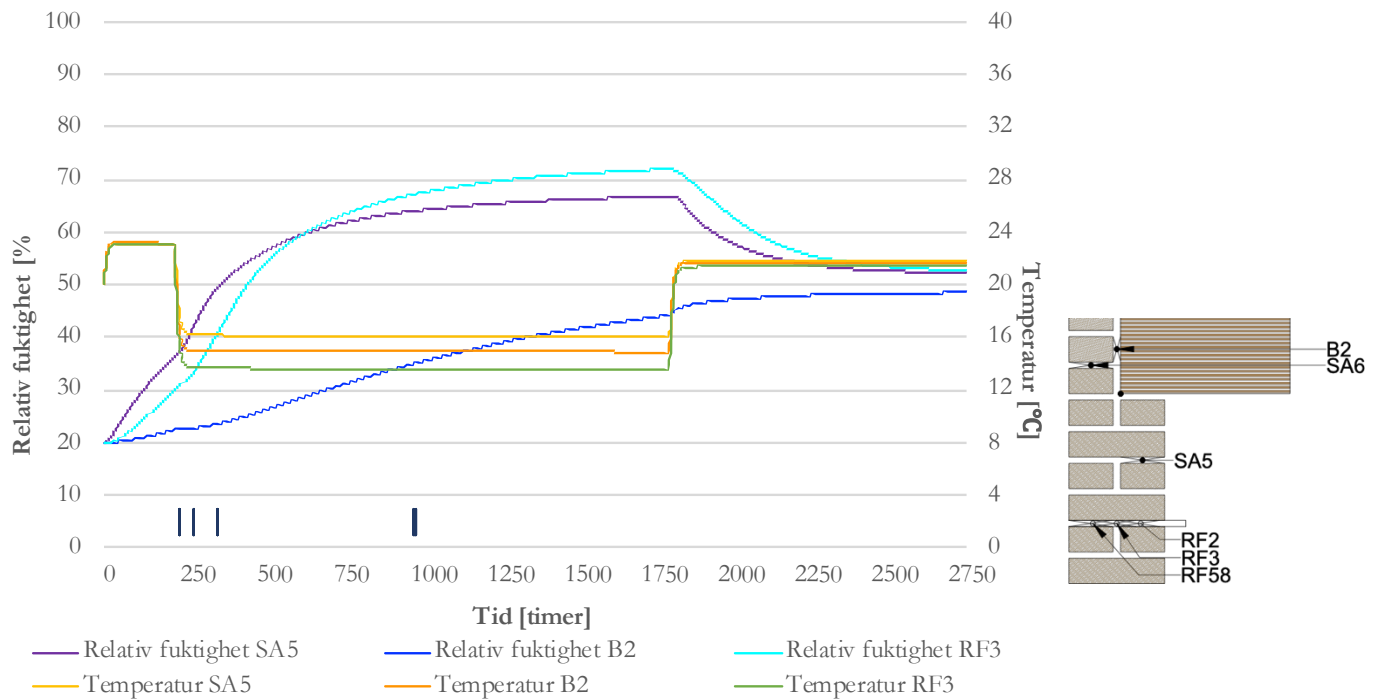
## 5.2 Resultater og analyse

Tabell 8 viser hvilke simuleringer som har blitt gjennomført. Disse er valgt på bakgrunn av resultatene i laboratorieforsøket og tilgjengelig pålitelig materialedata. Det er derfor valgt å fokusere på veggfeltene med gul teglstein. Ikke alle resultatene fra simuleringene er presentert i dette kapittelet, men et representativt utvalgt er valgt ut. De resterende resultatene er tilgjengelig i Vedlegg D.

Tabell 8

Simuleringer i WUFI® 2D				
Veggfelt	Uten regn	Med regn	Med endret heftsone	Uten dampsperre
Veggfelt 1				
Veggfelt 2	x	x	x	
Veggfelt 3		x		
Veggfelt 4		x	x	
Veggfelt 5	x	x	x	x
Veggfelt 6	x	x	x	
Veggfelt 7		x	x	
Veggfelt 8				
Veggfelt 9			x	

## 5.2.1 Simulering uten regnpåkjønning



Figur 37: Resultater fra simuleringen av veggfelt 2 uten regn. Det er i figuren vist data hentet ut fra samme plassering som sensorene B2, SA5 og RF3 har i den virkelige vegg.

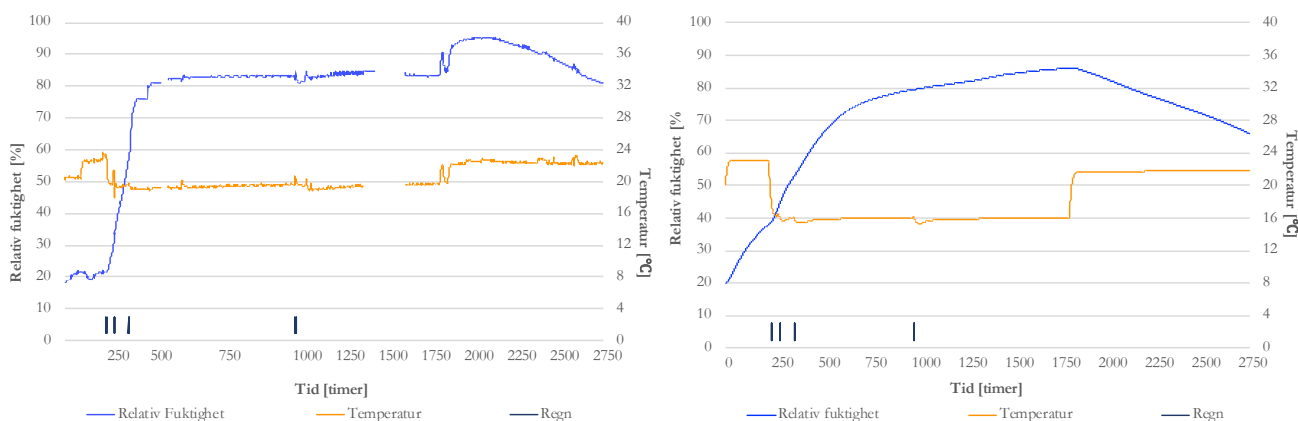
Det ble kjørt simuleringer i WUFI® 2D hvor regnpåkjønningen ble fjernet. Da er det kun temperatur og omgivende relativ fuktighet som påvirker veggfeltene. Dataen fra simuleringene viser at det ikke oppstår relativ fuktighet over 55 % i verken veggfelt 2, 5 eller 6 ved bjelkeenden. I andre punkter i veggfeltene er det høyere relativ fuktighet. Den høyeste relative fuktigheten registreres ved RF43 på innsiden av murverket i veggfelt 5, hvor det i overgangen mellom kaldt klima og tørkeperioden er 85% RF. I de fleste andre sensorplasseringene i de tre veggfeltene måles det mellom 55-70% RF ved samme tid. Det som er verdt å legge merke til er at det i alle punktene er stigende relativ fuktighet gjennom hele den kalde perioden, slik at en vil kunne forvente høyere verdier av RF ved en lengre kald periode.

## 5.2.2 Simulering med slagregn

Det er valgt å presentere resultatene fra simulering av veggfelt 2, 5 og 6 med lik klimabelastning som i laboratorieforsøket. Disse tre veggfeltene består av materialer hvor materialeegenskapene er antatt tilstrekkelig pålitelige. Det er derfor forventet at simulering av disse, med tilnærmet lik klimapåkjenning vil gi de mest like resultatene.

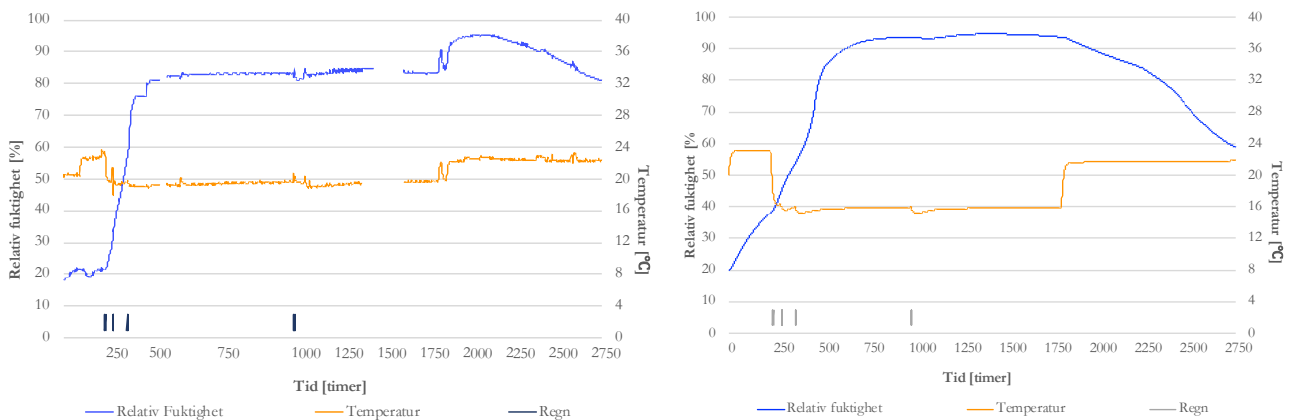
Resultatene viser at simuleringen fra WUFI har en mye jevnere kurve enn det loggdata fra laboratoriet viser. Dette er forventet da WUFI® 2D beregner med en helt stabil temperatur mens det i klimasimulatoren vil være variasjoner. Dette inkluderer blant annet de kontrollerte variasjonene av temperatur opp til 11°C som var et antifrosttiltak for ventilene i klimasimulatoren. Det er også mindre brå utslag på regnpåkjenningene. Disse brå endringene kan komme av at vann finner veien til sensorene via riss og sprekker, som ikke finnes i WUFI simuleringen.

### Veggfelt 2



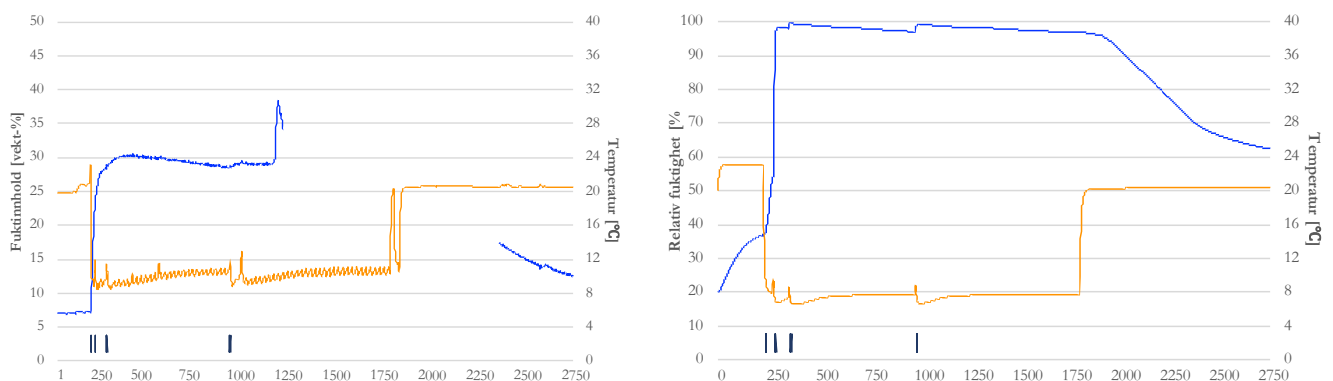
Figur 38: Figuren til venstre er målingene fra sensor RF2 fra laboratorieforsøket. Figur til høyre viser resultatene fra simuleringen av veggfelt 2 med regnpåkjenning fra samme punkt som RF2 er plassert.

Figur 38 viser simuleringene av veggfelt 2 som er referansetilfellet i laboratoriet ved siden av loggdataen fra laboratorieforsøket. Kurvene viser et lignende forløp, men det er stort avvik. Som nevnt har resultatene fra WUFI en mye slakere kurve; den relative fuktigheten øker mer gradvis etter regnpåkjenningene og har en gradvis stigning gjennom hele perioden med kaldt klima. Dette gjelder for samtlige plasseringer i veggfeltet. Simuleringen viser generelt en høyere relativ fuktighet i laboratoriet enn i WUFI® 2D og en høyere temperatur.



Figur 39: Figuren til venstre er målingene fra sensor RF2 fra laboratorieforsøket. Figur til høyre viser resultatene fra simuleringen av veggfelt 2 med regnpåkjenning og justert absorpsjonskoeffisient i mørtelen i horisontalfugene fra samme punkt som RF2 er plassert.

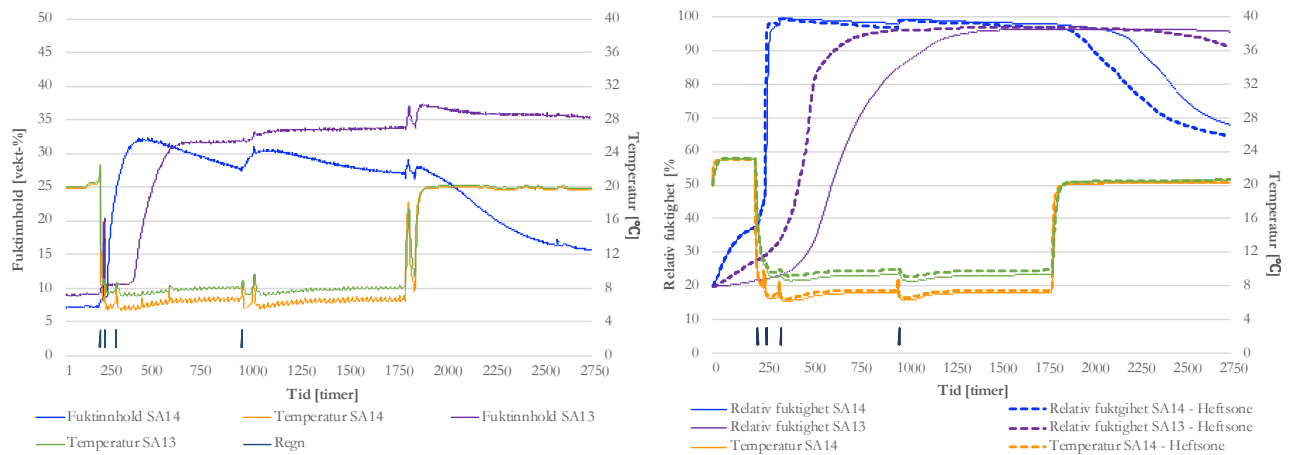
Ved å justere absorpsjonskoeffisienten til mørtelen for å ta hensyn til endrede egenskaper i heftsonen ser vi med en gang at den relative fuktigheten i simuleringen ligner mer på loggdataen til sensorene. Den relative fuktigheten øker raskere og blir også høyere enn loggdataen viser. Det er fortsatt en stor temperaturdifferanse ved RF2 mellom simulering og laboratoriet. Differansen er mindre tydelig ved sammenligning av Sahlén sensorene.



Figur 40: viser fuktinnholdet i veggfelt 2 ytterst i murvangen i laboratorieforsøket (til venstre) og relativ fuktighet ved samme plassering i simuleringen med justert heftzone (til høyre).

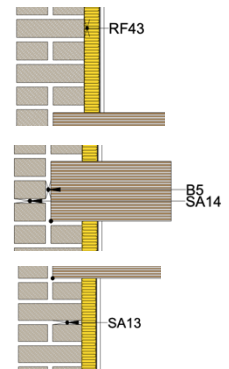
I sensormålingene fra SA6 er variasjonene i innstilt temperatur i klimasimulatoren tydelig ved sammenligning mot simuleringresultatene hvor disse variasjonene ikke er inkludert. Dette kan være med å forklare den høyere temperaturen i laboratorieforsøket. Plasseringen av sensorer i rør kan også være en medvirkende forklaring for avvikende temperaturmålinger.

## Veggfelt 5

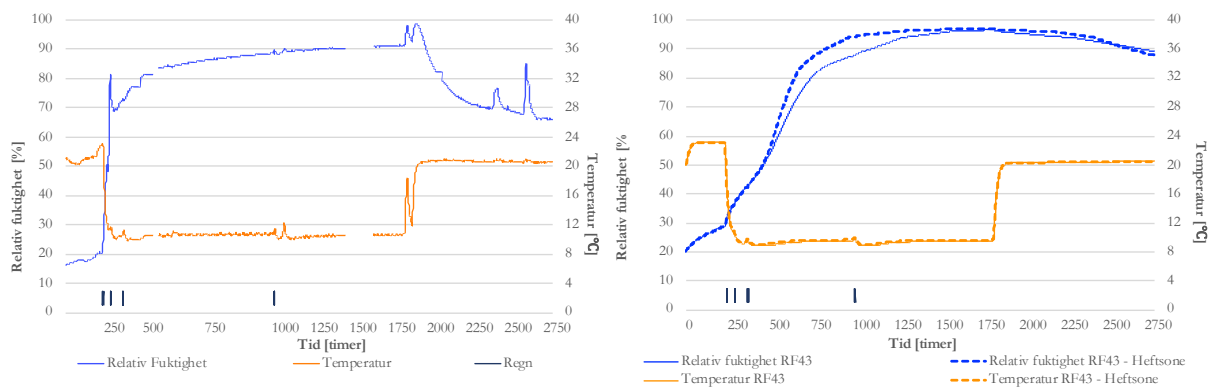


Figur 41: Til venstre er fuktninnholdet i vekt-% registrert i sensor SA13 og SA14 i laboratorieforsøket og figuren til høyre viser sammenligning av simulering med og uten heftsoner-justering for veggfelt 5 ved sensor SA13 og SA14.

Uten justering av heftsonen samsvarer simuleringen i WUFI® 2D bedre med målingene fra Sahlén-sensorene sammenlignet med temperatur- og RF-sensorene i veggfelt 5, men også her blir det ytterligere forbedring når heftsonen blir justert. Ved SA13 begynner RF å øke på samme tidspunkt og holder en relativ fuktighet opp mot 100% gjennom hele perioden. Målingene fra laboratoriet viser at SA13 måler et fuktninnhold som overstiger 100%, noe som ikke mulig med relativ fuktighetsdata fra WUFI® 2D, men de antas å være sammenlignbare. Også ved SA14 er simuleringen med justert heftsoner likere, dette blir spesielt tydelig i tørkeperioden.

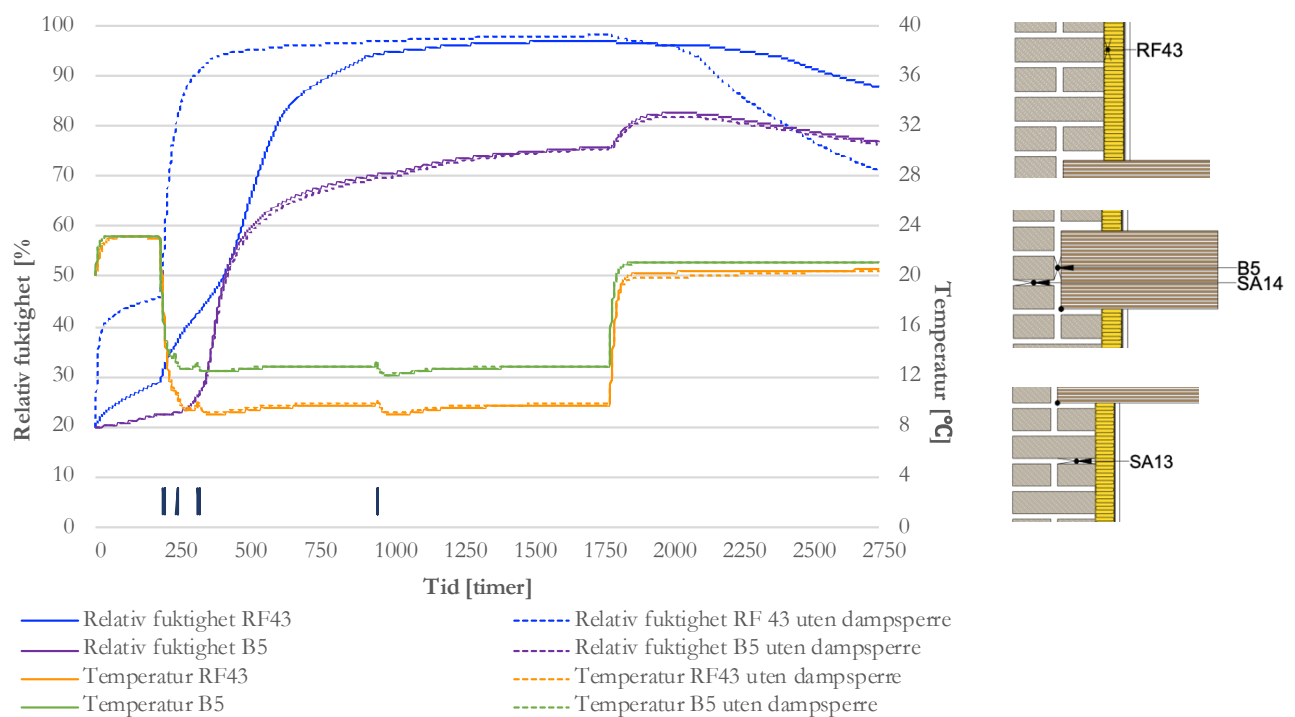


Både temperatur og relativ fuktighet følger samme forløp og omtrent samme verdier. Det er mulig at når isolasjonen er montert så har den termiske konduktiviteten til teglsteinen mindre å si for temperaturen gjennom veggfeltet og det derfor samsvarer bedre mellom simulering og målinger. Det er likevel noen forskjeller; WUFI® 2D bruker lenger tid på å oppnå nivået hvor relativ fuktighet stabiliserer seg ved de ulike sensorene. Ved SA13 tar det omtrent 600 timer i laboratoriet og 750 timer i WUFI® 2D for å komme opp til RF = 95%. Dette kan forklares gjennom fraværet av sprekker og riss, samt porestrukturen som helhet er forenklet i WUFI® 2D. Kombinert vil dette kunne gjøre at fukttransporten går litt raskere i realiteten enn i simuleringen.



Figur 42: Sammenligning av målingene fra laboratoriet (til venstre) og resultater fra simulering i WUFI (til høyre) ved sensor RF43 i veggfelt 5.

Den største forskjellen mellom simulering og måledata i veggfelt 5 er relativ fuktighet etter at tørkeperioden er begynt hos RF43; i laboratoriet viser RF43 en tydelig reduksjon i relativ fuktighet, mens det i simuleringen kun viser en slak nedgang. Dette endres ikke ved heftsonejusteringen.

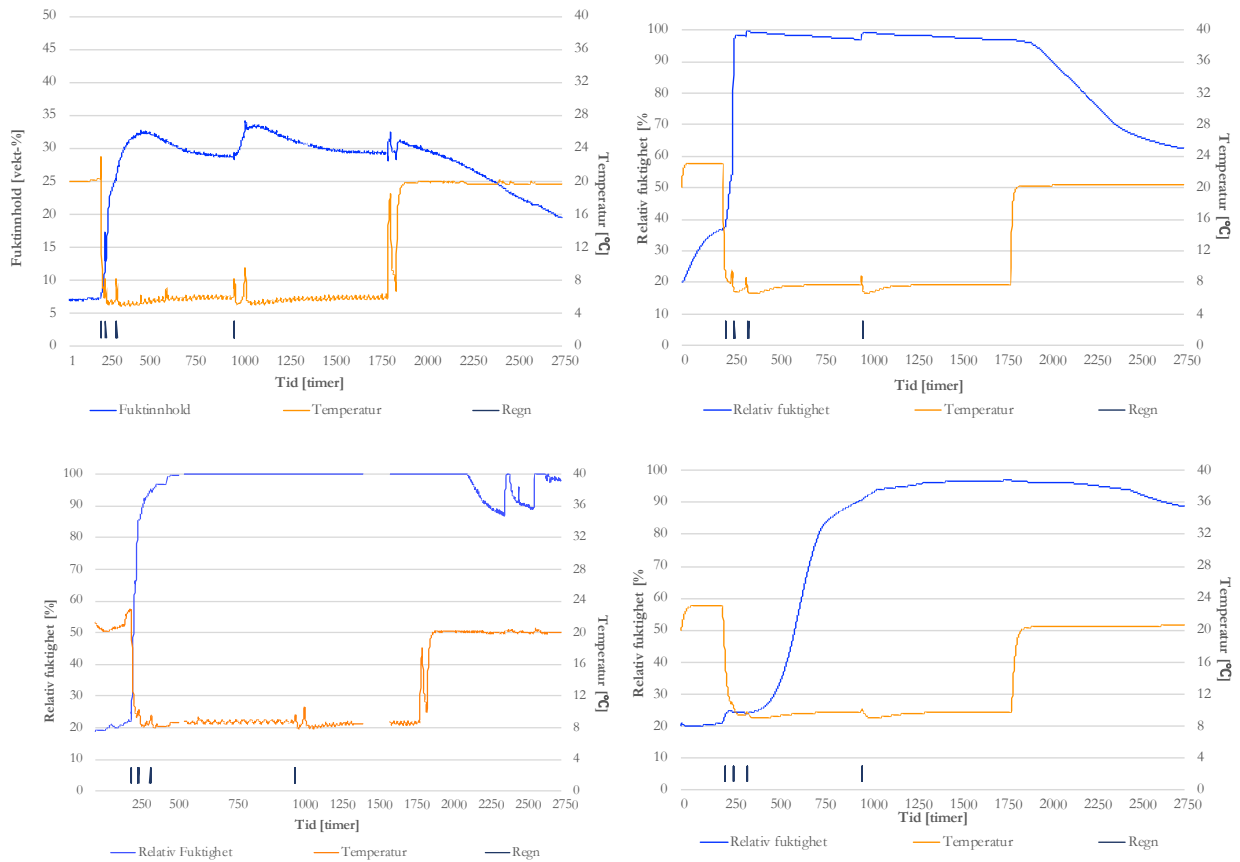


Figur 43: viser veggfelt 5 simulert med og uten dampsperre. Figuren viser resultater hentet fra innsiden av murverket ved RF43 og i bjelkeenden B5

Veggfelt 5 er også simulert uten dampsperre. Resultatene er vist i Figur 43 sammen med resultatene for simuleringen med justert heftsone ved RF43 på innsiden av murverket og B5 som er trebjelkeenden. Uten dampsperre øker den relative fuktigheten opp mot 90% allerede etter første regnpåkjenning, og mye raskere enn simuleringen med dampsperre. Det er også tydelig i tørkeperioden at det tørker mer i simuleringen uten dampsperreren enn den med. I trebjelkeenden ser ingen forskjell med og uten dampsperre. Dette kan skyldes at dampsperreren ikke dekker bjelkeenden.

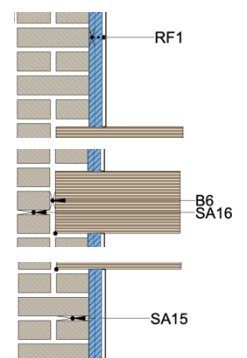


## Veggfelt 6

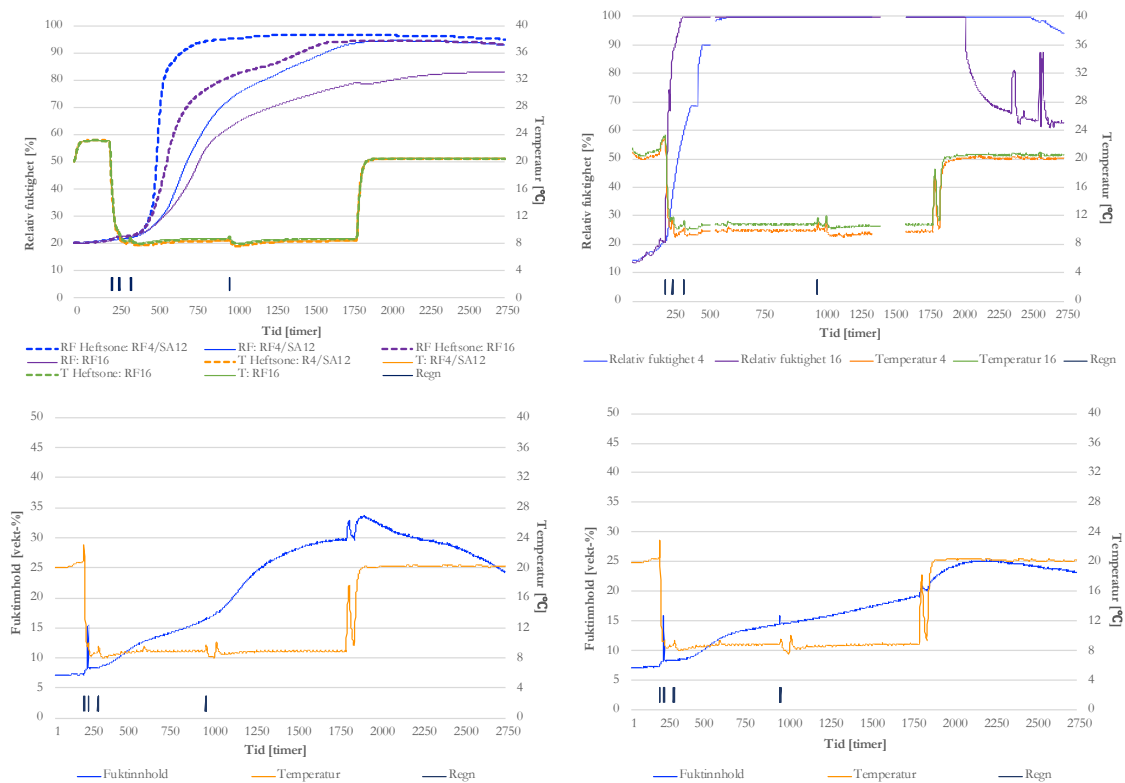


Figur 44: Resultater fra laboratoriet (til venstre) og WUFI simulering (til høyre). Fra sensor SA16 (øverst) og RF1 (nederst). SA16 er plassert i den ytterste horisontale mørtelfuger og RF1 er plassert på innsiden av murverket i veggfelt 6. Legg merke til at SA16 er oppgitt i fuktinnhold i vekt-% fra laboratorie-målingene.

Simulering av veggfelt 6 med og uten heftsonejustering viser de samme forbedringene som for veggfelt 2 og 5. Med justert heftsone går fuktopptaket i veggfeltet raskere og har det mest like forløpet som sensorene målt i laboratoriet. I simuleringen med heftsonejustering er det likevel fortsatt de samme ulikhetene som i simuleringen av veggfelt 5; innover i veggfeltet går relativ fuktighet saktere opp enn i laboratoriet og i bjelkeenden er det gjennom hele forløpet 10%-poeng lavere relativ fuktighet i WUFI® 2D enn i måledataen fra sensoren. Temperaturen er i motsetning til veggfelt 2 lavere i klimasimulatoren enn i WUFI® 2D.



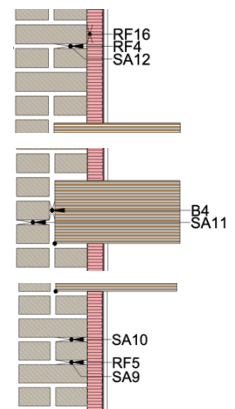
## Veggfelt 4

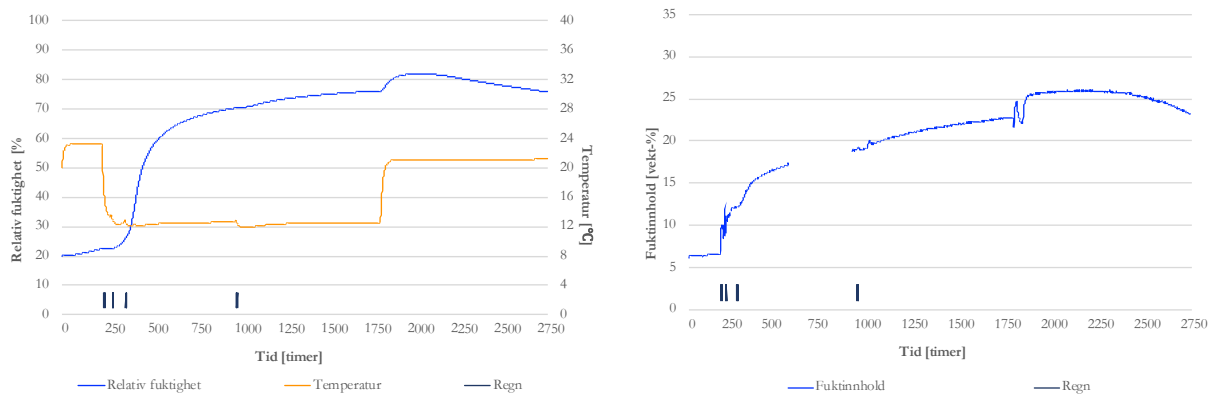


Figur 45: viser simulering av veggfelt 4 med justert heftsone (øverst til venstre) ved RF4 og RF16. Siden SA12 og SA9 er plassert i samme dybde som RF4 kan simuleringen sammenlignes her også. Resultater fra laboratoriet ved SA12 (nederst til venstre) og SA9 i (nederst i høyre hjørne) samt RF4 og RF16 (øverst til høyre) er lagt ved for sammenligning. Legg merke til at målingene fra Sahlén sensorene er i fuktinnhold i vekt.%.

Veggfelt 4 med 50 mm Kooltherm isolasjon er også simulert til tross for usikker materialdata for Kooltherm. Simuleringen uten justering for heftsone stemmer mye bedre overens med Sahlén sensorene SA9 og SA12. Dette er også de to sensorene som viste den tregeste økningen i relativ fuktighet i laboratorieforsøket.

Med heftsonejustering er simuleringen likere på de fleste sensorplasseringene, med unntak av SA9 og SA12. Ved RF4 viser både simuleringen og måledata at den relative fuktigheten overstiger 90% etter de første regnpåkjenningene og at det er lite nedgang i relativ fuktighet i løpet av tørkeperioden. Det er fortsatt en temperaturdifferanse på 1-2,5 grader i gjennomsnitt mellom simulering og måledata ved alle sensorplasseringer. En mulig forklaring kan være at feilmarginen i temperatur- og RF-sensorene spiller inn ettersom forskjellen er størst i disse sensorene. En annen mulig forklaring er at den termiske konduktiviteten til materialene ved høy relativ fuktighet i simuleringen differensierer fra det virkelige materialet.



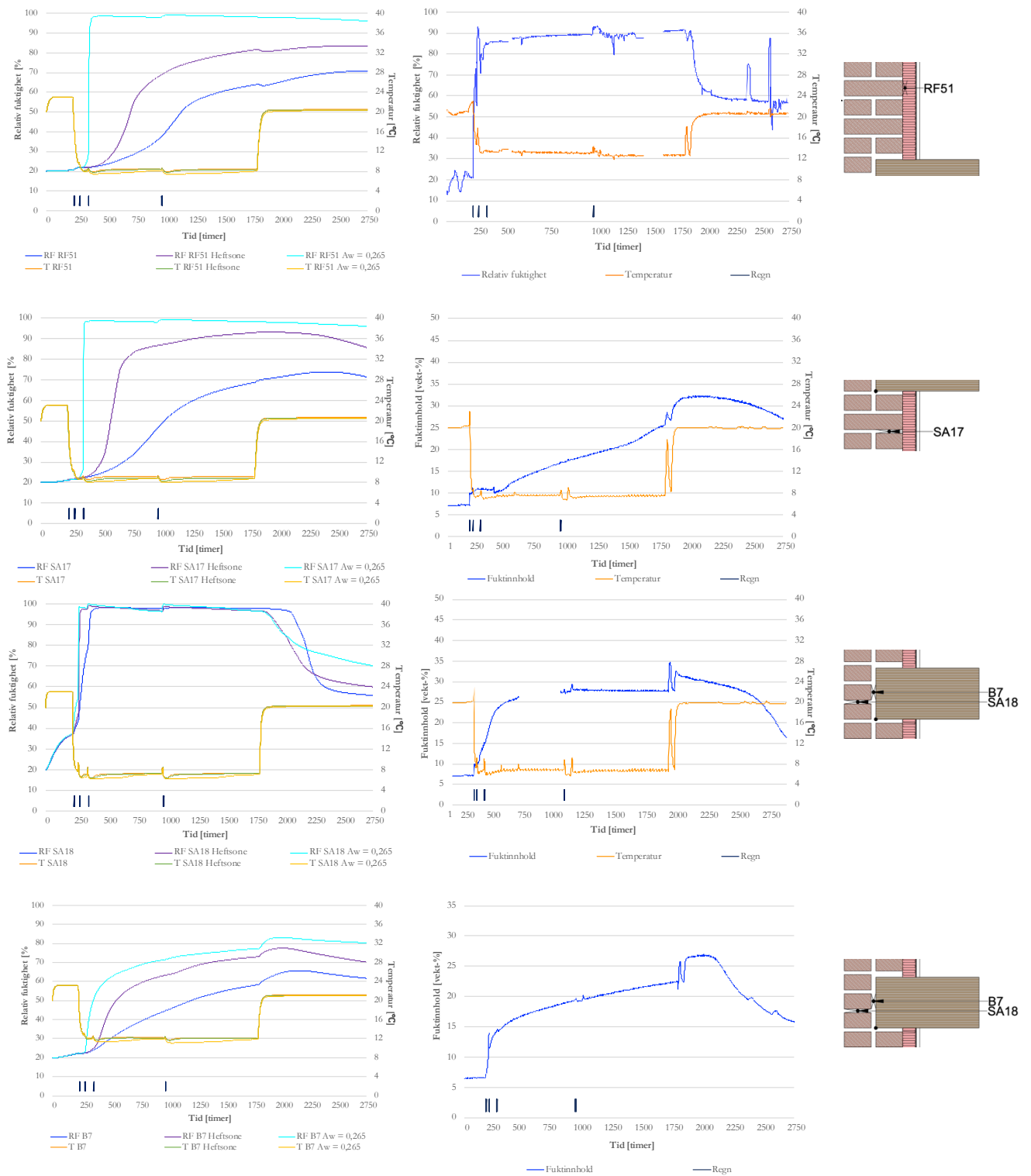


Figur 46: Bjelkeende 4 simulert i WUFI® 2D og resultatene fra samme bjelkeende i laboratoriet oppgitt i fuktinnhold i vekt-%

I bjelken ser vi også i veggfelt 4 at den relative fuktigheten er høyere i laboratoriemålingene enn i simuleringen. Det er verdt å merke seg at simuleringen viser den samme økningen av relativ fuktighet etter at tørkeperioden har begynt.

### 5.2.3 Simulering av rød teglstein

Det er som nevnt en del usikkerhet knyttet til materialegenskapene til både den røde teglsteinen og Kooltherm isolasjonsplater. På grunn av begrenset tid er dette ikke gjort tilstrekkelig undersøkelser av de hygrotermiske egenskapene til disse to materialene. Det er likevel gjennomført noen simuleringer av veggfeltene hvor disse to materialene er inkludert. I dette kapitlet er kun resultatene fra veggfelt 7 presentert, men resultater fra veggfelt 9 er tilgjengelig i Vedlegg D. Simuleringene er gjort med flere parameterendringer for å se om det er mulig å få til en simulering som sammenfaller med laboratoriemålingene. Parameterendringene er heftsonejustering som gjennomført for veggfeltene med gul teglstein som innebærer å endre den kapillære absorpsjonskoeffisienten til mørtelen i horisontalfuger og endring av teglsteinens kapillære absorpsjonskoeffisient  $A_w$ . Heftsonejusteringen er basert på undersøkelser som er gjort med en teglstein som ligner den Glatt Oker, så vil derfor egentlig ikke kunne anvendes for den røde teglsteinen. Disse simuleringene er kun gjort som en parameteranalyse og vil i mindre grad bli vektlagt i vurderingen av WUFI® 2D som beregningsverktøy.



Figur 47: sammenligner simuleringsresultater (til venstre) og resultatene fra laboratoriet (til høyre). Det er gjort tre simuleringer med rød teglstein som er presentert gjennom de fire sensorplasseringene i veggfelt 7. Øverst er SA18, deretter SA17, nest nederst er RF51 og nederst B7.

Som figuren viser er det et stort avvik mellom simulering og laboratoriemålingene i veggfelt7 som er murt med rød teglstein og har 50 mm Kooltherm isolasjon. Det er kjørt en simulering med regnpåkjønning, så en simulering for absorpsjonskoeffisienten til mørtelen i horisontalfugen er justert opp og til sist en simulering hvor absorpsjonskoeffisienten er justert opp til  $A_w = 0,265$ . Ved den første simuleringen viser SA18 at det er gåt tregere å tørke ut den røde teglsteinen i WUFI® 2D, mens oppfuktingen går raskere. Det er tar omtrent 300 timer etter at tørkingen har begynt får man ser en reell nedgang i relativ fuktighet. Lenger inn i veggfeltet ved plasseringen til SA17 er det enda større differanse, etter 900 timer registrerer sensoren i laboratoriet et fuktinnhold tilsvarende  $RF = 75\%$ , mens simuleringen i WUFI viser  $RF = 40\%$  ved samme tidspunkt. I simuleringen oppnås det ikke høyere  $RF$  enn  $74\%$ , som er etter 2500 timer. Temperaturdifferansen er også tydelig her, da det er i gjennomsnitt  $1,5$  grad forskjell i temp, hvor WUFI ligger høyere i den kalde perioden. Også ved RF51 er det veldig stor differanse mellom simulering og måling i lab. Temperatur- og  $RF$  sensoren i laboratoriet følger innstillingene i klimakammeret i stor grad, med  $RF \approx 90\%$  gjennom den kalde perioden, og rask tørking når temperaturen i kammeret skrus opp. I WUFI derimot er det en mye lavere relativ fuktighet gjennom hele perioden, men fortsetter å stige gjennom hele perioden også når temperaturen skrus opp og ender på  $RF \approx 70\%$ . Fuktmåleren i bjelkeenden viser også de samme differansepunktene.

Det er de samme endringene i relativ fuktighet i veggfeltet ved den røde teglsteinen som den gule som følge av heftsonejusteringen, oppfuktingen går raskere. Ved SA18 tørker det mye fortere etter heftsonejusteringen og en del mer enn det gjør i måledataene,  $60\%$   $RF$  mot  $77\%$   $RF$  ved slutten av perioden. Ved RF51 er det fortsatt stor differanse i temperaturen. Det er rundt  $12$  grader gjennom den kalde perioden i laboratoriet, men bare  $8$  grader i WUFI. Det er også en mye mer gradvis økning i relativ fuktighet i WUFI® 2D enn det som måles i laboratoriet, hvor det raskt øker til  $90\%$   $RF$  som opprettholdes helt til tørkeperioden begynner. Etter det reduseres den relative fuktigheten kraftig. I WUFI® 2D stiger den relative fuktigheten gradvis gjennom hele perioden og stabiliserer seg ved  $RF = 80\%$  og holdes der ut tørkeperioden. Også B7 viser en mye lavere relativ fuktighet i WUFI enn det målingen i laboratoriet gjør,  $70\%$   $RF$  mot  $90\%$   $RF$

Ved å justere den kapillære absorpsjonskoeffisient,  $A_w$ , til teglsteinen fra  $0,0461$  til  $0,265$   $\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$  vil fukttransporten i teglsteinen øke. Dette viser også resultatene fra simuleringen med økt  $A_w$ . Den relative fuktigheten øker raskere etter justeringen som forventet. Ved SA17 øker  $RF$  for raskt i forhold til målingene fra laboratoriet, mens det i RF51 og B7 sammenfaller bedre etter justeringen. Med tanke på at Sahlén sensorene har en ilagt forsinkelse, tyder resultatene på at den kapillære absorpsjonskoeffisienten er satt for lav opprinnelig eller at sprekker og riss i murverket gjør at fukttransporten går raskere enn det materialeegenskapene tilsier ved testing.

#### 5.2.4 Generelle observasjoner fra simuleringene

Gjennom simuleringene observeres det jevnt over at oppfukting av veggfeltene går raskere i laboratoriet enn i simuleringene. Det er også jevnt over høyere relativ fuktighet i laboratoriet enn i simuleringene i WUFI® 2D. Dette kan forklares ved at fukt tas opp og transporteres gjennom sprekker og riss ettersom dette ikke er inkludert i simuleringen. Differansen mellom simulering og måledata ble mindre når det ble justert for effekten av heftsonen. En annen observasjon er den manglende reduksjonen i relativ fuktighet på innsiden av murverket i løpet av tørkeperioden i simuleringene. I måledataen fra laboratoriet er denne reduksjonen tydelig på nesten alle veggfelt, mens i simuleringen er det liten grad av tørking. Det er også tydelig en temperaturforskjell mellom simuleringene og laboratoriemålingene. Dette kan skyldes at ukorrekte materialdata angående hvordan den termiske konduktiviteten til materialene påvirkes av relativ fuktighet. Utenom de nevnte differansene viser simuleringene det samme forløpet som laboratoriemålingene, både i temperatur og relativ fuktighet. Det er også mulig ut fra simuleringene å identifisere en del anormale data fra sensormålingene. Til sist så er det i samtlige isolerte bjelkeender observert den samme økningen i relativ fuktighet ved begynnelsen av tørkeperioden som ble observert i laboratorieforsøket.

## 6 Diskusjon

Etter å ha gjennomført analyse av både resultatene fra laboratoriet og de numeriske beregningene i WUFI® 2D gjenstår det å se tilbake på forskningsspørsmålene som ble definert ved starten av arbeidet:

*Hvordan vil de hygrotermiske forholdene i en massiv murvegg utsatt for en gitt klimasekvens og slagregn avvike fra hverandre ut fra type teglstein og type isolasjon? Og vil en smart dampsperre bidra til lavere relativ fuktighet i denne typen yttervegger?*

Ut fra analysen av sensormålingene bekreftes forventningen fra eksisterende litteratur. Temperaturen i murvangen reduseres når det isoleres på innvendig side, er lavest i ytre del av murvangen i veggfeltene med størst varmemotstand. De fleste av målingene viser også et betydelig høyere fuktnivå i feltene med mest isolasjon sammenlignet med uisolerte eller mindre isolerte felt. Det er også funn som tyder på at den røde teglsteinen med mindre sug gir mer gunstige fuktforhold sammenlignet med den gule teglsteinen med høyt sug. De tre isolasjonsmaterialene som ble testet var alle dampåpne, men i ulik grad. Mineralull var den mest dampåpne av de tre, etterfulgt av aerogel og til sist Kooltherm isolasjonsplater. Veggfeltet med mineralull holdt lavest relativ fuktighet av de isolerte veggfeltene med gul teglstein, og var på samme nivå som veggfeltene med rød teglstein isolert med Kooltherm. Feltet med mineralull var det feltet som hadde lavest varmemotstand i isolasjonen. Feltene med aerogel hadde den høyeste relative fuktigheten, men holdt også en lavere temperatur grunnet en vesentlig større isolasjonsmengde med tanke på varmemotstand. Det er også i forsøket bygget opp to like veggfelt med smart dampsperre på den ene som eneste differanse. Disse to veggfeltene viser ved målingene av bjelkeenden at det er noe bedre uttørking i feltet med smart dampsperre enn uten dampsperre i det hele tatt. Dette tyder på at den smarte dampspærren tilpasser dampmotstanden og «tillater» tørking innover. Det er ikke funnet en forklaring på hvorfor reduksjonen av fukt i bjelken er større i veggfeltet med dampsperre. I den kalde perioden viser heller ingen av målingene entydig at det er mer fukt i veggfeltet uten dampsperre. Dette kan skyldes at majoriteten av fukten i veggen kommer fra slagregnet og ikke gjennom diffusjon fra innvendig side. Siden kun ett av feltene ikke hadde dampsperre er det ikke mulig å sammenligne med de andre feltene på dette punktet. Det er også generelt observert liten grad av tørking i veggfeltene som er isolert. Det gjelder spesielt sensorer i midten av murvangen og i bjelkeenden. Dette kan skyldes at det tar lenger tid for disse punktene å tørke ut og at lenger observeringstid ville vært nødvendig for å se effekten av den smarte dampspærren tilstrekkelig. Denne delen av forskningsspørsmålet blir derfor stående delvis ubesvart.



Det er gjennomgående i målingene er del resultater som ikke har kunnet forklares ut fra klimasekvensen og oppbygningen av veggfeltene. Noe av grunnen til dette er som tidligere nevnt en del avvik i målingene. Det er sensorer som er plassert i liknende plasseringer, men som viser stor differanse i relativ fuktighet. Dette er spesielt synlig i veggfelt 4 med sensor SA10 og SA9. Det er i tillegg en del operasjonelle utfordringer med klimasimulatoren som gjør resultatene mindre pålitelige. Dette inkluderer funksjonsfeil med ventiler, usikker regnmengde og manglende logger fra sensorene. Det er i tillegg funn i resultatene som tilsier at klimasekvensen i klimasimulatoren var for kort. Ved sammenligning av resultatene fra beregning av relativ fuktighet uten regn med Glaser-metoden og simulering i WUFI® 2D uten regn ser det ut til at tilnærmet stasjonære forhold ikke har blitt oppnådd i løpet perioden. Relativ fuktighet i WUFI® 2D stiger gjennom hele den kalde perioden og når ikke opp til samme nivå som for stasjonære forhold. Resultatene fra laboratorieforsøket viser i flere veggfelt også liten grad av tørking. For å få et bedre grunnlag for vurdering av dampspærren og risikoen for muggvekst ville det vært fordelaktig med en lengre tørkeperiode. Summen av dette gjør at funnene i forsøket blir usikre og lite brukervennlige til annet enn å se tendenser. Tendensene styrker som sagt allerede etablert kunnskap om innvendig isolering av massive murvegger.

Det andre forskningsspørsmålet som ble stilt i begynnelsen av arbeidet med masteroppgaven var:

*Vil en kunne simulere, med et numerisk beregningsverktøy, massive murte veggfelt med innvendig isolasjon utsatt for en gitt klimasekvens med tilstrekkelig nøyaktighet? Og kan numeriske beregninger brukes til å kvalitetssikre løsninger for innvendig isolering av massive murvegger?*

Simuleringene i WUFI® 2D har vært tidkrevende å få til på en tilfredsstillende måte. Resultatene har vært varierende og sensitive i forhold til materialegenskapene og andre innstillinger, så det har krevd mye tid for å samle inn de riktige inndataene og innstillingene. Materialegenskapene kan være sprikende selv innenfor samme materialtype, noe som gjør at empiriske tester av materialet som er brukt ofte er nødvendig. Det har også vært numeriske problemer gjennom beregningene på grunn av de store gradientene i en del av materialegenskapene. Her kan spesielt sorpsjonskurven til teglsteinen trekkes frem, som er veldig bratt i partiet mellom 98-100 % RF. Resultatene viser fortsatt at det er en del avvik mellom simulering og måledataen fra sensorene. Dette er også forventet; ettersom målingene fra sensorene også differensierer en del fra hverandre. I tillegg finnes det forenklinger som er gjort i WUFI® 2D beregningene. Det er som nevnt ikke inkludert variasjonene gjennom et materiale. Poresystemet til teglsteinen er forenklet til en gjennomsnittlig porøsitet og alt av sprekker og riss er ikke inkludert. Spesielt sprekker og riss kan være med på å forklare den raske økningen i relativ fuktighet på innsiden av murverket etter de første regnpåkjenningene.

Dette er en gjennomgående forskjell mellom simulering og måledata, hvor simuleringen viser en mer gradvis økning av RF. Gjennom simuleringene med økt kapillær absorpsjonskoeffisient,  $A_w$ , i mørtelen ble det tydelig at heftsonen har en effekt på fukttransporten i murverket. Når mørtel og teglstein mures sammen endres egenskapene til begge materialer. Tester gjort i forbindelse med doktorgradsarbeidet som denne oppgaven er en del av, viser at absorpsjonskoeffisienten til mørtelen i horisontalfugene øker drastisk når det mures mellom to teglsteiner med høyt sug. Tilpasningen av mørtelens absorpsjonskoeffisient i horisontale fuger resulterte i at simuleringene korrelerte mye bedre med målingene fra laboratoriet.

Resultatene viser generelt de samme tendensene som resultatene fra laboratorieforsøket viste. De feltene med mest varmemotstand i isolasjonssjiktet holder den laveste temperaturen, og den relative fuktigheten er høyest i de samme veggfeltene. Det er dog også målt en generelt høyere temperatur nær varm side i simuleringene enn i måledataen, og kaldere nær kald side. Dette antas å være en effekt av at den termiske konduktiviteten i murverket påvirkes i mindre grad av fukt enn det som er beregnet, eller at den termiske konduktiviteten til teglsteinene er lavere enn antatt. Det som ikke skjer i simuleringene er uttørking. Det er liten reduksjon i RF gjennomgående i alle feltene. Selv med lavere relativ fuktighet i utgangspunktet ender en del av veggfeltene i simuleringen på slutten av tørkeperioden med en høyere relativ fuktighet enn det som måles i laboratoriet. En mulig forklaring på dette er at den relative fuktigheten i gipsplaten med dampspærren ikke er høy nok for at diffusjonsmotstandsfaktoren, i simuleringen, reduseres nok til å tillate tørking innover. Siden WUFI® 2D ikke har mulighet for å legge inn diffusjonsmotstandsfaktor som er variabel med relativ fuktighet på to sider, er det valgt en middelvei. Derfor vil ikke dampspærren i simuleringen fungere helt likt som dampspærren i laboratoriet. Til sist er det også tydelig at simuleringene ikke viser de avvikene som laboratoriemålingen viste med tanke på funksjonsfeil hos ventiler eller klimainnstillinger som ikke var en del av den planlagte klimasekvensen.

Sammenligningen av resultatene fra simuleringen og resultatene fra laboratoriet viser at økningen i relativ fuktighet i bjelkeenden ved starten av tørkeperioden også er tydelig i WUFI® 2D. Dette tyder på at hypotesen om at økte relative fuktighetene er en effekt av at det skapes en partialtrykkgradient ved oppvarming av veggfeltet mellom den ytre delen av murvengen og bjelkeenden, og at dette i kombinasjon med væske i murverket som opprettholder en høy relativ fuktighet til tross for økt temperatur, kan stemme. I simuleringene er økningen synlig i alle veggfeltene og det kan derfor se ut til at dampåpenheten til isolasjonsmaterialet har mindre betydning for denne økningen.

For å svare på forskningsspørsmålet, så viser resultatene fra denne runden med simuleringer at ved å bruke materialdata fra empiriske tester eller andre troverdige kilder vil simuleringene gi et lignende resultat som resultatene fra et laboratorieforsøk. Om resultatene er tilstrekkelig nøyaktige vil avhenge av bruken. For å sammenligne ulike oppbygninger, vil simuleringer i

WUFI® 2D nok gi tilstrekkelig nøyaktig resultat. For å vurdere risikoen for fuktskader vil ikke resultatene fra denne runden med simuleringer være tilstrekkelig da det tydelig er et høyere fuktnivå i målingene fra laboratoriet i de fleste punkter, inkludert bjelkeenden. Når reduksjonen av fukt gjennom tørkeperioden heller ikke stemmer overens, vil det kunne fattes gale beslutninger angående innvendig isolering av massive murvegger med en WUFI® 2D-simulering som grunnlag. Det er likevel et godt verktøy i kombinasjon med andre metoder i vurderingen av ulike løsninger, da det nettopp fjerner en del feilkilder som oppstår i både laboratorieforsøk og i fullskala studier.

## 7 Konklusjoner og videre arbeid

### 7.1 Konklusjon

I denne oppgaven er det undersøkt effekten av innvendig isolering på massive yttervegger av mur. Det er analysert sensormålinger fra et laboratorieforsøk hvor ni veggfelter med ulik oppbygning er utsatt for en gitt klimasekvens i en klimasimulator. Det er i tillegg forsøkt å simulere det samme forsøket i det numeriske beregningsverktøyet WUFI® 2D, samt simulere variasjoner av forsøket gjennom varierende materialegenskaper og klima.

Resultatene fra laboratorieforsøket viser at innvendig isolering øker den relative fuktigheten og senker temperaturen i veggen, og øker dermed risikoen for fuktskader ved sammenligning av et uisolert veggfelt ved samme klimapåkjenning. Resultatene viser også at teglstein med høyere sug vil gi økt relativ fuktighet i veggen sammenlignet med teglstein med lavere sug. Det er videre observert at slagregnspåkjenningen står for en stor andel av fuktinnholdet i veggfeltene og forlenger uttørkingsperioden betraktelig. Det vil derfor kunne antas at tilstrekkelig regnbeskyttelse vil kunne være et effektivt tiltak for å øke fuktsikkerheten ved innvendig isolering. Det er også sett på effekten av smart dampsperre. I løpet av klimasekvensen registreres det lite tørking i veggfeltene, men det er heller ikke observert noe tydelig forskjell mellom veggfelt med og uten smart dampsperre. Dette tyder på at den smarte dampspærren tilpasser vandampmotstanden etter relativ fuktighet, men at en lengre tørkeperiode ville formodentlig gi bedre grunnlag for vurdering av smart dampsperre i denne typen vegger.

Det er videre oppdaget en del avvik i målingene i laboratoriet som antas å skyldes funksjonsfeil i utstyret og operasjonsfeil. Dette senker troverdigheten til målingene og gir et dårligere sammenligningsgrunnlag for de numeriske beregningene.

Gjennomføringen av de numeriske beregningene har vært tidkrevende med tanke på anskaffelse av tilstrekkelig nøyaktig materialdata og numeriske problemer i selve simuleringsverktøyet. Resultatene av simuleringene viser derfor, som forventet, et avvik fra målingene i laboratoriet. Ved justering for effekten av heftsonen mellom teglstein og mørtel i horisontale fuger ble de mest like resultatene oppnådd. Disse simuleringene fulgte samme forløp og hadde de samme tendensene som målingene fra laboratoriet, men med et generelt lavere fuktinnhold enn målingene fra laboratoriet viste. Det konkluderes derfor med at numeriske beregningsverktøy som WUFI® 2D kan med nok inndata gi resultater som er tilstrekkelig nøyaktige ved sammenligninger av løsninger for innvendig isolering murfasader. Det vil likevel ikke anbefales som eneste verktøy og grunnlag for beslutninger om innvendig isolering av eksisterende murte fasader.

## 7.2 Videre arbeid

I et videre arbeid med utfordringene med innvendig isolering av massive murvegger vil det basert på resultatene av denne oppgaven være flere undersøkelser som kunne vært interessant å gjennomføre. På grunn av det den ufullstendige konklusjonen angående bruken av smart dampsperre ville det vært interessant å logge sensorene i det varme klimaet i en enda lenger periode for å se hvordan de hygrotermiske forholdene i veggfeltene utviklet seg. Det kunne også vært interessant å se på forskjellen mellom et innvendig isolert veggfelt med smart dampsperre og ett med tradisjonell dampsperre.

I videre arbeid med bruk av WUFI® 2D vil det være fordelaktig å fortsette arbeidet med å kartlegge materialegenskaper og utføre parameteranalyser hvor materialegenskapene blir variert systematisk. Dette vil nok gi en bedre forståelse av hvordan numerisk beregning differensierer seg fra ekte bygningsmaterialer og bygningskomponenter. Lenger frem vil det også kunne være interessant å kjøre slike simuleringer med reelle, målte klimabelastninger over en lenger periode og sammenligne med resultater fra fullskala studier.

## 8 Referanseliste

- [1] IPCC, «GLOBAL WARMING OF 1.5 °C an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty,» IPCC, 2018.
- [2] T. H. Dokka, G. Hauge, M. Thyholt, M. Klinski og A. Kirkhus, «Energieffektivisering i bygninger – mye miljø for pengene!», SINTEF Byggforsk, Oslo, 2009.
- [3] K. I. Edvardsen, *Eldre yttervegger av mur og betong Metoder og materialer - 723.308*, SINTEF Byggforsk, 2017.
- [4] M. Thyholt, T. D. Pettersen, T. Haavik og B. J. Wachenfeldt, «Energy Analysis of the Norwegian Dwelling Stock. Subtask A - Internal working document,» International Energy Agency, 2009.
- [5] Direktoratet for byggkvalitet, «§ 14-3. Minimumskrav til energieffektivitet,» i *Byggteknisk forskrift (TEK17)*, 2017.
- [6] J. F. Straube, K. Ueno og C. J. Schumacher, *Measure Guideline: Internal Insulation of Masonry Walls*, North Texas: National Renewable Energy Laboratory (U.S.), 2012.
- [7] M. Harrestrup og S. Svendsen, «Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with wooden beams embedded in solid masonry brick façades,» *Building and Environment*, nr. 99, pp. 59-72, April 2016.
- [8] T. V. Rasmussen, «Post-insulation of existing buildings constructed between 1850 and 1920,» i *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings - 11th International Conference 2010*, 2010.
- [9] P. Blom, «Fuktsikker innvendig etterisolering av mur- og betongvegger,» SINTEF akademisk forlag, Oslo, 2014.
- [10] M. Harrestrup og S. Svendsen, «Full-scale test of an old heritage multi-storey building undergoing energy retrofitting with focus on internal insulation and moisture,» *Building and Environment*, nr. 85, pp. 123-133, 2015.
- [11] T. V. d. Brande og S. R. Bert Blocken, «Rain water runoff from porous building facades: Implementation and application of a first-order runoff model coupled to a HAM model,» *Building and Environment*, nr. 64, pp. 177-186, Juni 2013.
- [12] M. Langvik, «Fasaderehabilitering 2009 : mur-, puss- og malerarbeider på fasader av murverk og betong : en håndbok fra Norsk puss- og mørtelforening,» Norsk puss- og mørtelforening, Oslo, 2009.
- [13] H. Balje, «MURKATALOGEN - Rehabilitering og vedlikehold av murte fasader - Anvisning P6,» Mur-senteret, Oslo, 2003.
- [14] E. Biseniece, G. Zogla, A. Kamenders, R. Purvins, K. Kass, R. Vanaga og A. Blumberga, «Thermal performance of internally insulated historic brick building incold climate: A long term case study,» *Energy and Buildings*, nr. 152, p. 577–586, 1 Oktober 2017.
- [15] M. Uranjekab og V. Bokan-Bosiljkovic, «Influence of freeze–thaw cycles on mechanical properties of historical brick masonry,» *Construction and Building Materials*, nr. 84, pp. 416-428, 1 June 2015.
- [16] S. P. Rosanne Walker, «Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings,» *Building and Environment*, nr. 94, pp. 155-165, Desember 2015.

- [17] H. Næve, *Energioppgradering av eldre murbygninger*, B. Stig Geving, Red., Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for bygg, anlegg og transport, 2015.
- [18] T. D. Mets, A. Tilmans og X. Loncour, «Hygrothermal assessment of internal insulation systems of brick walls through numerical simulation and full-scale laboratory testing,» *Energy Procedia*, nr. 132, pp. 753-758, Oktober 2017.
- [19] H. Viitanen, J. Vinha, K. Salminen, T. Ojanen, R. Peuhkuri, L. Paajanen og K. Lähdesmäki, «Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures,» *Journal of Building Physics*, nr. 33, pp. 201-224, 21 August 2009.
- [20] J. V. Thue, *Bygningsfysikk, Grunnlag*, Bergen: Fagbokforlaget, 2016.
- [21] S. Geving og J. V. Thue, *Håndbok 50 - Fukt i bygninger*, Oslo: Norges byggforskningsinstitutt, 2002.
- [22] Fraunhofer IBP, «WUFI Pro Manual,» 2019.
- [23] A. Tveit, *Fukt og fukttransport i porøse materialer*, Oslo: Statens byggforskningsinstitutt, 1964.
- [24] H. M. Künzl, *Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1995.
- [25] Fraunhofer, «Details:Physics: Moisture Transport in Building Materials,» Fraunhofer, 2009. [Internett]. Available: <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Physics>. [Funnet May 2019].
- [26] M. Krus, *Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1996.
- [27] Mursentret, *Murkatalogen : Perm 1 : Produkter. Materialegenskaper*, Oslo: Mursentret, 1985-2007.
- [28] Vereecken, Evy og S. Roels, «Hygric performance of a massive masonry wall: How do the mortar joints influence the moisture flux?,» *Construction and Building Materials*, nr. 41, pp. 697-707, 2013.
- [29] H. Janssen, H. Derluyn og J. Carmeliet, «Moisture transfer through mortar joints: interface resistances or hygric property changes ?,» i *12th Symposium for Building Physics*, Dresden, 2007.
- [30] Saint-Gobain Byggevarer as, «YTELSESERKLÆRING Nr. DoP-NO-M28069789 Versjon 1,» Oslo, 2013.
- [31] SINTEF Byggforsk, «Teknisk Godkjenning 20321,» SINTEF Byggforsk, Trondheim, 2014.
- [32] A. Samuelsson, «Resistanskurvor för elektriska fuktkvotsmätare,» TräteknikCentrum, Stockholm , 1990 .
- [33] H. Forsén og V. Tarvainen, «Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters,» VTT TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND, Espoo, 2000.
- [34] Ametherm, Inc. , «NTC Thermistors Steinhart and Hart Equation,» 2013. [Internett]. Available: <https://www.ametherm.com/thermistor/ntc-thermistors-steinhart-and-hart-equation>.
- [35] M. Matus, «Temperature Measurement in Dimensional Metrology – Why the SteinhartHart Equation works so well,» i *MacroScale 2011*, 2013.

- [36] WebPlotDigitizer, «WebPlotDigitizer - Web application,» 2019. [Internett]. Available: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>.
- [37] P. Johansson, S. Geving, C.-E. Hagentoft, B. P. Jelle, E. Rognvik, A. S. Kalagasidis og B. Time, «Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations,» vol. 79, nr. September, 2014.
- [38] A. M. Waldum, Murte teglvegger og rentetthet., Trondheim: Institutt for husbyggingsteknikk, NTH, 1985.
- [39] Standard Norge , «NS-EN ISO 13788:2012,» Standard Norge , Oslo, 2013.
- [40] R. Schirmer, «,» i *Die Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft-Gemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit*, VDI Verlag , 1938, pp. 170-177.
- [41] J. I. Knarud og S. Geving, «Comparative study of hygrothermal simulations of a masonry wall,» *Energy Procedia* 132, nr. 132, p. 771–776, 2017.
- [42] KRDs arbeidsgruppe for energieffektivisering av bygg, «Energieffektivisering av bygg. En ambisiøs og realistisk plan mot 2040,» Kommunal- og regionaldepartementet, 2010.
- [43] M. Morelli, *Development of a method for holistic energy renovation*, Lyngby: Technical University of Denmark, 2013.
- [44] P. Blom, Artist, *Figur 3.1*. [Art]. SINTEF Byggforsk, 2014.
- [45] N. p.-o. mørtelforening, Artist, *Figur 4.2.1: Illustrasjon av fuktvandring i veggoverflaten*. [Art]. Norsk puss- og mørtelforening, 2009.
- [46] SINTEF Byggforsk, «723.235 - Murte fasader - skader og utbedringalternativer,» SINTEF Byggforsk, 2013.
- [47] SINTEF Byggforsk, «Byggforskserien 421.132,» SINTEF Byggforsk.
- [48] «Fuktmekanikk,» [Internett]. Available: <http://www.bygningsfysikk.no/Fuktmekanikk.php>. [Funnet 21 11 2018].
- [49] Isola, «Isola AirGuard® Smart,» [Internett]. Available: <https://www.isola.no/produkter/vegg/dampsperrer/isola-airguard-smart/>. [Funnet 15 05 2019].
- [50] H. Forsén og V. Tarvainen, «Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters,» VTT PUBLICATIONS, Espoo, 2000.
- [51] Fjellvåg, Helmer og M. Ystenes, «Ideal gass,» Stor norske leksikon, 2 mai 2019. [Internett]. Available: [https://snl.no/ideal\\_gass](https://snl.no/ideal_gass). [Funnet 12 februar 2019].



## **9 Vedlegg**

### **A – Sensormålingene fra laboratorier**

- **A.1 : Temperatur- og relativ fuktighet – sensorene**
- **A.2 : Sahlén– sensorene**
- **A.3 : Fuktmålerne i bjelkeendene**

### **B – Glasers metode: beregning av relativ fuktighet uten regn**

### **C – Inndata WUFI® 2D – materialeegenskaper**

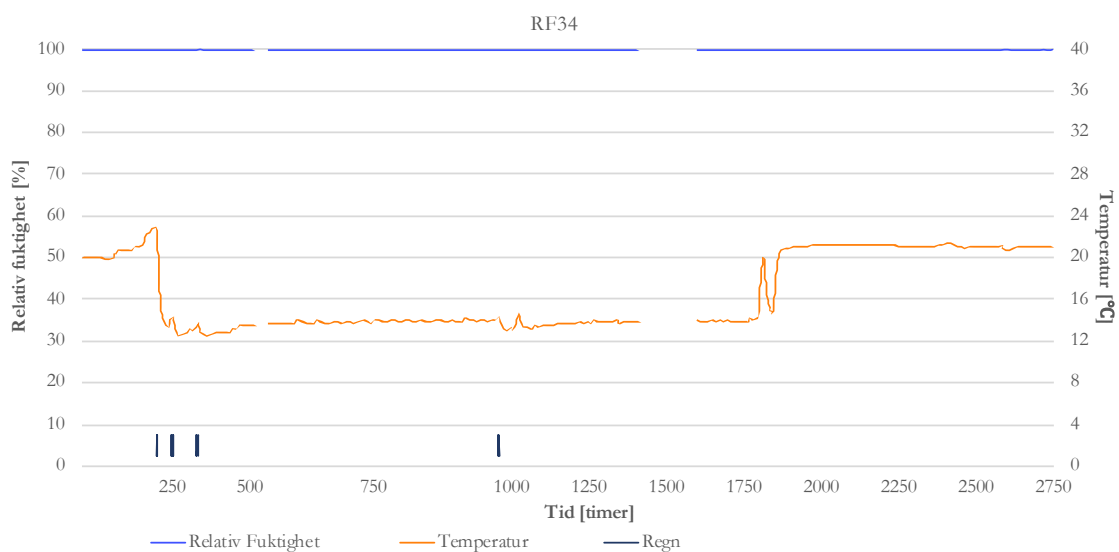
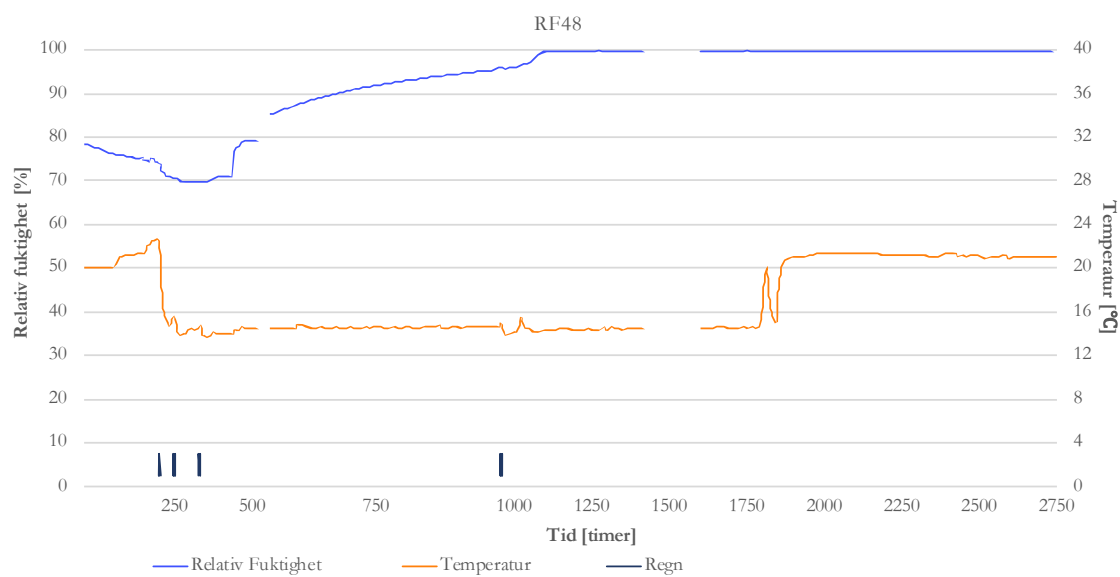
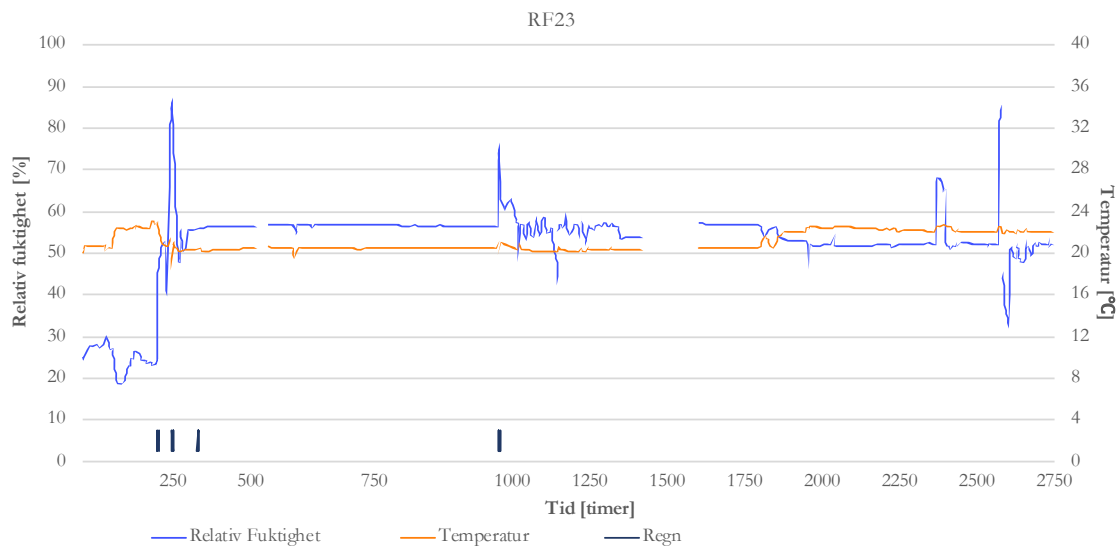
### **D – Resultater fra simuleringene i WUFI® 2D**

## **Vedlegg A.1**

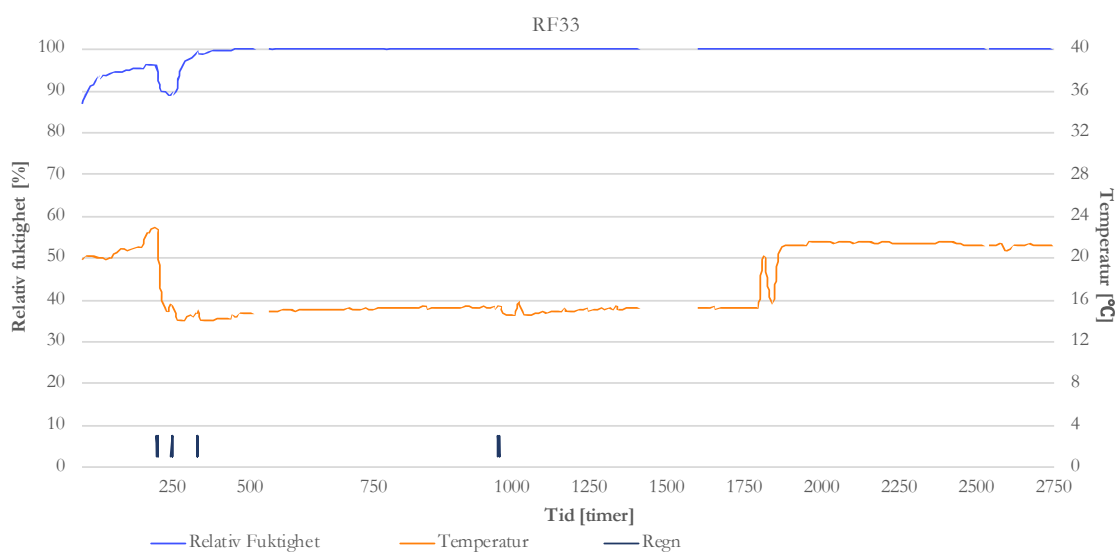
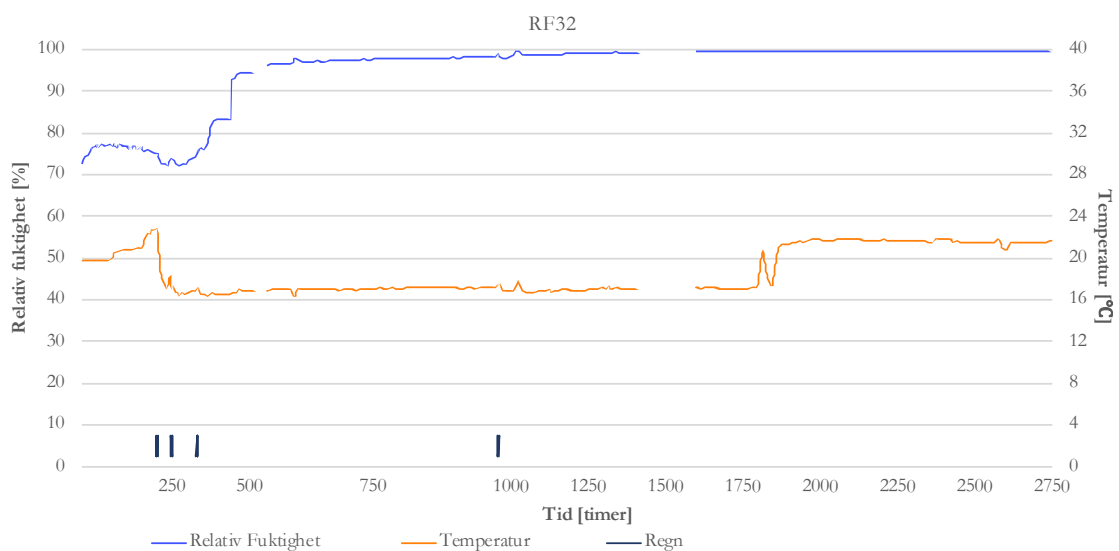
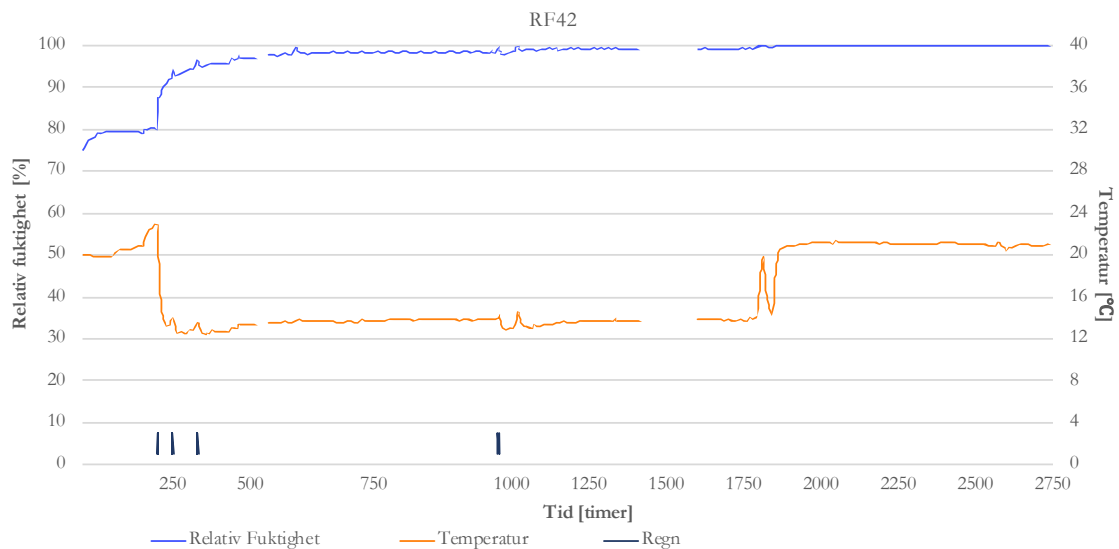
**Måling fra Temperatur- og relativ fuktighetssensorer**

**Veggfelt 1-9**

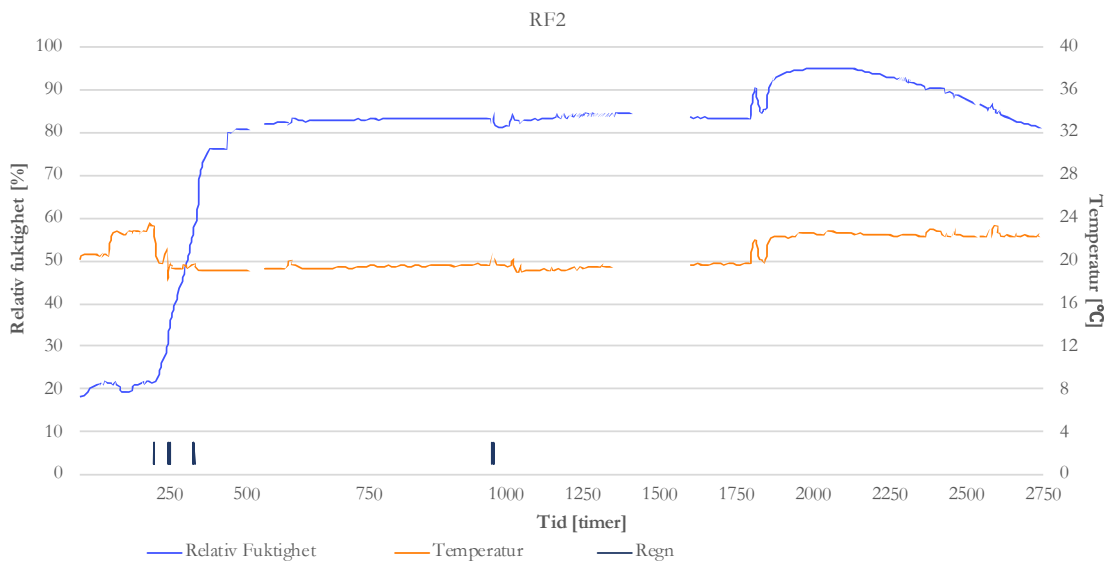
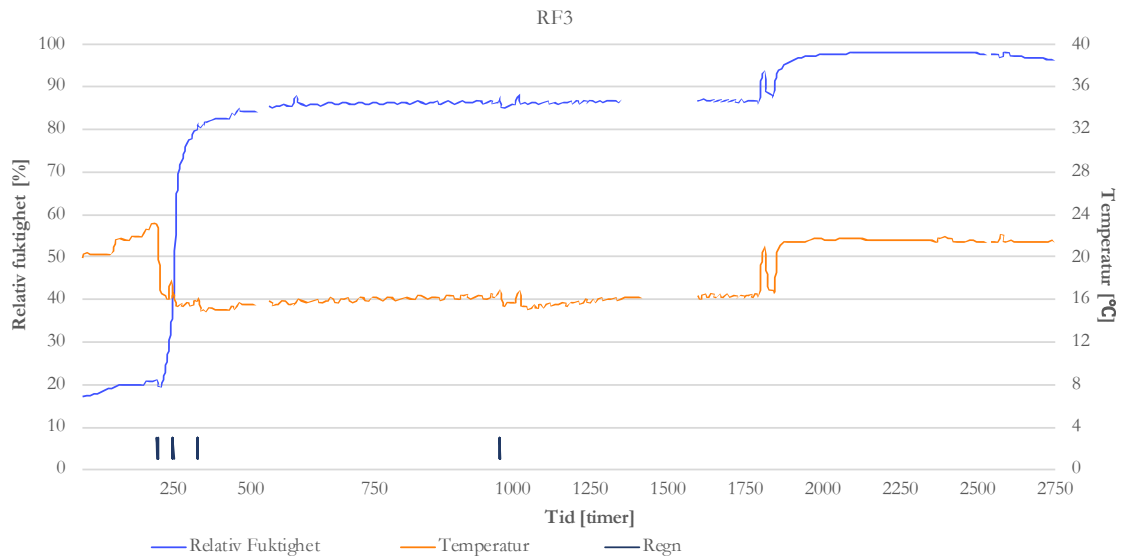
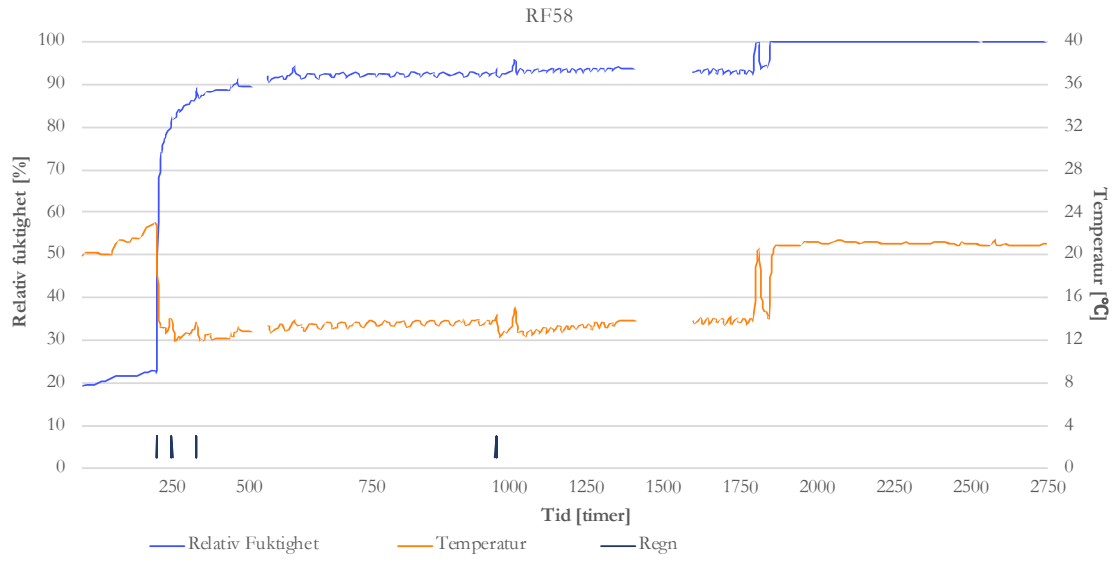
# Veggfelt 1



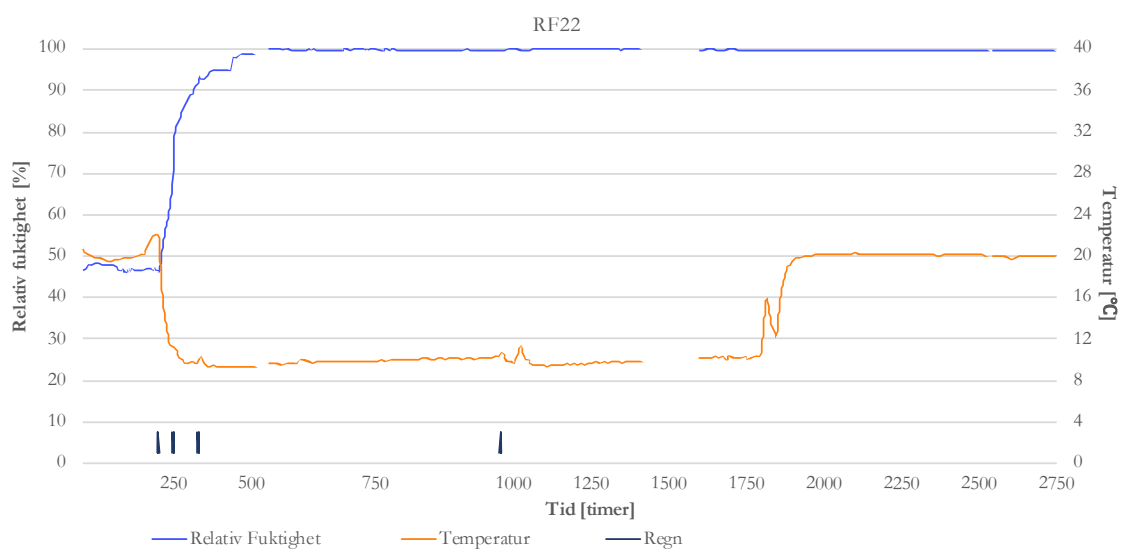
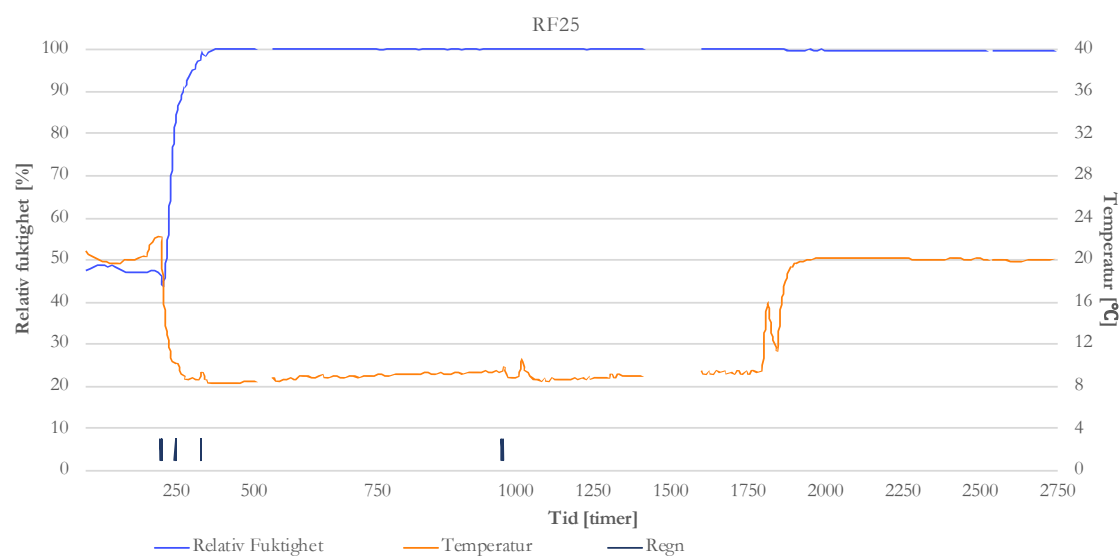
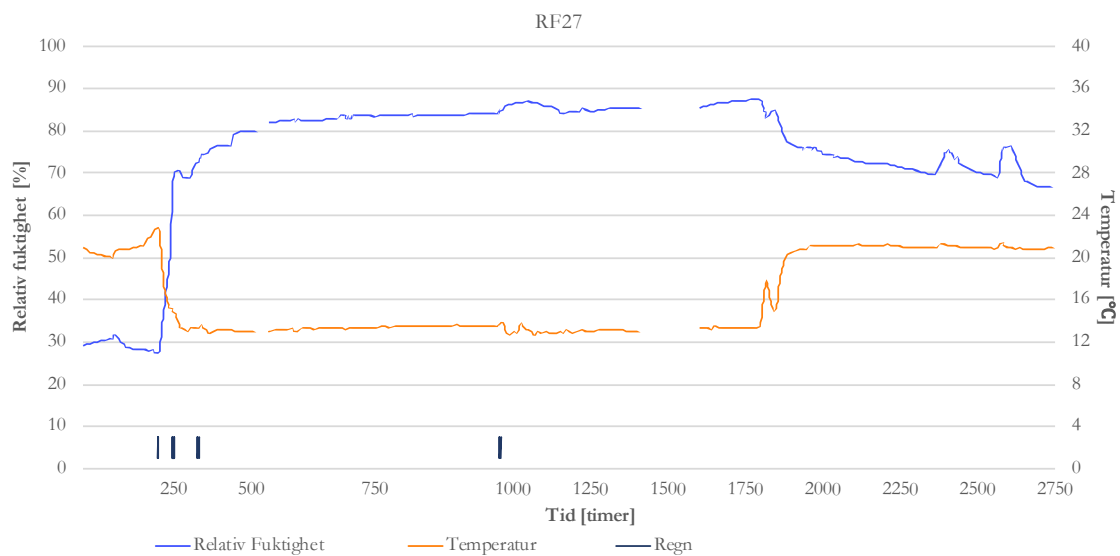
# Veggfelt 1



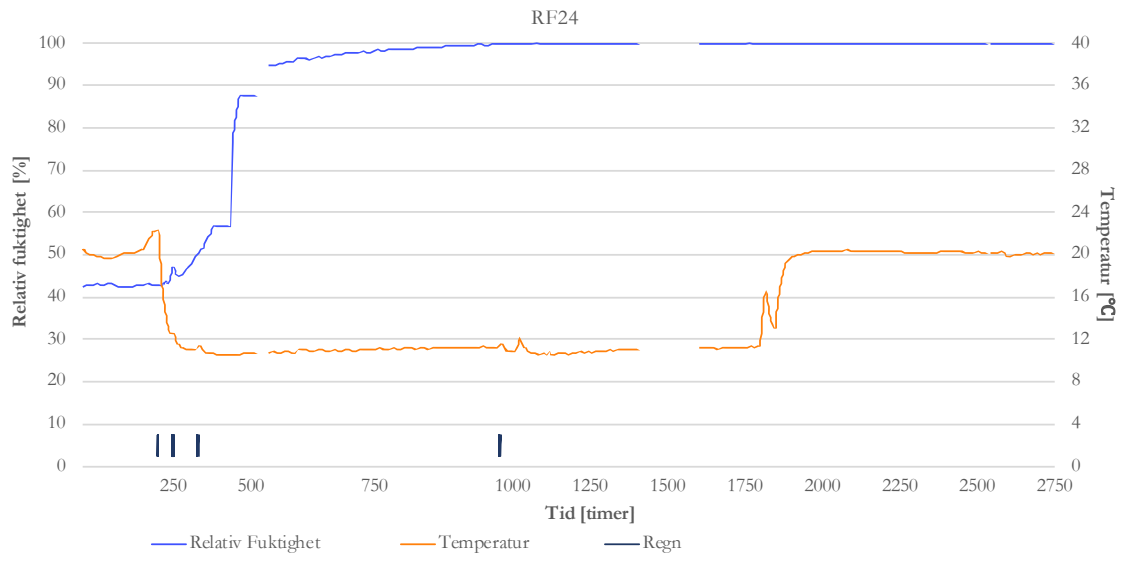
## Veggfelt 2



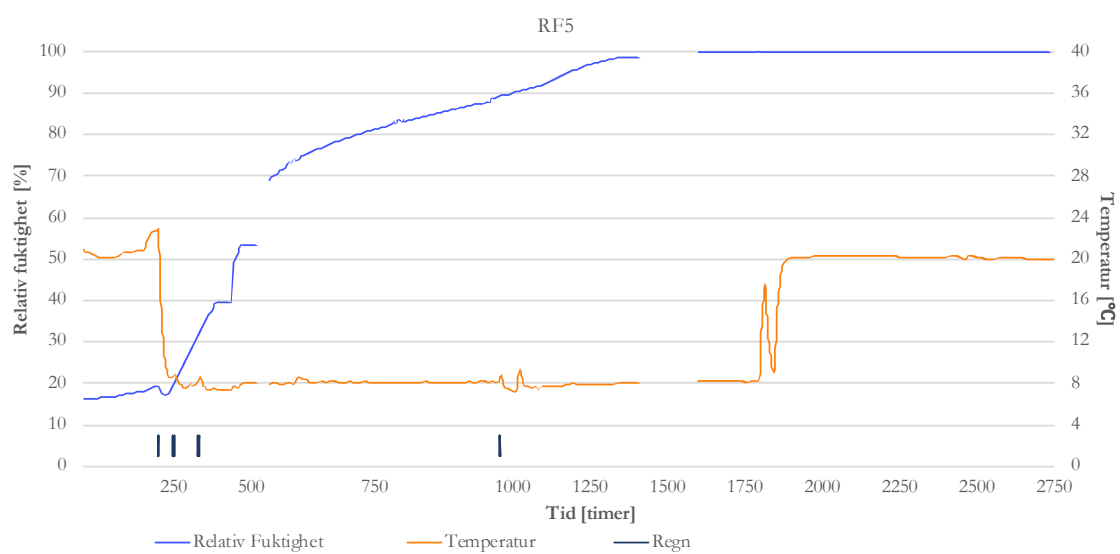
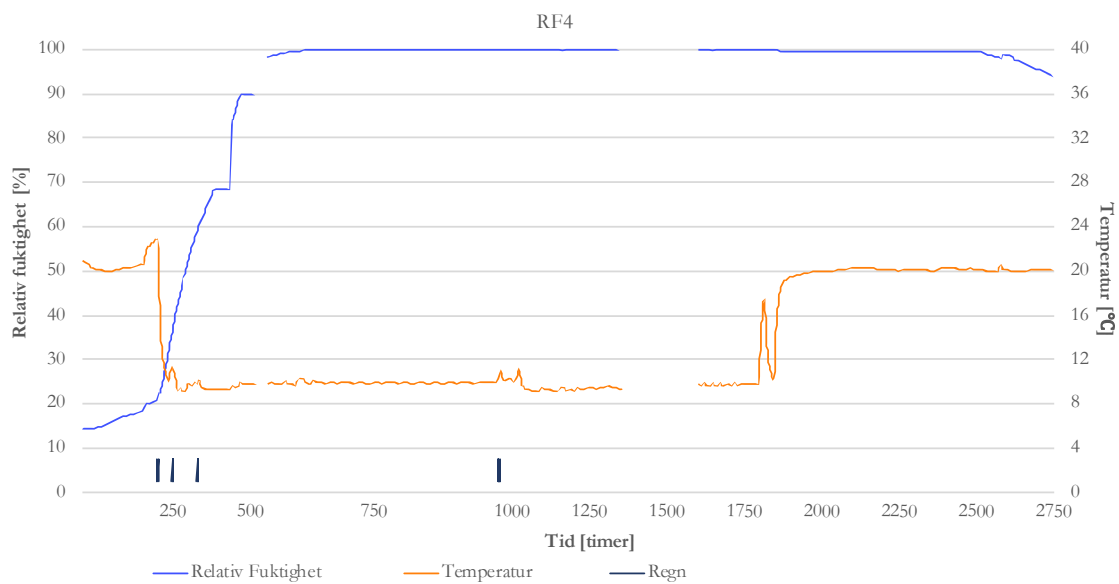
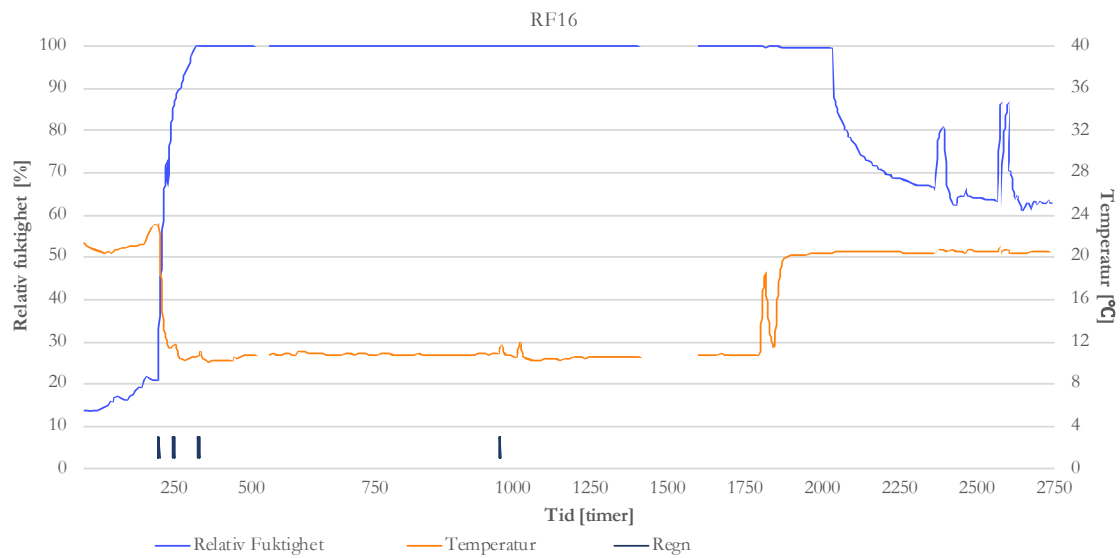
### Veggfelt 3



### Veggfelt 3

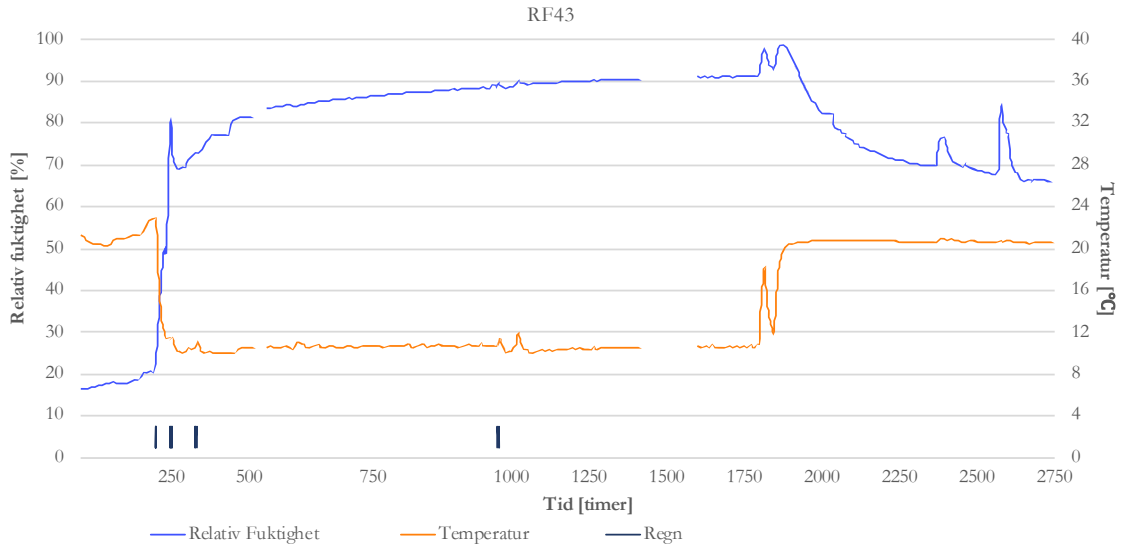


# Veggfelt 4

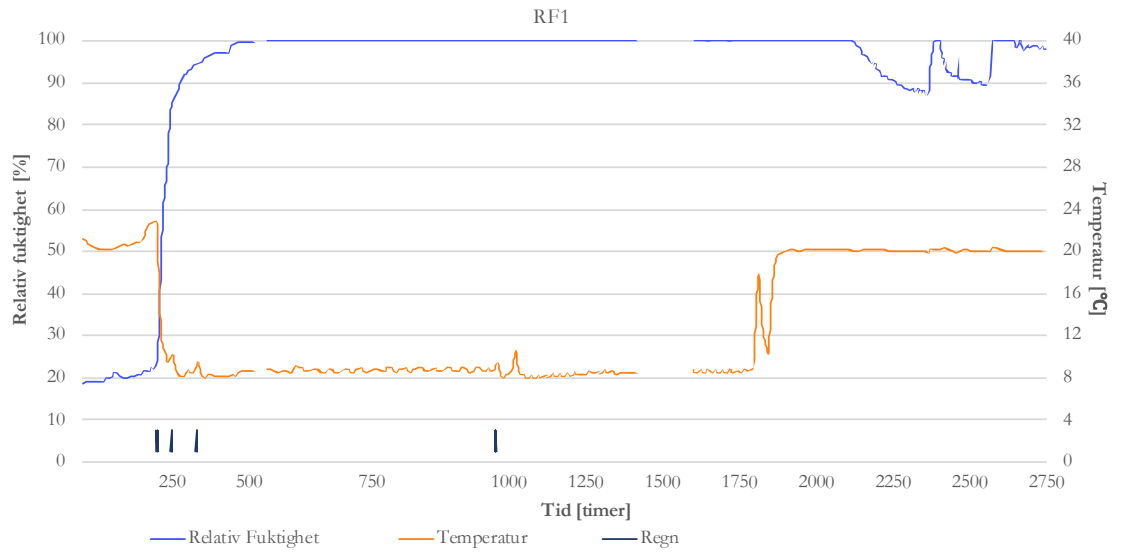




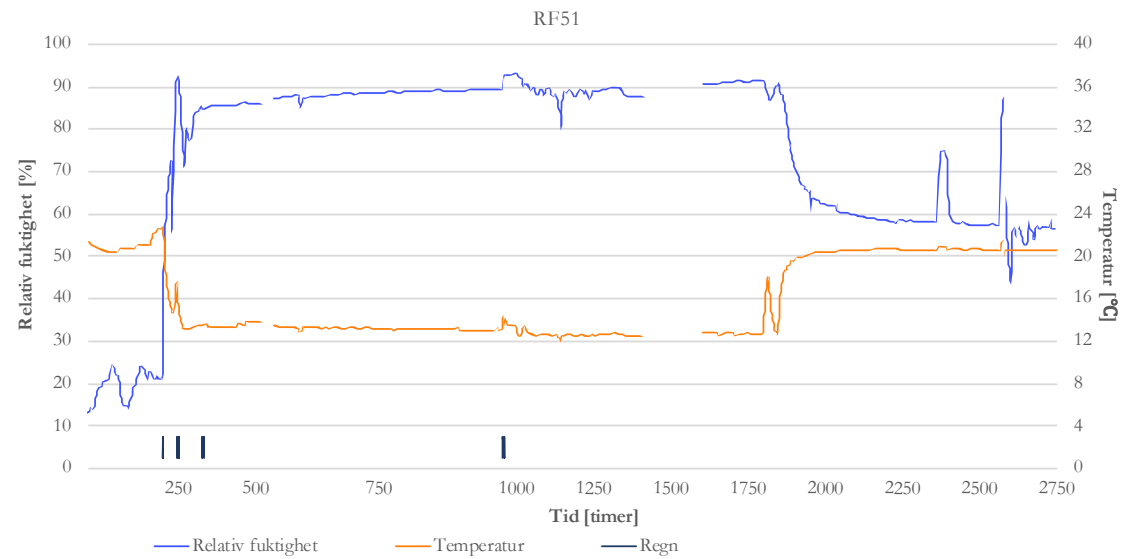
### Veggfelt 5



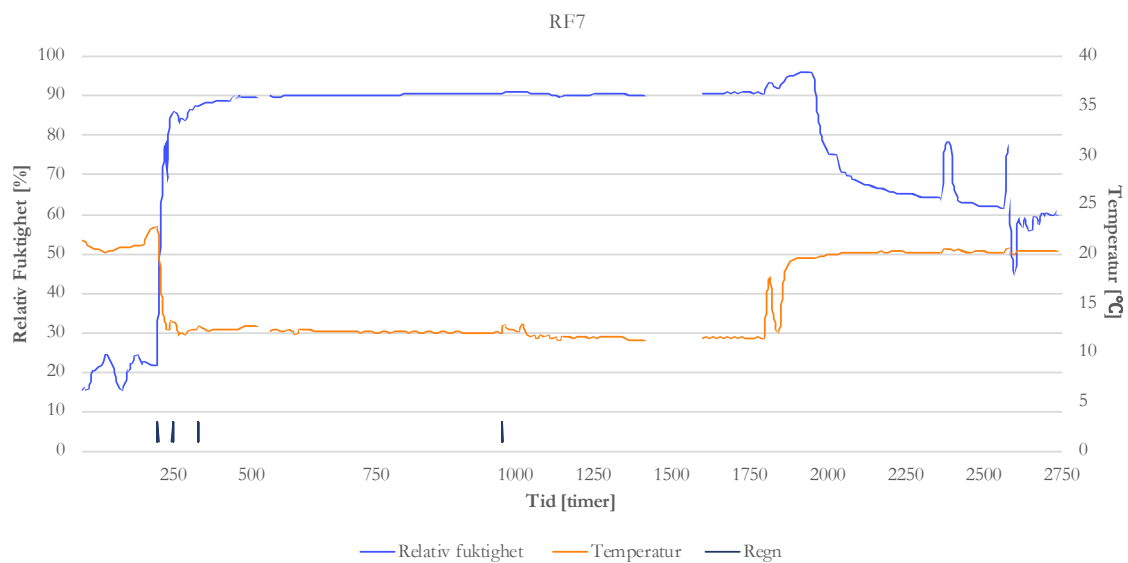
### Veggfelt 6



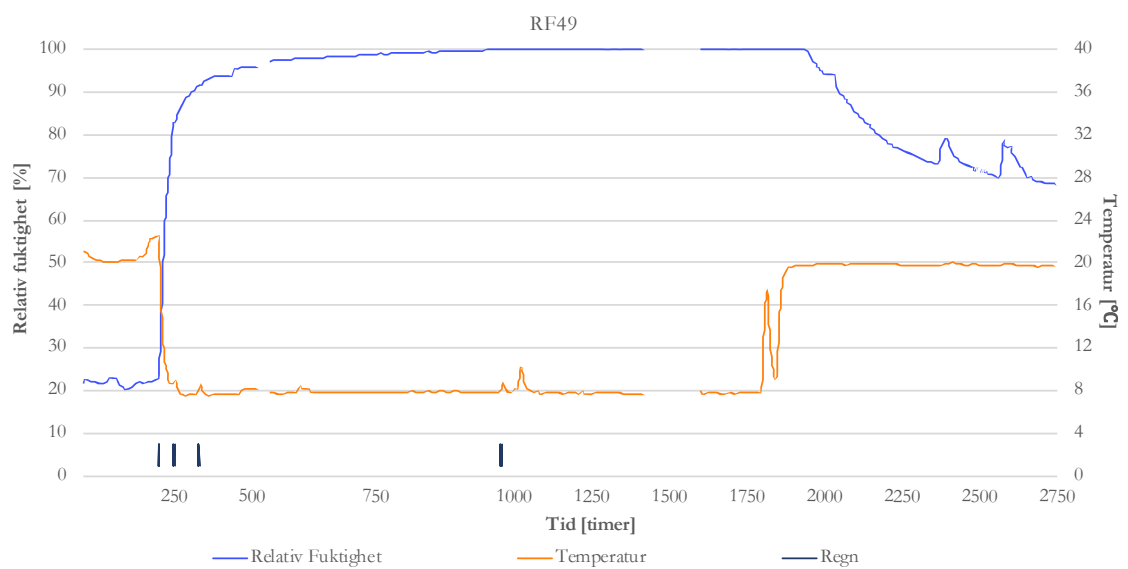
### Veggfelt 7



## Veggfelt 8



## Veggfelt 9

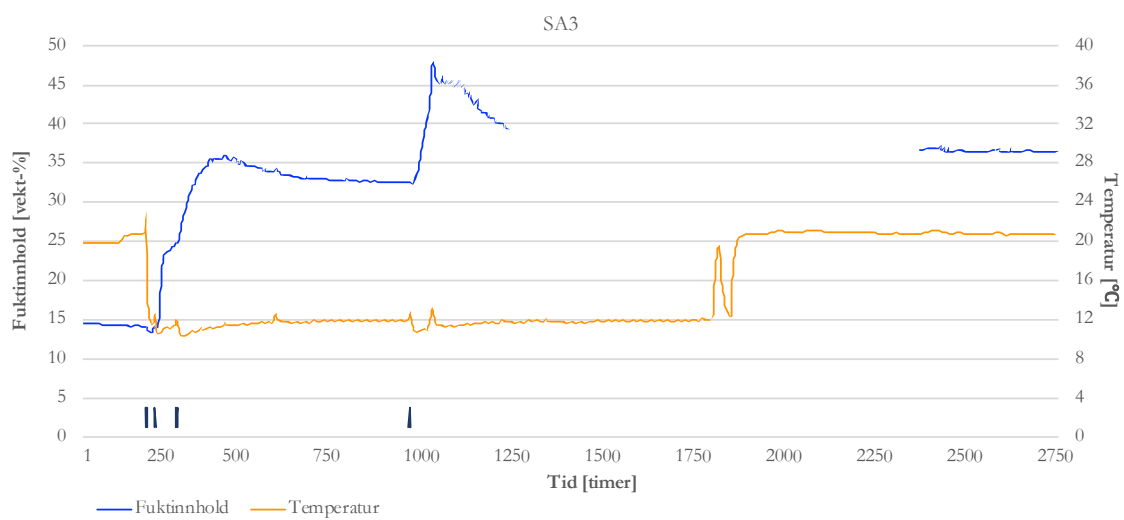
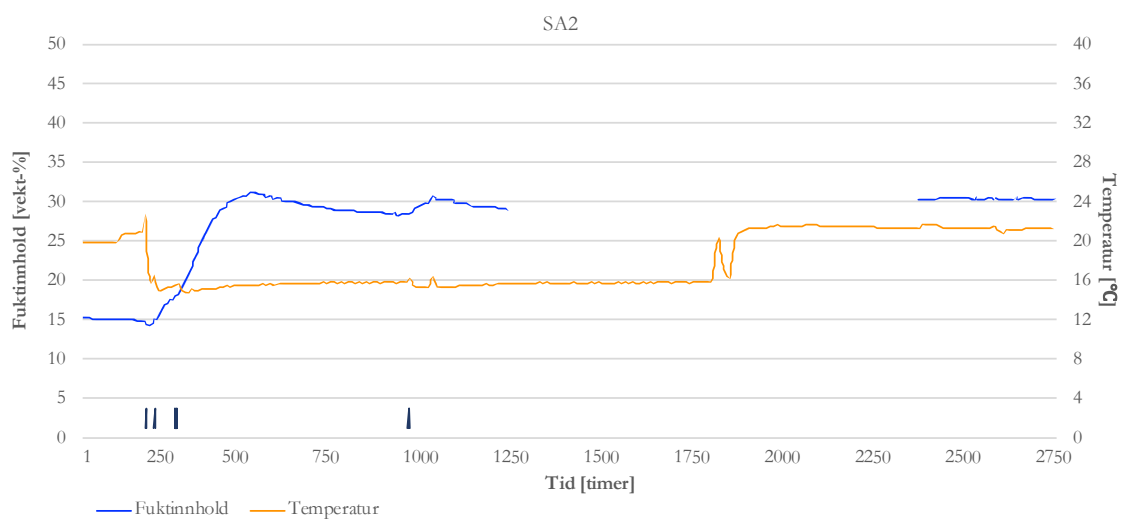
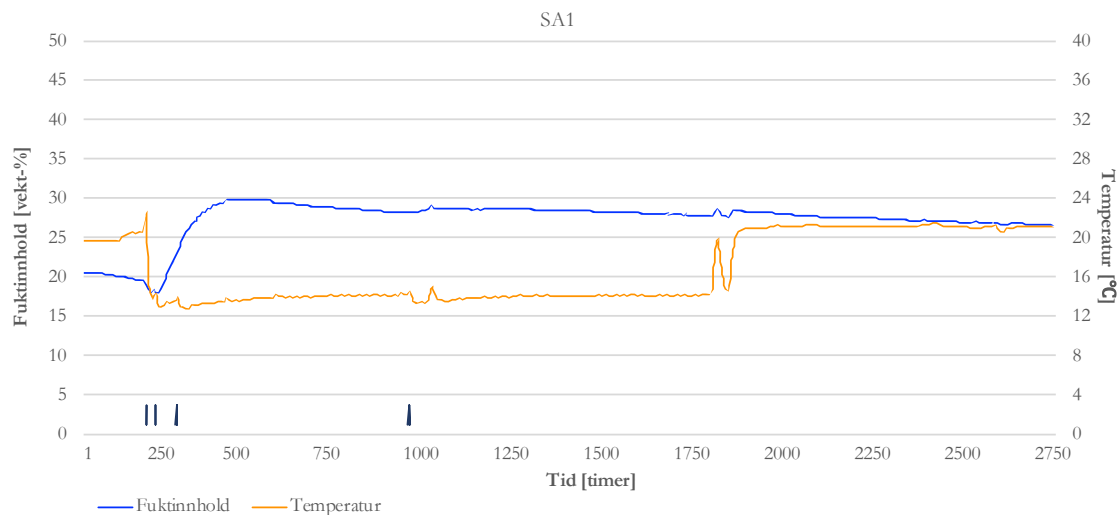


## **Vedlegg A.2**

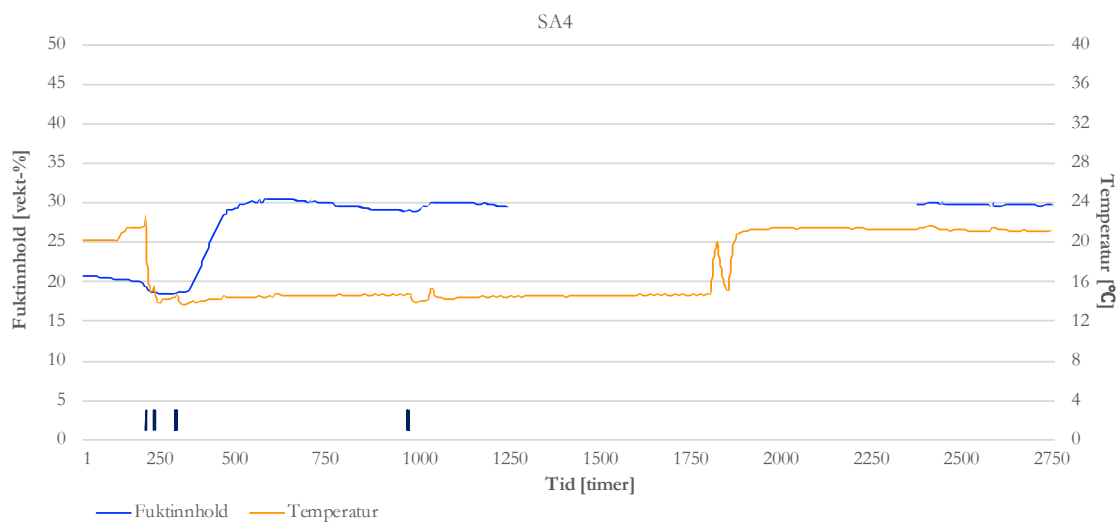
**Måling fra Sahlén sensorer**

**Veggfelt 1-9**

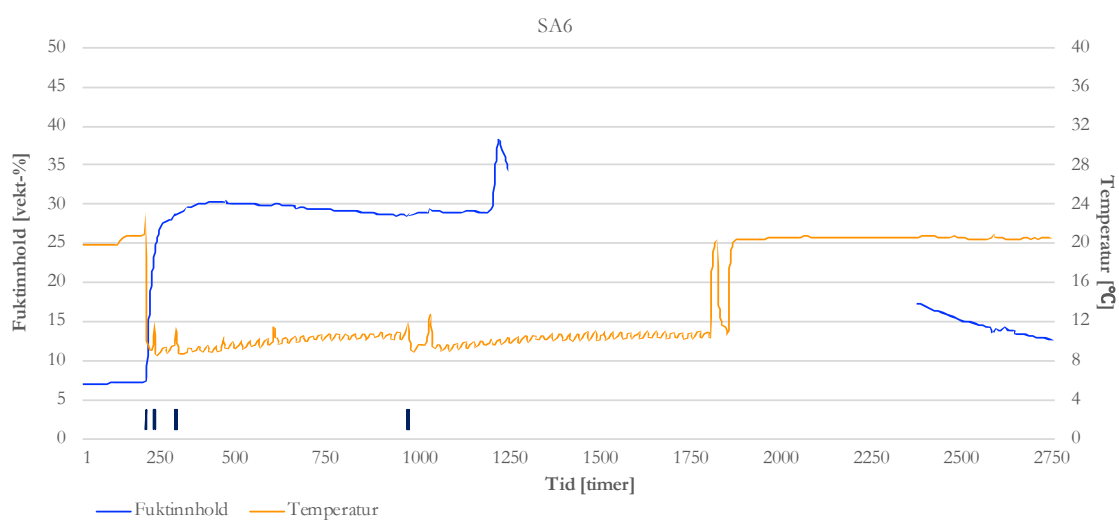
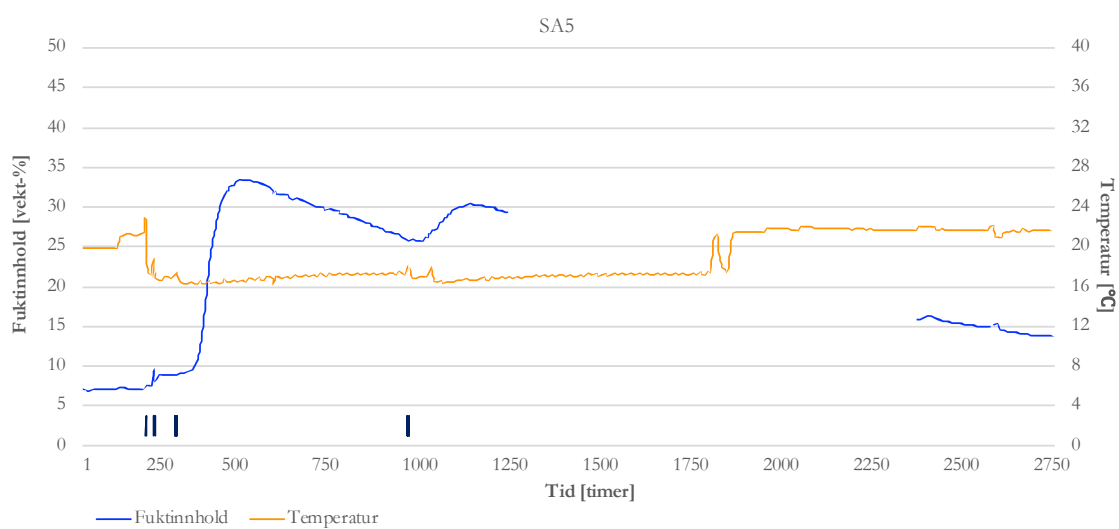
# Veggfelt 1



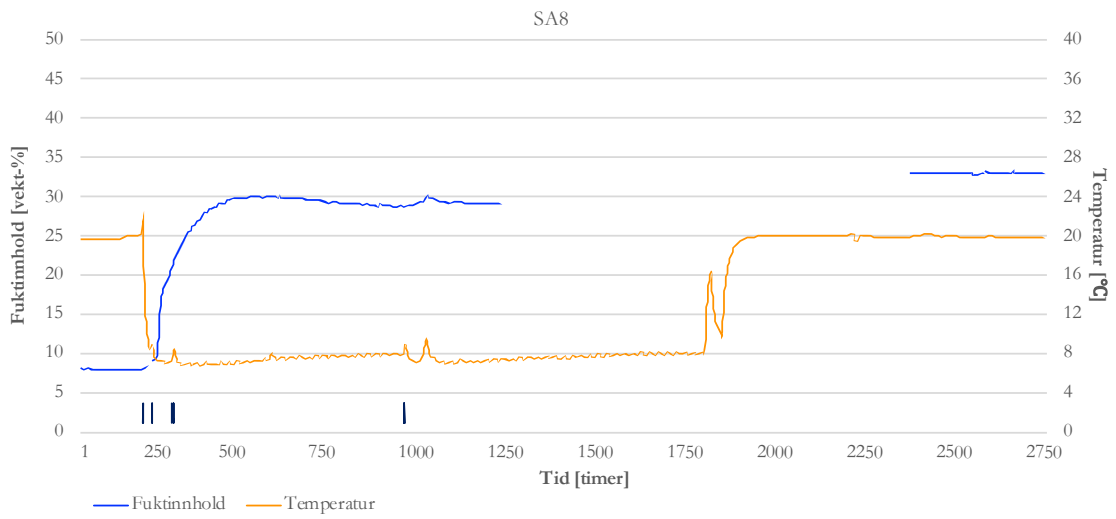
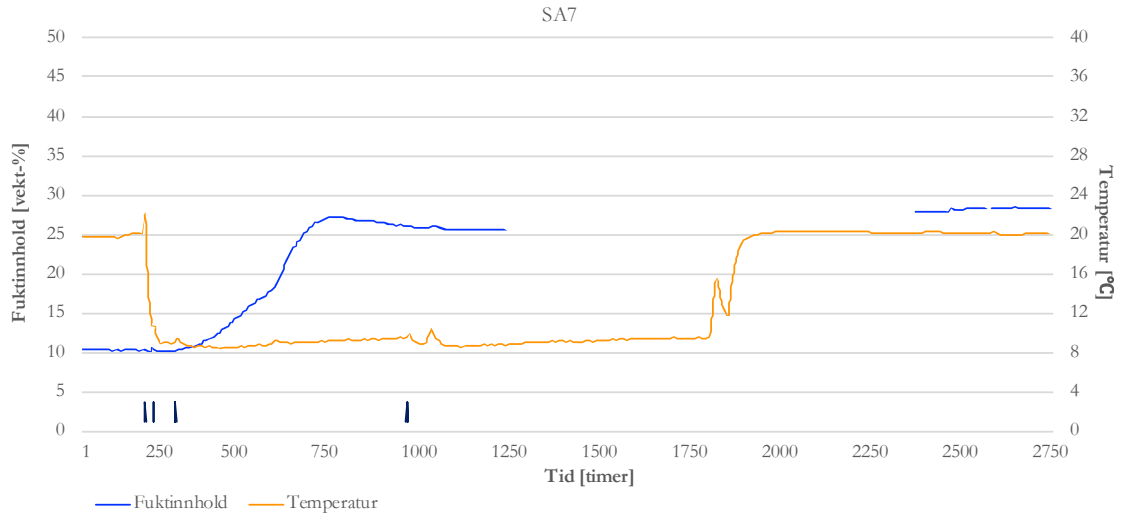
## Veggfelt 1



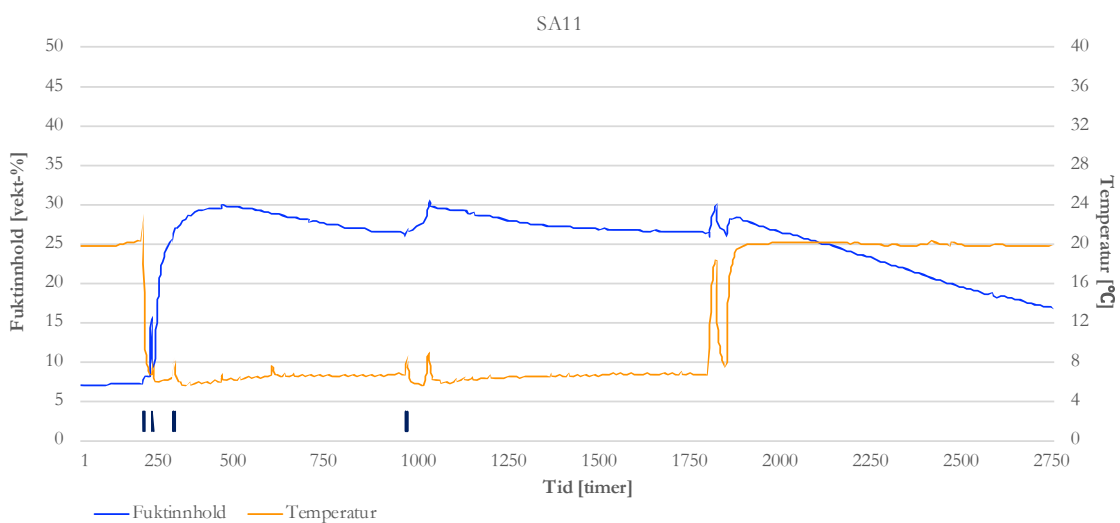
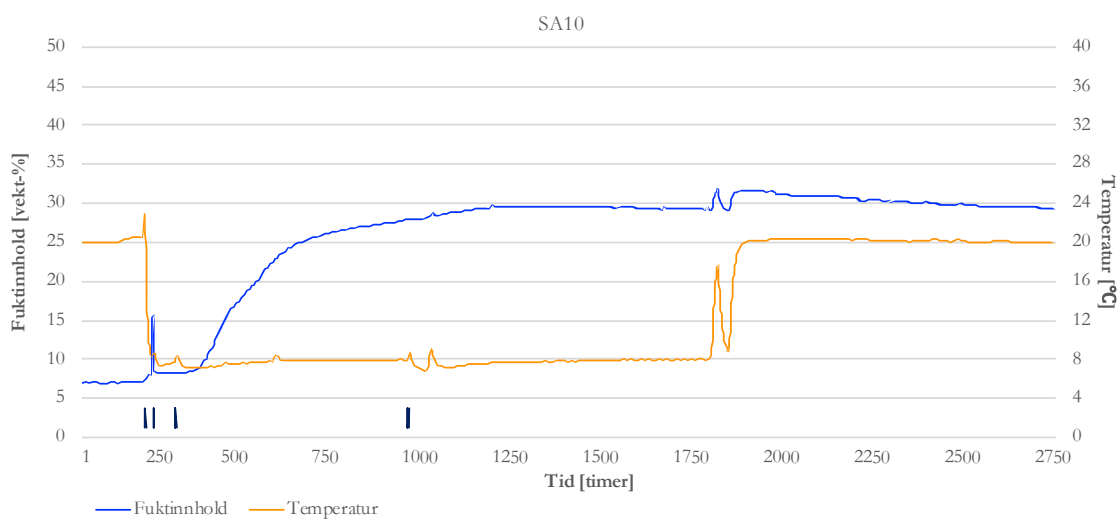
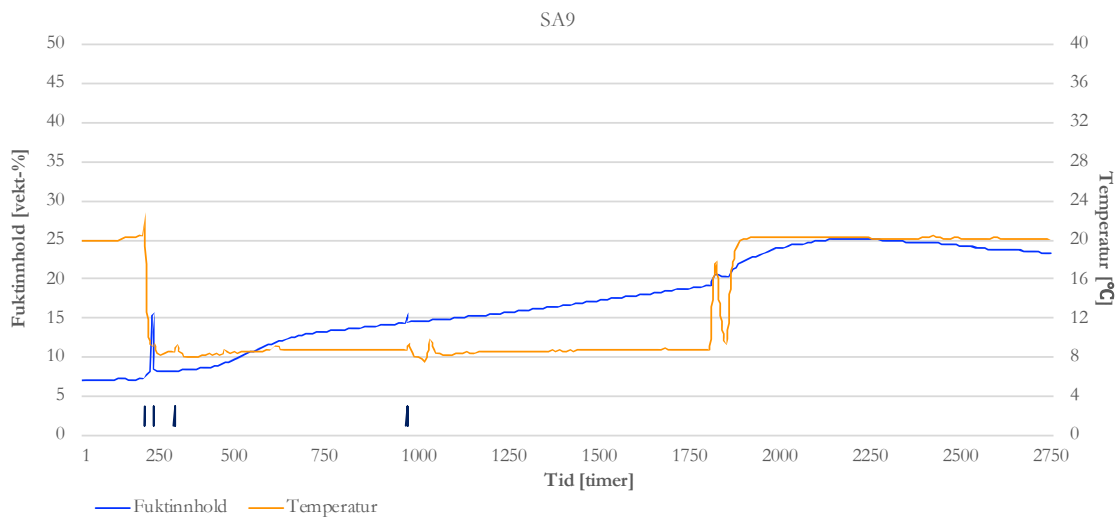
## Veggfelt 2



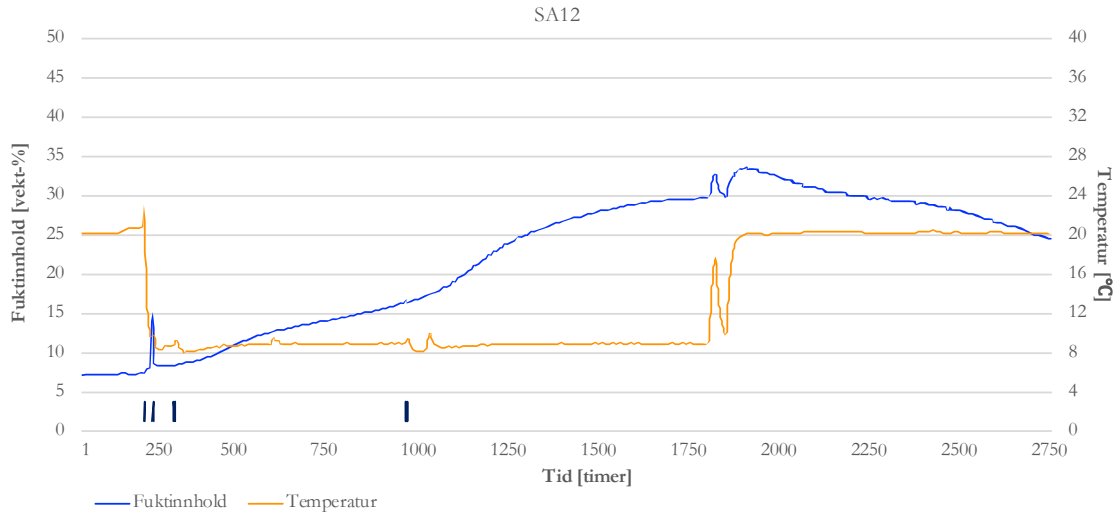
### Veggfelt 3



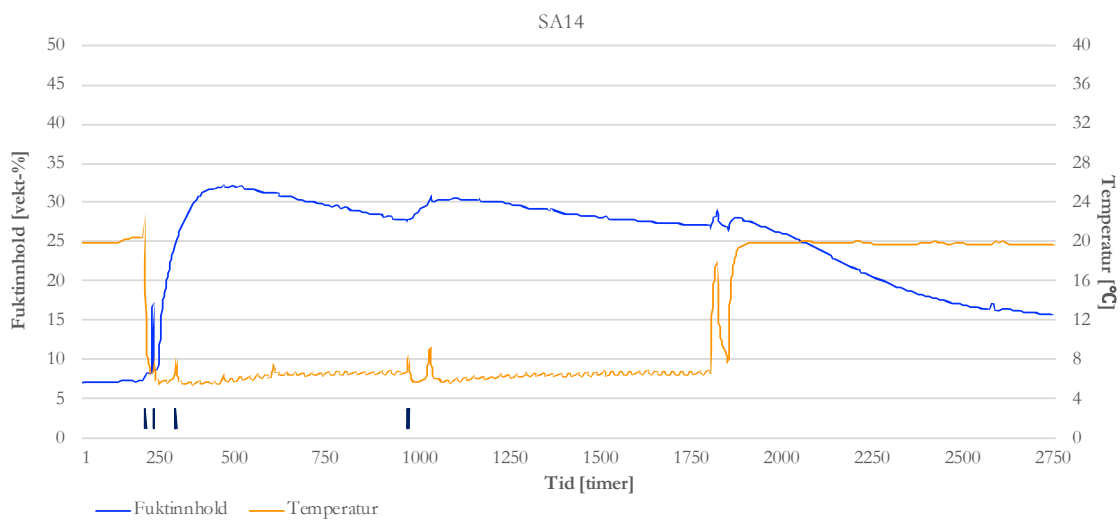
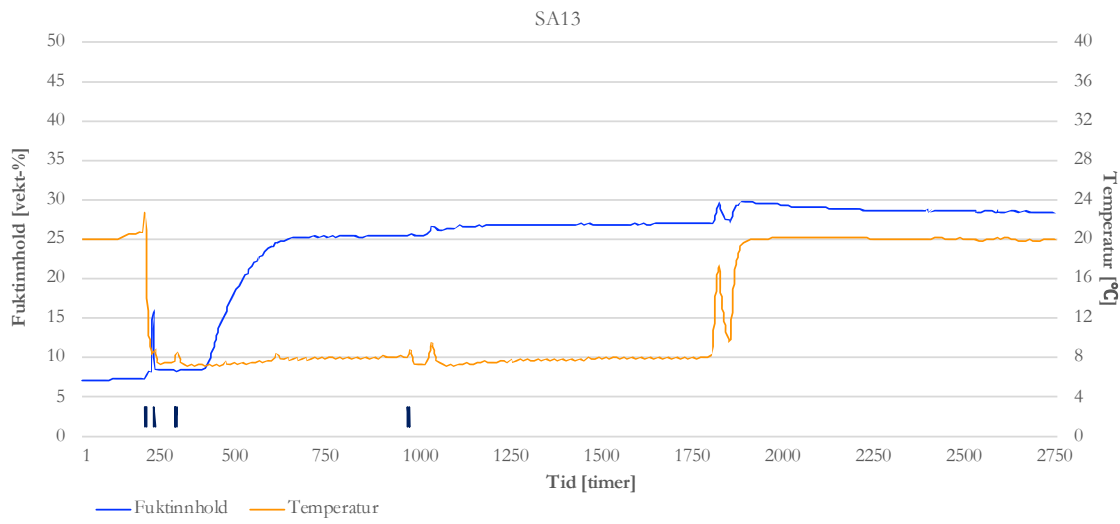
# Veggfelt 4



## Veggfelt 4

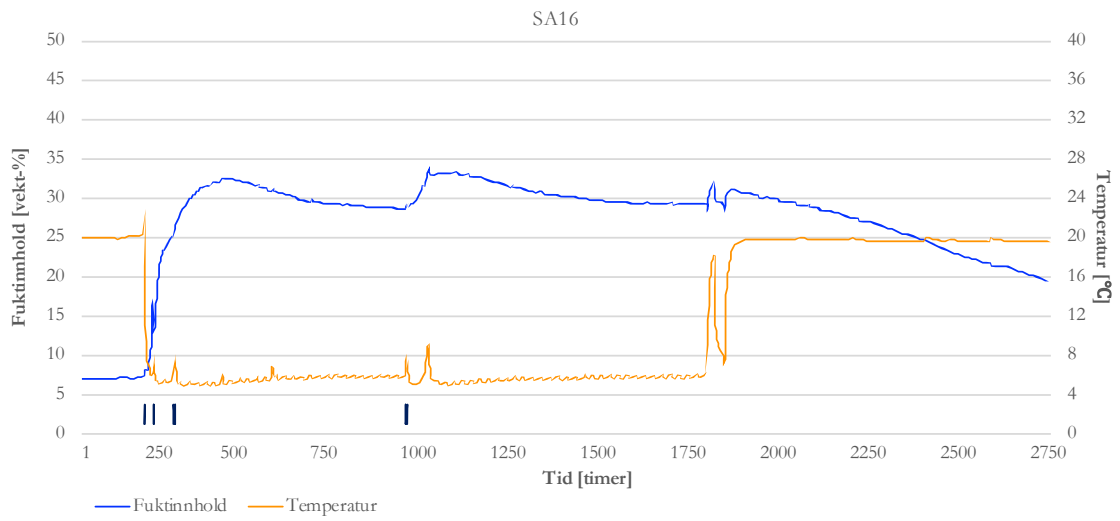
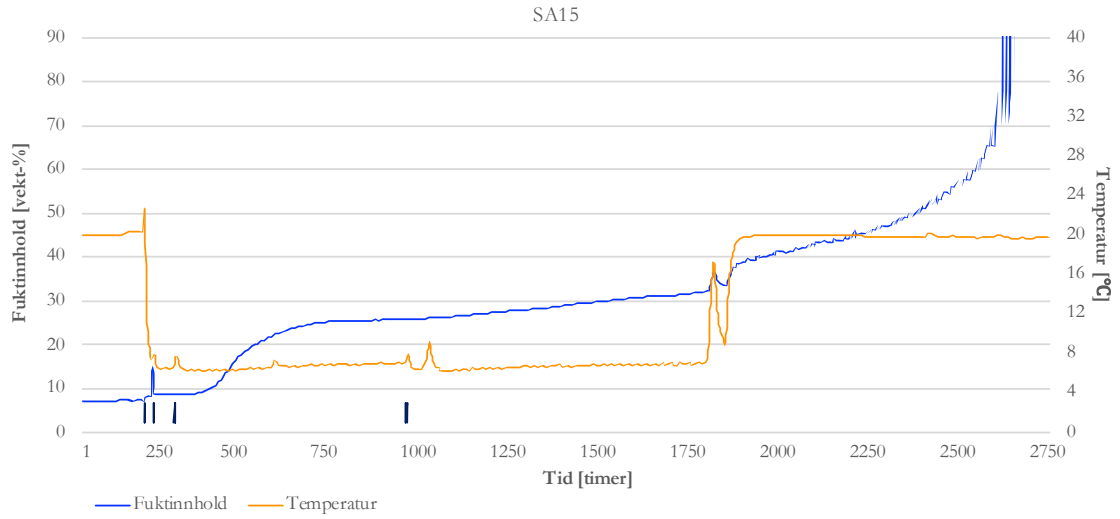


## Veggfelt 5

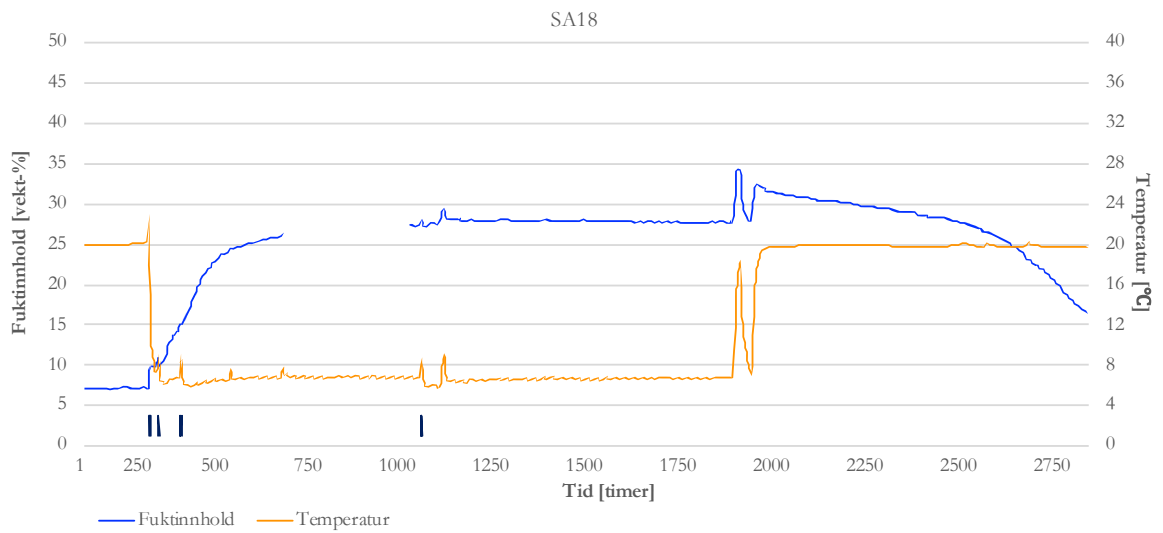
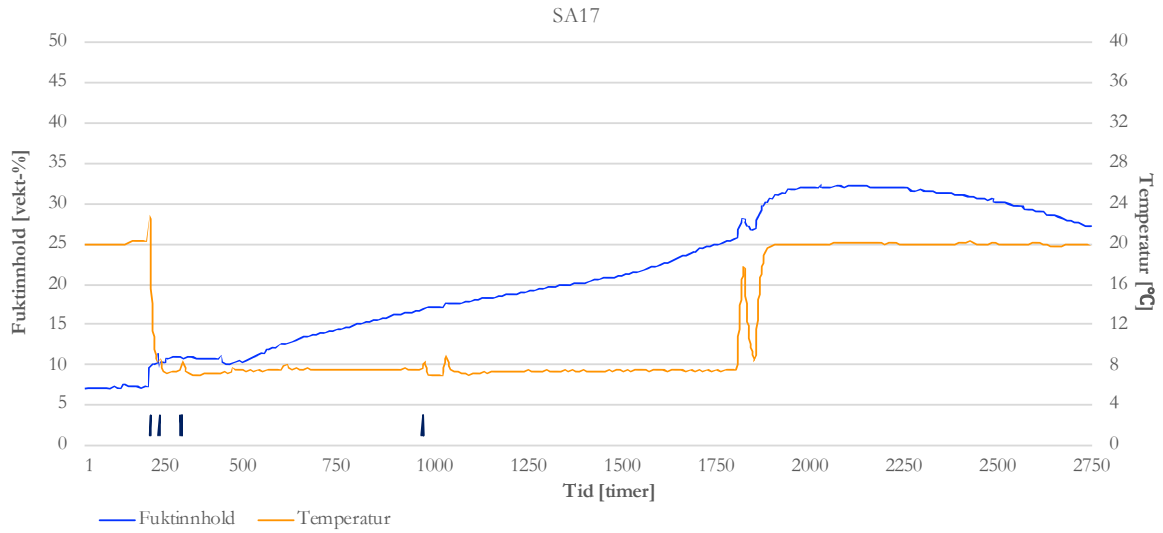




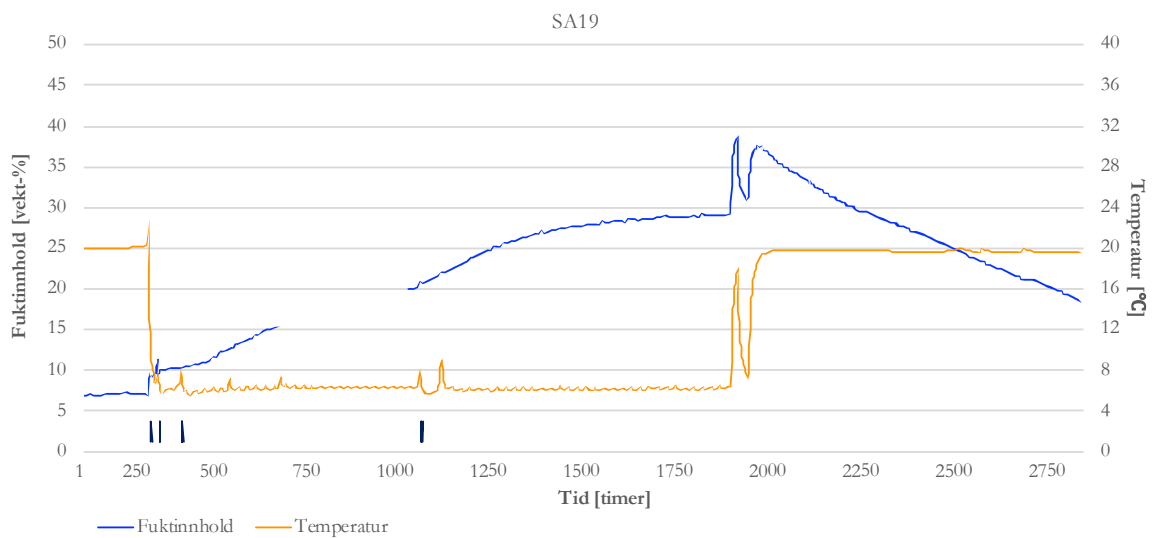
# Veggfelt 6



### Veggfelt 7

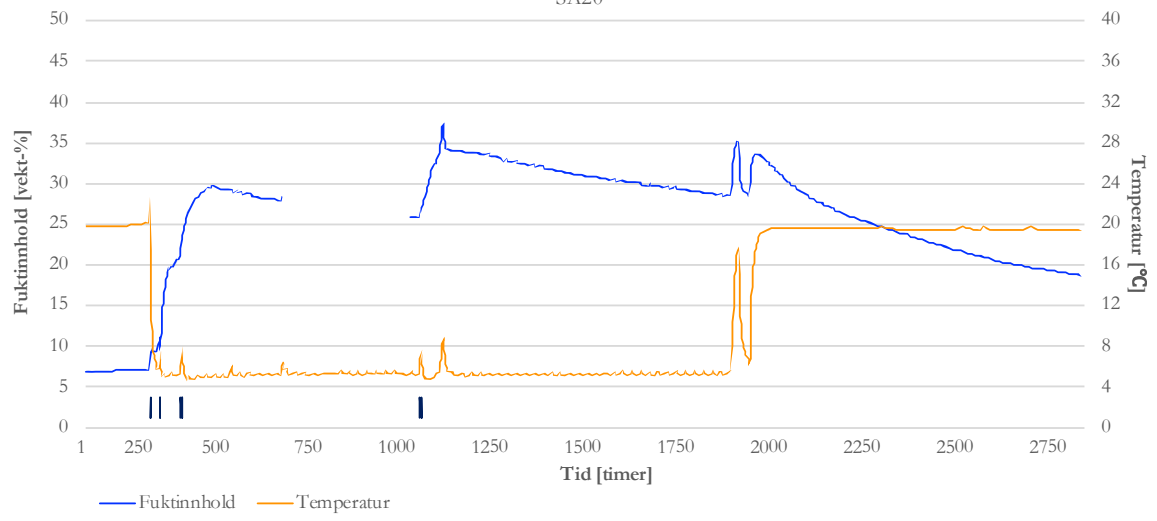


### Veggfelt 8



# Veggfelt 9

SA20



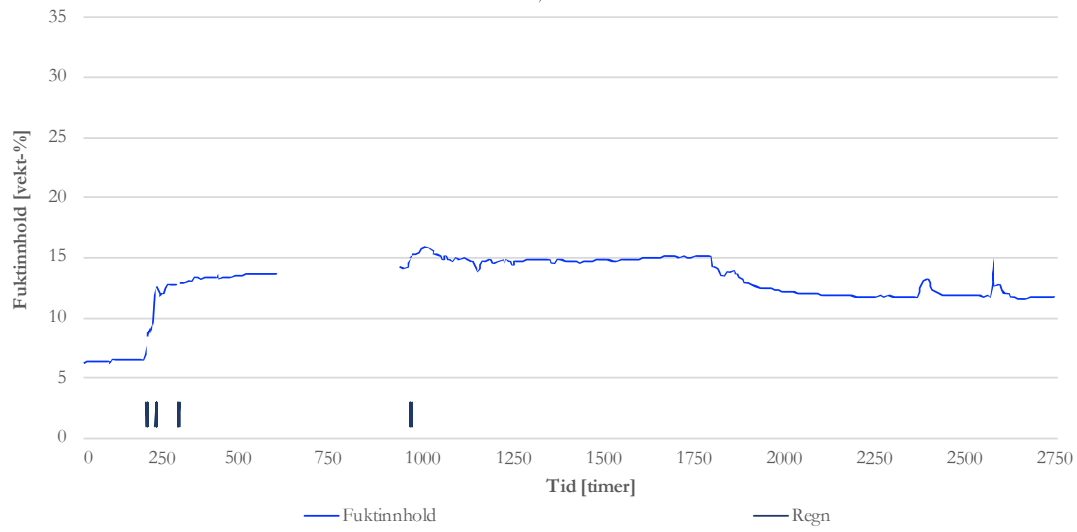
## **Vedlegg A.3**

**Måling fra fuktmålerne i bjelkeendene**

**Veggfelt 1-9**

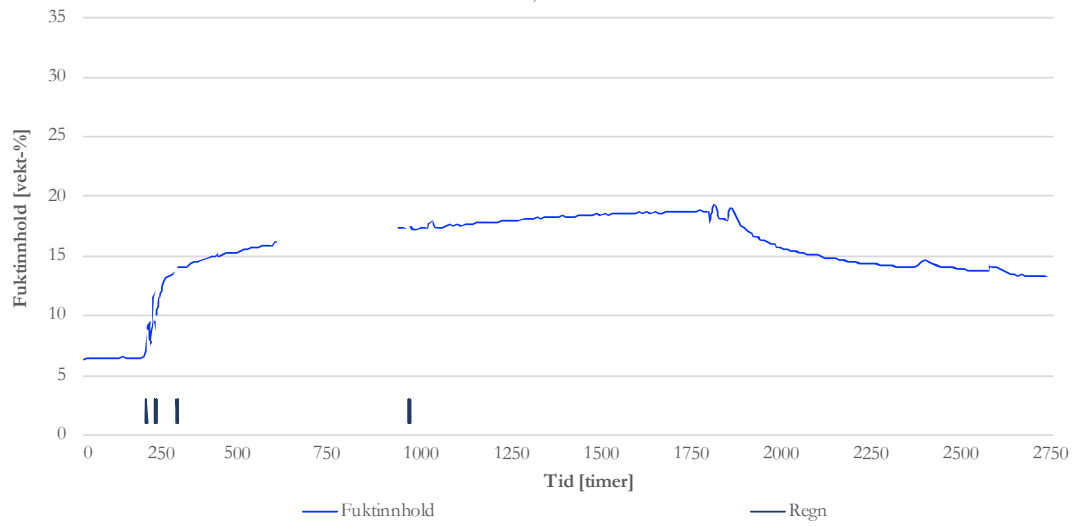
## Veggfelt 1

Bjelke 1



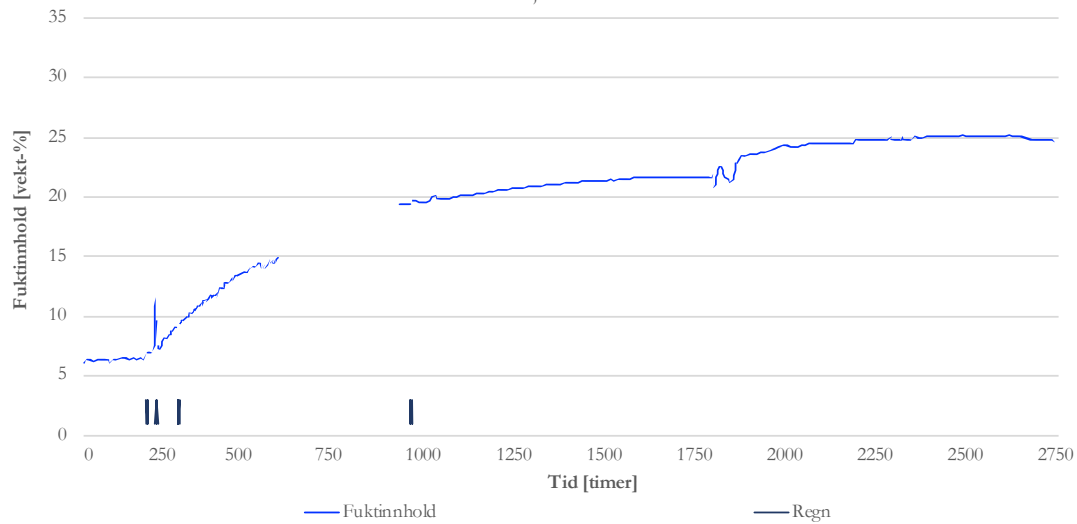
## Veggfelt 2

Bjelke 2

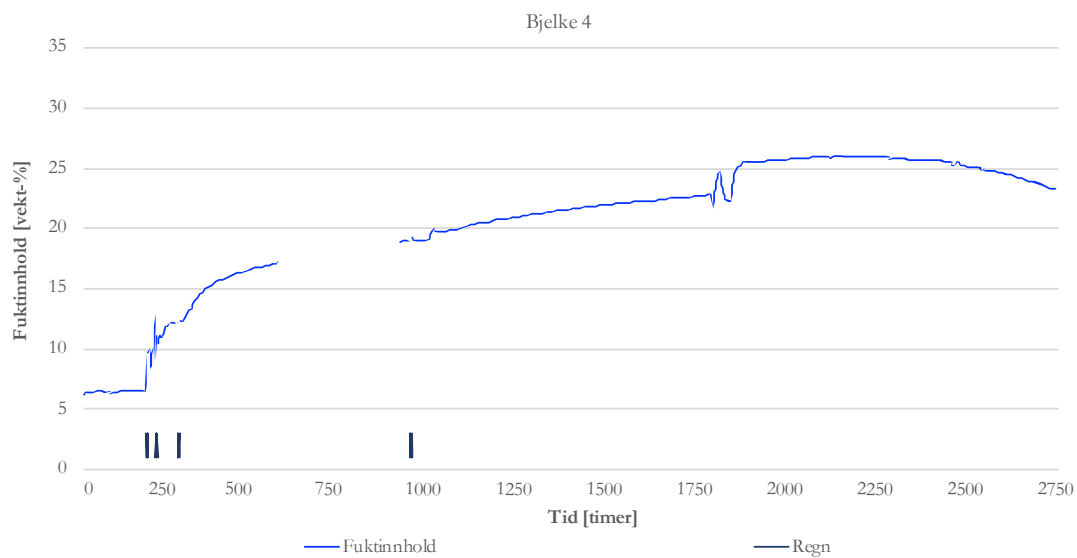


## Veggfelt 3

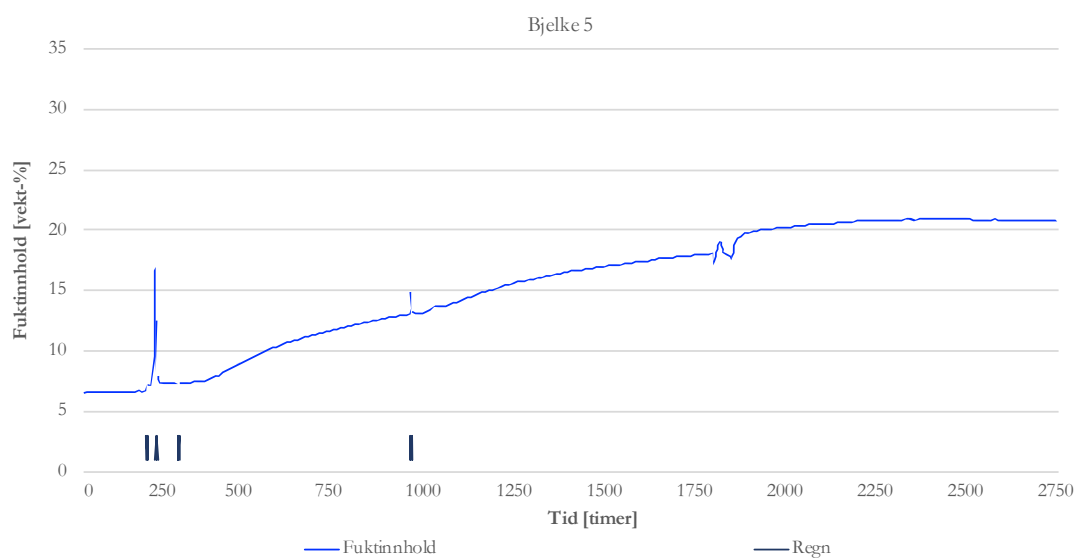
Bjelke 3



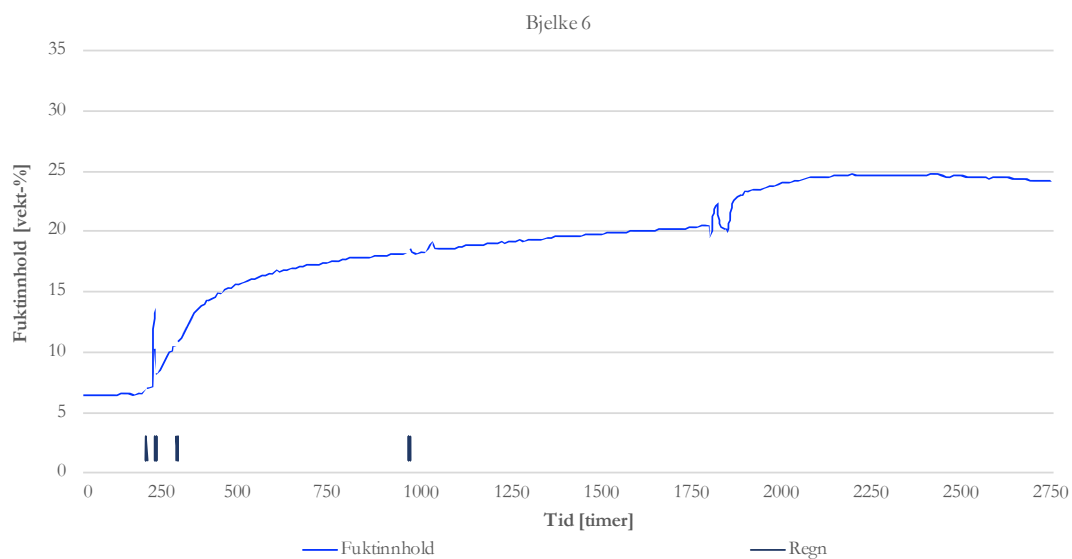
## Veggfelt 4



## Veggfelt 5

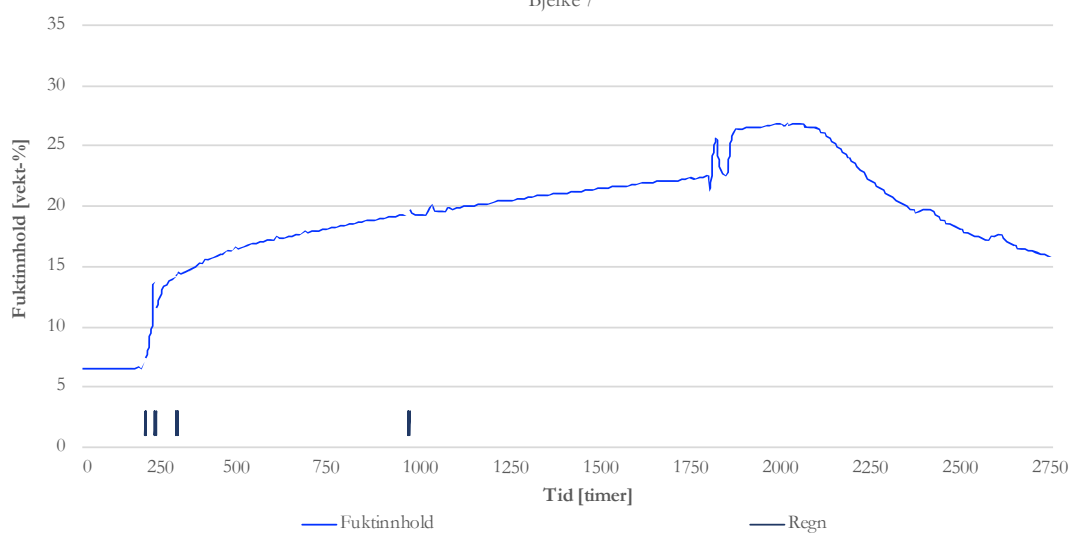


## Veggfelt 6



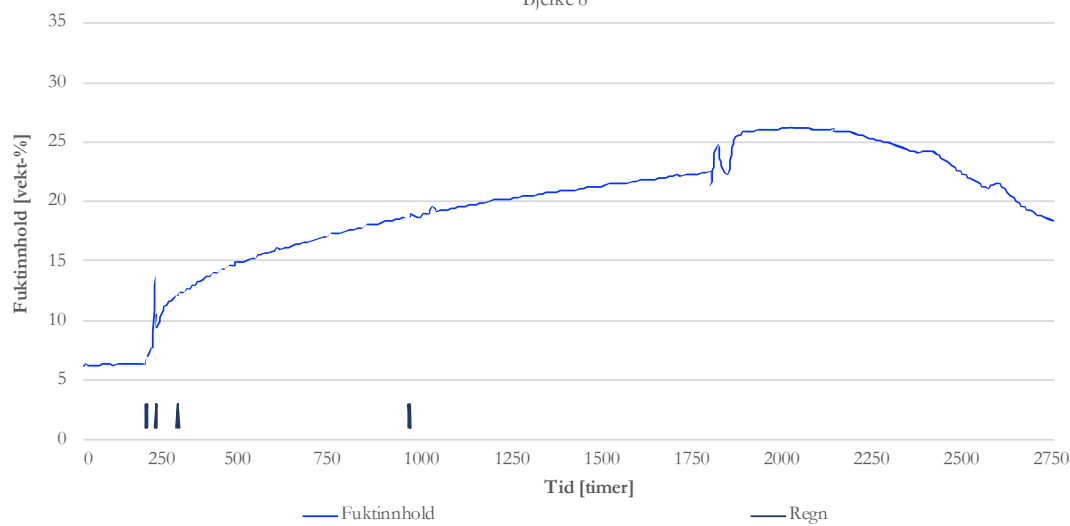
## Veggfelt 7

Bjelke 7



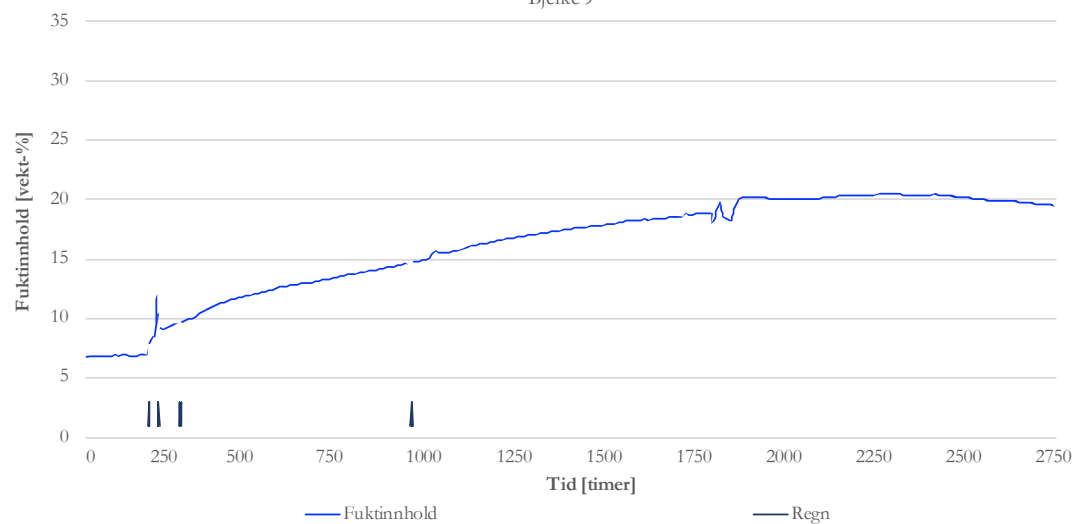
## Veggfelt 8

Bjelke 8



## Veggfelt 9

Bjelke 9



## **Vedlegg B**

**Forventet relativ fuktighet uten regn**

**Glasers metode**



## Beregning av RF uten slagregn - NS-EN ISO 13788:2012

Innvendig relativ fuktighet	$\varphi_i =$	0,5
Innvendig temperatur	$t_i =$	23
Utvendig relativ fuktighet	$\varphi_e =$	0,9
Utvendig temperatur	$t_e =$	5
Kristisk innvendig relativ fuktighet	$\varphi_{sicc} =$	0,8
	Psat (t = 5) =	872
	Psat (t = 23) =	2808

	$\lambda$	d	$R = d/\lambda$	$\mu$	Sd
Teglstein (gul) (104 mm)	0,51	0,104	0,20392157	9,8	1,0192
mørtel (18 mm)	0,82	0,018	0,02195122	49,64	0,89352
Teglstein (gul) (122 mm)	0,51	0,122	0,23921569	9,8	1,1956
Teglstein (rød) (104 mm)	0,69	0,104	0,15072464	9,68	1,00672
Teglstein (rød) (122 mm)	0,69	0,122	0,17681159	9,68	1,18096
Isolasjon kooltherm (50 mm)	0,021	0,05	2,38095238	38	1,9
Isolasjon Mineralull (50mm)	0,035	0,05	1,42857143	1,226	0,0613
Isolasjon Aerogel (20 mm)	0,014	0,02	1,42857143	5	0,1
Isolasjon Aerogel (60 mm)	0,014	0,06	4,28571429	5	0,3
Dampsperre	1	0,001	0,001	100000	100
Gipsplate	0,17	0,013	0,07647059	8,3	0,1079
Rsi	0,13	Pe	784,8		
Rse	0,04	Pi	1404		

$$\theta'_n = \theta_e + \frac{R'_n}{R'_T} (\theta_i - \theta_e)$$

$$P = P_e + \frac{P_i - P_e}{Sd_{tot}} \cdot Sd_i$$

Veggfelt 1	R_akkumulert	$\theta_n^i$	Sd	Psat	P	RF
R total	0,674					
Sd total	3,369	5,000		872		
Rse	0,040	6,068		939	785	0,835
R_104mm_rod_tegl	0,191	10,091	1,007	1235	970	0,785
R_mørtel	0,213	10,677	0,894	1285	1134	0,883
R_104mm_rod_tegl	0,363	14,700	1,007	1672	1155	0,691
R_122mm_rod_tegl	0,540	19,420	1,181	2254	1372	0,609
Rsi	0,670	22,890		2808	1372	0,489

Veggfelt 2	R_akkumulert	$\theta_n^i$	Sd	Psat	P	RF
R total	0,600					
Sd total	2,932	5,000		872		
Rse	0,040	6,200		948	784	0,827
R_104mm_gul_tegl	0,244	12,320	1,019	1432	1000	0,698
R_mørtel	0,266	12,979	0,894	1495	1188	0,795
R_104mm_gul_tegl	0,470	19,099	1,019	2209	1404	0,635
Rsi	0,600	23,000		2808	1404	0,500

Veggfelt 3	R_akkumulert	$\theta_n^i$	Sd	Psat	P	RF
R total	2,345					
Sd total	104,335	5,000		872		
Rse	0,040	5,307		891	784	0,880
R_104mm_gul_tegl	0,244	6,872	1,0192	993	790	0,796
R_mørtel	0,266	7,041	0,89352	1004	796	0,793
R_104mm_gul_tegl	0,470	8,606	1,0192	1115	802	0,719
R_122mm_gul_tegl	0,709	10,442	1,1956	1262	809	0,641
R_20mm_Aerogel	2,138	21,408	0,1	2492	809	0,325
R_dampsperre	2,139	21,415	100	2493	1403	0,563
R_gipsplate	2,215	22,002	0,1079	2642	1404	0,531
Rsi	2,345	23,000		2808	1404	0,500

Veggfelt 4	R_akkumulert	$\theta_n^i$	Sd	Psat	P	RF
R total	3,058					
Sd total	104,940	5,000		872		
Rse	0,040	5,235		887	784	0,884
R_104mm_gul_tegl	0,244	6,436	1,0192	964	790	0,820
R_mørtel	0,266	6,565	0,89352	972	796	0,818
R_104mm_gul_tegl	0,470	7,765	1,0192	1055	802	0,760
R_50mm_Kooltherm	2,851	21,779	1,9	2566	813	0,317
R_dampsperre	2,852	21,785	100	2566	1403	0,547
R_gipsplate	2,928	22,235	0,1079	2681	1404	0,524
Rsi	3,058	23,000		2808	1404	0,500

Veggfelt 5	R_akkumulert	$\theta_n^i$	Sd	Psat	P	RF
R total	2,106					
Sd total	103,101	5,000		872		
Rse	0,040	5,342		894	784	0,878
R_104mm_gul_tegl	0,244	7,085	1,0192	1007	791	0,785
R_mørtel	0,266	7,273	0,89352	1019	796	0,781
R_104mm_gul_tegl	0,470	9,016	1,0192	1144	802	0,701
R_50mm_Mineralull	1,898	21,227	0,0613	2470	802	0,325
R_dampsperre	1,899	21,235	100	2471	1403	0,568
R_gipsplate	1,976	21,889	0,1079	2624	1404	0,535
Rsi	2,106	23,000		2808	1404	0,500

Veggfelt 6	R_akkumulert	$\theta_n^i$	Sd	Psat	P	RF
R total	3,534					
Sd total	103,140	5,000		872		
Rse	0,040	5,204		885	784	0,886
R_104mm_gul_tegl	0,244	6,242	1,0192	951	791	0,831
R_mørtel	0,266	6,354	0,89352	958	796	0,830
R_104mm_gul_tegl	0,470	7,393	1,0192	1029	802	0,779
R_20mm_Aerogel	1,898	14,668	0,1	1668	803	0,481
R_20mm_Aerogel	3,327	21,943	0,3	2632	804	0,306
R_dampsperre	3,328	21,948	100	2633	1403	0,533
R_gipsplate	3,404	22,338	0,1079	2698	1404	0,520
Rsi	3,534	23,000		2808	1404	0,500

Veggfelt 7	R_akkumulert	$\theta_n^i$	Sd	Psat	P	RF
R total	2,952					
Sd total	104,196	5,000		872		
Rse	0,040	5,244		887	784	0,884
R_104mm_rød_tegl	0,191	6,163	1,00672	946	790	0,836
R_mørtel	0,213	6,297	0,89352	955	796	0,834
R_104mm_rød_tegl	0,363	7,216	1,00672	1016	802	0,789
R_50mm_Kooltherm	2,744	21,735	1,9	2601	813	0,313
R_dampsperre	2,745	21,741	100	2601	1407	0,541
R_gipsplate	2,822	22,207	0,1079	2676	1408	0,526
Rsi	2,952	23,000		2808	1408	0,501

Veggfelt 8	R_akkumulert	$\theta_n^i$	Sd	Psat	P	RF
R total	2,977					
Sd total	4,196	5,000		872		
Rse	0,040	5,242		887	784	0,884
R_104mm_rød_tegl	0,191	6,153	1,00672	945	933	0,987
R_mørtel	0,213	6,286	0,89352	954	1065	1,116
R_104mm_rød_tegl	0,363	7,197	1,00672	1015	1213	1,195
R_50mm_Kooltherm	2,744	21,594	1,9	2578	1494	0,580
R_dampsperre	2,821	22,056	0,1079	2651	1510	0,569
R_gipsplate	2,951	22,842		2808	1510	0,538

Veggfelt 9	R_akkumulert	$\theta_n^i$	Sd	Psat	P	RF
R total	4,861					
Sd total	102,596	5,000		872		
Rse	0,040	5,148		881	784	0,890
R_104mm_rød_tegl	0,191	5,706	1,00672	916	790	0,862
R_mørtel	0,213	5,788	0,89352	922	796	0,864
R_104mm_rød_tegl	0,341	6,264	1,00672	952	802	0,842
R_60mm_Aerogel	4,627	22,135	0,3	2664	804	0,302
R_dampsperre	4,628	22,139	100	2665	1407	0,528
R_gipsplate	4,705	22,422	0,1079	2712	1408	0,519
Rsi	4,835	22,903		2808	1408	0,501

# **Vedlegg C**

**Inndata til WUFI® 2D**

**Alle materialer**

# Inndata til WUFI® 2D

## Materialer

### Glatt oker teglstein - høyt sug

Densitet	1705	kg/m <sup>3</sup>
Porøsitet	0,279	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Spesifikk varmekapasitet	1000	J/kgK
Termisk konduktivitet, $\lambda$	0,51	W/mK
Diffusjonsmotstand, $\mu$	9,871	-

W <sub>sat</sub>	255,7	kg/m <sup>3</sup>
Aw	0,1877	kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup>
Referanse vanninnhold, w <sub>80</sub>	2,2	kg/m <sup>3</sup>
b	8	-

### Sorpsjonskurve

RF [%]	0,0001	34	50	75	83	94	96	98	99	99,6	99,9	99,96	100
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0,00	1,17	1,55	2,08	2,21	2,26	4,40	19,07	35,87	95,03	172,01	231,57	255,70

### Fuktavhengig varmekonduktivitet

w [kg/m <sup>3</sup> ]	0	1,17	1,55	2,26	35,87	172,01	255,7
$\lambda(\varphi)$	0,510	0,533	0,534	0,536	0,617	0,945	1,150

### Rustika rød teglstein - lavt sug

Densitet	2116	kg/m <sup>3</sup>
Porøsitet	0,218	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Spesifikk varmekapasitet	1000	J/kgK
Termisk konduktivitet, $\lambda$	0,69	W/mK
Diffusjonsmotstand, $\mu$	9,68	-

W <sub>sat</sub>	116,7	kg/m <sup>3</sup>
Aw	0,0461	kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup>
Referanse vanninnhold, w <sub>80</sub>	2,72	kg/m <sup>3</sup>
b	8	-

### Sorpsjonskurve

RF [%]	0,0001	34	50	75	83	94	96	98	99	99,6	99,9	99,96	100
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0,00	2,18	2,40	2,56	2,73	2,88	3,86	10,46	49,35	81,62	112,53	115,64	116,70

### Fuktavhengig varmekonduktivitet

w [kg/m <sup>3</sup> ]	0	2,19	2,4	2,88	49,34	116,7
$\lambda(\varphi)$	0,690	0,695	0,696	0,697	0,817	0,989

### Kalk sement mørtel - KC 50 50

Densitet (ved glatt oker teglstein)	1823	kg/m <sup>3</sup>
Densitet (ved rustika rød teglstein)	1788	kg/m <sup>3</sup>
Porøsitet	0,27	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Spesifikk varmekapasitet	850	J/kgK
Termisk konduktivitet, $\lambda$	0,82	W/mK
Diffusjonsmotstand, $\mu$	49,64	-

W <sub>sat</sub>	258,7	kg/m <sup>3</sup>
Aw	0,0297	kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup>
Aw (med effekt av heftsoner)	0,1633	kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup>
Referanse vanninnhold, w <sub>80</sub>	20,5	kg/m <sup>3</sup>
b	4	-

### Sorpsjonskurve

RF [%]	0,0001	34	50	75	83	94	96	98	99	99,6	99,9	99,96	100
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0,00	14,44	15,13	18,83	22,31	33,97	37,03	51,21	127,19	190,24	239,03	250,72	258,70

### Fuktavhengig varmekonduktivitet

w [kg/m <sup>3</sup> ]	0	127,2	258,70
$\lambda(\varphi)$	0,820	1,053	1,295

Mineralull													
Densitet	60	kg/m <sup>3</sup>											
Porøsitet	0,95	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>											
Spesifikk varmekapasitet	850	J/kgK											
Termisk konduktivitet, $\lambda$	0,035	W/mK											
Diffusjonsmotstand, $\mu$	1,226	-											
Wsat	60	kg/m <sup>3</sup>											
Aw	-	kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup>											
Referanse vanninnhold, w80	2,34	kg/m <sup>3</sup>											
Sorpsjonskurve													
RF [%]	0,0001	10	30	50	70	85	90	95	97	98	99	99,5	100
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0,00	0,37	0,62	0,96	1,62	3,00	4,24	7,46	11,19	15,32	25,36	38,47	60,00
Fuktavhengig diffusjonsmotstand													
RF [%]	0,0001	70	90	99	99,5								
$\mu(\varphi)$	1,226	1,226	1,228	1,41	1,92								
Fuktavhengig varmekonduktivitet													
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0	10	20	50	100	200	300	400	500	600	700	800	950
$\lambda(\varphi)$	0,035	0,040	0,041	0,043	0,049	0,070	0,100	0,150	0,200	0,270	0,350	0,440	0,600
Kooltherm® isolasjonsplater av fenolskum													
Densitet	35	kg/m <sup>3</sup>											
Porøsitet	0,99	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>											
Spesifikk varmekapasitet	1500	J/kgK											
Termisk konduktivitet, $\lambda$	0,021	W/mK											
Diffusjonsmotstand, $\mu$	38	-											
Wsat	116,1	kg/m <sup>3</sup>											
Aw	0,0024	kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup>											
Referanse vanninnhold, w80	1,54	kg/m <sup>3</sup>											
Sorpsjonskurve													
RF [%]	0,0001	34	50	80	100								
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0,00	0,20	0,54	1,54	116,70								
Spaceloft® aerogel isolasjon													
Densitet	146	kg/m <sup>3</sup>											
Porøsitet	0,92	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>											
Spesifikk varmekapasitet	1000	J/kgK											
Termisk konduktivitet, $\lambda$	0,014	W/mK											
Diffusjonsmotstand, $\mu$	4,7	-											
Wsat	213	kg/m <sup>3</sup>											
Aw		kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup>											
Referanse vanninnhold, w80	6,6	kg/m <sup>3</sup>											
Sorpsjonskurve													
RF [%]	0,0001	50	65	80	93	97	99	99,5	99,9	99,95	99,99	100	
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0,00	4,72	5,30	6,60	10,60	11,50	15,90	19,30	29,60	35,30	51,90	213,00	
Kapillær transportkoeffisient, sug													
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0,00	6,60	213,00										
DWS [m <sup>2</sup> /s]	0	1,7E-14	1,3E-11										
Kapillær transportkoeffisient, redistribisjon													
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0,00	6,60	51,90	100,00	213,00								
DWW [m <sup>2</sup> /s]	0	4E-11	7E-11	7E-10	8E-10								
Fuktavhengig varmekonduktivitet													
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0	2,8	6,2	10	20	50	100	200	400	600	700	800	920
$\lambda(\varphi)$	0,014	0,0141	0,0148	0,0155	0,017	0,022	0,033	0,055	0,130	0,240	0,310	0,420	0,600

---

**Gipsplate m/Airguard® smart dampsperre**


---

Densitet	625	kg/m <sup>3</sup>
Porøsitet	0,73	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Spesifikk varmekapasitet	850	J/kgK
Termisk konduktivitet, $\lambda$	0,2	W/mK
Diffusjonsmotstand, $\mu$ , torr	7692,3	-

W <sub>sat</sub>	25	kg/m <sup>3</sup>
A <sub>w</sub>	-	kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup>
Referanse vanninnhold, w80		kg/m <sup>3</sup>

**Sorpsjonskurve**

RF [%]	0	35	50	70	80	90	95	100
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0	3	4	5	5	8	11	25

**Fuktavhengig vanndampdiffusjonsfaktor**

RF [%]	13	42	43	54	63	72	98
$\mu(\varphi)$	7692	3692	1076	615	108	14	2,3
S <sub>d</sub>	100	48	14	8	1,4	0,18	0,03

---

**Bjelkeende av gran**


---

Densitet	455	kg/m <sup>3</sup>
Porøsitet	0,75	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Spesifikk varmekapasitet	1500	J/kgK
Termisk konduktivitet, $\lambda$	0,23	W/mK
Diffusjonsmotstand, $\mu$	4,23	-

W <sub>sat</sub>	600	kg/m <sup>3</sup>
A <sub>w</sub>	-	kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup>
Referanse vanninnhold, w80	2,72	kg/m <sup>3</sup>

**Sorpsjonskurve**

RF [%]	0,0001	10	30	50	60	80	90	95	97	99,5	100
w [kg/m <sup>3</sup> ]	0,00	22,62	33,80	44,74	51,49	72,78	96,95	125,83	150,73	257,98	600,00

**Fuktavhengig vanndampdiffusjonsfaktor**

RF [%]	0	0,995
$\mu(\varphi)$	4,23	4,902

# **Vedlegg D**

**Resultater fra WUFI® 2D**

**Veggfelt 1-9**



## **D Vedlegg D – Resultater fra WUFI® 2D**

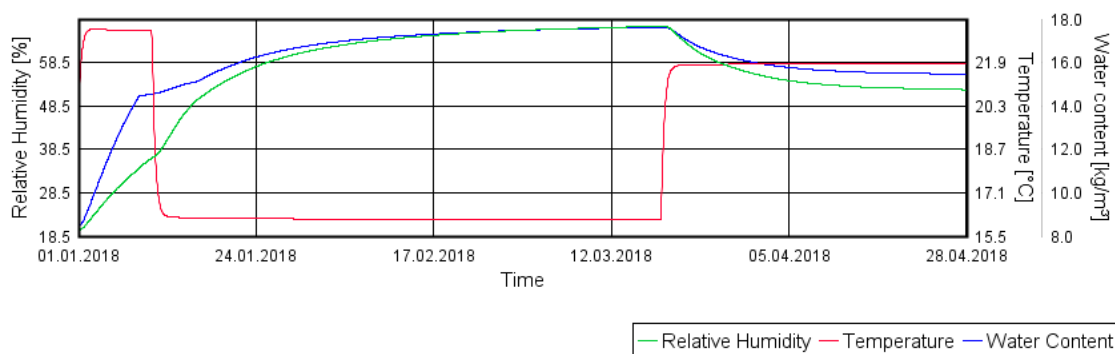
### **D Innhold**

<b>D</b>	<b><i>Vedlegg D – Resultater fra WUFI® 2D</i></b> .....	<b>1</b>
<b>D.1</b>	<b>Simulering uten regn</b> .....	<b>2</b>
D.1.1	Veggfelt 2.....	2
D.1.2	Veggfelt 5.....	4
D.1.3	Veggfelt 6.....	6
<b>D.2</b>	<b>Simulering med regnpåkjenning</b> .....	<b>8</b>
D.2.1	Veggfelt 2.....	8
D.2.2	Veggfelt 3.....	10
D.2.3	Veggfelt 4.....	12
D.2.4	Veggfelt 5.....	14
D.2.5	Veggfelt 6.....	16
D.2.6	Veggfelt 7.....	18
<b>D.3</b>	<b>Simulering med justert heftsone</b> .....	<b>20</b>
D.3.1	Veggfelt 2.....	20
D.3.2	Veggfelt 4.....	22
D.3.3	Veggfelt 5.....	24
D.3.4	Veggfelt 6.....	26
D.3.5	Veggfelt 7.....	28
D.3.6	Veggfelt 9.....	30
<b>D.4</b>	<b>Uten dampsperre</b> .....	<b>31</b>
D.4.1	Veggfelt 5.....	31
<b>D.5</b>	<b>Rød teglstein med justert Aw</b> .....	<b>33</b>
D.5.1	Veggfelt 7.....	33

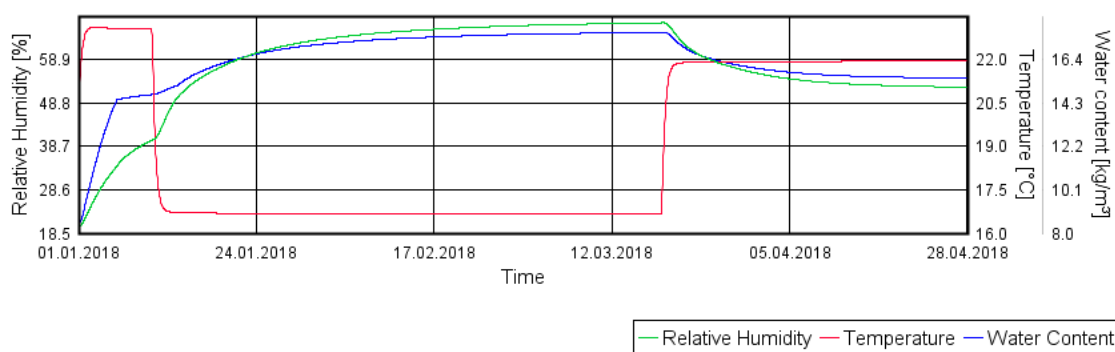
## D.1 Simulering uten regn

### D.1.1 Veggfelt 2

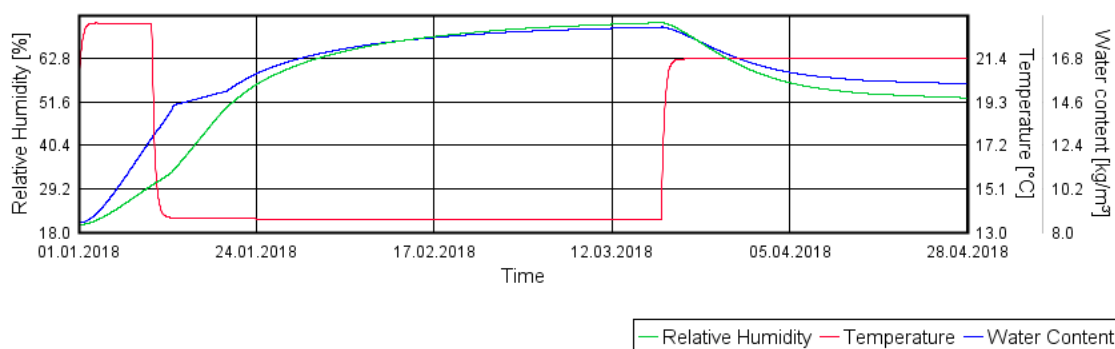
#### Veggfelt 2 - SA5



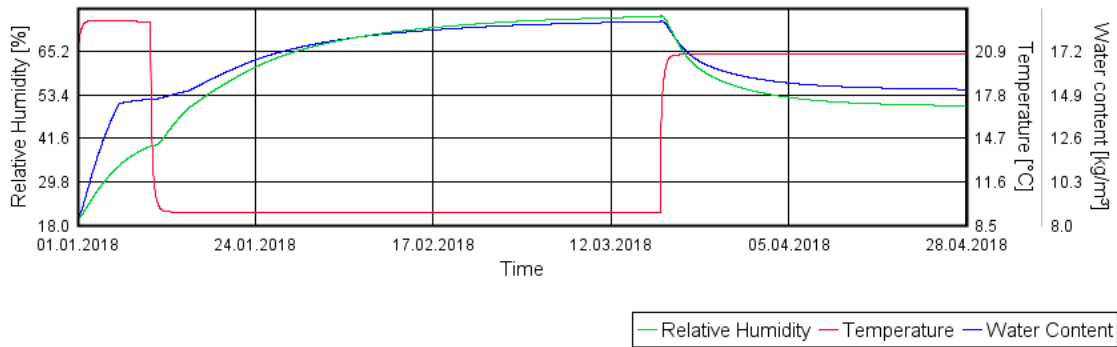
#### Veggfelt 2 - RF2



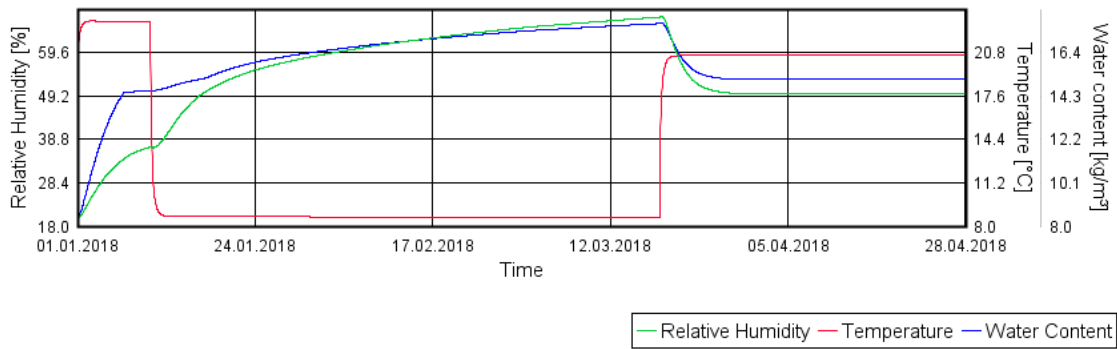
#### Veggfelt 2 - RF3



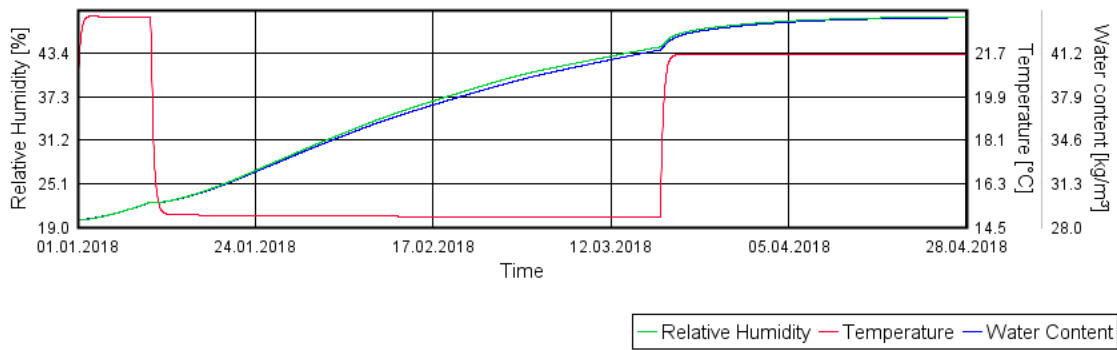
### Veggfelt 2 – RF58



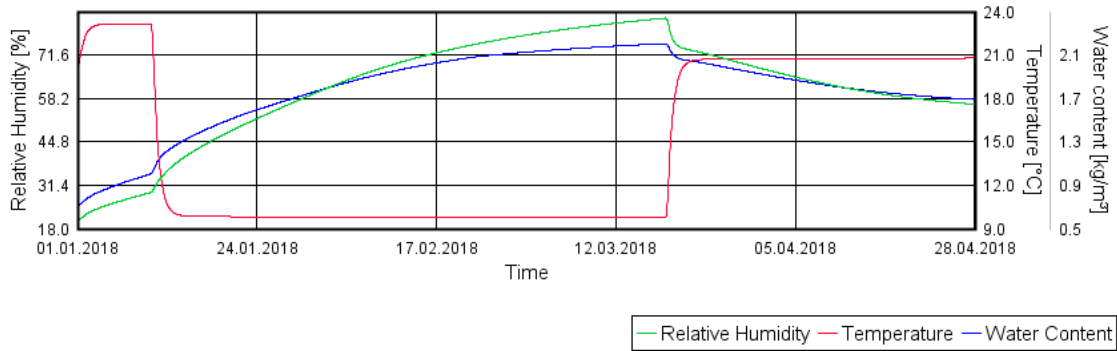
### Veggfelt 2 – SA6



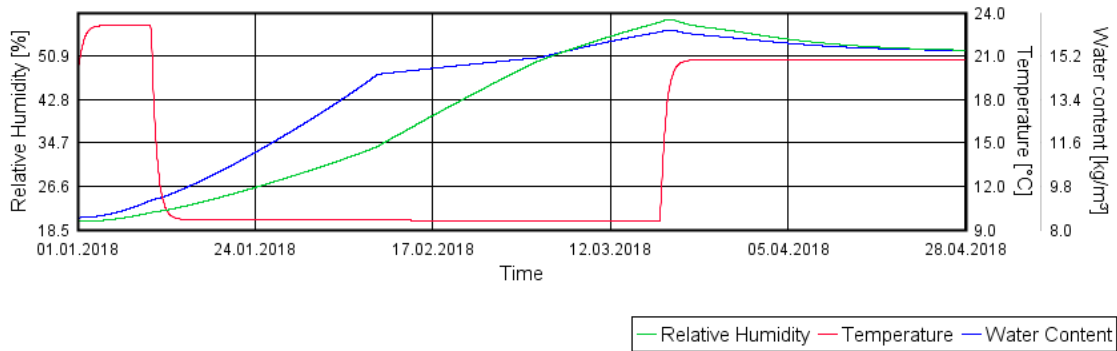
### Veggfelt 2 - B2



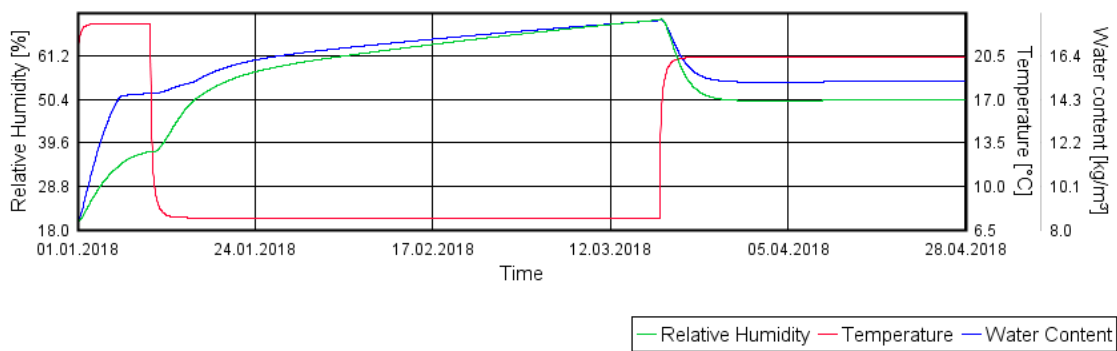
### D.1.2 Veggfelt 5 Veggfelt 5 – RF 43



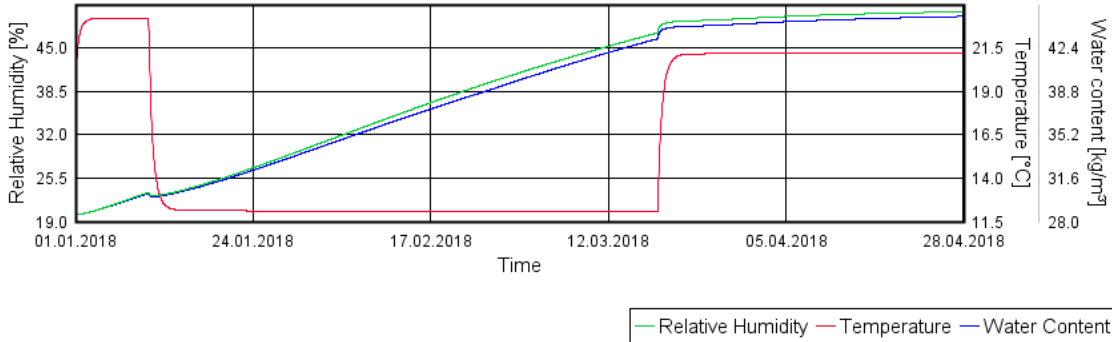
### Veggfelt 5 – SA13



### Veggfelt 5 – SA14

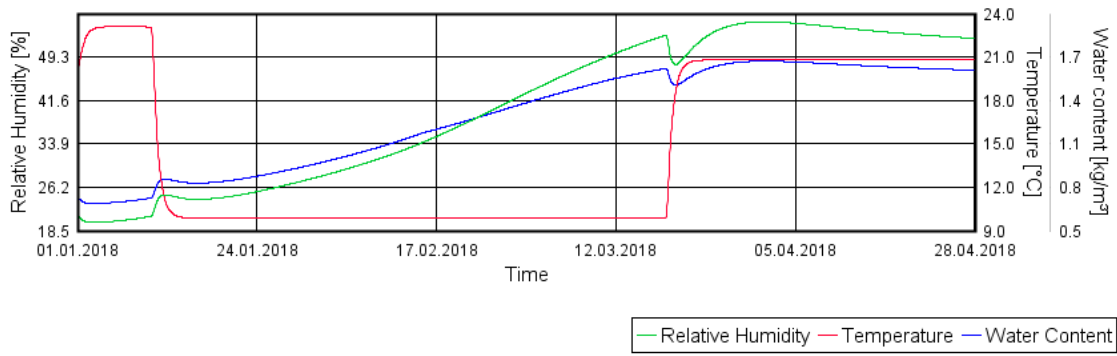


# Veggfelt 5 – B5

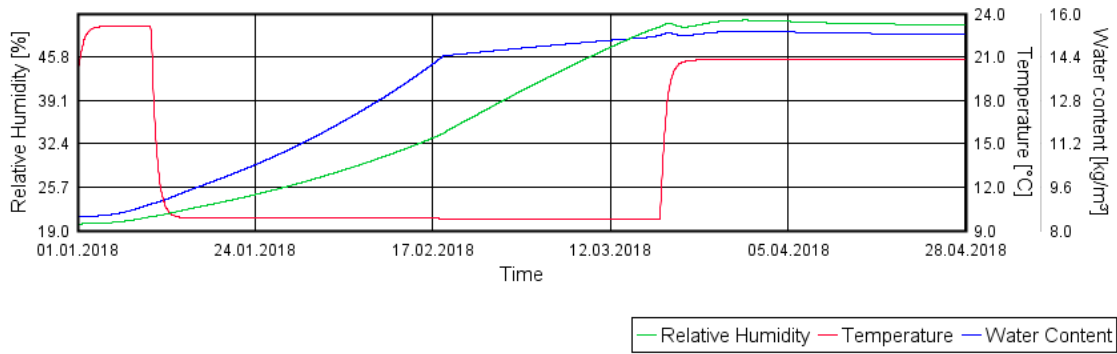


### D.1.3 Veggfelt 6

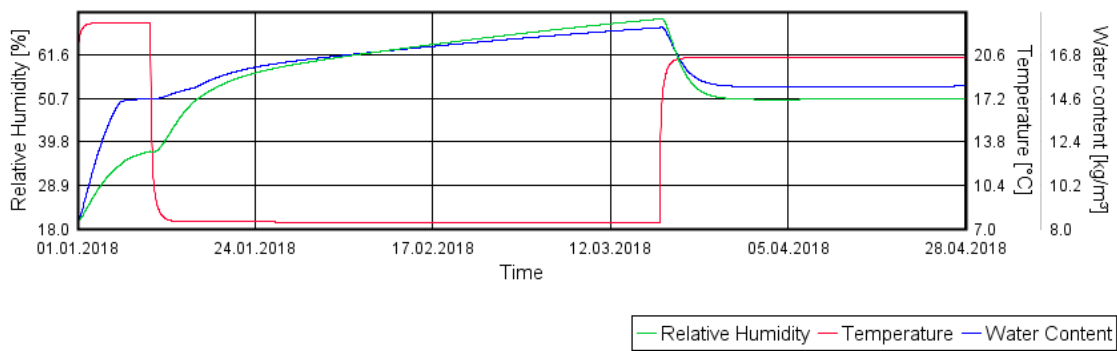
#### Veggfelt 6 – RF1



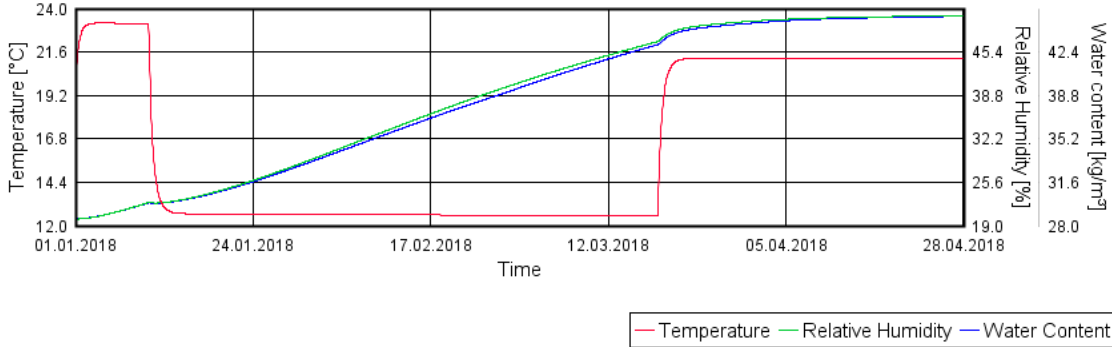
#### Veggfelt 6 – SA15



#### Veggfelt 6 – SA16



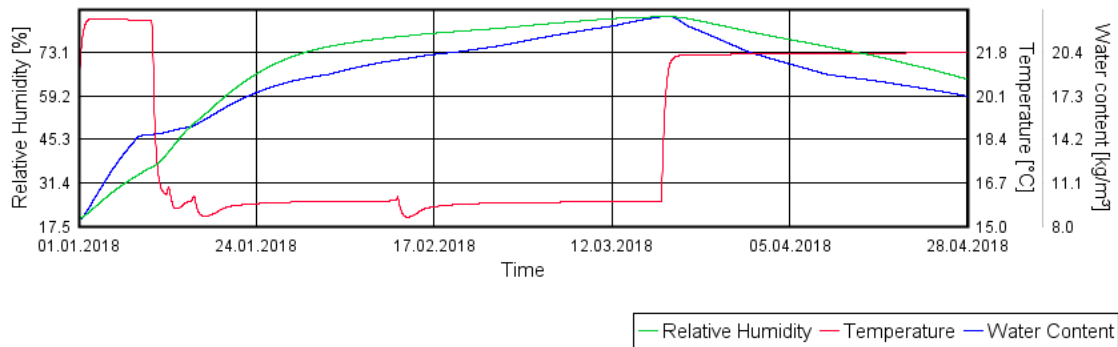
# Veggfelt 6 – B6



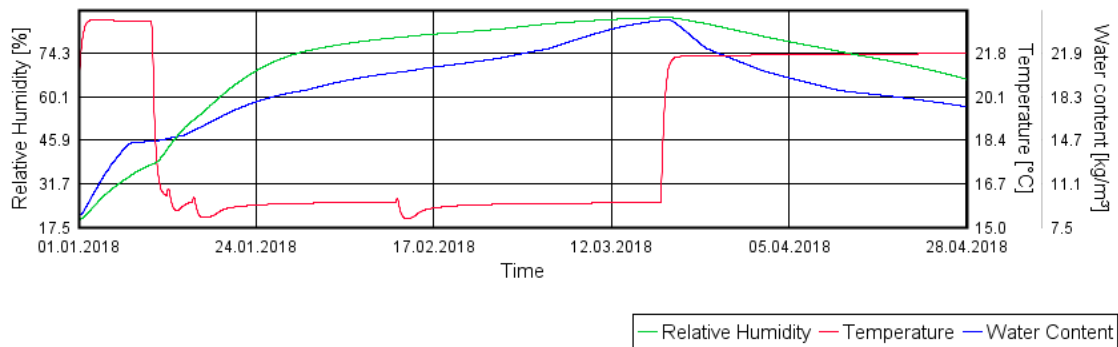
## D.2 Simulering med regnpåkjenning

### D.2.1 Veggfelt 2

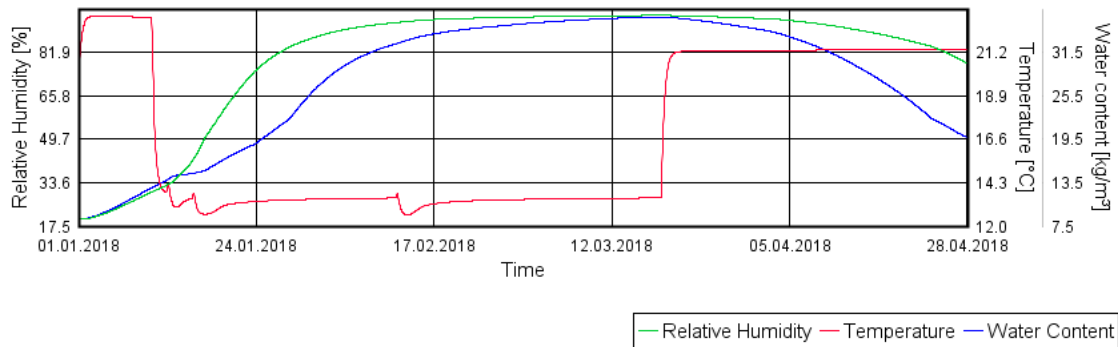
#### Veggfelt 2 – SA5



#### Veggfelt 2 – RF2

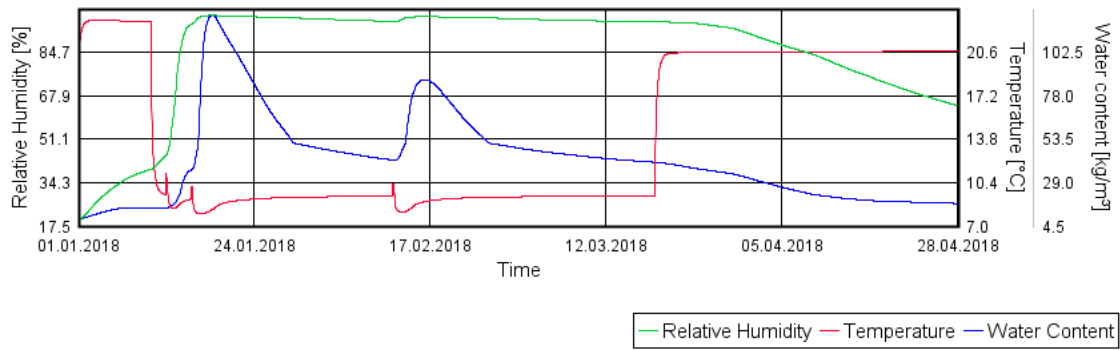


#### Veggfelt 2 - RF3

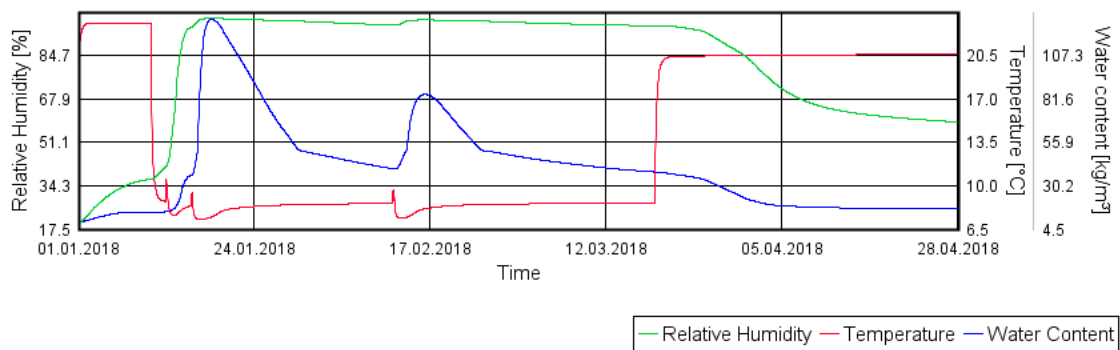




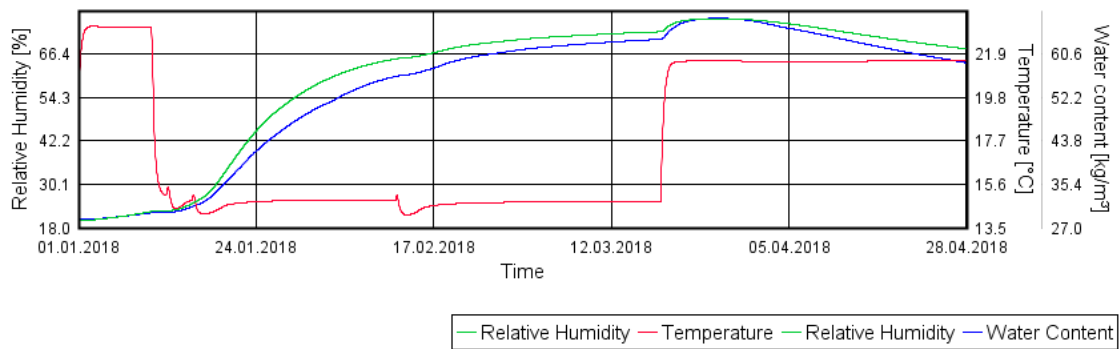
### Veggfelt 2 – RF58



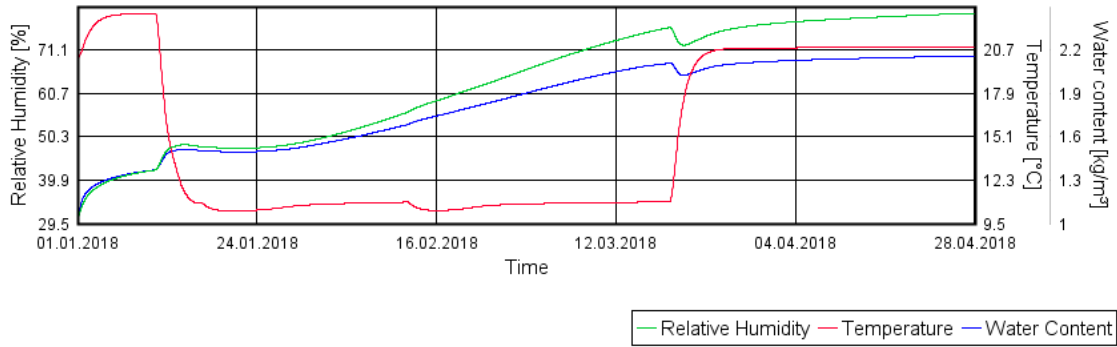
### Veggfelt 2 – SA6



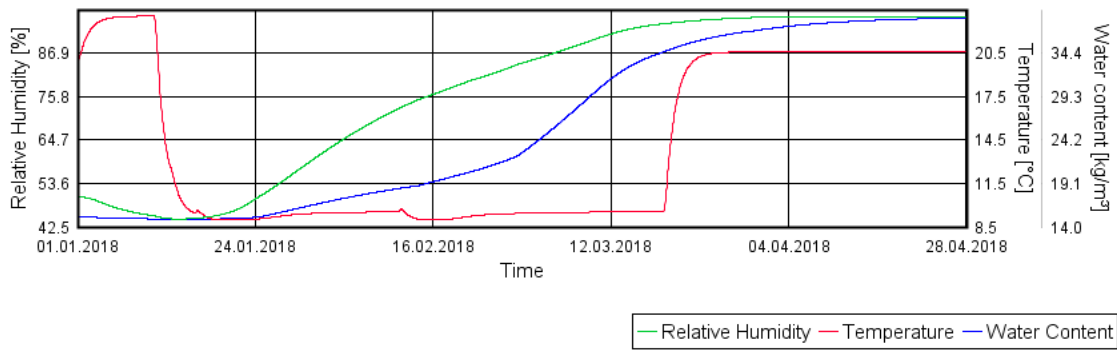
### Veggfelt 2 - B2



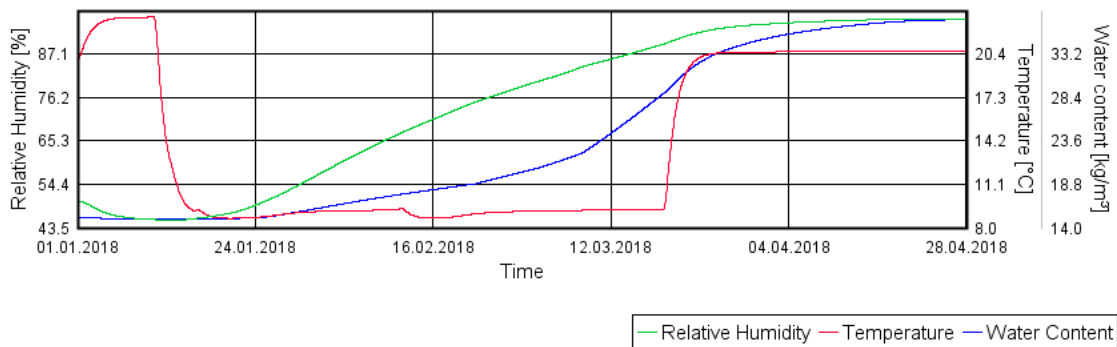
### D.2.2 Veggfelt 3 Veggfelt 3 – RF27



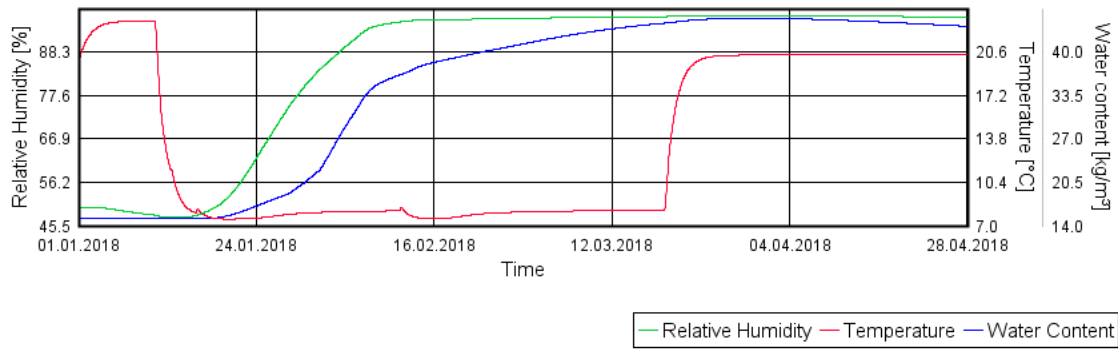
### Veggfelt 3 – SA7



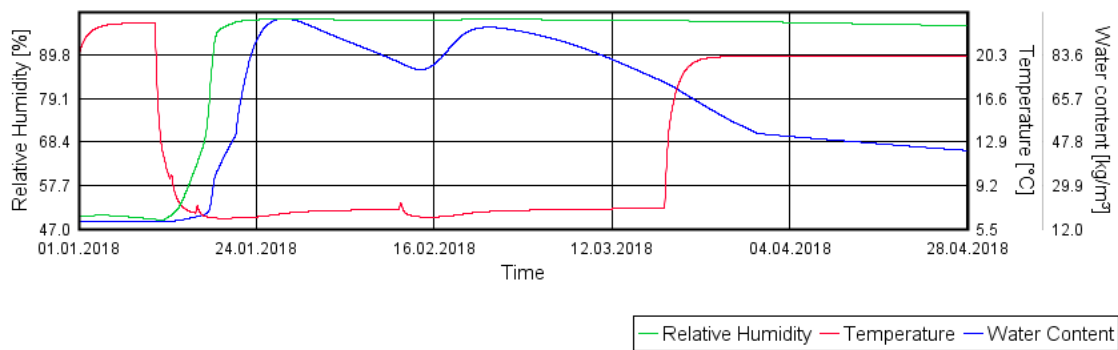
### Veggfelt 3 – RF24



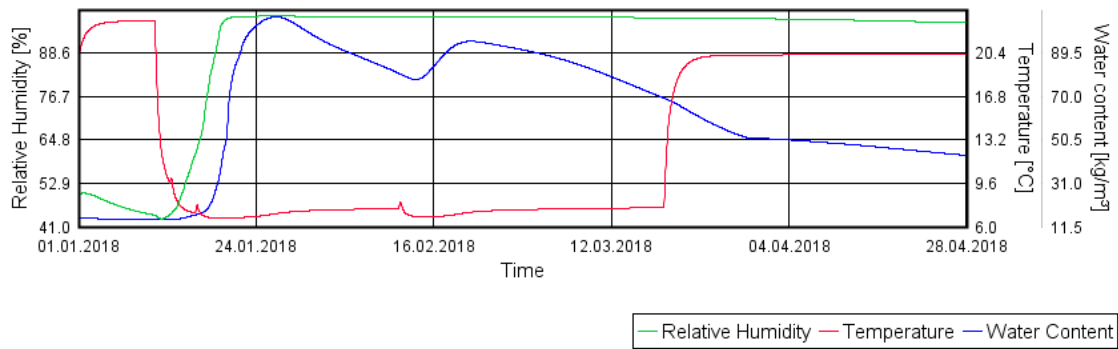
### Veggfelt 3 – RF22



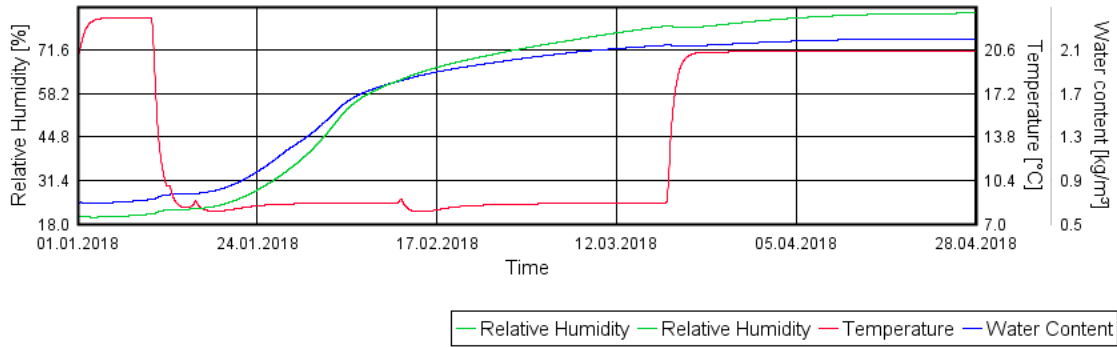
### Veggfelt 3 – RF25



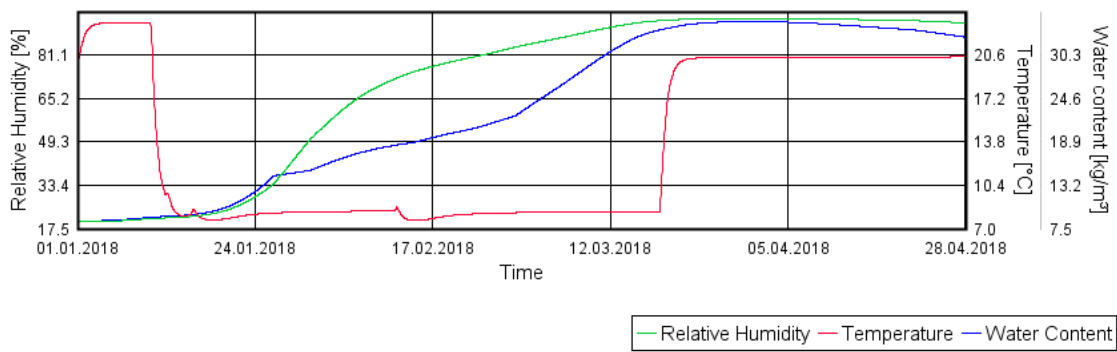
### Veggfelt 3 – SA8



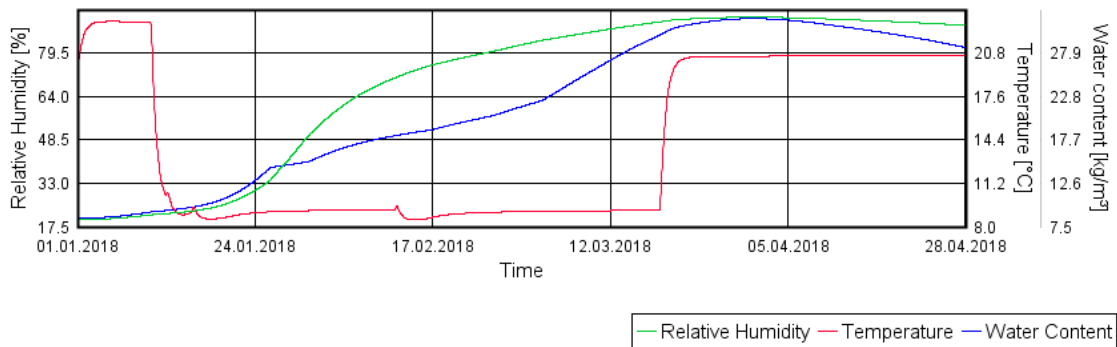
### D.2.3 Veggfelt 4 Veggfelt 4 – RF 16



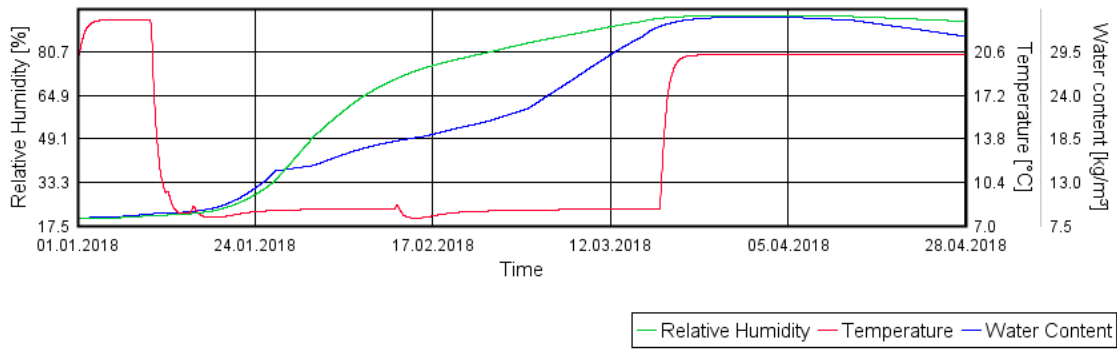
### Veggfelt 4 – RF4 / SA12



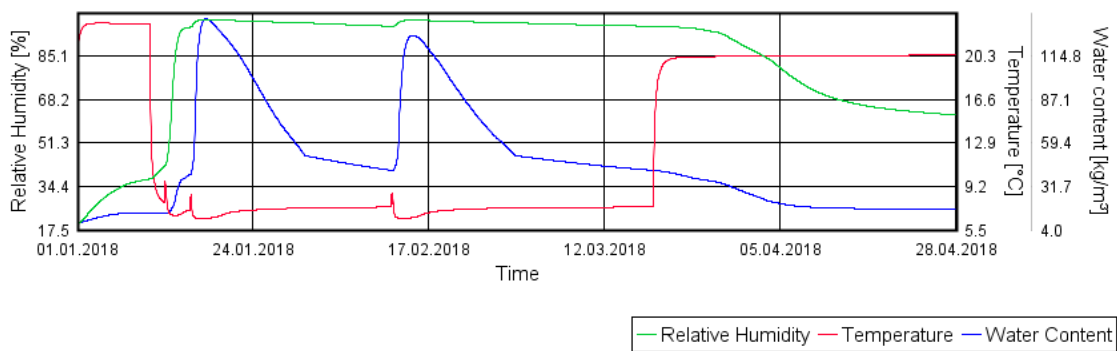
### Veggfelt 4 – SA10



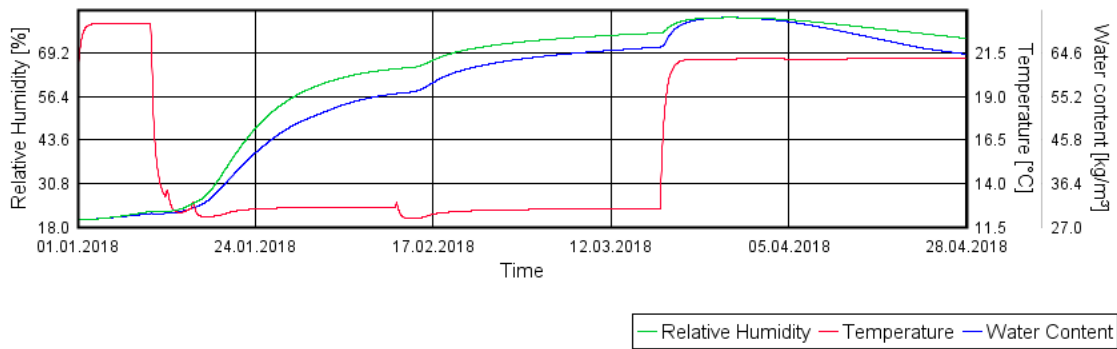
### Veggfelt 4 – RF5 / SA9



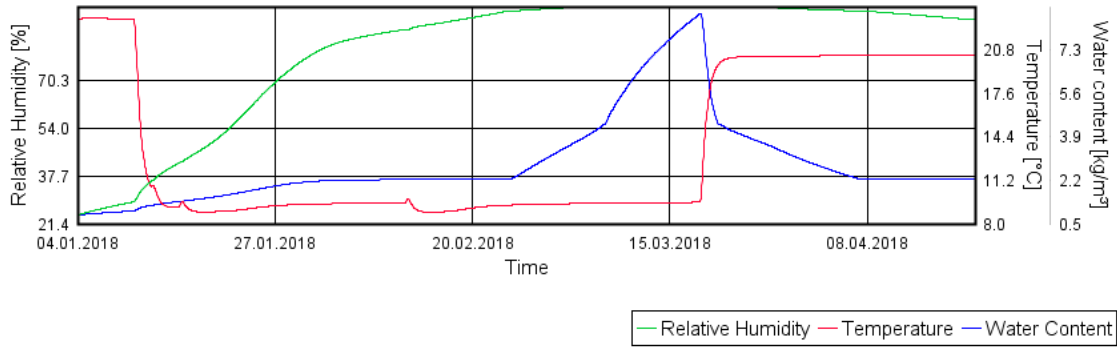
### Veggfelt 4 – SA11



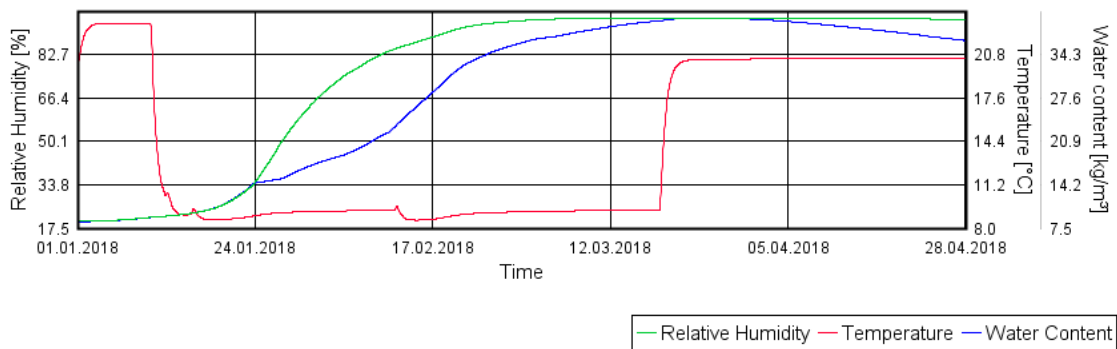
### Veggfelt 4 – B4



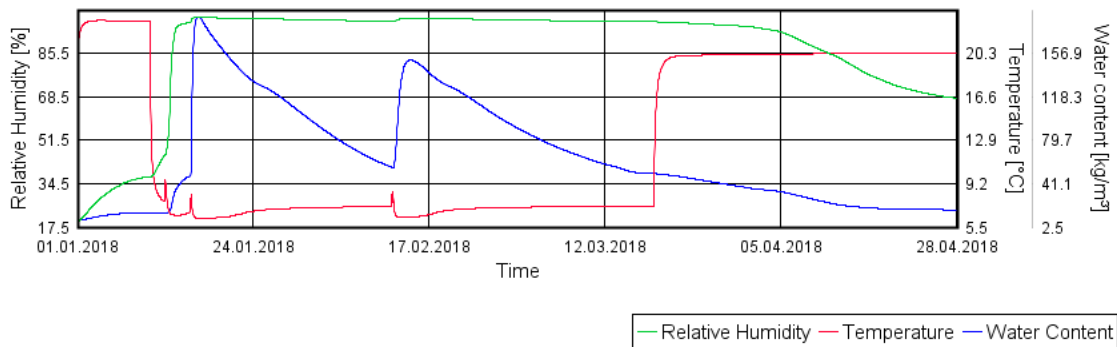
## D.2.4 Veggfelt 5 Veggfelt 5 – RF43



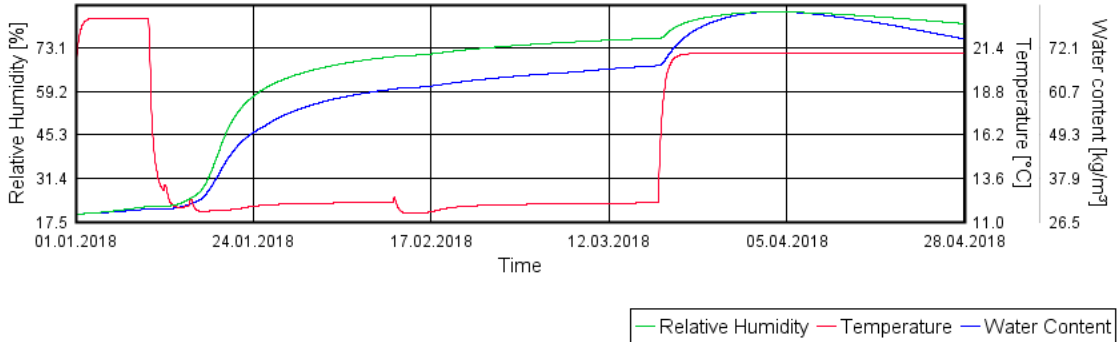
## Veggfelt 5 – SA13



## Veggfelt 5 – SA14

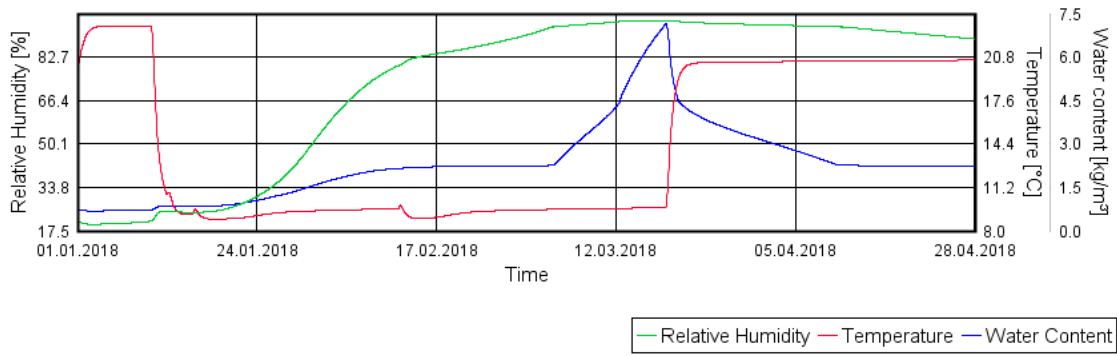


# Veggfelt 5 – B5

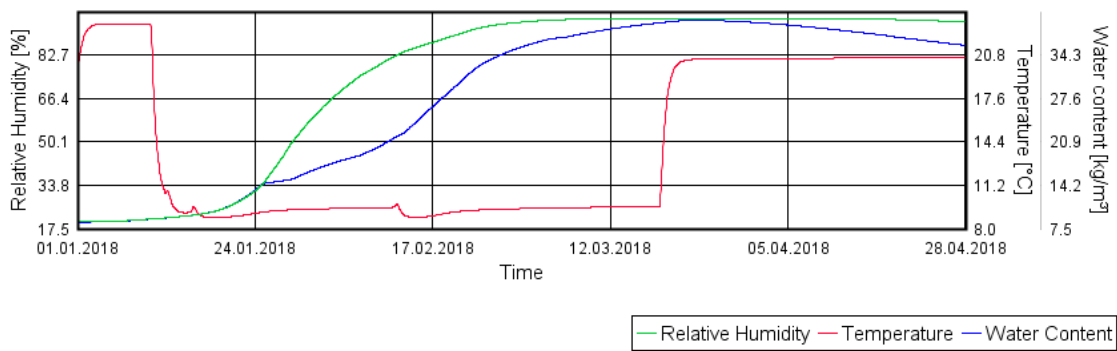


## D.2.5 Veggfelt 6

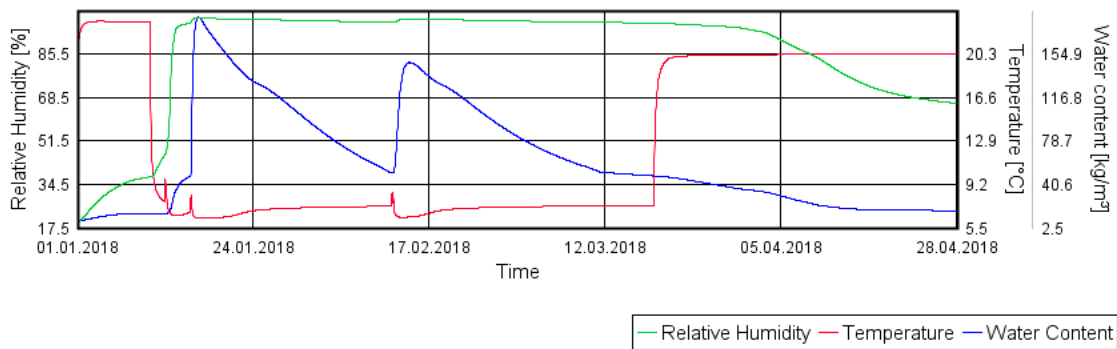
### Veggfelt 6 – RF1



### Veggfelt 6 – SA15

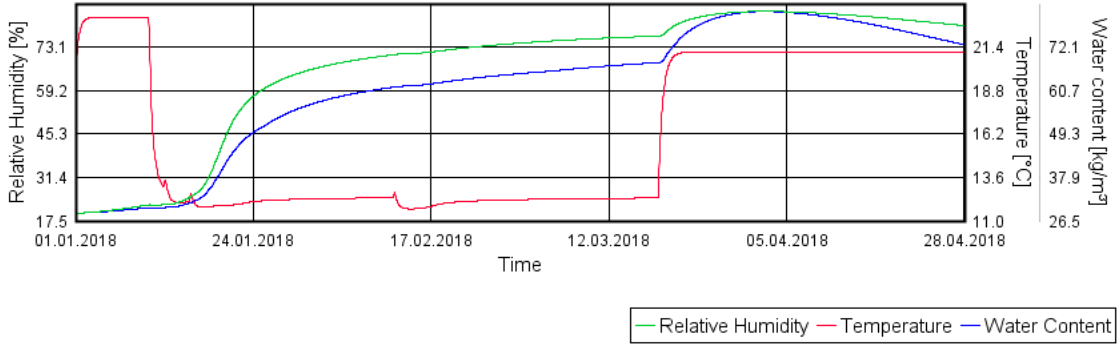


### Veggfelt 6 – SA16

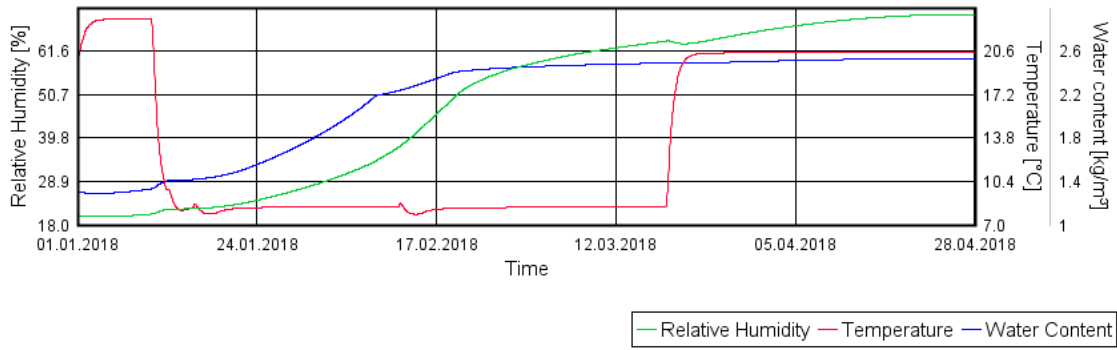




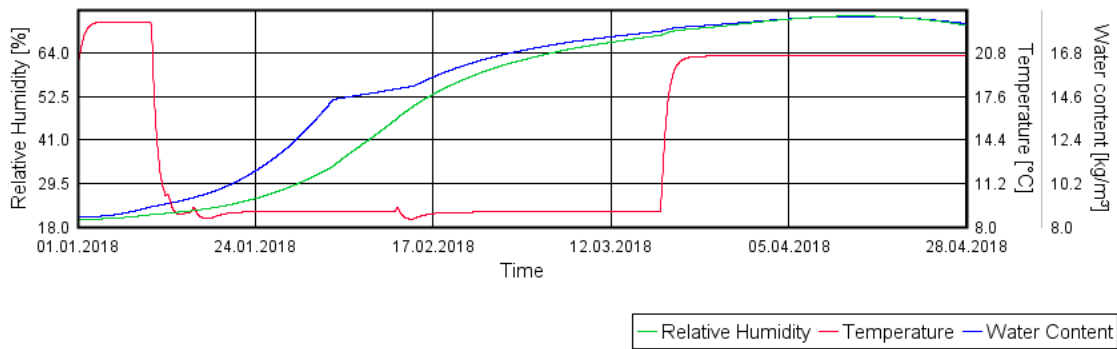
# Veggfelt 6 – B6



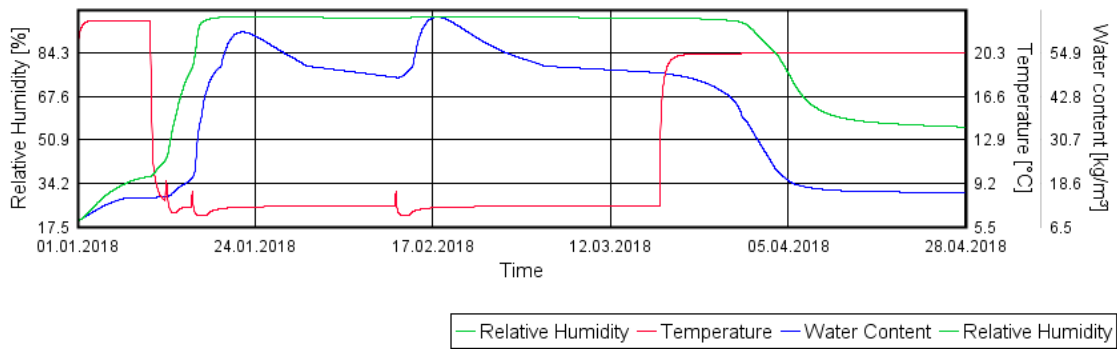
### D.2.6 Veggfelt 7 Veggfelt 7 – RF51



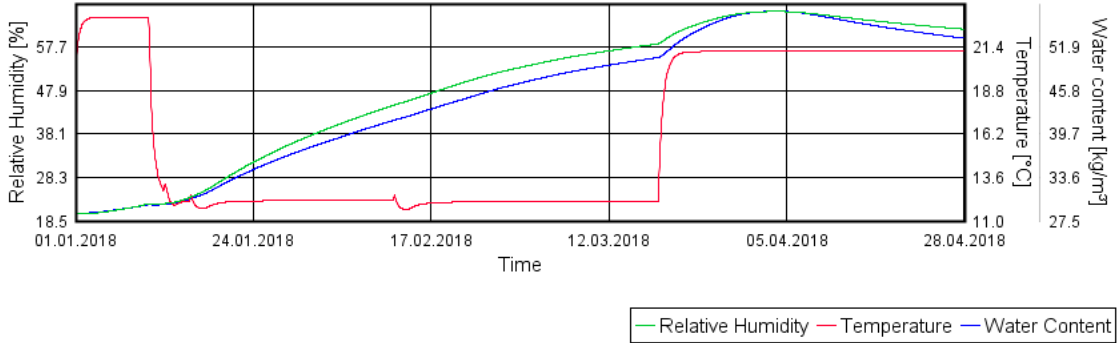
### Veggfelt 7 – SA17



### Veggfelt 7 – SA18



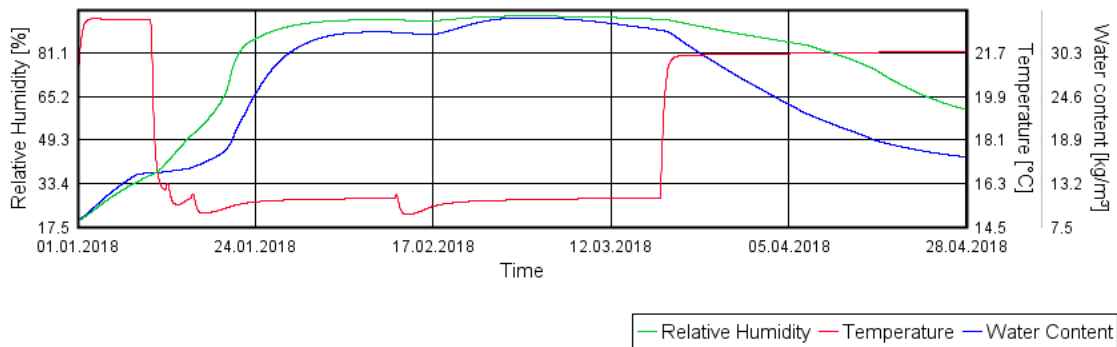
# Veggfelt 7 – B7



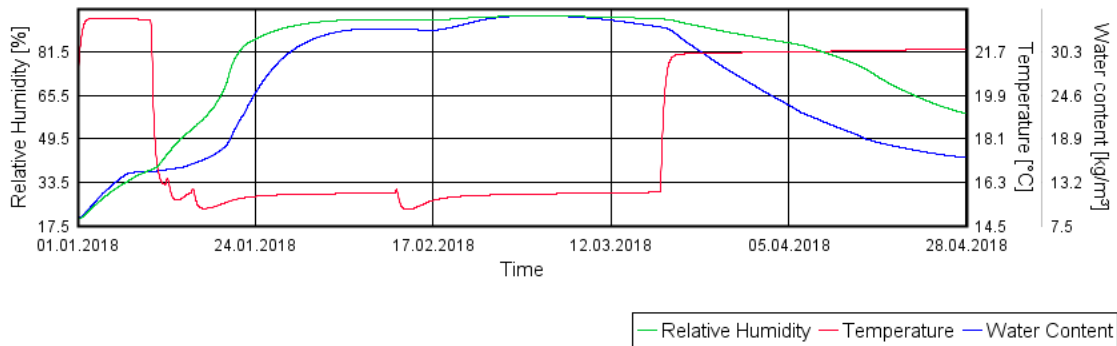
### D.3 Simulering med justert heftsonne

#### D.3.1 Veggfelt 2

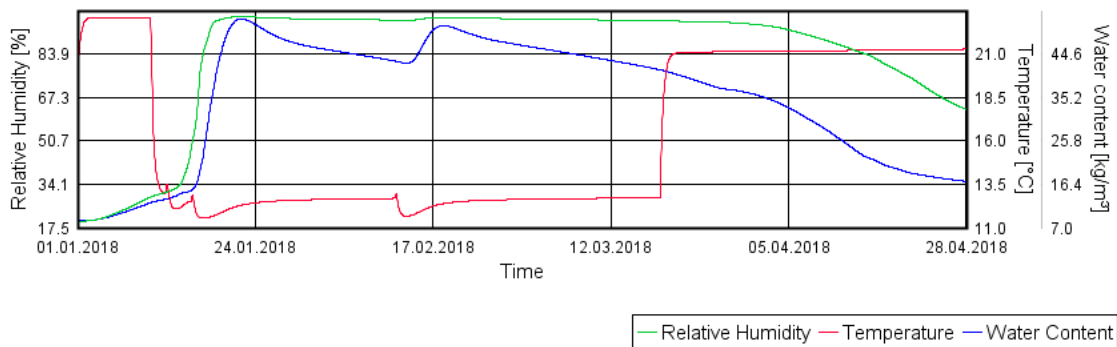
##### Veggfelt 2 – SA5



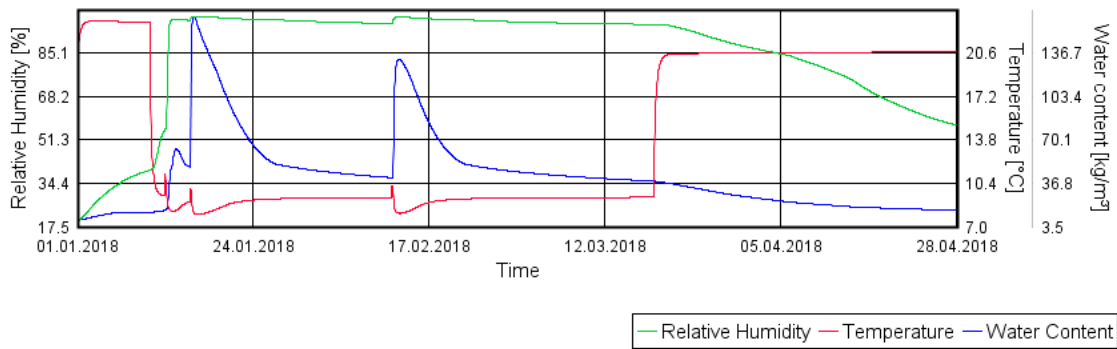
##### Veggfelt 2 – RF2



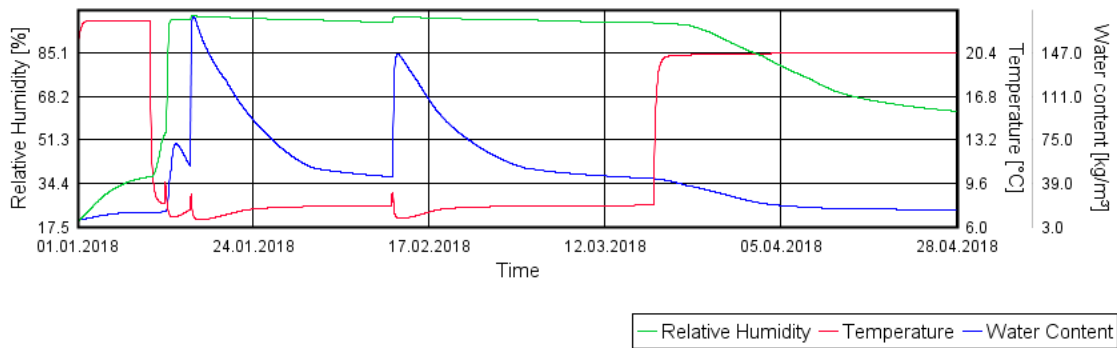
##### Veggfelt 2 – RF3



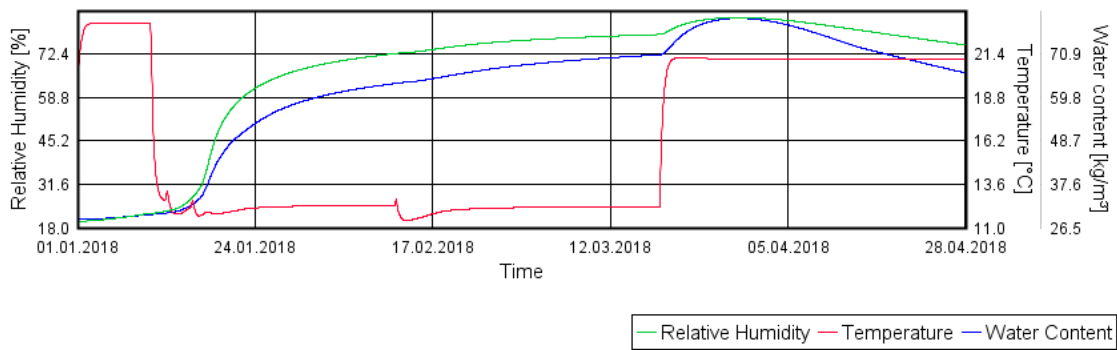
## Veggfelt 2 – RF58



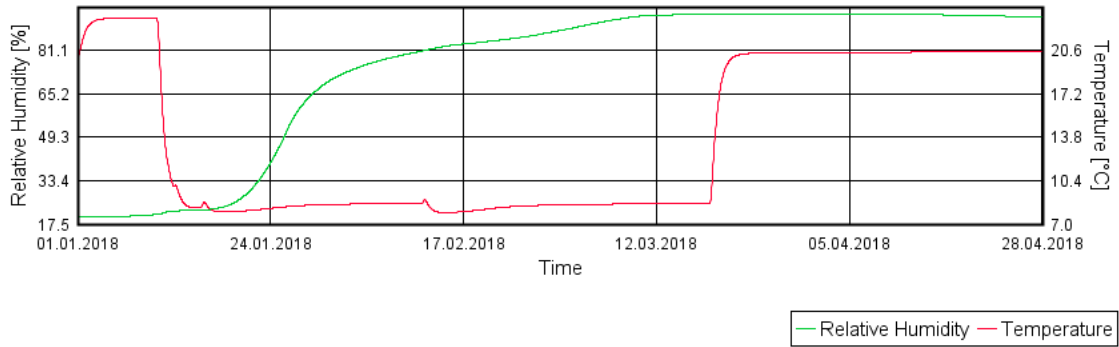
## Veggfelt 2 – SA6



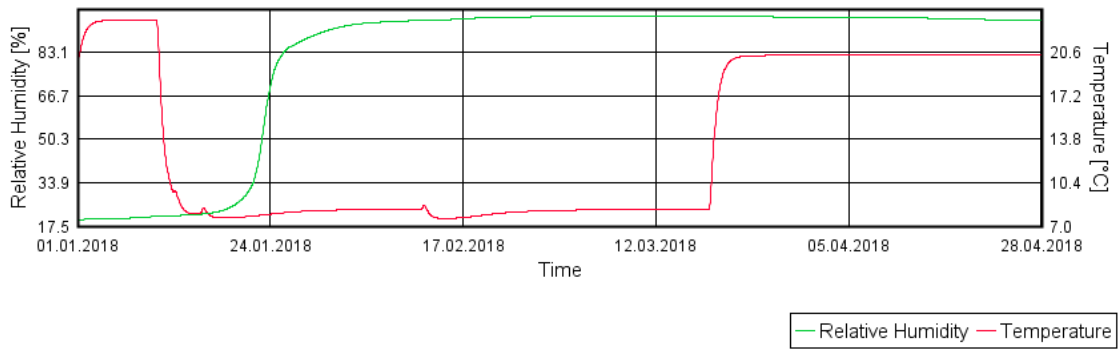
## Veggfelt 2 – B2



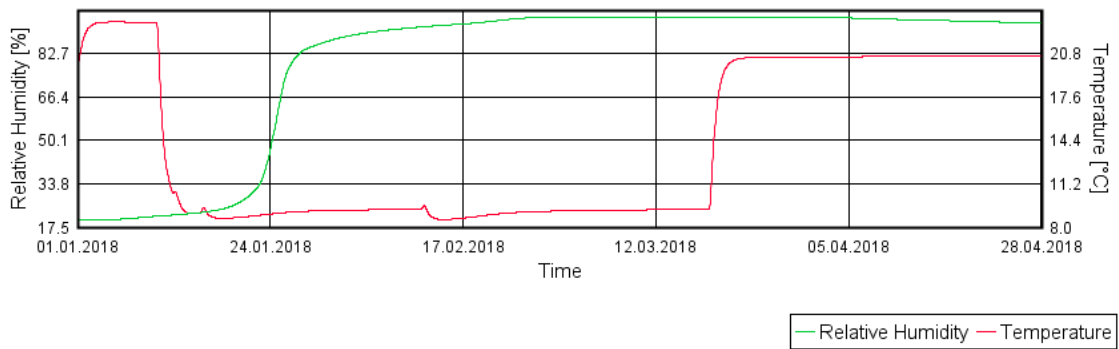
### D.3.2 Veggfelt 4 Veggfelt 4 – RF16



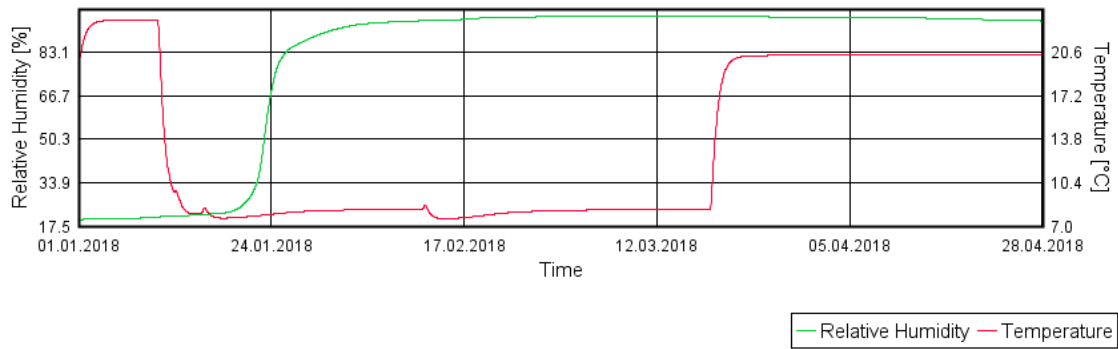
### Veggfelt 4 – RF4 / SA12



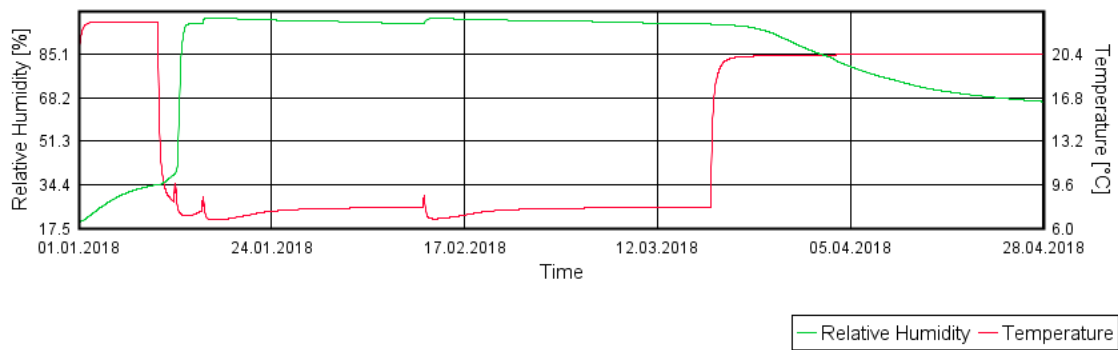
### Veggfelt 4 – SA10



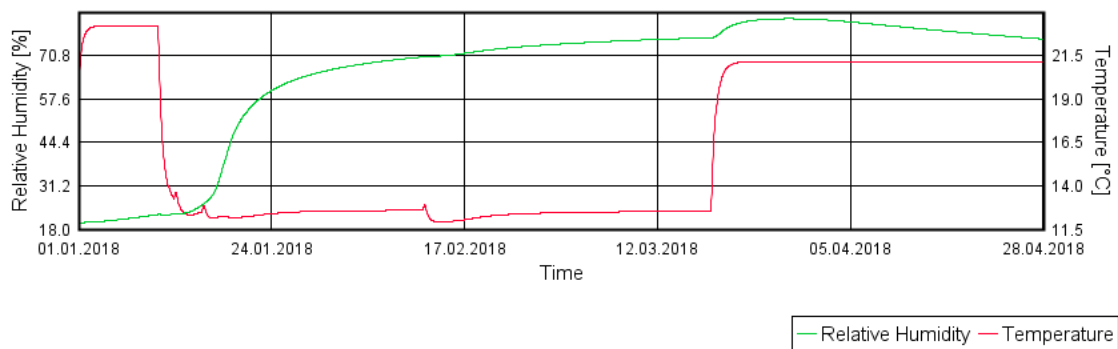
### Veggfelt 4 – RF5 / SA9



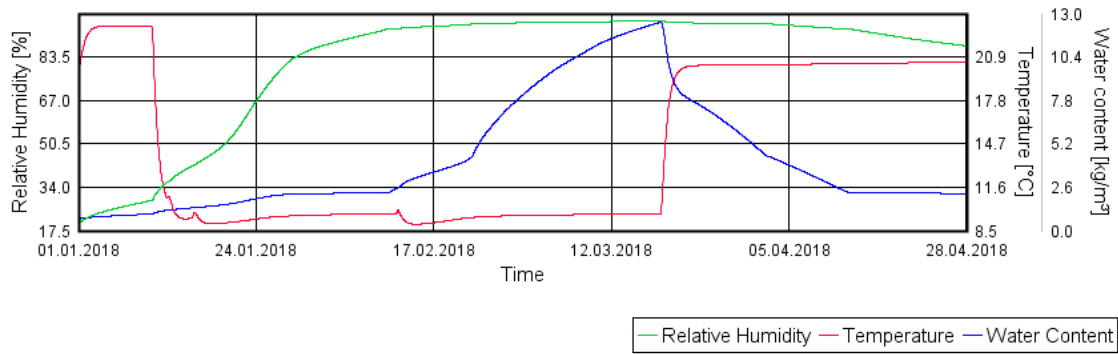
### Veggfelt 4 – SA11



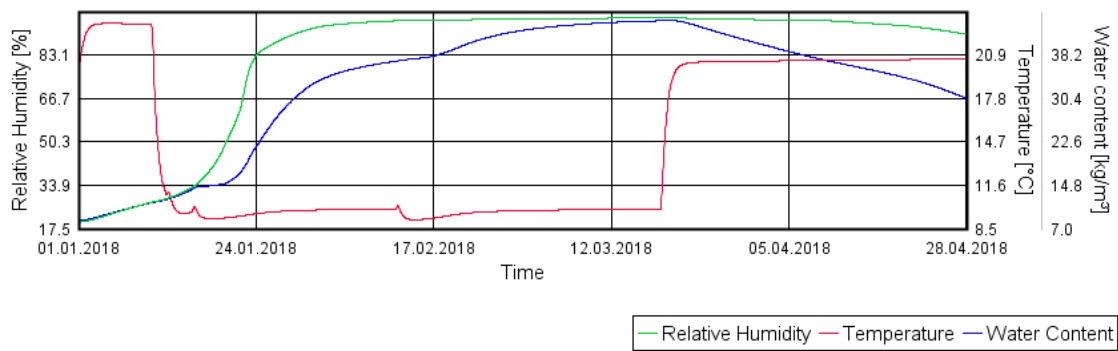
### Veggfelt 4 – B4



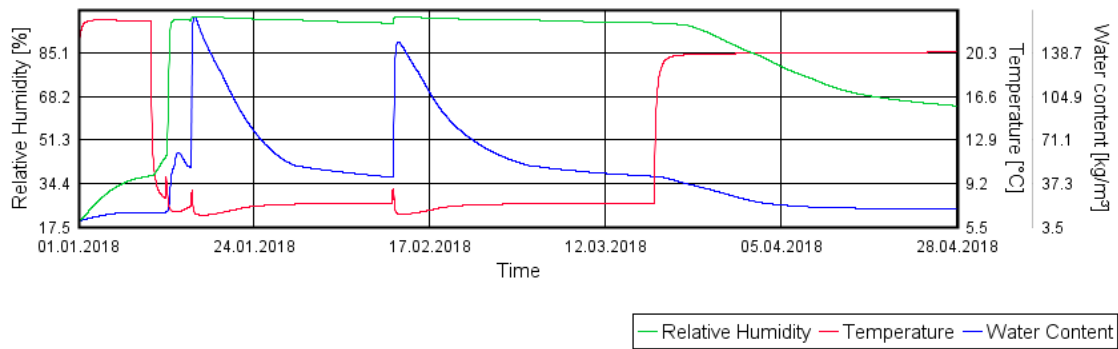
### D.3.3 Veggfelt 5 Veggfelt 5 – RF 43



### Veggfelt 5 – SA13

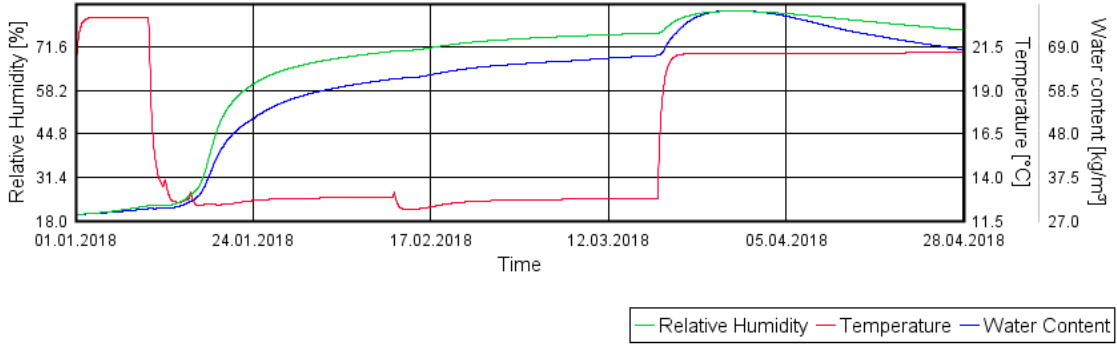


### Veggfelt 5 – SA14



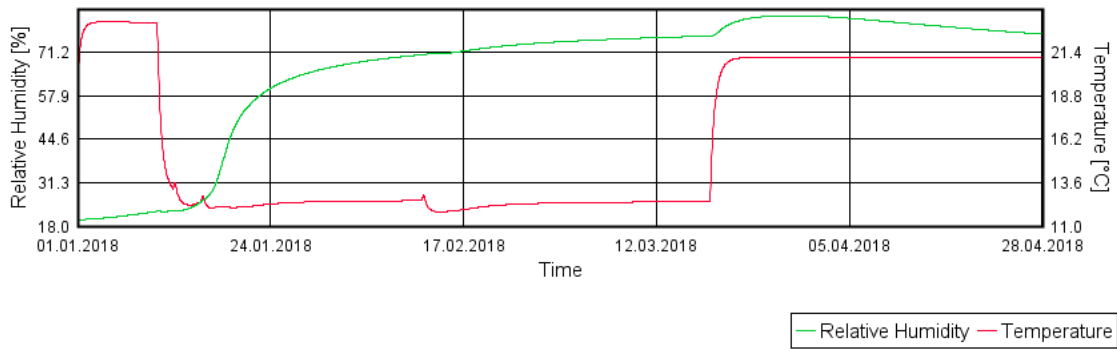


# Veggfelt 5 – B5

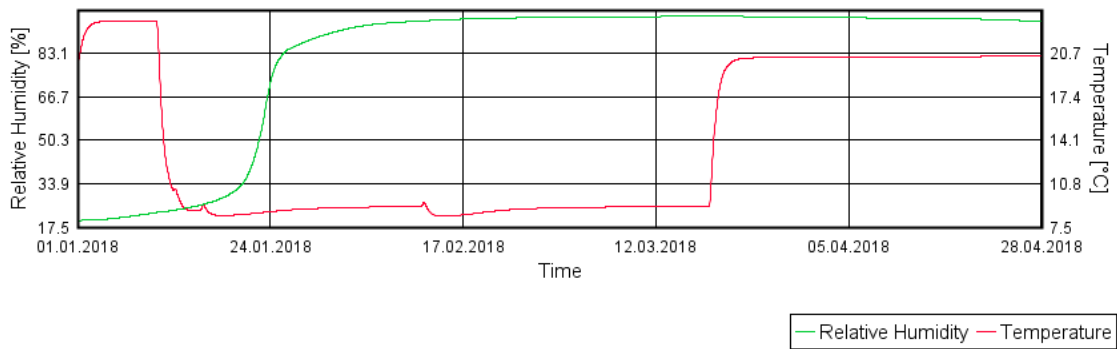


### D.3.4 Veggfelt 6

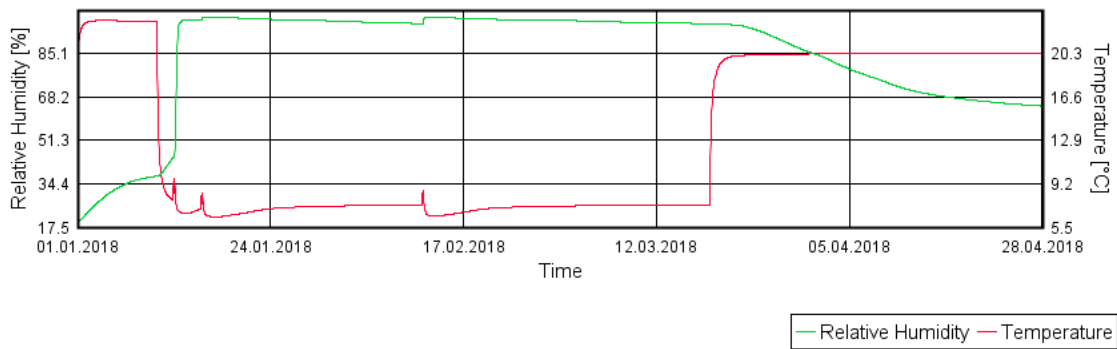
#### Veggfelt 6 – RF1



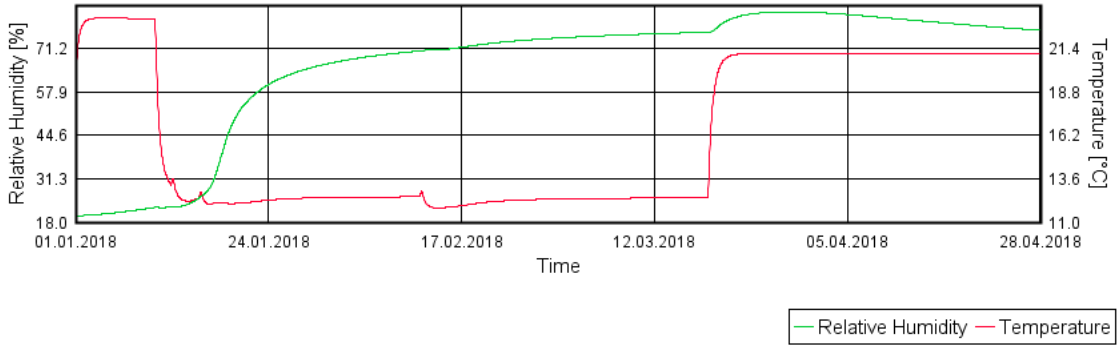
#### Veggfelt 6 – SA15



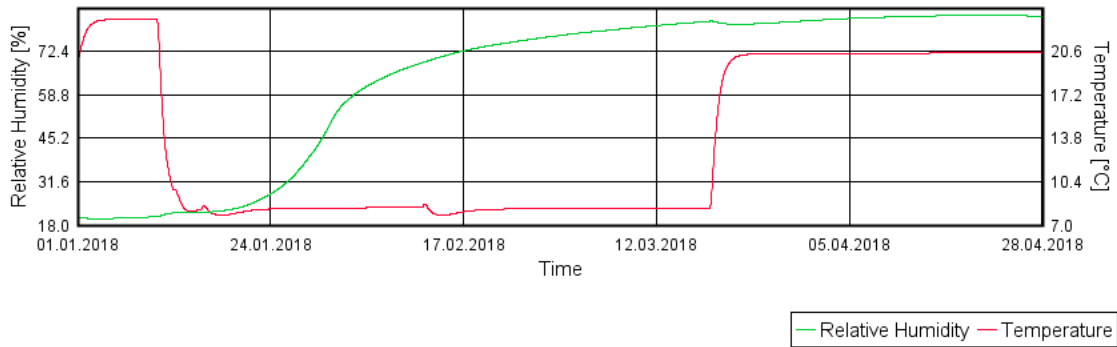
#### Veggfelt 6 – SA16



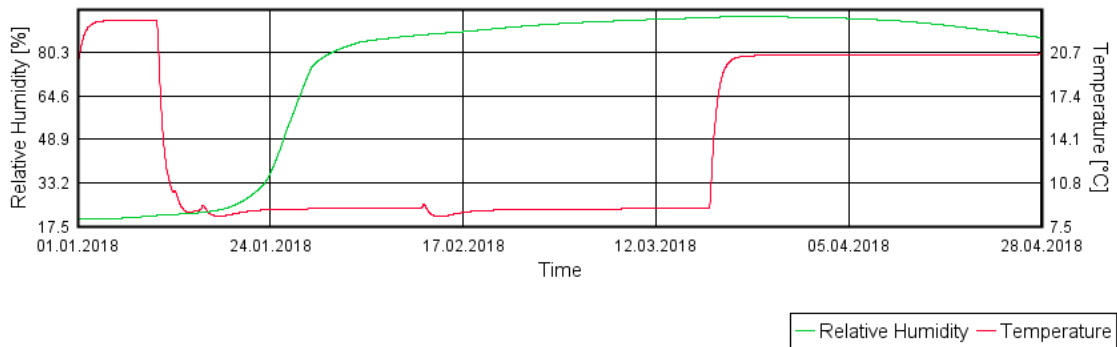
# Veggfelt 6 – B6



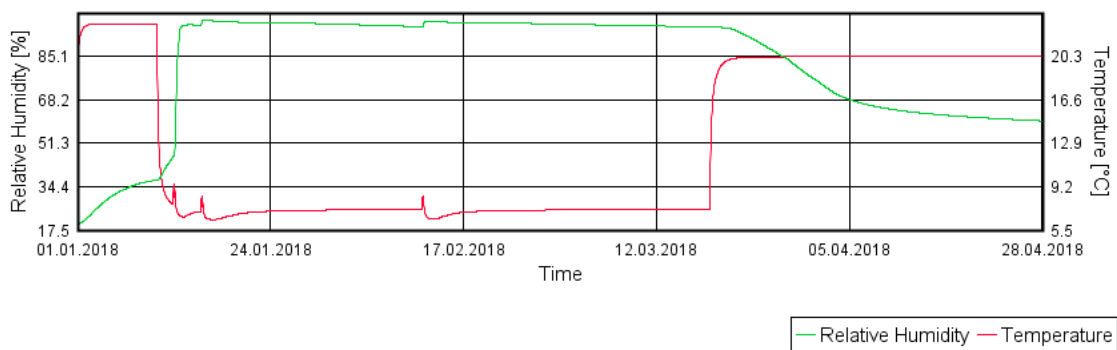
### D.3.5 Veggfelt 7 Veggfelt 7 – RF51



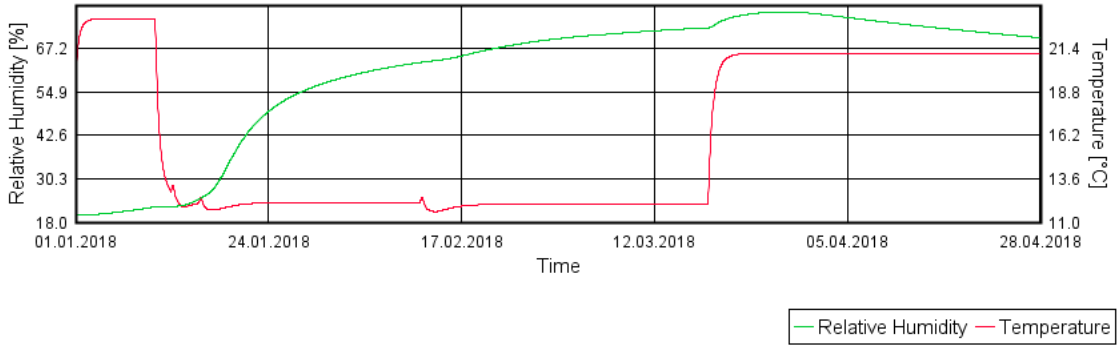
### Veggfelt 7 – SA17



### Veggfelt 7 – SA18

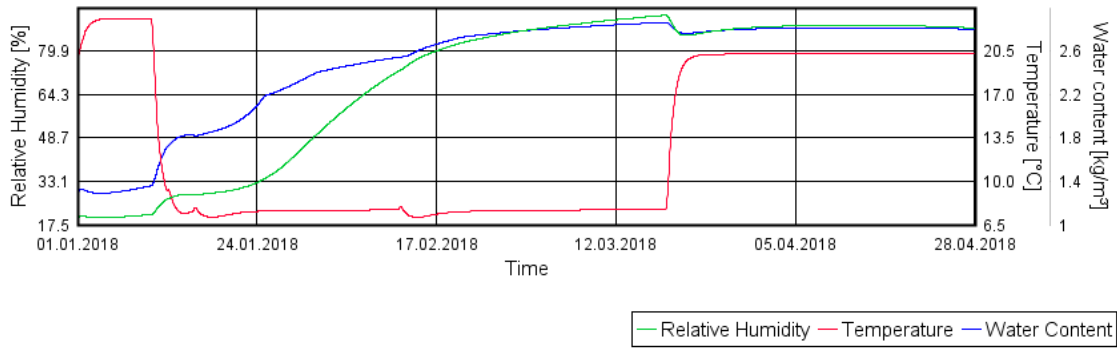


# Veggfelt 7 – B7

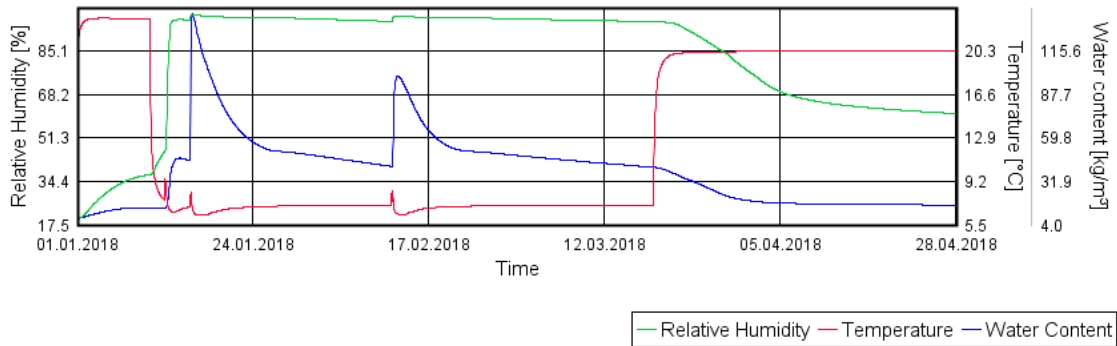


### D.3.6 Veggfelt 9

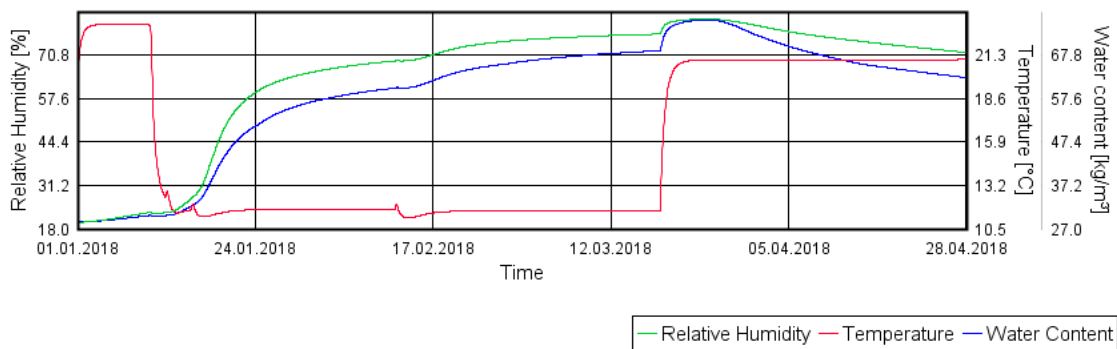
#### Veggfelt 9 – RF49



### Veggfelt 9 – SA20



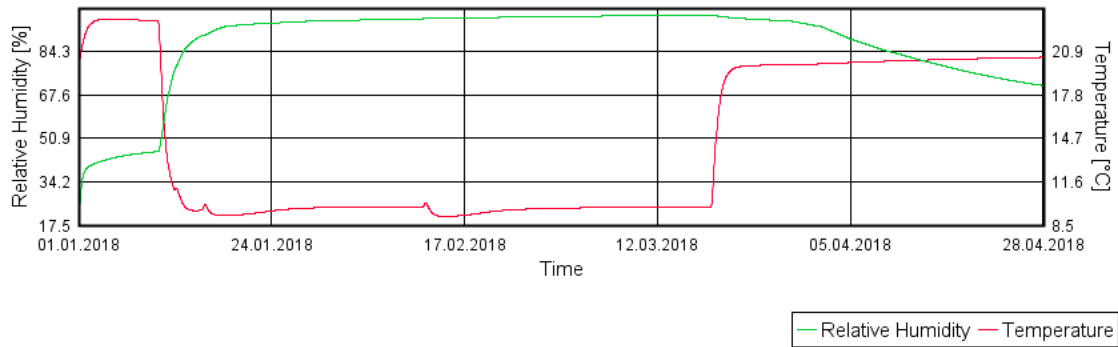
### Veggfelt 9 – B9



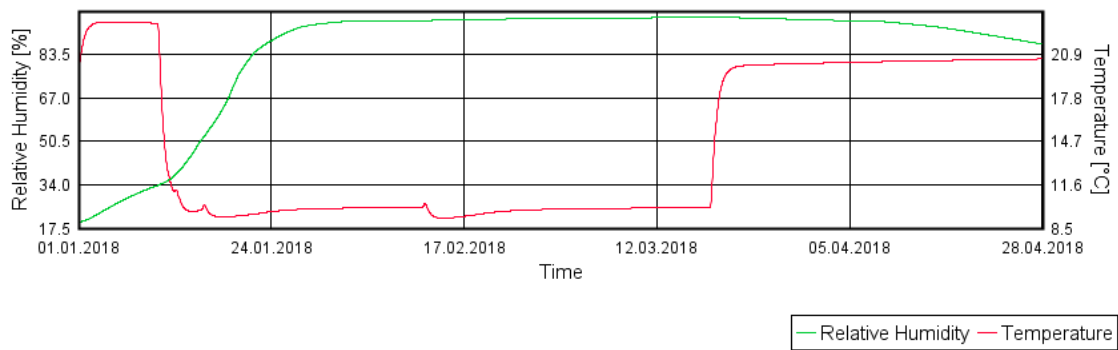
## D.4 Uten dampsperre

### D.4.1 Veggfelt 5

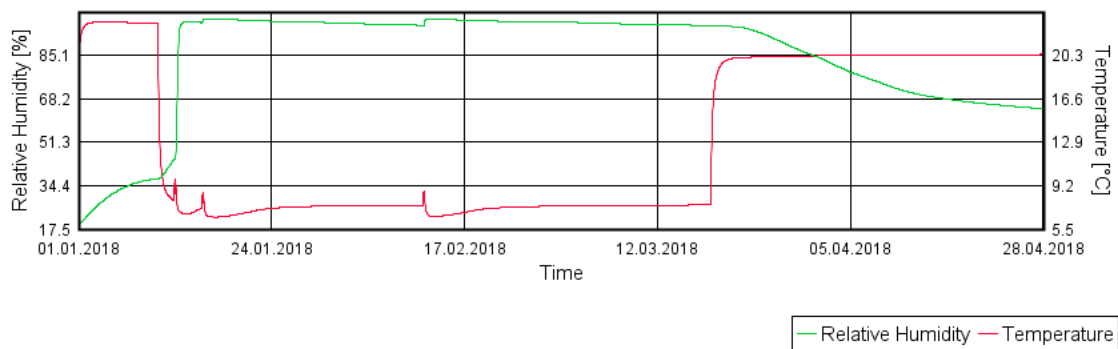
#### Veggfelt 5 – RF43



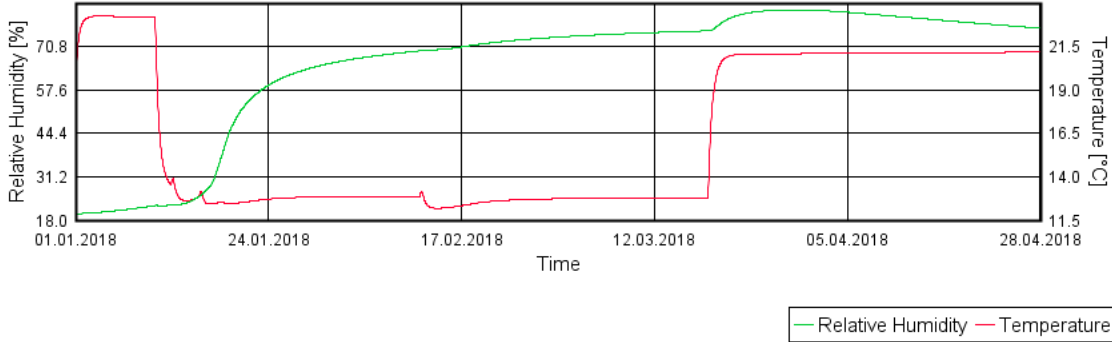
#### Veggfelt 5 – SA13



#### Veggfelt 5 – SA14



**Veggfelt 5 – B5**

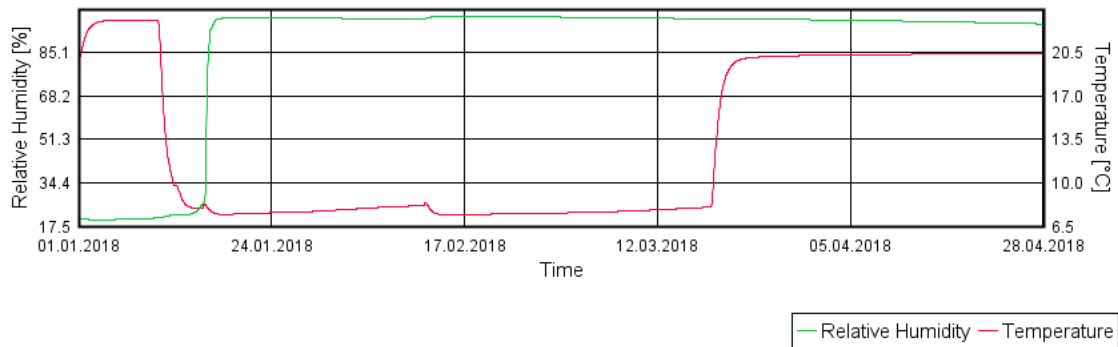




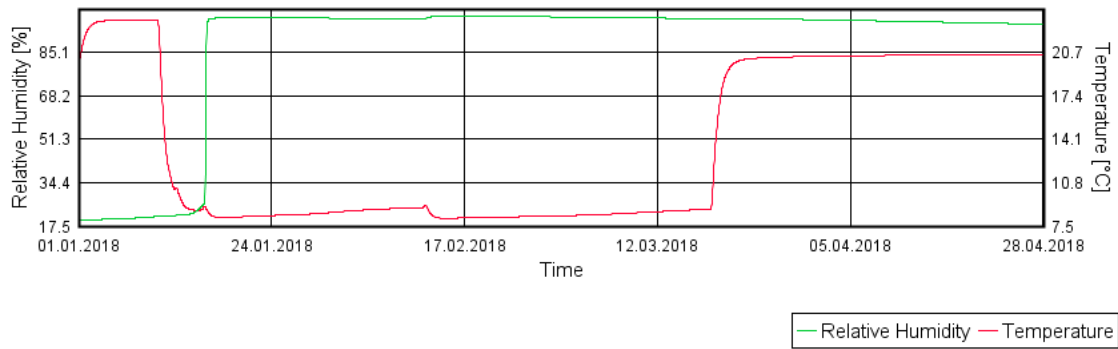
## D.5 Rød teglstein med justert Aw

### D.5.1 Veggfelt 7

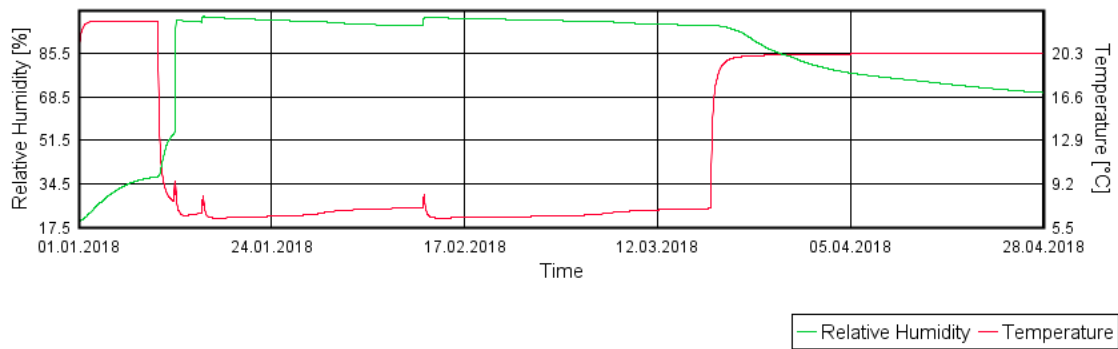
#### Veggfelt 7 – RF51



#### Veggfelt 7 – SA17



#### Veggfelt 7 – SA18



**Veggfelt 7 – B7**

