

Trefiberbasert isolasjon i bindingsverksvegger

Undersøkelse av fuktforhold i
laboratorieforsøk og sammenligning med
simuleringer i WUFI

Erik Lunde

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juli 2014

Hovedveileder: Stig Geving, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



Oppgavens tittel: Trefiberbasert isolasjon i bindingsverksvegger - Undersøkelse av fuktforhold i et laboratorieforsøk og sammenligning med simuleringer i WUFI®.	Dato: Juli 2014 Antall sider (inkl. Bilag): 105		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Erik Lunde			
Faglærer/veileder: Stig Geving, professor, Institutt for Bygg, Anlegg og Transport (BAT), NTNU			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Ole Aunrønning, avdelingsingeniør, BAT, NTNU			

Ekstrakt:

Oppgaven tar for seg oppsettet og gjennomføring av et laboratorieforsøk og sammenligning av resultater med simuleringer i WUFI. Perspektivet er fuktforhold i trefiberisolasjon i bindingsverksvegger.

Laboratorieforsøket er todelt. Det undersøker endimensjonal fukttransport gjennom isolasjonsmaterialet samt todimensjonale forhold. 1D-forsøket består av et rutenett på 15 forsøksceller, upåvirket av andre faktorer enn materialsjiktene og klimaet inne og ute. 2D-forsøket består av fem stykk, vanlig vegghøye bindingsverksfakk, hvor fuktopptak i stenderverk og naturlig konveksjon vil påvirke fuktfordelingen over veggen. I forsøket loggføres relativ fuktighet og temperatur i isolasjonen. I 2D-forsøket loggføres også fuktigheten i topp- og bunnsvillen.

Materialene i forsøket: *Kledning* Fermacell®. *Dampbrems*: PE-folie (Tommen Gram Dampsperre), DELTA® Luxx, INTELLO® eller ingen folie. *Isolasjon*: Hunton Trefiberisolasjon™ (plater og innblåst) og Glava® Proff 35 (mineralull for sammenligning). *Veggykkelse*: 300mm. *Vindsperre*: Hunton Vindtett™ 12 mm og 50 mm (laget av 2 x 25 mm Hunton Vindtett™ plater) og Tyvek®. *Klemleker*: 36 x 48 mm.

Klima som testelementene blir utsatt for er tredelt og består av to vinterscenarioer med lavt og middels fuktilskudd og ett vårsenario med lavt fuktilskudd.

Resultatene fra forsøksperioden viser forskjellene i fuktegenskapene til isolasjonstypene. Trefiberisolasjonen har høyere totalt fuktinnhold, men generelt lavere relativ fuktighet mot ytterside av vegg. Mineralullen har vesentlig raskere reaksjonstid på utørking og oppfukning. Begge isolasjonstypene når fuktnivåer som er kritiske med tanke på biologisk vekst. Simuleringene i WUFI® viser delvis samsvar med forsøket. Bruk av klimafil fra laboratoriet fungerte ikke som klimabelastning i WUFI®, årsaken er ukjent.

Konklusjon

Trefiberisolasjonen er mindre avhengig av innvendig dampsperre.

Trefiberisolasjonen vil holde et akseptabelt fuktnivå i bindingsverksvegger med de belastninger som er testet i dette forsøket.

Stikkord:

1. Trefiberisolasjon
2. Fuktforhold
3. Bindingsverksvegger
4. Laboratorieforsøk

X.
(sign.)

Forord

Denne masteroppgaven er basert på et laboratorieforsøk med trefiberbasert isolasjon i bindingsverksvegger som har blitt kjørt i klimarommene til NTNU våren 2014. To typer trefiberisolasjon testes mot ulike vind- og dampsperrer med tanke på fuktopptak/opptørking. Oppgavens hensikt er også å sammenligne prøveresultatene med simuleringresultater fra WUFI® og dermed undersøke om WUFI® kan valideres som simuleringprogram for trefiberisolasjonen Flex og Zell fra Hunton Fiber AS.

Bakgrunn og vurderingskriterier for evalueringen av resultatene kommer i starten av oppgaven, etterfulgt av hvordan laboratorieforsøket er bygd og utført. Oppgaven avsluttes med resultater fra både laboratoriet og simuleringprogrammet samt en evaluering av disse og isolasjonsmaterialets ytelser under forsøket.

Masteroppgaven bygger på min prosjektoppgave *Trefiberbasert isolasjon i bindingsverksvegger – oppsett av laboratorieforsøk for undersøkelse av fuktforhold* (Lunde 2013).

Oppgaven er en del av flere tekniske undersøkelser utført av SINTEF Byggforsk på oppdrag av Hunton som ønsker å få undersøkt fukttekniske egenskaper i trefiberbasert isolasjon. Min prosjektoppgave høsten 2013 hadde til hensikt å klargjøre for et laboratorieforsøk som skulle videreføres i denne masteroppgaven, slik at det skulle være tilstrekkelig med tid til å gjennomføre et omfattende laboratorieforsøk og en analyse av resultatene.

Prosjektoppgaven var altså en ren forberedelse til forsøket som ble gjennomført i masteroppgaven. De deler av prosjektoppgaven som er relevant for masteroppgaven brukes her.

I litteratur som jeg ikke kommer nærmere inn på i denne oppgaven behandles andre egenskaper enn trefiberisolasjonens isolasjonsevne, f.eks. termisk lagringskapasitet, lydempning og påvirkning av innklimaet både fuktmessig men også med tanke på emisjoner. Et annet perspektiv som jeg heller ikke går nærmere inn på er det miljømessige som nå også preger utviklingen i byggebransjen.

Med min bakgrunn som tømrer har oppgaven har vært tiltalende og interessant i forhold til å kunne være med på en mulig utvikling i byggebransjen og få jobbe med den godt kjente bindingsverksveggen med en ny vinkling og et nytt isolasjonsmateriale.

Det å fullføre et forskningsprosjekt er noe jeg er takknemlig for å ha fått være en del av og en hendelse jeg kommer til å ta med meg videre og som er stolt av.

Jeg ønsker å rette en takk til avdelingsingeniør Ole Aunrønning for hjelp med laboratorietekniske elementer og loggføring av forsøket. Jeg takker forskningsdirektør Jonas Holme og forskningsleder Petra Rüter ved SINTEF for gode diskusjoner rundt oppsett og resultatevaluering.

Sist, men ikke minst, ønsker jeg å takke Stig Geving, professor ved Institutt for Bygg, Anlegg og Transport (BAT) ved NTNU, for god veiledning og tilrettelegging av oppgaven.

Sammendrag

Bruken av og produksjon av trefiberbasert isolasjon er liten i Norden i forhold til resten av Europa. Hunton Fiber AS iverksetter i disse dager planene om egenproduksjon. For å kvalitetssikre produktenes anvendelsesområde/hvilke kombinasjoner av vindsperrer og fuktbremser som er egnet ønsker de en undersøkelse av produktets bygningsfysiske egenskaper relatert til fuktopptak.

Masteroppgaven er en del av flere undersøkelser utført av SINTEF Byggforsk på oppdrag fra Hunton. Formålet med oppgaven var å undersøke og dokumentere fuktforhold i bindingsverksvegger med Hunton Trefiberisolasjon™. Oppgaven redegjør for oppsett og gjennomføring av et laboratorieforsøk og sammenligner resultatene med simuleringer utført i WUFI®.

Kapasitet i klimarom og tid/arbeidskapasitet har begrenset antall varianter av materialkombinasjoner og klimavarianter.

Isolasjonsvariantene som er undersøkt, Flex og Zell, er henholdsvis en fast plate og løsfiber for innblåsing. De leveres fra Hunton under navnene Hunton Trefiberisolasjon™ (plater/innblåst). Isolasjonsmaterialet har en varmekapasitet på 2100j/kg K og har hygroskopiske egenskaper som gir en stor fuktbufferingskapasitet. Varmekonduktiviteten er 0,038 og 0,040 W/mK for Flex og Zell.

Laboratorieforsøket er todelt. Det undersøker endimensjonal fukttransport gjennom isolasjonsmaterialet i en forsøksvegg som består av 15 forsøksceller 600x600 mm, upåvirket andre faktorer enn materialsjiktene og klimaet inne og ute. 2D-forsøket er fem stykk, vanlig veggøye bindingsverksfakk, hvor fuktopptak i stenderverk og naturlig konveksjon vil påvirke fuktfordelingen over veggen. I forsøket loggføres relativ fuktighet (RF) og temperatur i ulike dybder og høyder (2D-delen) i isolasjonen. I 2D-forsøket loggføres også fuktigheten i topp- og bunnsvillen.

Materialene i forsøket; *Kledning* Fermacell®. *Dampbrems*; PE-folie (Tommen gram dampsperre), DELTA® Luxx, INTELLO® eller ikke noe folie. *Isolasjon*; Hunton Trefiberisolasjon™ (plater og innblåst) og Glava mineralull (for sammenligning). *Veggykkelse*; 300mm. *Vindsperre*; Hunton Vindtett 12 mm og 50 mm (laget av 2 x 25 mm Hunton Vindtett plater) og Tyvek®. *Klemlekter*; 36 x 48 mm.

Materialene som er brukt i forsøket er forhåndskondisjonert til ca 70% RF.

Målesystemet i forsøket består i hovedsak av 60 sensorer som måler relativ fuktighet og temperatur. Loggføringen har foregått automatisk. Det er også montert trefuktsensorer i topp- og bunnsvill i de 5 fullskala veggelementene. Trefukten er målt manuelt med motstandsmåler.

Klima som testelementene blir utsatt for er tredelt og består av; to vinterscenarioer med lav og middels fukttilskudd og ett vårsenario med lavt fukttilskudd.

Resultatene av forsøket viser forskjellene i fuktegenskapene til isolasjonstypene. Trefiberisolasjonen har høyere totalt fuktinnhold, men jevnt over lavere RF mot

ytterside av vegg sammenlignet med mineralull. Mineralullen har vesentlig raskere reaksjonstid på utørking og oppfukting. Begge isolasjonstypene når i forøskets klimabelastning områder som er kritiske med tanke på biologisk vekst. Simuleringene i WUFI® viser et tydelig samsvar mellom simuleringer og forsøk for de enkle tilfellene i 1D-veggen. Ved en mer kompleks klimabelastning fremkom ikke resultater som tilsier at WUFI kan legges til grunn for simulering av materialkombinasjoner uten ytterligere undersøkelser eller verifisering av sorpsjonsegenskaper. Oppgaven kan ikke entydig identifisere årsaken.

Konklusjon

Trefiberisolasjonen klarer seg minst like bra som mineralull under de testede klimabelastningene. De er også mindre avhengig dampsperrrens Sd-verdier. Resultatene viser at trefiberisolasjon har interessante bygningsfysiske egenskaper relatert til fuktopptak og fukttransport/konveksjon, egenskaper kan være fordelaktige ved de materialkombinasjoner og klimabelastninger som er testet i dette forsøket.

Abstract

The use and production of wood fibre-based insulation is small in the Nordic countries compared to the rest of Europe. Hunton Fiber AS is currently implementing plans to start producing wood fibre-based insulation. In order to verify the products' field of utilisation, and which combinations of windbreakers and vapor retarders that are suitable, Hunton have requested tests of the products' building physical properties regarding moisture accumulation.

This **thesis** is a part of a research project commissioned by Hunton and carried out by SINTEF Byggforsk. The aim of the thesis is to investigate and substantiate moisture conditions in timber frame-built walls with Hunton Trefiberisolasjon™ (Wood fibre insulation). The thesis gives an account of the setup and the implementation of a laboratory test, and compares the results of the test with simulations carried out in WUFI®.

The number of material conditions and climatic scenarios tested were restricted due to the limited capacity of the climatic room and the time frame of the study.

The insulation products that have been examined are Flex and Zell, a solid plate and loose fibre designed for insufflation, respectively, both offered by Hunton AS. The insulation material has a thermal capacity of 2100J/kgK and has hygroscopic properties that give a large moisture buffer capacity. The thermal conductivity is 0.038 and 0.040 W/mK for Flex and Zell, respectively.

The laboratory test is split in two parts. First it looks at one-dimensional moisture transport through the insulation material in a test wall consisting of 15 test cells (300x600x600 mm), unaffected by other factors than the material composition used in each cell as well as outdoor and indoor climate. Secondly, five 2D-tests have been carried out with a normal height frame-built wall part (300x600x2400mm), where moisture uptake in the stud partitions and natural convection have affected the moisture dispersion in the wall. The tests log relative humidity (RH) and the temperature in different depths and heights (the 2D-part) of the insulation. The 2D-part also logs the humidity in the top and ground beam.

The materials used in the test are: *indoors cladding*: Fermacell®; *vapour barrier*: PE-foil (Tommen Gram Dampsperre), DELTA® Luxx, INTELLO® or no foil; *Insulation*: Hunton Trefiberisolasjon™ (plates and insufflated) and Glava mineral wool (for comparison only); *Wall thickness*: 300 mm. *Sheating*: Hunton Vindtett™ 12 mm and 50 mm (made of 2 x 25 mm Hunton Vindtett™ plates) and Tyvek®; *Hug barges*: 36 x 48 mm

The materials used in the test have been conditioned to approximately 70% RH.

The measuring system of the test consists of 60 sensors measuring relative humidity and temperature. The logging has been automatic. Wood moisture sensors have been rigged in the top and ground beams in the five full scale wall elements. The wood moisture has been measured manually with an ohmmeter.

The test elements have been exposed to three **climatic scenarios**; two winter scenarios with low and medium moisture contributions, and one spring scenario with low moisture contribution.

The **test results** show the difference in the moisture characteristics of the insulation types. The wood fibre insulation has higher total moisture content, but a consistently lower RH against the outer surface of the wall than the mineral wool. The mineral wool on the other hand, has a substantially faster response time of dehydrogenation and wetting. Both types of insulation approach levels of moisture that are critical when considering biological growth. The WUFI® simulations are in accordance with the tests of the one-dimensional wall. The more complex climatic strain scenarios did not yield results that indicate that WUFI® can be relied on to simulate combinations of materials without further investigations or verification of sorption capacities. The thesis has not been able to unambiguously identify the reason for this.

The conclusion of the thesis is that wood fibre insulation managed just as well as mineral wool in the tested climatic scenarios. The wood fibre insulation is less dependent on the Sd-values of the vapour barrier. The laboratory tests show that wood fibre insulation holds interesting building physics properties related to moisture uptake and transport/convection. These are properties that can be advantageous in the combinations of materials and climatic scenarios that have been tested.

Innholdsfortegnelse

FORORD	III
SAMMENDRAG	V
ABSTRACT	VII
1 INNLEDNING	1
1.1 FORMÅL	1
1.2 BAKGRUNN	1
1.2.1 GJENNOMFØRINGSMODELL	2
1.3 BEGRENSNINGER OG AVKLARINGER	3
2 GRUNNLAG FOR VURDERINGER	4
2.1 MATERIALPARAMETRE	4
2.1.1 FLEX	4
2.1.2 ZELL	4
2.2 BIOLOGISK VEKST,	5
2.3 KRAV TIL DAMSPERRESJIKT	7
2.4 HYGROSKOPISKE EGENSKAPER	7
3 LABORATORIEFORSØK	9
3.1 HENSIKTEN MED FORSØKET	9
3.2 FORSØKSVEGGER	10
3.2.1 1D-FORSØKET	10
3.2.2 2D-OPPSETTET	14
3.3 FORSØKSMATERIELL	17
3.3.1 INNBLÅSING AV ZELL	17
3.4 VALG AV KLIMA	19
3.4.1 KLIMASTYRINGEN	20
3.5 KONDISJONERING AV ISOLASJONSMATERIALER	21
3.6 MÅLESYSTEM	24
3.6.1 RF/T-SENSORER	24
3.6.2 TREFUKTELEKTRODER	26
3.6.3 TREFUKTMÅLINGER	27
4 RESULTATER	29
4.1 LOGGFØRING OG BEHANDLING AV DATA	29
4.2 SAMMENLIGNING AV FORSØKSELEMENTENE 1D-VEGGEN	29
4.2.1 EFFEKTEN AV ISOLASJONSTYPE, TETTESJIKT A12,D	31
4.2.2 ENDRING I RF FOR ISOLASJONSTYPE F OG M, TETTESJIKT A12,PE	32
4.2.3 EFFEKTEN AV TREFIBERISOLASJONSARIANT, TETTESJIKT A50,D	33
4.2.4 EFFEKTEN AV ISOLASJONSTYPE, TETTESJIKT T,D	34
4.2.5 EFFEKTEN AV ULIKE VINDSPERRER PÅ FLEX, INNVENDIG TETTESJIKT D	35
4.2.6 EFFEKTEN AV ULIKE DAMPBREMSER PÅ FLEX, UTVENDIG TETTESJIKT A12	36
4.2.7 EFFEKTEN AV ULIKE DAMSPERRER PÅ FLEX, UTVENDIG TETTESJIKT A50	37
4.2.8 ALTERNATIV OPPBYGNING MED FLEX, I FORHOLD TIL TYVEK, MINERALULL OG PE-FOLIE	38

4.2.9	BETYDNINGEN AV PE-FOLIE OG DELTA® LUXX FOR FLEX OG MINERALULL, UTVENDIG TETTESJIKT TYVEK®	39
4.3	SAMMENLIGNING AV VEGGELEMENTENE I 2D	41
4.3.1	I TOPPEN AV VEGGENE.....	41
4.3.2	TREFUKT I SVILLENE	42
4.3.3	KONVEKSJON I VEGGELEMENTENE.....	43
5	WUFI SIMULERINGENE.....	44
5.1	VALG AV DATA OG TESTMETODE	44
5.2	VALIDERING AV WUFI® OG INNPUTTPARAMETERE.....	45
5.3	RESULTATER FRA WUFI	46
5.4	ÅRSSIMULERING I WUFI	50
6	DRØFTING AV RESULTATENE.....	52
7	KONKLUSJON.....	54
8	ANBEFALINGER TIL VIDERE ARBEIDER.....	55
9	MULIGE FEILKILDER.....	56
9.1.1	MULIGE FEILKILDER I LABORATORIEFORSØKET.	56
9.1.2	MULIGE FEILKILDER VED KLIMASTYRING.....	56
9.1.3	MULIGE FEILKILDER I WUFI® SIMULERINGENE.	57
	LITTERATURLISTE.....	58
	VEDLEGG 1: SORPSJONSKURVER TIL ALTERNATIVE ISOLASJONSMATERIALER.	63
	VEDLEGG 2: KONDISJONERING AV TREFIBERISOLASJON	64
	FLEX.....	64
	ZELL	65
	VEDLEGG 3: KALIBRERING AV RF/T SENSORER.....	67
	VEDLEGG 4: MATLABSKRIPT	73
	VEDLEGG 5: RESULTATER FRA CELLENE I 1D-VEGGEN.	74
	VEDLEGG 6: RESULTATER FRA VEGGELEMENTENE.....	82
	VEDLEGG 7: TREFUKTMÅLINGER I TOPP OG BUNNSVILL.....	85
	VEDLEGG 8: SENSORPLASSERINGER I 1D OG 2D VEGGEN.....	88

Figurliste

Figur 1: Gjennomføringsmodell av oppgaven.	3
Figur 2: Flex 10cm isolasjonsmatter (Hunton 2013b)	4
Figur 3: Zell blåseisolasjon (Hunton 2013a).....	5
Figur 4: Elementer som må være tilstede for at biologisk vekst skal forekomme (Geving & Holme 2010)	5
Figur 5: Farekart for soppangrep (Trondstad, 2003 gjengitt i Clementz et al. 2011)	6
Figur 6: Fukttinnhold i et materiale (Künzel 1995)	7
Figur 7: Sorpsjonskurver fra WUFI, Pavaflex (Trefiberisolasjons plate) og Wood fibre insulation board (annen type trefiberisolasjon), Spruse (rent treverk, gran) og Isover GW (glassullisolasjon tilsvarende Glava)	8
Figur 8: Skisse av klimarommets oppbygning med plassering av egne styringsenheter og forsøksveggene	9
Figur 9: Oppbygning av testveggen i 1D -forsøket, med 15 testceller og en ekstra celle hvor kondisjonering av startfukten og densiteten til Zell ble målt.	11
Figur 10: Påføring av Hey'di® smøremembran med sikkerhetsremse i hjørnet, for å hindre fuktpåvirkning fra stenderverket i 1D-forsøket. Første bilde viser sikkerhetsremsen og priming. Andre bilde viser ett strøk membran. Tredje bilde, tre strøk.....	12
Figur 11: Plassering av sensorer i forsøkssellene	12
Figur 12: Innfesting av RF/T sensorer i Celle 10 med Zell. Fiskesenen er festet med små skurer.	13
Figur 13: Tetting av ledningsgjennomføring i dampspærre og innvendig kledning	13
Figur 14: Oppbygning av 2D-forsøket.	15
Figur 15: Plassering av RF/T sensorer og trefuktsensorer i veggelementene.	16
Figur 16: Detalj av RF/T-sensorer midt i veggelement. Rød sensor ligger bak vindspærren, orange sensor ligger 50mm inn i isolasjonen.	16
Figur 17: Detalj av RF/T-sensor og trefuktmålere i bunnsvill, likt i toppsvillen. Skrueparrene er fargekodet og har 25mm avstand mellom seg. Det er 100mm mellom hvert parr.....	16
Figur 18: Innblåsing av Zell i veggelementene.....	18
Figur 19: Strekk i dampbremsen etter innblåsing.	18
Figur 20: Fukttilskudd i norske boliger (Geving & Holme 2012).	19
Figur 21: Loggført klimabelastning under laboratorieforsøket.	21
Figur 22: Veiing av 200mm Flex isolasjonsplate under kondisjonering.	22
Figur 23: Tørking av Zell i to tønner, med parallelt forsøk.	23
Figur 24: Kalibrering av RF/T-sensorer.	25
Figur 25: Montering av RF/T- sensorer i Flex.....	26
Figur 26: Montering av RF/T-sensorer i elementer med Zell	26
Figur 27: Montering av trefuktsensorer i bunnsvillen	27
Figur 28: Bærebær elektronisk fuktmåler, GMH 3830, brukt til trefuktmålinger.....	28
Figur 29: Måleplate for trefuktmålinger.....	28
Figur 30: Effekten av isolasjonstype med A12,D, Celle 1 (F), 9(Z) og 12(M).....	31
Figur 31: Endring i RF for isolasjonen med A12 og PE, Celle 2 (F) og 13 (M).....	32
Figur 32: Effekten av trefiberisolasjonsvariant med A50,D, Celle 4(F) og 10(Z).....	33
Figur 33: Effekten av isolasjonstype med Tyvek® og DELTA® Luxx. Celle 7(F), 11(Z), og 14(M).....	34

Figur 34: Effekten av vindsperre på celler med Flex isolasjon™ og DELTA® Luxx.....	35
Figur 35: Effekten av dampspærre på celler med A12 og Flex isolasjon™.....	36
Figur 36: Effekten av dampspærre på celler med A50 og Flex isolasjon™.....	37
Figur 37: Celle 15,2,5,8 sammenligninger med standardcellen T,M,PE,FP.	38
Figur 38: Sammenligning av Flex og mineralull, sammensetning tabell 14.....	39
Figur 39: Detalj av celle 7 (F) og 14 (M) med D, Ute.....	40
Figur 40: Detalj av celle 8 (F) og 15 (M) med PE, Ute.	40
Figur 41: Sensorer bak vindsperre i toppen av alle veggelementene.....	41
Figur 42: Midlede trefuktmålinger fra kanten og flaten til topp og bunnsvillen i veggelement 1. K=kanten av svillen, F= flasken av svillen.....	42
Figur 43: Midlede trefuktmålinger fra kanten og flaten til topp og bunnsvillen i veggelement 5. K=kanten av svillen, F= flasken av svillen.....	43
Figur 44: Sammenligning av WUFI® (W) og forsøksresultater, celle 14.....	46
Figur 45: Sammenligning av WUFI® (W) og forsøksresultater, celle 1.....	47
Figur 46: Sammenligning av damptrykk, WUFI® og Forsøksresultater, celle 14.....	48
Figur 47: Prosentvis forskjell i damptrykk i celle 14, 0% =damptrykket i forsøkscellen.	49
Figur 48: Sammenligning av damptrykk, WUFI® og Forsøksresultater, celle 1.....	49
Figur 49: Prosentvis forskjell i damptrykk i celle 1.	50
Figur 50: MDRY simulering av celle 1 og 12	51
Figur 51: Sorpsjonskurver til alternative isolasjonsmaterialer (Hansen et al. 1999). Saueull, strå og celluloseisolasjon sammenlignes med glassull og steinull og perlitt.	63
Figur 52: Maltlabskript til midling av data.	73
Figur 53: Resultater fra celle 1, A12,F,D. S28-bak vindsperre, S29-50mm inn, S30-innside dampspærre	74
Figur 54: Resultater fra celle 2, A12,F,PE. S31-bak vindsperre, S32-50mm inn, S33- innside dampspærre	74
Figur 55: Resultater fra celle 3, A12,F,I. S34-bak vindsperre, S35-50mm inn, S36-innside dampspærre	75
Figur 56: Resultater fra celle 4, A50,F,D. S37-bak vindsperre, S38-50mm inn, S39-innside dampspærre	75
Figur 57: Resultater fra celle 5, A50,F,PE. S40-bak vindsperre, S41-50mm inn, S42- innside dampspærre	76
Figur 58: Resultater fra celle 6, A50,F,U. S43-bak vindsperre, S44-50mm inn, S45-innside dampspærre	76
Figur 59: Resultater fra celle 7, T,F,D. S46-bak vindsperre, S47-50mm inn, S48-innside dampspærre.	77
Figur 60: Resultater fra celle 8, T,F,PE. S49-bak vindsperre, S50-50mm inn, S51-innside dampspærre.	77
Figur 61: Resultater fra celle 9, A12,Z,D. S2-bak vindsperre, S1-innside dampspærre.	78
Figur 62: Resultater fra celle 10, A50,Z,D. S5-bak vindsperre, S4-50mm inn, S3-innside dampspærre.	78
Figur 63: Resultater fra celle 11, T,Z,D. S6-bak vindsperre, S7-innside dampspærre.	79
Figur 64: Resultater fra celle 12, A12,M,D. S59-bak vindsperre, S58-innside dampspærre	79
Figur 65: Resultater fra celle 13, A12,M,PE. S57-bak vindsperre, S52-innside dampspærre.	80
Figur 66: Resultater fra celle 14, T,M,D.	80

Figur 67: Resultater fra celle 15, T,M,PE. S60-bak vindsperre, S54-innside dampsperre.	81
Figur 68: Vegg 1. A12,F,D,FP	82
Figur 69: Vegg 2. A50,F,D,FP	82
Figur 70: Vegg 3. A12,Z,D,FP	83
Figur 71: Vegg 4. A50,Z,D,FP	83
Figur 72: Vegg 5. A12,M,D,FP.....	84
Figur 73: Trefuktmålinger, topp- og bunnsvill i veggelement 1.....	85
Figur 74: Trefuktmålinger, topp- og bunnsvill i veggelement 2.....	85
Figur 75: Trefuktmålinger, topp- og bunnsvill i veggelement 3.....	86
Figur 76: Trefuktmålinger, topp- og bunnsvill i veggelement 4.....	86
Figur 77: Trefuktmålinger, topp- og bunnsvill i veggelement 5.....	87
Figur 78: Oversikt over sensorplasseringene og oppbygning, 1D-veggen.	88
Figur 79: Oversikt over sensorplasseringene og oppbygning, 2D-veggen.	89

Tabelliste

Tabell 1: Testkombinasjoner i 1D-forsøk med 15 testceller, alle testkombinasjonene har Fermacell® som innvendig kledning.....	11
Tabell 2: Testkombinasjoner i 2D-forsøk med 5 veggelementer. Alle veggelementene har Fermacell® som innvendig kledning. Det er 4 RF/T-sensorer og 8 trefuktsensorer i hvert element.....	14
Tabell 3: Materialer brukt i forsøket med nøkkelparametre.....	17
Tabell 4: Planlagt klimaparametre til laboratorieforsøket.....	20
Tabell 5: Virkelig klimabelastning på forsøksenelementene.....	21
Tabell 6: Flex kondisjonert, leveranse- og tørrvekt.....	22
Tabell 7: Zell kondisjonert, med tørrvekt,. Leveransefukten er ikke veid, den er oppgitt av leverandør.....	23
Tabell 8: Forkortelser benyttet i navngiving av materialkombinasjoner og grafer.	29
Tabell 9: Sammenligninger av forsøksenelementene.....	30
Tabell 10: Sammensetninger for sammenligning av celler med F og D.....	35
Tabell 11: Sammensetninger for sammenligning av celler med A12 og F.....	36
Tabell 12: Sammensetning for sammenligning av celler med A50 og F.....	37
Tabell 13: Sammensetning av cellene for sammenligning med standardcellen med T,M,PE.....	38
Tabell 14: Sammensetninger for sammenligning av T med PE eller D for isolasjonsvariantene Flex og Mineralull.....	39
Tabell 15: Veggsammensetning og S_d verdier.	41
Tabell 16: Temperaturforskjell i veggelementer oppe og nede, antydning på intern konveksjon.....	43
Tabell 17: Transportmekanismer for fukt og varme som blir inkludert eller ikke i WUFI® (Künzel 1995).....	44
Tabell 18: Materialparametre brukt til simulering i WUFI ® 5.3 Pro og 2D.....	45
Tabell 19: Fuktinnhold i Flex 200mm isolasjonsmatte.....	64
Tabell 20: Kondisjonering av Flex 200mm isolasjonsmatte.....	64
Tabell 21: Tørking av Flex 200mm isolasjonsmatte.....	65
Tabell 22: Resultater fra tørking av Zell.	65
Tabell 23: Tørking av blå og grønn tønne med Zell.	66
Tabell 24: Kalibrering av RF/T-sensorer ved 50% RF og 22,9°C.....	67
Tabell 25: Kalibrering av RF/T-sensorer ved 70% RF og 23,2°C.....	70

1 Innledning

Masteroppgaven er en videreføring av min prosjektoppgave høsten 2013 (Lunde 2013). Den var en ren forberedelse til laboratorieforsøket som er blitt gjennomført i masteroppgaven. Av den grunn er deler av prosjektoppgaven benyttet i denne oppgaven uten henvisning til min egen tekst. Dette gjelder i hovedsak i beskrivelsen av oppbygningen og oppsettet av forsøksriggen.

1.1 Formål

Formålet med masteroppgaven var å undersøke og dokumentere fuktforhold i bindingsverksvegger med Hunton Trefiberisolasjon™ (plater) og Hunton Trefiberisolasjon™ (Innblåst), på oppdrag fra Hunton Fiber AS (heretter omtalt som Hunton). Isolasjonsvariantene het tidligere henholdsvis Flex isolasjon™ og Zell isolasjon™. I oppgaven omtales isolasjonsvariantene som Flex og Zell, men med fullt produktnavn i tabeller med produktinformasjon.

Undersøkelsene ser på Huntons trefiberbaserte isolasjon sine egenskaper med tanke på fuktakkumulering og fordeling, sammenlignet med mineralull. Datagrunnlaget fra forsøksperioden skulle også brukes til validering av simuleringsresultater i 1D og 2D i fukt- og varmetransport i simuleringsprogrammet WUFI® versjon 5.2. Valideringen vil vise om WUFI® kan benyttes til nøyaktige parameterstudier.

Resultatene fra forsøket skal være med i Hunton sitt beslutningsgrunnlag for om de skal satses videre på egenproduksjon av trefiberbasert isolasjonsmateriale i Norge.

1.2 Bakgrunn

Bruken av trefiberbaserte isolasjonsprodukter er liten i Norden i forhold til andre isolasjonsmaterialer. I land som Tyskland, Østerrike, Frankrike, Polen og Sveits finnes flere produsenter av trefiberisolasjon, jeg nevner Steico (2014) Glunz (2014) GUTEX (2014) Pavatex (2014) og Homatherm (2014). I Norden finner man produksjon i Sverige ved Termoträ (2014) og Thermocell (2014) i Danmark. Det har enda ikke blitt startet noen produksjon i Norge. Med økt fokus på klimautslipp, BREEAM-klassifisering og CO₂-regnskap for bygninger, øker også interessen for mer klimavennlige produkter på markedet. Hunton er i ferd med å starte kommersiell produksjon av trefiberbaserte isolasjonsmaterialer på Gjøvik i Norge. For å vurdere konkurransedyktigheten til materialene ønsket Hunton å få vurdert produktets bygningsfysiske egenskaper.

Fuktbufferevnen, defineres av Peuhkuri et al. (2004) som "(a) material's ability to absorb or release moisture with the climate that surrounds it", noe de definerer som en funksjon av permeabilitet og sorpsjonseffekten. Videre hevder de at materialer med høy buffereffekt vil moderere svingninger i relativ fuktighet. I tillegg kan "materials with good buffer capacity (...) be expected to be more resistant to damage due to high moisture loads than constructions with, e-g. mineral wool and perlite" (Peuhkuri et al. 2004).

Av Hunton (2012) fremheves fuktopptaksevnen til trefiberisolasjon som ti ganger så stor som hos mineralull. Trefiberisolasjonen kan ha hele 20 vektprosent fukt lagret i massen. Laboratorieforsøk utført av Salonvaara et al. (2004) viser at fuktbufferevnen til trefiber er stor og at den har raskere uttørkingsegenskaper enn rent treverk.

Hansen et al. (1999) har samme definisjon av fuktbufferevnen. I deres hovedrapport fra forsøkene viser adsorpsjons- og desorpsjonskurvene at hygroskopiske isolasjonsprodukter som cellulose har vesentlig høyere fuktopptaksevne enn mineralull. Sorpsjonskurvene for celluloseisolasjonen er ganske lik som vanlig trevirke av gran, hvis en sammenligner verdiene gitt i vekt-% fra Hansen et al. med sorpsjonskurver gitt i Geving og Thue (2009).

De hygroskopiske egenskapene til treverk gjør altså at trefiberbasert isolasjon har andre egenskaper med tanke på fukttransport og fordeling i en konstruksjon enn det mineralullprodukter har. For å se nærmere på dette, er det satt opp to testvegger i klimarom. I den ene veggen ble fukttransporten kartlagt i en dimensjon (1D) (testvegg med 15 små celler, 600x600mm), mens fukttransporten i den andre (fullskala-) veggen er testet todimensjonalt (2D)(testvegg med 5 fakk, 600x2400mm), fukttransport påvirket av vanlige faktorer som intern konveksjon, fuktopptak i stenderverket og trykkforskjeller.

Hunton har besluttet å bygge ut produksjonsanlegget sitt på Gjøvik for, i starten, å kunne produsere den løse trefiberisolasjonen Zell . Dette gjøres for å kunne konkurrere med andre aktører på pris i dagens marked. Det vil også styrke Hunttons miljøprofil i forhold til transportutslipp (Homleid 2014). I en rapport om isolasjonsmaterialer av trevirke konkluderer Berge (2007) med at trefiberisolasjon har et stort potensiale, men at produksjonen bør være lokal for gode utslag i miljøregnskapene.

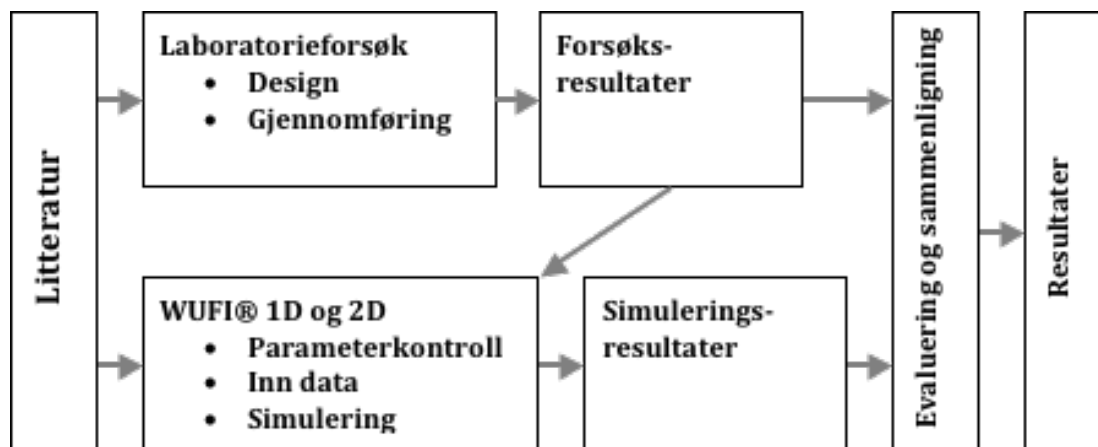
1.2.1 Gjennomføringsmodell

Laboratorieforsøk gir muligheten til å teste sammensetninger av materialer underkontrollerte forhold, som gjør at betydningen av enkeltfaktorer lettere kan undersøkes. Tidshorizonten og styringssystemene tilgjengelig for forsøket gjør at forholdene er forenklet i forhold til et normalt belastningsmiljø som ville variert mere over døgnet og fra dag til dag. Resultatene fra et forsøk kan gi grunnlag for validering av simuleringsprogrammer og grunnlag for kontroll av kalkulasjoner med ulike materialbrukskombinasjoner og klimaforhold. Hvis simuleringene stemmer godt overens med laboratorieforsøket kan det enkelt utarbeides estimerer for nye materialsammensetninger og andre klimaforhold (Vinha 2007)

Gjennomføringen av oppgaven har vært firedelt

- Gjennomgang av bakgrunns litteratur
- Gjennomføring av laboratorieforsøket
- Datasimuleringer med klimabelastningen loggført i laboratorieforsøket
- Evaluering og sammenligning av resultatene

En modell av gjennomføringen fra start til slutt er presentert i Figur 1.



Figur 1: Gjennomføringsmodell av oppgaven.

1.3 Begrensninger og avklaringer

Masteroppgaven omhandler et laboratorieforsøk på to veggelementer i klimarommet til NTNU BAT / SINTEF og en validering av simuleringer fra WUFI® vurdert opp mot de målte verdiene i laboratorieforsøket. Oppgaven beskriver forsøksoppsettet og evaluerer resultatene i forsøket med tilhørende nødvendig teori for å begrunne argumentasjonen rundt resultatene. I tillegg vil oppsettet i WUFI® og evaluering av parametere og utdata sammenlignes med resultatene fra fullskalaforsøket.

Hunton leverer to typer trefiberisolasjon, en fast matte kalt Flex og en løs variant myntet på innblåsing kalt Zell (Hunton 2013b). Oppgaven er begrenset til å omhandle disse to typene trefiberisolasjon. Dampbrems og vindtetting i forsøksveggene er dels produkter fra Hunton, dels produkter fra andre konkurrerende leverandører.

Den generelle oppbygningen vil bestå av:

- Vindsperre (Hunton Vindtett™ 12mm eller 50mm eller Tyvek®)
- Isolasjon, 300 mm (Flex, Zell eller mineralull fra Glava)
- Dampbrems (DELTA® Luxx, PE-folie, INTELLLO®, eller uten folieprodukt)
- Innvendig kledning (Fermacell®)

Variantene i forsøksoppsettene er vist i Tabell 1 og Tabell 2. Av plasshensyn i forsøksveggene, 15 celler til 1D og 5 veggelementer for 2D-forsøket, er ikke alle kombinasjonene av vindsperre/dampbrems testet med alle tre typer isolasjon.

I WUFI simuleres bare de samme sammensetningene som er gjennomført i laboratorieforsøket. Resultatene fra forsøket sammenlignes med simuleringsdataene fra WUFI. Derved kan man vurdere om WUFI, basert på de parameterdata som i dag brukes for trefiberisolasjon, gir troverdige resultater.

2 Grunnlag for vurderinger

I dette kapitlet er det en kort gjennomgang av bakgrunnsinformasjonen som ble brukt ved valg av forsøksoppsett og evaluering av forsøks- og simuleringsresultatene.

2.1 Materialparametre.

Materialene og deres nøkkelparametre er listet i Tabell 3 i kapittel 3.3 Forsøksmaterieell. Når det gjelder parameterinnstillingene til WUFI er dette omtalt i kapittel 5.2 Validering av WUFI® og innputtparametre.

Egenskapene for de to isolasjonstypene Flex og Zell, som er hovedfokuset i oppgaven, gjennomgås i 2.1.1 og 2.1.2.

2.1.1 Flex

Flex isolasjonsmatter, vist i Figur 2, består av trefiber, polyolefin og ammonium phosphate (Hunton 2012). Produktet klassifiseres som treverk og regnes derfor som et økologisk materiale (EPA 2002). Dermed er det også interessant å se på i forhold til klimaregnskap og ZEB-bygninger. Tremassen gir isolasjonsmaterialet en spesifikk varmekapasitet på 2100 (J/kg K), en varmekonduktivitet på 0,038 (W/mK) og en densitet 50 (kg/m³) (Hunton 2012).

Varmekonduktiviteten målt med fluksmeter har vist seg å være dobbelt så stor i lengderetningen av isolasjonsmattene som i tverretningen (Kaemmerlen et al. 2010). Dette vil si at konveksjon vil kunne foregå lettere i mattens lengderetning som tilsvarer oppover i veggen. Denne effekten vil trolig ikke gjelde for løsfiberisolasjonen Zell, der fiberretningen blir mer tilfeldig.



Figur 2: Flex 10cm isolasjonsmatter (Hunton 2013b)

2.1.2 Zell

Zell, vist i Figur 3, er løsfibervarianten av trefiberisolasjonen og er ment for innblåsing. Maskinen som blåser isolasjonen inn i veggen er også utstyrt med en kvern som sørger for at isolasjonen er luftig og uten klumper. Dette gjør at Zell kan komprimeres for transport i motsetning til Flex – som har en komprimeringsgrad tilnærmet null under

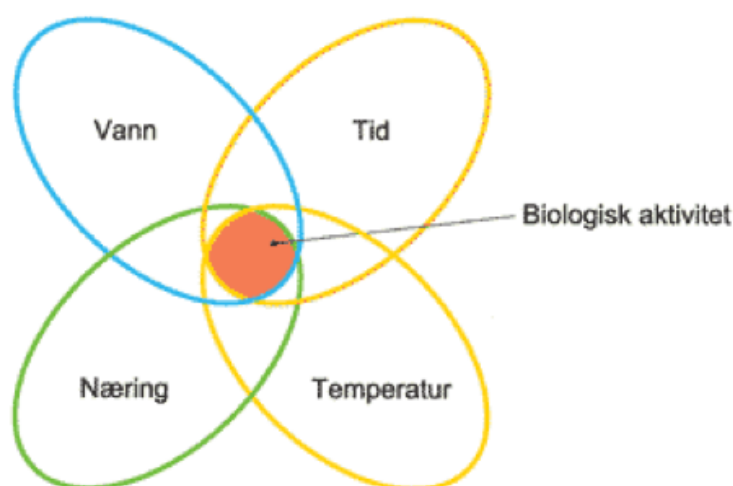
lagring/transport. Zell har samme varmekapasitet som Flex, men har en varmekonduktivitet på 0,040 (W/mK) og densiteten varierer med konstruksjonsdelens helning og trykket ved innblåsing. Normalt ligger densiteten for tak og vegger over 45 grader mellom 38 og 45 (kg/m³) (Hunton 2013c).



Figur 3: Zell blåseisolasjon (Hunton 2013a)

2.2 Biologisk vekst,

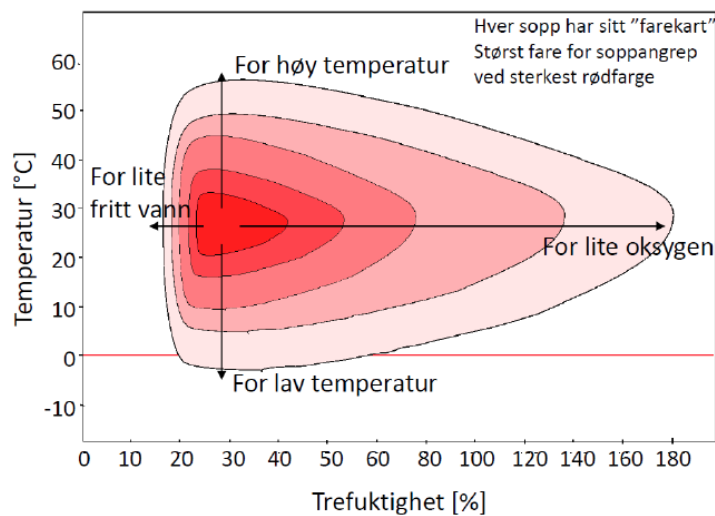
For at muggvekst skal være et faremoment i treverk, må flere forutsetninger være tilstede. Næring, temperatur og fukt må være tilgjengelig over en viss tid (Geving & Holme 2010). Dette er illustrert i Figur 4. Ofte er 80-85% relativ fuktighet (RF) og +5 °C brukt som kriterium for at vekst skal kunne starte. Det tilsvarer ca 20 vektprosent i treverk. En av faktorene for mikrobiologisk vekst er tilgjengelig aktivt vann a_w . I et hygroskopisk materiale som treverk er likevekt med 100% RF det samme som $a_w=1$. A_w kan defineres som RF/100 (Hukka & Viitanen 1999). De mest tolerante artene av sopp kan gro med a_w ned mot 0,7. De vanligste soppartene trives best med verdier rundt 0,9-0,95 (Holme 2010). Forsøk gjennomført av Ayerst (1969) viser at de fleste artene ligger med grenseverdier rundt 0,8.



Figur 4: Elementer som må være tilstede for at biologisk vekst skal forekomme (Geving & Holme 2010)

Som vist i Figur 5 kan biologiskvekst forekomme også ved lavere temperaturer, og grensene varierer avhengig av sopptype og treslag (Pandey & Pitman 2003). I

trefiberisolasjon er næring tilstede som trefiber og en må anta at det er risiko for at sopp sporer finnes i materialet. Av den grunn vil jeg i forsøkene være spesielt oppmerksom på fukt- og temperaturnivåer som kan gi fare for muggvekst.



Figur 5: Farekart for soppangrep (Trondheim, 2003 gjengitt i Clementz et al. 2011)

Ved evalueringen av resultatene fra laboratorieforsøket vil faren for mikrobiologisk vekst bli vurdert, da dette er uønsket i en konstruksjon. I forsøk utført av Holme (2010) vises at i tilfeller der RF er over 85%, har en økning i RF på 1% større påvirkning enn en økning på 8 grader celsius for utviklingen av den biologiske veksten.

I den samme PhD oppgaven påviser Holme at Asfalt vindtettplater har bedre motstandsdyktighet mot biologisk vekst enn gu-gips, treverk og kryssfiner. *"Wood-fibre (hardboard) based windbarrier board have a comparatively grather resistance to mould growth than plasterboard-based wind-barrer boards.... Both in time until proof of visible growth... and the extent of growth after incubatation periods.."* Holme (2010 s.11) Den samme konklusjonen støttes av (Mykleost & Jansen 2007) som også viser til at bruk av dampåpne rullprodukter som vindspærre reduserer faren på grunn av gode uttørkingsmuligheter.

Materialekarakteristikk er også viktig for tidsforløpet før muggvekt oppstår (Doll 2002)

Parallelt med forsøket i denne oppgaven er det blitt gjennomført laboratorieforsøk av SINTEF på trefiberisolasjonens egenskaper i forhold til biologisk vekst. Dessverre er ikke disse dataene frigitt ennå og jeg må derfor basere meg på de generelle faregrensene som allerede er nevnt.

Når det gjelder glassfiberisolasjonen er det i utgangspunktet lite næring tilstede men med de rette forholdene er det også her fare for at muggvekst kan oppstå (Loo et al. 2004).

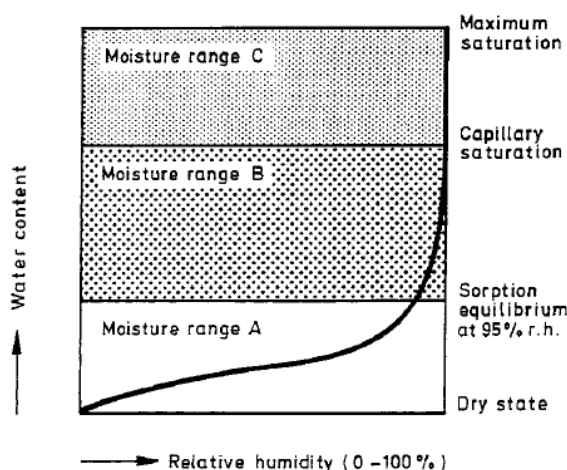
Behandling av cellulosematerialer med sopphekkende stoffer som ammonium phosphate og sodium polyborate har en preventiv effekt på biologiskvekst i materialet (Herrera 2005).

2.3 Krav til dampsperrsjikt

Ved damptetting av bygg anbefaler Byggforskserien (2003) en innvendig S_d -verdi på minst ti meter (ekvivalent luftlagstykkelse). Hvis ikke det innvendige dampsjiktet har en dampmotstand på ti meter anbefales det at forholdet mellom innvendig og utvendig dampmotstand har en faktor større enn ti. I Europa er denne faktoren oftere nærmere 5 (Vinha 2007). Av folieproduktene som benyttes i laboratorieforsøket er det kun Tommen Gram Dampsperre som overstiger en S_d -verdi på ti meter alene, men i flere av kombinasjonene som nevnes senere vil forholdet være større enn ti. Andre kombinasjoner som ikke tilfredsstillt anbefalingene (S_d -verdi eller faktor mindre enn 10) er testet for å se om fukttegenskapene til trefiberisolasjonen gjør det mulig å benytte seg av en mer innadrettet dampåpen konstruksjon. Dette for å vurdere om trefiberisolasjonens egenskaper kan redusere behovet for en damptett oppbygning.

2.4 Hygroskopiske egenskaper

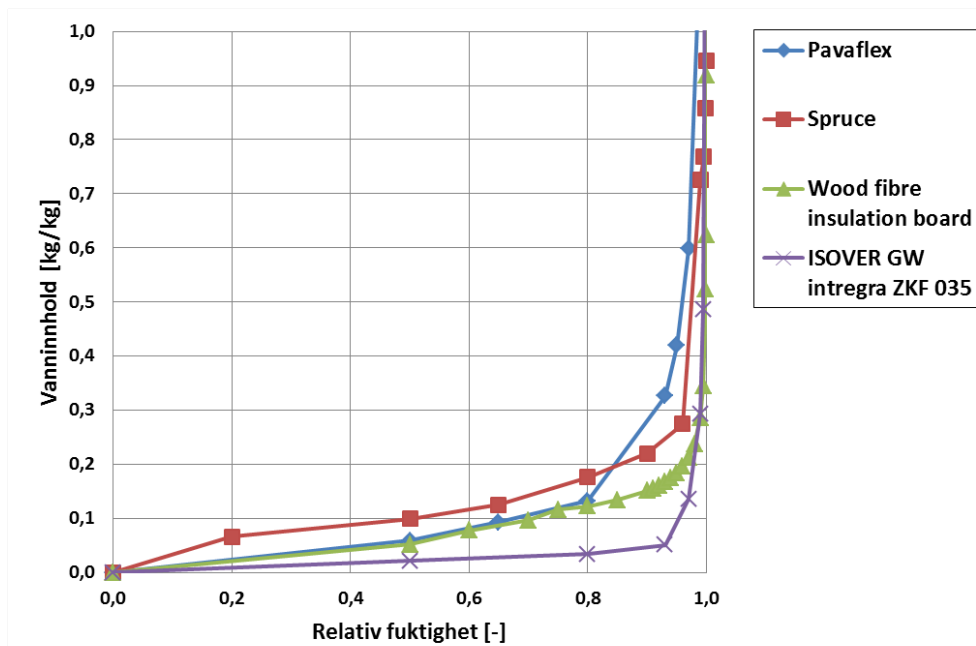
Figur 6 viser de tre stadiene for fuktinnhold for et materiale. Område A er det hygroskopiske området og sier noe om hvor mye fukt et materiale kan ta opp i likevekt med den fuktige luften. Grensen ligger rundt 95-98 % RF (Künzel 1995).



Figur 6: Fuktinnhold i et materiale (Künzel 1995)

Sone A er stor hos treverk fordi tre kan lagre opp til ca 35% vektprosent vann i celleveggene. En annen effekt dette gir er at varmekonduktiviteten ikke er så følsom for fukt som mineralull (Hansen et al. 1999) (Kaemmerlen et al. 2010).

De hygroskopiske egenskapene til et materiale påvirker hvor fort RF i materialet endres. WUFI har sorpsjonskurver i sin database. Fire av disse er vist i Figur 7. Forskjellen i stigningstallet ved relativ fuktighet tilsvarer hvor mye fukt som lagres før RF i materialet stiger. Som vi ser har alle variantene av treverk høyere stigningstall fra starten av. Dette gjelder spesielt i området fra 60 til 90% RF. Denne forskjellen vil gjenspeile seg som buffereffekt hvor det i resultatene er tydelig at utviklingen i RF i forhold til mineralullisolasjonen er forsinket



Figur 7: Sorpsjonskurver fra WUFI, Pavaflex (Trefiberisolasjons plate) og Wood fibre insulation board (annen type trefiberisolasjon), Spruce (rent treverk, gran) og Isover GW (glassullisolasjon tilsvarende Glava)

Den største forskjellen mellom mineralull og trefiber ligger i området fra 80 til 90% RF. Dette kommer også tydelig frem i resultatene fra forsøket og i simuleringen i WUFI® senere i oppgaven. WUFI® har ikke Flex i sin database, Pavaflex fra produsenten Pavatex (2014) brukes derfor i simuleringene i denne oppgaven.

Tidligere forskning på alternative isolasjonsmaterialer som celluloseisolasjon (av papir), saueull og (kompakt)treverk, samt andre hygroskopiske materialer, har en del felles med trefiberisolasjon, bl.a. likheten i sorpsjonskurvene. Dette vises spesielt godt i Hansen et al. (1999) sin hovedrapport *Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer*. Figur 51 fra Hansen finnes i Vedlegg 1: Sorpsjonskurver til alternative isolasjonsmaterialer

3 Laborieforsøk

I denne delen kommer en gjennomgang av hvordan forsøket er designet og bygd for å få et laborieforsøk som tjener hensikten i oppgaven.

3.1 Hensikten med forsøket

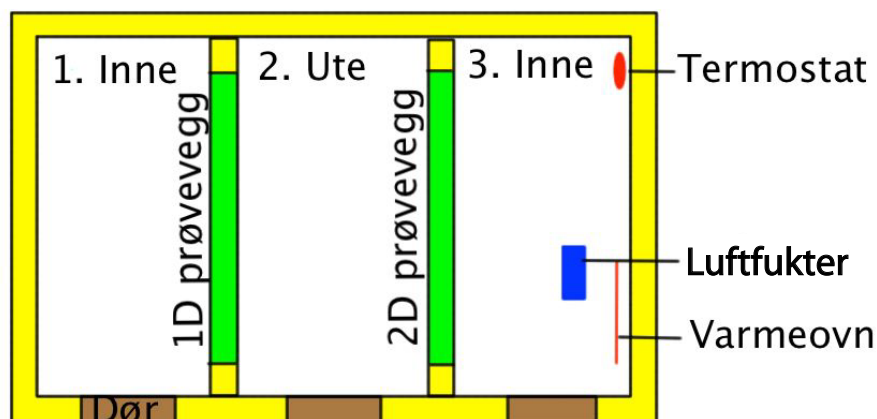
Som tidligere nevnt var hensikten med laborieforsøket å undersøke og dokumentere fuktforhold i bindingsverksvegger med trefiberisolasjon av typen Flex og Zell, på oppdrag fra Hunton. Det ble gjort to parallelle forsøk, henholdsvis ett 1D-forsøk og ett 2D-forsøk.

1D prøveveggen består av 15 celler med c/c 600 mm x 600 mm. I denne veggen måles fuktforholdene upåvirket av andre drivkrefter enn potensialet mellom ute og inne. I 2D-veggen måles fuktforholdet påvirket også av andre naturlige faktorer som intern konveksjon og fuktinntak i stenderverket. 2D-veggen består av fem c/c 600 mm fakk i full etasjehøyde.

Det er mineralull av glassfiber i noen av cellene i 1D-veggen og i det ene fakk i 2D-veggen for å kunne sammenligne med trefiberisolasjonen. Skisser av prøveveggene er vist i Figur 9 for 1D- og Figur 14 for 2D-veggen.

Forsøket er satt opp i et av klimarommene i laboratoriene til BAT ved NTNU. Klimarommet blir delt i tre rom av prøveelementene som er bygd som skillevegger slik det fremgår av Figur 8. I rom 1 og 2 er det styringssystemer integrert for å kontrollere klimaet. I rom 3 ble det montert en luftfukter og en termostatstyrt varmekilde. Klimaet, plassering av tekniske enheter, samt omtale av prøveelementene blir nøyere gjennomgått i påfølgende kapitler.

Klimarom



Figur 8: Skisse av klimarommets oppbygning med plassering av egne styringsenheter og forsøksveggene

3.2 Forsøksvegger

Det er tidligere gjennomført flere forsøk som med ulik vinkling og materialsammensetning ser på fukt i ytterkonstruksjoner. Langmans (2013) lister relevante feltforsøk og laboratorieforsøk i sin doktoravhandling. Det samme gjør Vinha (2007, s67) med grensebetingelser og konklusjoner fra 1979 og frem til 2007. De nevnte doktoravhandlingene inneholder selv hvert sitt oppsett av et laboratorieforsøk på yttervegger, henholdsvis 1D-forsøk med fuktstrøm i én dimensjon, og et 2D-forsøk hvor virkningen av konveksjon i veggen også måles. Deler av deres oppsett er blitt brukt som inspirasjon i dette forsøksoppsett.

Av plasshensyn settes det opp ett 1D-forsøk og ett 2D-forsøk. Førstnevnte har med sine 15 celler kapasitet til å teste mange kombinasjoner av vindsperrer og dampbremsers effekt på fuktstrømmen i selve isolasjonsmaterialet upåvirket av konveksjon, lekkasjer eller fuktopptak i rammeverket. 2D-forsøket ser på hvordan isolasjonsmaterialet reagerer med naturlig intern konveksjon i isolasjonen og eventuell fuktutjevning med stenderverket. Det er ikke blitt installert noen form for lekkasjepunkter eller oppfuktede områder i noen av forsøksellementene for å fremheve eventuelle effekter eller tydeliggjøre egenskaper ved gitte situasjoner som vannlekkasje, byggfukt eller økt konveksjon ved luftlekkasje.

I tillegg til isolasjonsmaterialets hygroskopiske egenskaper undersøkes også virkningene av forskjellige kombinasjoner av vindsperrer og dampsperrer på de forskjellige isolasjonsmaterialene. I forsøket er det brukt 3 ulike vindsperrer. Hunton Vindtett™ 12 mm, Hunton Vindtett™ 50 mm (50 mm = 2 plater 25 mm) og Tyvek®. På varm side av veggen er det brukt 3 ulike dampsperrer, henholdsvis 0,15 mm PE-folie fra Tommen Gram, DELTA® Luxx dampbrems og INTELLLO® smart dampbrems. En celle er uten dampbrems/ folieprodukt. Som innvendig kledning benyttes Hunttons egne fiberarmerte gipsplater Fermacell® på alle prøveelementer. Materialene blir nærmere presentert i delkapittel 3.3 Forsøksmateriell. Testkombinasjonene er omtalt i 1D- og 2D-oppsettet.

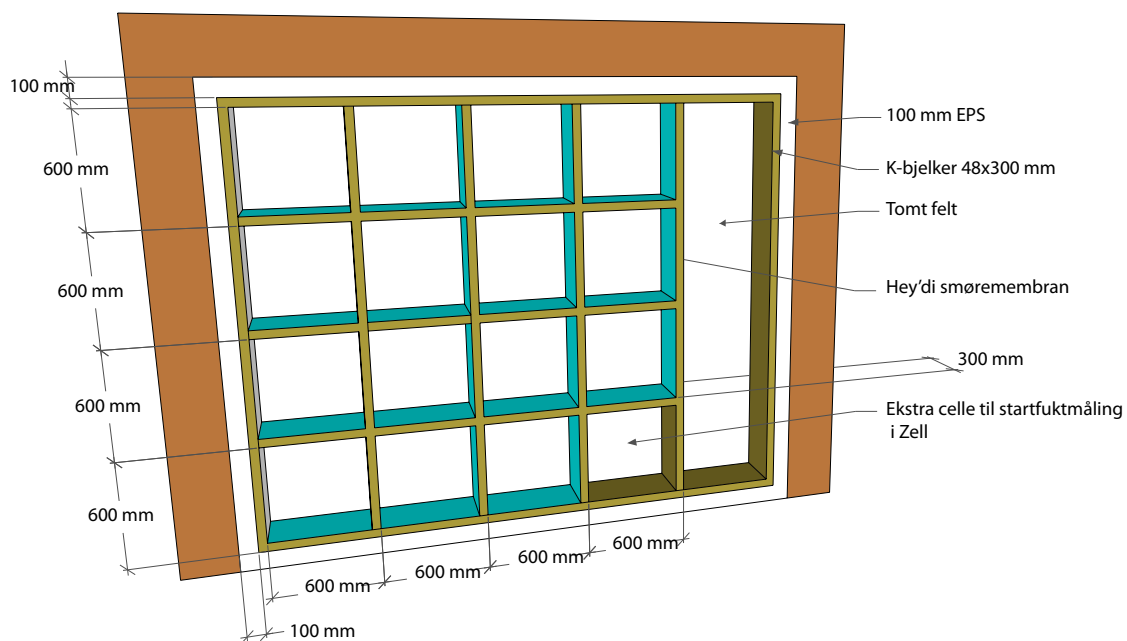
3.2.1 1D-forsøket.

1D-forsøket gjennomføres for tydelig å få frem isolasjonsmaterialenes hygroskopiske egenskaper upåvirket av annet enn fukttransport gjennom materialsjiktene. Prøveveggen har 15 celler som gjør det mulig å teste og sammenligne flere forskjellige oppbygningsvarianter av forsøksmaterialene. Oppbygningen av rammeverket til de 15 testcellene er vist i Figur 9 mens de aktuelle testkombinasjonene er gitt i Tabell 1.

Selve veggen er bygget inn i en eksisterende ramme i klimarommet hvor selve prøveveggen skilles fra den faste konstruksjonen med ekspandertpolystyren for å ikke påvirke forsøkelementene. Rammeverket består av K-bjelker (limtrestendre) 48 x 300 mm, dekket av en Hey'di® smøremembran påført i tre lag. Det er lagt sikkerhetsremser av fiberduk i hjørnene der det kan være fare for oppspreking av membranen SINTEF (2009). Membranen er lagt etter anvisning fra produktblad for Hey'di® smøremembran (HEYDI 2011). Påføring av membran er illustrert i bildeserien i Figur 10.

Tabell 1: Testkombinasjoner i 1D-forsøk med 15 testceller, alle testkombinasjonene har Fermacell® som innvendig kledning.

VARIABLE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Vindsperre															
Hunton Vindtett™	X	X	X						X			X	X		
Hunton Vindtett™ (2 x 25mm)				X	X	X				X					
Tyvek®							X	X			X			X	X
Isolasjonsmateriale															
Flex isolasjon™	X	X	X	X	X	X	X	X							
Zell isolasjon™									X	X	X				
Glava® PROFF 35												X	X	X	X
Dampmotstand innvendig															
DELTA® Luxx	X			X			X		X	X	X	X		X	
Tommen Gram Dampsperre		X			X			X					X		X
INTELLO®			X												
Uten dampbrems						X									
Antall sensorer	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2	2	2	3	2



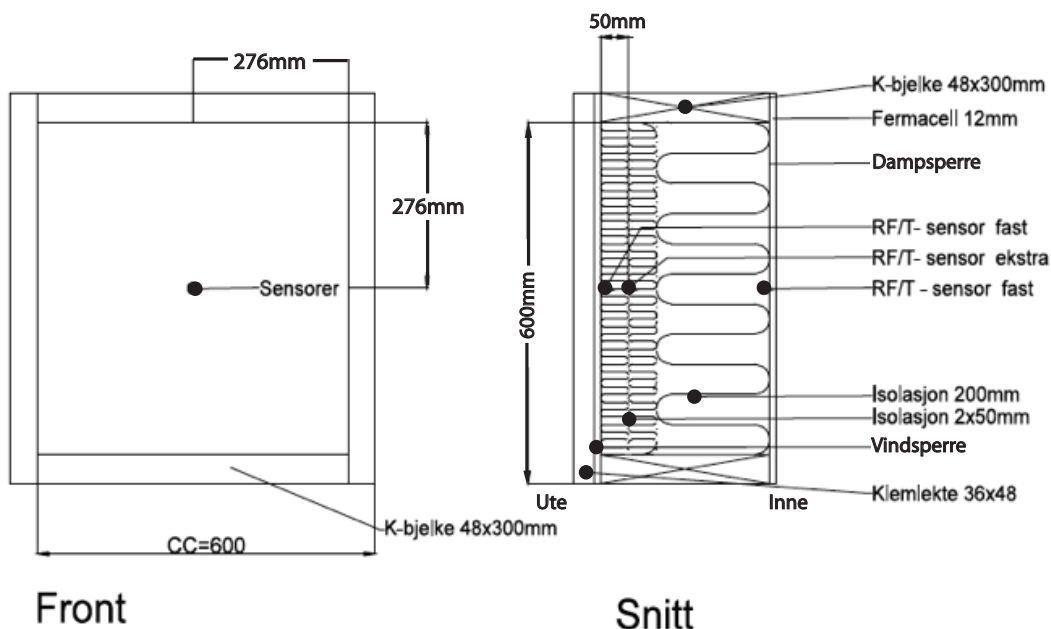
Figur 9: Oppbygning av testveggen i 1D -forsøket, med 15 testceller og en ekstra celle hvor kondisjonering av startfukten og densiteten til Zell ble målt.



Figur 10: Påføring av Hey'di® smøremembran med sikkerhetsremse i hjørnet, for å hindre fuktpåvirkning fra stenderverket i 1D-forsøket. Første bilde viser sikkerhetsremsen og priming. Andre bilde viser ett strøk membran. Tredje bilde, tre strøk

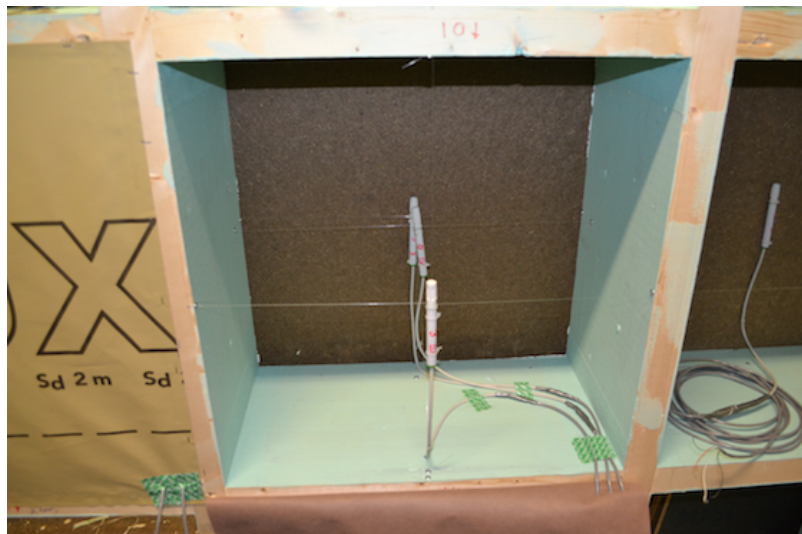
Kubbingene, som deler stenderåpningene inn i celler, er skrudd skjult eller stikkskrud for ikke å lage problemer med heften til smøremembranen. Dette gjøres for å hindre forstyrrelse av fukttransporten gjennom veggene til cellene ved diffusjon, sorpsjon eller luftlekkasjer.

Oppbygningen og plassering av sensorer, er inspirert av Vinha (2007). Sensorene måler relativ fuktighet og temperatur (RF/T) og plasseres på innsiden av tettesjiktene i senter av de kvadratiske rutene. I tillegg plasseres det fra innsiden av vindsperrene en ekstra RF/T-sensor 50 mm inn i isolasjonen i ti av prøveelementene. Plasseringene av sensorene fremgår av Figur 11. Den ekstra sensoren ligger i samme linje som de to foregående sensorene og vil gi resultater som forteller mer om fordelingen av fukt i prøveelementet. På grunn av begrenset kapasitet på antall kanaler og følere til rådighet, plasseres den tredje sensoren i kun ti av elementene. Testkombinasjonene som er utstyrt med tre sensorer vises i Tabell 1.



Figur 11: Plassering av sensorer i forsøkssellene

I cellene hvor Zell skulle benyttes ble sensorene festet med fiskesene som er strammet godt for å motstå forskyvelse ved innblåsing av isolasjonen. Innfesting av sensorer er illustrert i Figur 12.



Figur 12: Innfesting av RF/T sensorer i Celle 10 med Zell. Fiskesenen er festet med små skurer.

Vindsperrene og dampbremsene er festet til rammeverket med en stripe silikon. Der det er benyttet to lag med 25mm Hunton Vindtett™ er det fuget mellom platene langs ytterkanten. Utvendig er vindsperren klemt med lekter for å hindre lekkasjepunkter. Innvendig er folien klemt med lekter der Zell er benyttet, og direkte av Fermacell® platen i alle andre celler.

For å unngå lekkasjepunkter rundt sensorledningene er de festet til celleveggene med tape eller smeltelim. Dette for å hindre at ledningene flytter seg ved en eventuell liten belastning senere. Der ledningene føres ut av testelementet er det fuget rikelig med silikon både på innsiden og utsiden av dampbremsen. Gjennomføringen i Fermacellplaten er også fuget for å hindre luftlekkasje inn bak kledningsmaterialet. Tetting av gjennomføringen er vist i Figur 13.



Figur 13: Tetting av ledningsgjennomføring i dampspærre og innvendig kledning

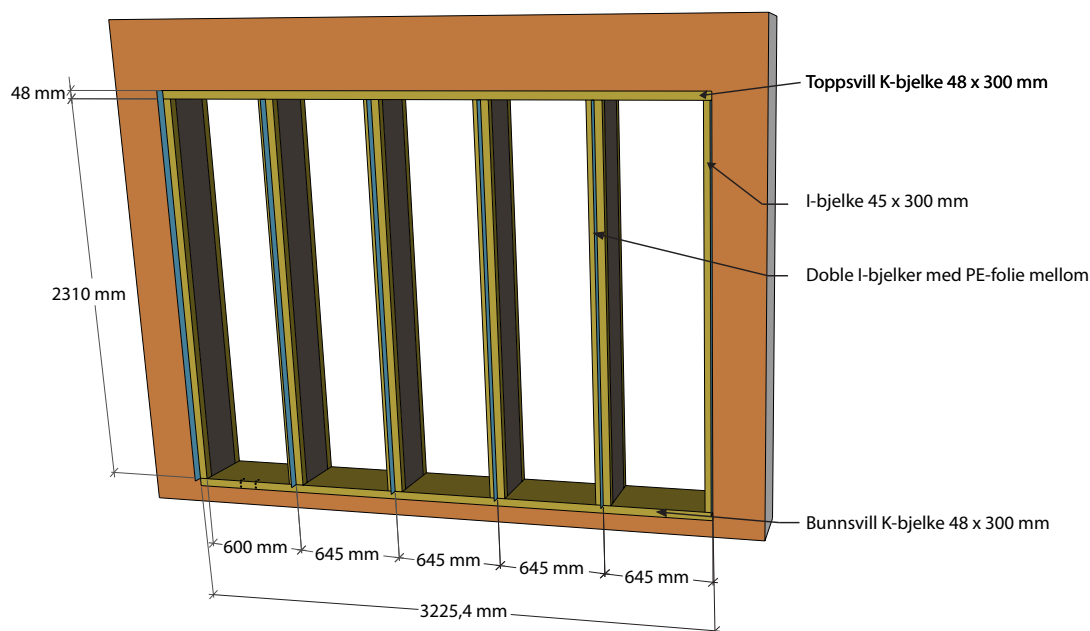
3.2.2 2D-oppsettet

Den todimensjonale delen av forsøket ser på et fakk av hele veggelement i normal størrelse. Med dette oppsettet vil man se hvordan fukttransporten i isolasjonsmaterialet er når det blir påvirket av naturlig konveksjon i isolasjonen og fuktfordelingen over vegghøyden (Langmans 2013).

Materialvalgene er tilnærmet de samme som i 1D-forsøket. Hovedforskjellen er at det blir benyttet I-bjelker fra Hunton Trefiber AS med Hunton vindtettplater i steget. Stenderverket i cellene er ikke isolert fra fukten i isolasjonen slik som i 1D-forsøket. De fem forsøksenelementene er derimot skilt fra hverandre for å unngå påvirkninger fra de andre materialsammensetningene. Skillet er lagd ved at stenderverket er doblet med PE-folie mellom stenderne. Folien er fuget i topp og bunn for at ikke lekkasjer av luft mellom prøveelementene skal forekomme. Figur 14 viser forsøksveggenes oppbygning med de doble I-bjelkene med plastfolien trukket ut. Alle testkombinasjonene for 2D-forsøket vises i Tabell 2.

Tabell 2: Testkombinasjoner i 2D-forsøk med 5 veggelementer. Alle veggelementene har Fermacell® som innvendig kledning. Det er 4 RF/T-sensorer og 8 trefuksensorer i hvert element.

VARIABLE	1	2	3	4	5
Vindsperrer					
Hunton Vindtett™	X		X		X
Hunton Vindtett™ (2 x 25mm)		X		X	
Tyvek®					
Isolasjonsmateriale					
Flex isolasjon™	X	X			
Zell isolasjon™			X	X	
Glava® PROFF 35					X
Dampmotstand innvendig					
DELTA® Luxx	X	X	X	X	X
Tommen Gram Dampsperre					
Uten dampbrems					

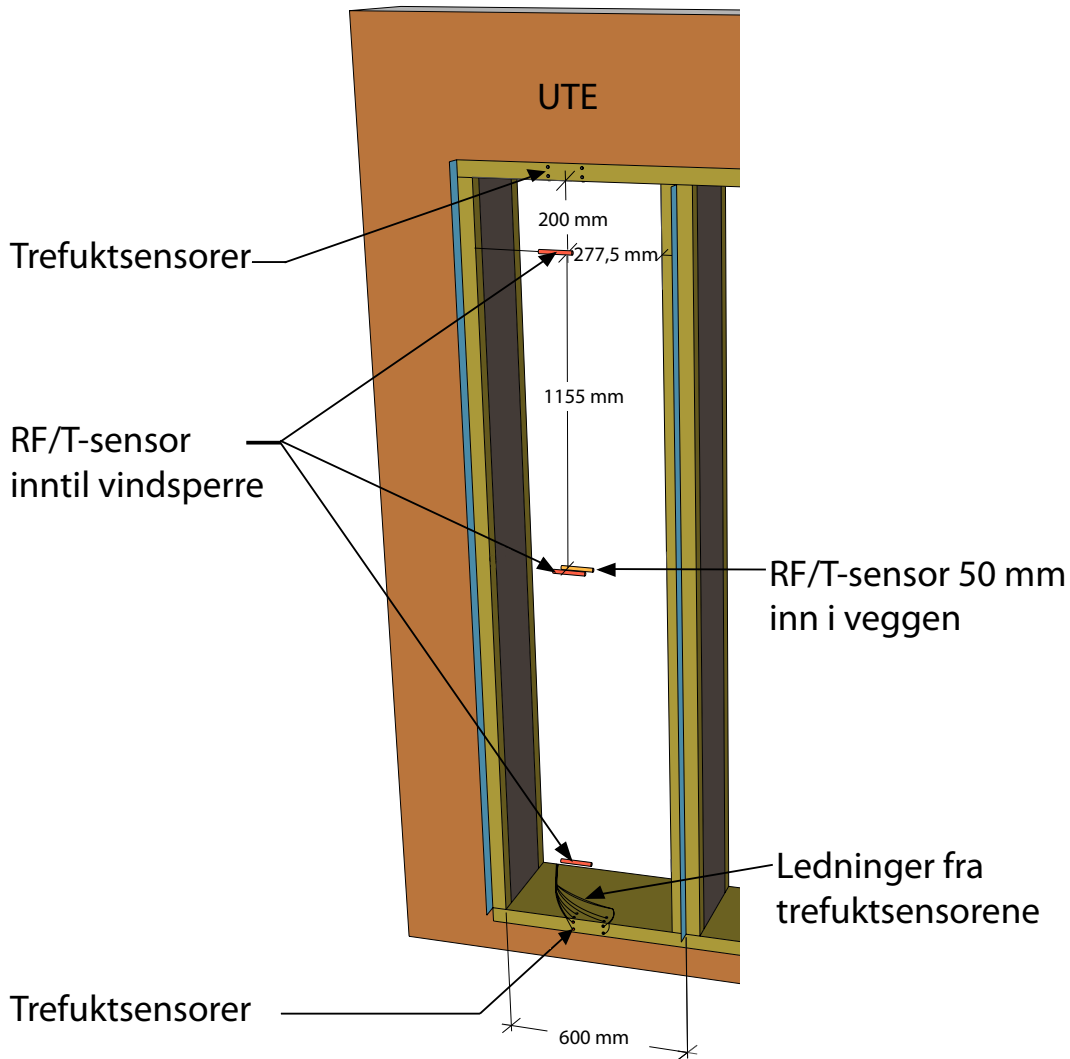


Figur 14: Oppbygning av 2D-forsøket.

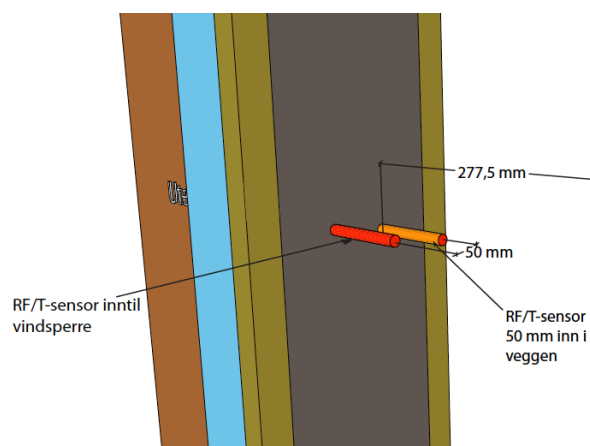
Et lignende oppsett i det samme klimarommet ble også brukt av Gaare og Løvteit (2012) i deres masteroppgave. De hadde med en oppfuktet bunns vill i sitt forsøk med innebygde trefuktsensorer. Deres metode med montering av skruer som elektrodepunkt for trefuktmålere blir kopiert i mitt forsøk, men ledningene vil bli ført ut på varm side da måleapparatet viste seg å bli påvirket av lave temperaturer.

I 2D-oppsettet har trefuktsensorenes plassering utgangspunkt i et forsøk gjennomført i 2000, hvor man testet fukttilstanden i tak- og veggkonstruksjoner med bindingsverk av tre (Geving & Uvsløkk 2000). For å få bedre sikkerhet i måleresultatene, er sensorene duplisert. Hensikten med trefuktsensorene, vist i Figur 15 og Figur 17, er å se hvordan omfordelingen av fukt i vegg høyden påvirker topp og bunns villen. Topp og bunns villen består av en K-bjelke, hvor de ytterste 48 mm er av ett stykke treverk upåvirket av lim. Langmans (2013) testet som en del av sin doktorgrad fulle veggelementer med tanke på konveksjon i klimarom. RF/T-sensorene er plassert i samme høyde som i Langmans forsøk; 20 cm fra bunn og topp og en midt i feltet høydemessig. Den fjerde sensoren blir plassert 50 mm innenfor den midterste sensoren for å gi en mulighet for sammenligning med 1D-celle.

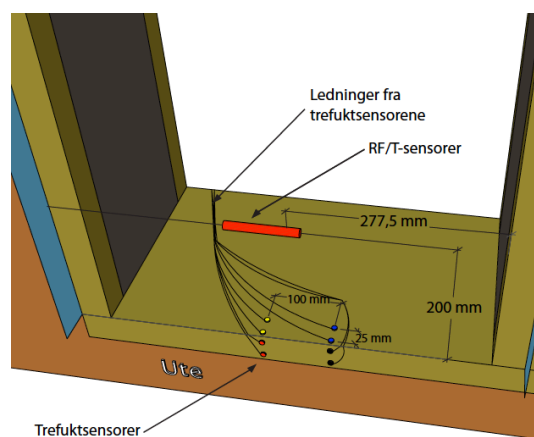
Tettingen av veggelementene har foregått på samme måte som for 1D celleveggen. I tillegg er Hunton Vindtett™ platen klemt godt rundt trefuktsensorene på kanten av villen. Dette er gjort for ikke å få et lekkasjepunkt rundt sensorene.



Figur 15: Plassering av RF/T sensorer og trefuktsensorer i veggelementene.



Figur 16: Detalj av RF/T-sensorer midt i veggelement. Rød sensor ligger bak vindspærren, orange sensor ligger 50mm inn i isolasjonen.



Figur 17: Detalj av RF/T-sensor og trefuktmålere i bunnsvill, likt i toppsvillen. Skrueparrene er fargekodet og har 25mm avstand mellom seg. Det er 100mm mellom hvert parr.

3.3 Forsøksmaterieill

De forskjellige materialene som er brukt i forsøket og deres nøkkelparametre er gitt i Tabell 3. Materieill som ikke er av betydning for forsøket er ikke listet.

Tabell 3: Materialer brukt i forsøket med nøkkelparametre.

Material	Tykkelse sjikt (mm)	λ_d (W/mK)	S_d (m)	Referanse
Hunton Vindtett™	12	0,048	$\leq 0,2$	(SINTEF 2013b)
Hunton Vindtett™ (2 x 25mm)	50	0,048	$\leq 0,4$	(2 x 25mm) (SINTEF 2013b)
Tyvek®	1	-	0,023	(SINTEF 2011)
Flex isolasjon™	300	0,038	1-2 (μ)	(Hunton 2012)
Zell isolasjon™	300	0,040	1-2 (μ)	(Hunton 2013c)
Glava® PROFF 35	300	0,035	-	(Glava 2013)
DELTA® Luxx	1	-	2,0	(NORTETT)
INTELLO®	0,20 \pm 0,05	0,17	0,25 - >10	(Proclima 2013)
Tommen Gram Dampsperre	0,15	-	≥ 40	(SINTEF 2008)
Fermacell®	12,5	-	-	(SINTEF 2012a)
Hey'di® Membran	1	-	12,2	(SINTEF 2009)
Hunton I-Bjelken™	45 x 300	-	-	(SINTEF 2013a)
K-bjelken	48 x 300	-	-	(SINTEF 2012b)

3.3.1 Innblåsing av Zell

En representant fra Norsk trefiberisolering AS i Bergen kom med en demonstrasjonsmaskin og blåste veggelementene og cellene hvor Zell skulle benyttes. Innblåsingen bød på noen utfordringer. I følge Lygren som utførte innblåsingen i forsøkssveggene var det ikke riktig dimensjon på munnstykket eller god nok permeabel tettematte for returluft i den demonstrasjonsmaskinen han benyttet (Lygren 2013) (Norsk_trefiberisolering_AS 2013). En annen utfordring var det lille volumet til 1D-cellene. For å kontrollere at sensorene ikke ble forskjøvet under innblåsingen ble det foretatt en kontroll med hånden for å kjenne om sensorene var på sin rette plass. Av den grunn ble hullet for innblåsingen i fullskala veggelementene tatt i samme høyde som sensorene i midtplasseringen. Innblåsingen under utførelse er vist i Figur 18.



Figur 18: Innblåsing av Zell i veggelementene.



Figur 19: Strekk i dampbremsen etter innblåsing.

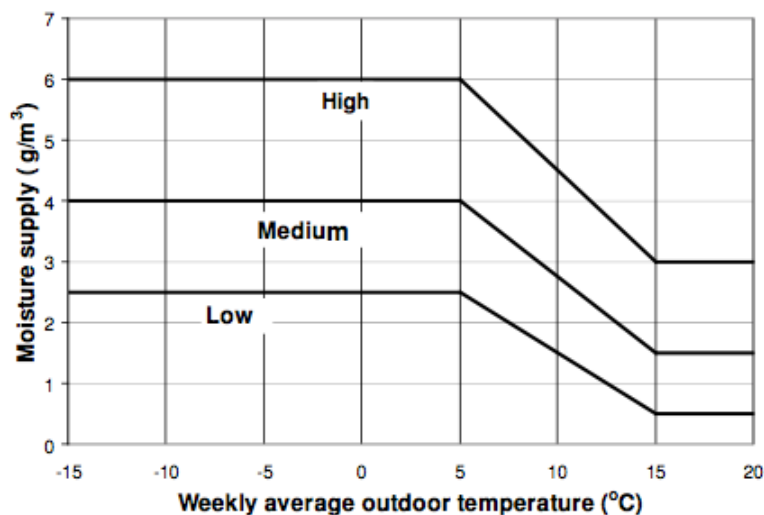
Hulltaking kan ha ført til noe ujevn tetthet på isolasjonen rett ved hullet i tillegg til at tapen som benyttes for å tette dampbremsen ikke har samme dokumenterte S_d -verdi som dampbremsen. Denne forskjellen vil trolig ikke ha stor innvirkning på målingene siden nærmeste sensor er plassert 250mm inn i isolasjonen i forhold til dampbremsen og med trefiberisolasjonens evne til å spre fukten vil det trolig bli tilnærmet samme resultater som om sensoren skulle vært plassert et annet sted i forhold til Innblåsingshullet.

Til sist viste det seg at DELTA® Luxx dampbremsen som var benyttet, strakk seg mye ved Innblåsing, slik at montering av gipsplate direkte på sperren ble vanskelig å gjennomføre, både på grunn av tykkelsesforskjellen og frykten for at dampbremsen skulle løsne hvis klelektene ble tatt av. Som en følge av dette ble klelektene fuget tette i kantene og Fermacellplaten skrudd utenpå disse. Figur 19 viser tydelig magen cellene fikk etter innblåsing av Zell.

3.4 Valg av Klima

Klimaet i laboratoriet ble satt til å simulere tre forskjellige scenarier; to typiske vintersituasjoner med mulighet for fuktakkumulasjon i konstruksjonen, og et vårlig uttørkingsklima. Alle klimaene vil ha 80% RF utendørs da det er normale verdier for Moisture Design Referens Year (MDRY) flere steder i landet i de aktuelle klimasesongene (Geving & Thue 2009).

Fuktklasser og innendørs fuktbelastning gitt i EN_ISO_13788 (2013) baserer seg på prøveresultater fra Vest-Europa, men anbefaler å bruke målinger fra områder som er relevante for stedet en skal bygge. Geving og Holme (2012) har utført slike målinger i Norge og resultatet er vist i Figur 20. Fuktbelastningen her er noe annerledes enn nivåene gitt i standarden EN ISO 13788 og det er Geving og Holmes resultater for fuktbelastningen som er benyttet i dette forsøket.



Figur 20: Fukttilskudd i norske boliger (Geving & Holme 2012).

Ved valg av fukttilskudd i klimaoppsettet er skillelinjene mellom lavt, medium og høyt fukttilskudd i Figur 20 benyttet. Dette er gjort for at oppsett skal kunne testes ved andre temperaturer enn det som er valgt i denne oppgaven, med samme forutsetninger av Norsk klima. Fukttilbelastningen og klimaparameterne i klimaoppsettene er gitt i Tabell 4. Klimaoppsett 1 (vinter) og 3 (vår) har lavt fukttilskudd, mens klimaoppsett 2 (vinter) har middels fukttilskudd. Fukttilskuddet i g/m^3 er avhengig av temperaturen utendørs slik som vist i Figur 20. Fukttilskuddet defineres i Byggforsk sin håndbok 50, *Fukt i bygninger*, (Geving & Thue 2009) som differansen mellom vanndampkonsentrasjonen (kg/m^3) i luften innendørs og utendørs. Fukttilskuddet oppgis vanligvis i enheten g/m^3 . Konsentrasjonen av fukt i inneluften er en funksjon av fuktproduksjonen i huset og antall luftskifter av luftvolumet.

Med klimaoppsett nr. 1 ønsker jeg å se på et typisk klima som kan gi fuktakkumulering i konstruksjonen, avhengig av tettesjikt og materialparametre. Med klimaoppsett nr. 2 er fuktbelastningen høyere og dermed fukttransportpotensialet enda større. Her vil det være fare for kondens i konstruksjoner med lav S_d -verdi på innvendige sjikt. Hensikten

med dette klimaet er å se om hygroskopiske egenskapene til trefiberisolasjonen klarer å fordele fukten slik at kondens eventuelt ikke oppstår. Det siste scenarioet, klimaoppsett nr.3, ser på potensialet for uttørking av den akkumulerte fukten i isolasjonen.

Forsøkselementene blir belastet med klimaforholdene i kronologisk rekkefølge, henholdsvis i fire uker om gangen. Det er verken uttørking eller opphold mellom klimaperiodene. I laboratoriet var det vanlig vinterscenario i forsøksukene 1-4, for å så fortsette med samme uteklima men med middels fuktbelastning innendørs i forsøksukene 5-8. Til slutt ble det simulert en opptørkningsperiode med lavt fukttilskudd i forsøksukene 9-12. Den relative luftfuktigheten innendørs er beregnet etter metode beskrevet i Geving og Thue (2009).

Tabell 4: Planlagt klimaparametre til laboratorieforsøket.

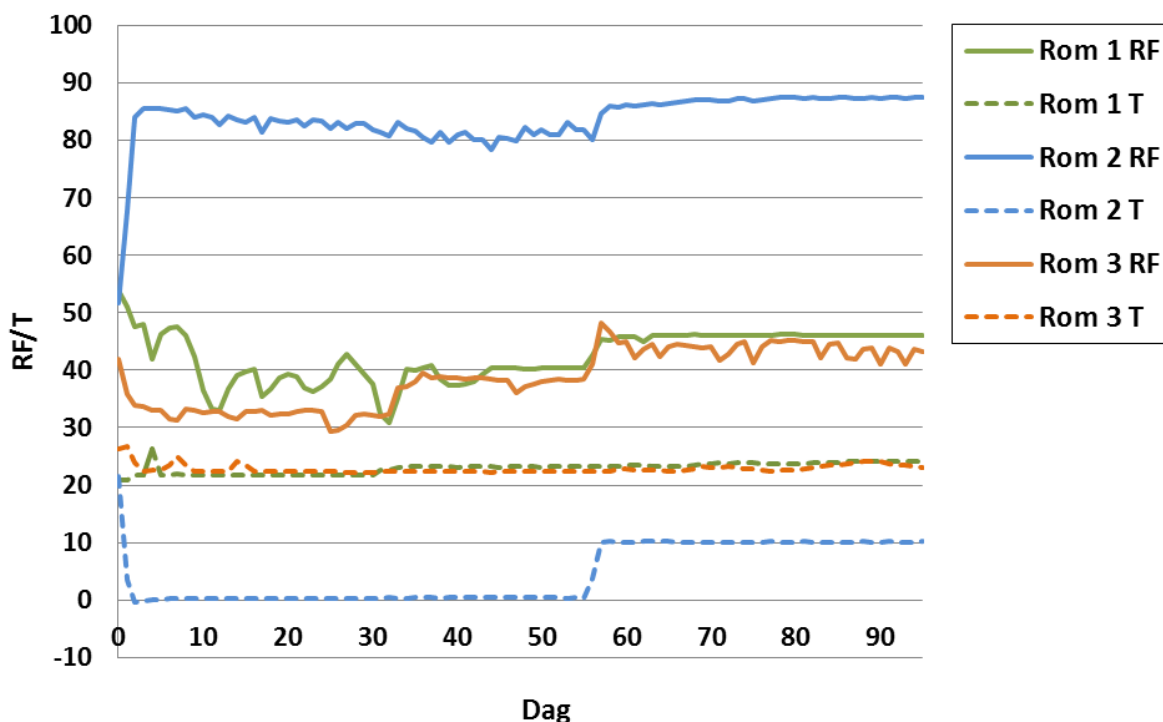
Klimaoppsett	T ute (°C)	RF ute (%)	T inne (°C)	Fukttilskudd (g/m ³)	RF inne (%)
1. Vinter	0	80	23	2,5	31
2. Vinter	0	80	23	4	38
3. Vår	10	80	23	1,5	44

3.4.1 Klimastyringen.

Klimaet som er loggført i klimarommene er presentert i Figur 21. Grafen viser både temperatur og RF. Rom 1 fikk ikke den trinnvise opptrappingen av fuktnivået som var ønsket. Grunnen er trolig at overskuddsmateriale som var lagret i klimarommet etter kondisjoneringen inneholdt mye fukt. Den automatiske styringen hadde ikke kapasitet til å fjerne overskuddsfuktigheten raskt nok til at det ikke påvirket fuktbelastningen i rom 1.

I rom 2, med uteklimaet, ga ikke kjøleaggregatet ønsket luftfuktighet ved valgt temperatur selv om tidligere erfaring skulle tilsa at den skulle ligget nærmere 80% RF (Aunrønning 2014). Resultatet av den høye luftfuktigheten i prøveperiode 3 gjør at prøveelementene får en større fuktbelastning utenfra enn forsøkets opprinnelige intensjon og man får en tydelig økning i fuktinnholdet.

Styringssystemet i rom 3 måtte justeres noe for å finne de innstillinger som passet best i forhold til ønsket klima. Resultatet ble en ganske godt med tilnærming til de ønskede klimatrinnene. For eksempel måtte befukteren innstilles på 40%RF for å gi 44% RF. Små temperaturtopper i rom 3 skyldes at lyset i rommet i enkelte perioder ikke ble skrudd av. Følsomheten for tilskuddsvarme var stor i de små høyisolerte rommene.



Figur 21: Loggført klimabelastning under laboratorieforsøket.

Den reelle klimabelastning under forsøket er for de tre klimaperiodene gitt som snitt i Tabell 5. De 50 første timene i forsøket er ikke med i midlingen, de hadde for stort avvik.

Tabell 5: Virkelig klimabelastning på forsøksenelementene.

Klimaoppsett	T rom 1	RF rom 1	T rom 2	RF rom 2	T rom 3	RF rom 3
1. Vinter	21,98	40	0,26	84	22,68	32
2. Vinter	23,23	40	0,42	81	22,38	38
3. Vår	23,75	46	10,11	87	23,04	44

3.5 Kondisjonering av isolasjonsmaterialer

Som tidligere nevnt har treverk stor fuktkapasitet, og for at resultatene fra starten av forsøket ikke skulle forsinkes av adsorpsjon, ble trefiberisolasjonen kondisjonert til startfukt på ca.70% RF. Likevekt regnes som oppnådd når vektendringen over tre døgn er mindre enn 0,1% (EN_ISO_12571 2000). Figur 22 viser veiing av trefiberisolasjonsplaten under kondisjonering.

Flex

Kondisjoneringen av Flex-platene foregikk i klimarommet før montering.

Målingene fra kondisjoneringen og tørrvekten for en 200mm Flex isolasjonsplate er vist i Vedlegg 2. Ved 72,3% RF ved 21,3 grader veide isolasjonsplaten 8202,9 g. Med en tørrvekt på 7341,5 g tilsvarer det et fuktinnhold på 861,4 g som tilsvarer 10,5% kg/kg. Uttørkingen av isolasjonsplaten for å finne tørrvekten, ble gjennomført på 70 °C.

Måleresultatene er presentert i Tabell 6

Tabell 6: Flex kondisjonert, leveranse- og tørrvekt.

Tilstand	Vekt (g)	Fuktinnhold (g)	Fuktinnhold % (kg/kg)	RF %	Ref
Tørrvekt	7341,5	0	0	0	
Leveransevekt	7564,7	223,2	2,95	≈11%	(Geving & Thue 2009)
Kondisjonert	8202,9	861,4	10,50	≈72%	(Geving & Thue 2009)



Figur 22: Veiing av 200mm Flex isolasjonsplate under kondisjonering.

Hvis en sammenligner fuktinnholdet med sorpsjonskurver fra Byggforsks håndbok 50 (Geving & Thue 2009) treffer vektprosenten innenfor variasjonsområdet i sorpsjonskurven til gran. Fuktinnholdet sammenfaller også godt med isolasjonsmaterialer av celluloseisolasjon og saueull som også er regnet for å ha stor bufferkapasitet (Geving & Thue 2009) (Hansen et al. 1999) (Peuhkuri et al. 2004) (Rode & Rasmussen 1999).

Zell

Zell isolasjonen ble en større utfordring å kondisjonere, da den ikke bør være påvirket før innblåsing. Derfor ble Zell-isolasjonen blåst inn i forsøkelementene tidligere enn forsøksstart for å kondisjonere seg. En ekstra celle (nr 16) i celleveggen ble også blåst med trefiberisolasjon for å kunne bestemme densiteten og for å måle startfukten når forsøket ble igangsatt. I tillegg er I-bjelkene med Hunton Vindtett™ i steget blitt kondisjonert i det samme klimaet i 2 uker.

Ekstracellen (celle 16) til kondisjonering var satt opp med DELTA® Luxx dampbrems med en S_d -verdi på 2,0 m (NORTETT 2013) og Tyvek® vindsperre med en S_d -verdi på 0,023 m (SINTEF 2011). Cellen ble belastet med samme kondisjoneringsklima, målt til 72,3% RF, på begge sider av veggen. Etter at trefiberisolasjonen ble tatt ut og puttet i tønner for veiing, ble hulrommet isolert med mineralull og ny dampbrems ble montert

for å opprettholde de samme fukt og temperaturtekniske egenskapene som andre celler i forsøksveggen.

To ståltønner ble benyttet for tørking av løsfiberisolasjonen. Etter uttaket fra kondisjoneringscellen hadde trefiberisolasjonen en vekt på 4257,5 g. Etter uttørking i varmeskap med en temperatur på 60 grader celsius hadde isolasjonen en vekt på 3839,6 g som gir et fuktinnhold på 417,9 g hvilket tilsvarer 10,9% kg/kg. Prøvene ble ikke tørket ut på 70 grader slik som Flex mattene på grunn av parallell uttørking av et annet forsøk i samme ovn. Dette andre forsøket krevde lavere temperatur. I Figur 23 vises tønnene i tørkeskapet. Målingene fra uttørkingen av løsfiberisolasjonen er gitt i vedlegg 2

Resultatene fra kondisjoneringscellen er presentert i Tabell 7. RF er estimert fra sorpsjonskurven som passet til Flex i Byggforsks håndbok 50 s406 (gran 2) (Geving & Thue).

Tabell 7: Zell kondisjonert, med tørrvekt. Leveransefukten er ikke veid, den er oppgitt av leverandør.

Tilstand	Vekt (g)	Fuktinnhold (g)	Fuktinnhold % (kg/kg)	RF %	Ref
Tørr	3839,6	0	0	0	-
Leveranse	-	40-90 g/kg	4 – 9	≈20 - 65	(Lygren 2013) (Geving & Thue 2009)
Kondisjonert	4257,5	417,9	10,9	≈73	(Geving & Thue 2009)



Figur 23: Tørking av Zell i to tønner, med parallelt forsøk.

Som vi kan se hadde Zell isolasjonen kondisjonert seg til omlag samme nivå som Flex. Kondisjoneringen vil trolig hindre større forskjeller i fuktfordelingen i starten av forsøket.

Mineralull

Mineralullisolasjonen Glava® PROFF 35 (Glava 2013), brukt i forsøket som sammenligningsmateriale har en sorpsjonskurve som indikerer liten bufferevne ved lavere fuktigheter og dermed rask tilpasning til fuktighetsnivået i klimarommene (Geving & Thue 2009). Isolasjonsmattene ble derfor ikke kondisjonert på samme måte. Isolasjonsmattene ble kun belastet i tiden mellom ferdigstilling av forsøksveggen og igangsettelsen av forsøket. Det ble ikke foretatt noen målinger av startfukt eller uttørking for tørrvekt av mineralullen.

3.6 Målesystem

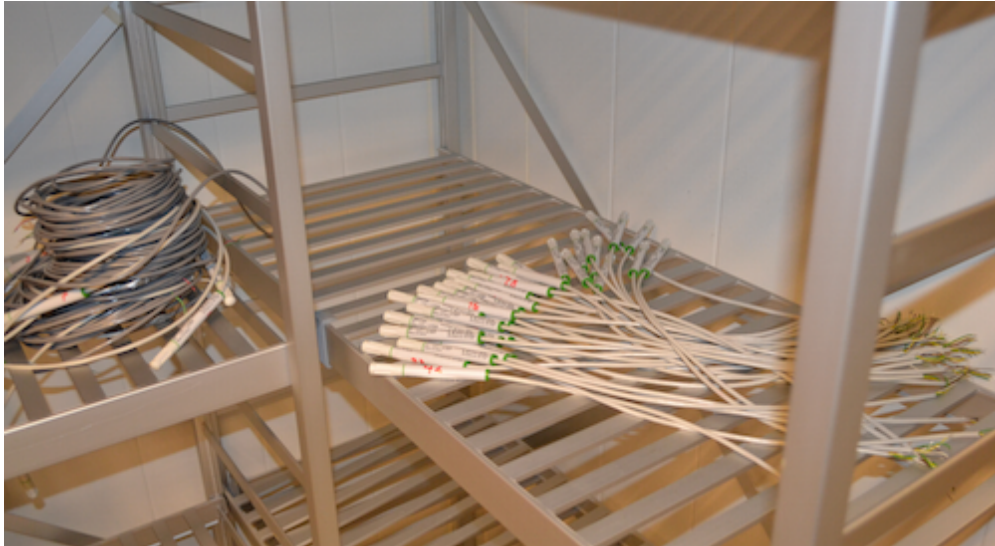
I dette kapitlet forklares montasjen, loggføringen, og kalibreringen av RF/T-sensorene og trefuktsensorene.

3.6.1 RF/T-sensorer

Til målingene av fuktighet og temperatur i forsøket er det brukt kompakte fukt- og temperaturmålere av typen EE06 (Elektronik). Føleren er av modell A med en rekkevidde på 0-100% RF, og har en målesikkerhet på $\pm 3\%$ RF ved 0-95% RF. For de siste fem prosentene er nøyaktigheten på $\pm 5\%$ RF. Sensorenes nøyaktighet på temperatur er avhengig av temperaturen og fuktbelastningen, men ved klimabelastningen i forsøket skal den være under $\pm 4^\circ$ C.

Sensorene sender signaler mellom 0-1V som er loggført til datamaskiner plassert i klimarommene. RF/T-sensorene ble kalibrert før oppstart av forsøket ved 50% RF og 75% RF, dette foregikk i egne klimarom hos SINTEF, og ble utført av Ole Aunrønning. Figur 24 viser sensorene under kalibrering hos SINTEF. Resultatene fra kontrollen kan ses i Vedlegg 3: Kalibrering av RF/T sensorer.

Sensorene bør også testes etter at forsøket er ferdigstilt og da helst for de samme verdiene pluss målte maksimum og minimumverdier for å kunne lage en nøyaktig kalibreringskurve for hver enkelt sensor (NORDTEST 1998). Kalibreringskurver er ikke lagd her fordi sensorene bare er kalibrert på 50 og 75 % RF. Manglende kalibreringskurve er uheldig, jeg kommer tilbake til dette senere. Sensorene har ikke vært tilgjengelige for etterkontroll da forsøksriggen benyttes videre av SINTEF.



Figur 24: Kalibrering av RF/T-sensorer.

I forsøksenelementene der Flex og Glava er benyttet ble sensorene montert ved hjelp av et lite snitt i isolasjonen. Kontroll på dybdemessig plassering er ivaretatt ved at skillene i isolasjonslagets tykkelse er utnyttet. Veggen er bygd opp av to 50 mm og en 200 mm isolasjonsmatte for å oppnå 300 mm isolasjonstykkelse.

I fullskala veggelementene, hvor naturlig konveksjon kan påvirke resultatene, er ledningene fra sensorene ført horisontalt ut til siden før de går inn til midten av dybden, slik som vist i Figur 25. Dette er gjort for å unngå en eventuell økt konveksjon langs ledningene som kan påvirke resultatet.



Figur 25: Montering av RF/T-sensorer i Flex



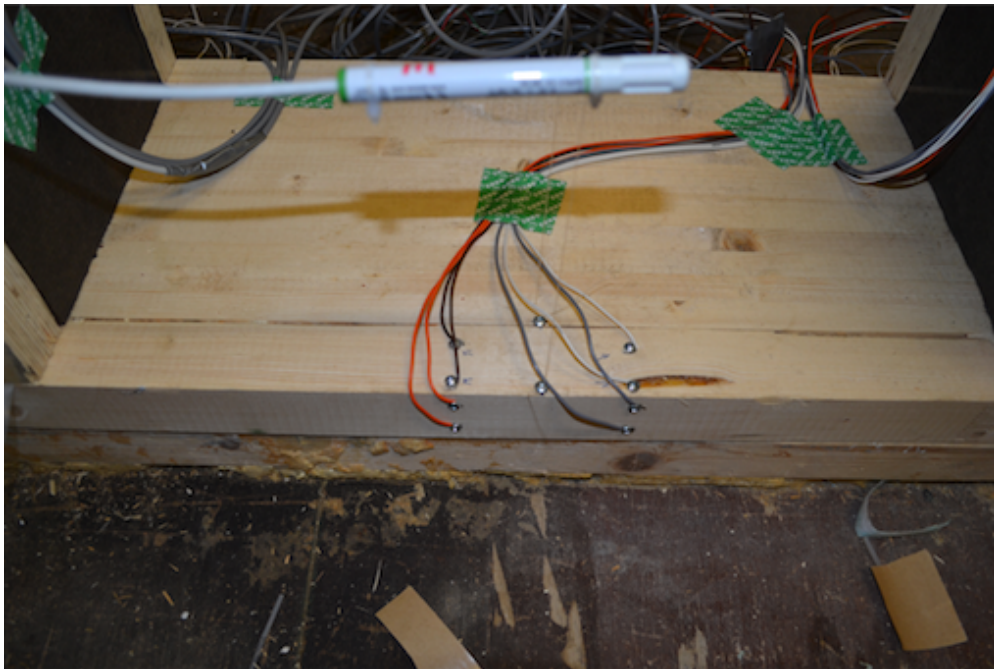
Figur 26: Montering av RF/T-sensorer i elementer med Zell

I forsøksenelementene som er isolert med Zell er RF/T-sensorene festet med fiskescene for at plasseringen skulle være stabil under og etter innblåsing av isolasjonen. I tillegg er det viktig at innfestningsmetoden ikke har hygroskopiske egenskaper som kan påvirke resultatene fra prøveelementene. Den samme innfestningsteknikken er benyttet i både 1D- og 2D-prøveveggene. Montering av RF/T-sensorer i elementer før vindsperre eller dampbrems er montert, er vist i Figur 26. Sensorenes plassering er blitt kontrollert manuelt gjennom innblåsingshullet før siste rest ble fylt opp. Dette kan ha medført at densiteten er noe annerledes der innblåsingen entret prøveelementet. Innblåsingshullet ble forseglet med teip tilhørende folieproduktets anbefalinger, dette kan ha endret S_d -verdien lokalt der innblåsing fant sted.

3.6.2 Trefuktelektroder

Trefuktsensorene er laget av kobberledning surret rundt en 15 mm skrue med panhode. Et målepunkt består av to skruer plassert med 25 mm avstand fra hverandre og måler fukten på kanten og flasken på kald side av topp- og bunnsvill. Henholdsvis med senter av skruene 24 mm ned fra kanten og 20 mm inn fra kanten slik som i Figur 17. Som tidligere nevnt er det montert 2 sett med trefuktsensorer, de er derfor blitt plassert fem cm til hver side for senter i testfakkene. Dupliseringen er gjort for å få bedre sikkerhet i målingene. Trefukt blir målt manuelt med et motstandsmeter, som kobles på ledningene som føres ut av prøveelementene.

Sensorene er kodet med elementnummer, flask eller kant, og sensornummer. Nummer 1 og 2 befinner seg på bunnsvillen, mens 3 og 4 er lokalisert på toppsvillen. Koden 2F2 vil altså si at det er trefuktsensor i element nr 2, festet på flasken, måler nr 2 på bunnsvillen. Figur 27 viser et nærbilde av bunnsvillen i prøveelement 4. Øverst i bilde vises den nedre RF/T-sensoren i et felt med Zell, bak i bildet ser en samlingene av ledninger fra sensorene i hele elementet og hvor de føres ut på varm side. De to skruene i senter på bunnsvillen er for innfestning av fiskescenene som holder RF/T-sensorene på plass.



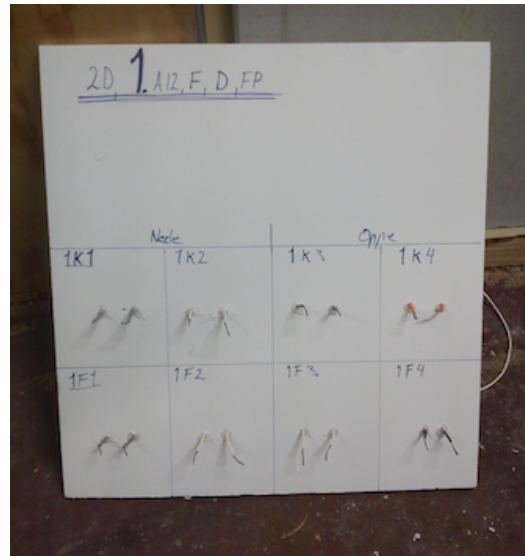
Figur 27: Montering av trefuktsensorer i bunnsvillen

3.6.3 Trefuktmålinger

Ved målingene av fuktigheten i svillene er det benyttet en fuktmåler av type GMH 3830 fra Greisinger (2002). Måleapparatet er basert på elektrisk motstand og har en målenøyaktighet på $\pm 0,2$ vektprosent innenfor et område på 6-30%. Alle målingene i laboratorieforsøket ligger innenfor dette intervallet. Fuktmåleren er vist i Figur 28 med ledningene som ble koblet til hvert enkelt målepunkt sortert på en måletavle vist i Figur 29 for systematisering og effektivisering av målingene. Målinger med en motstandsmåler som GMH 3830 er basert på å måle elektrisk ledningsevne i treverket. Av den grunn er det flere faktorer som spiller inn på nøyaktigheten til målingene som saltinnhold, densitet, oppsettet og temperatur. Mindre avvik i avstanden på 25mm mellom elektrodene har tidligere vist seg å ha liten betydning da selv en dobling av avstanden gir en målefeil på ca 1vektprosent (Geving & Thue)



Figur 28: Bærebær elektronisk fuktmåler, GMH 3830, brukt til trefuktmålinger.



Figur 29: Måleplate for trefuktmålinger.

Fuktmåleren ble innstilt på h137 (Nordisk gran) og en referansetemperatur på 20 grader celsius. De samme innstillingene er brukt i alle målingene som er gjort av fukt i svillene. Den eksakte temperaturen i målepunktet er ukjent på måletidspunktet. Det nærmeste en kan fastsette temperaturen er ved å bruke data fra en RF/T sensor som sitter 20 cm høyer eller lavere enn målepunktene avhengig av om plasseringen av målepunktene er i bunn- eller toppsvill. Temperaturdifferansen fra innstilt til faktisk temperatur gir en endring på +0,5 vektprosent for hver 5. grad lavere enn 20 grader så lenge det er under 20 vektprosent fuktighet. Apneseth og Hay (1992) presenterer Formel 1 for korrigering av temperatur i målepunktet. På grunn av at temperaturen ikke kan fastsettes vil målingene bare benyttes til å se på endringer i verdien i forhold til utviklingen i prøveveggen og ikke til å fastsette nøyaktig fuktinnhold.

Formel 1: Korrigering av trefuktmålinger med motstandsmåler for temperatur ved måletidspunkt.

$$u_k = \frac{u + 0,567 - 0,026 \cdot (t + 2,8) + 0,000051 \cdot (t + 2,8)^2}{0,881 \cdot (1,0056)^{t+2,8}}$$

u_k = fuktighet (vektprosent) korrigert

u = fuktighet (vektprosent) målt

t = temperatur (°C) i målepunktet

Skrueene som er brukt i forsøket er ikke forseglet i overflaten. Dette gir strømmen mulighet til å gå letteste vei også over selve svillen eller i eventuell kondens på overflaten i svillen. Jeg kan altså ikke angi dybden på hvor målingen gjelder.

4 Resultater

I resultatdelen kommer først en oppsummering av klimastyringen, deretter en sammenligning av forskjellige forsøks-elementer som viser effekten av klima, vindsperre, dampspærre og isolasjonsmaterialet.

4.1 Loggføring og behandling av data

Loggeintervallet fra sensorene har vært hvert 6 minutt i forsøksperioden da større intervall ikke var mulig på noen av loggerne. Intervallet har resultert i ca 23000 loggførte verdier for hver enkelt sensor (RF og T). Datamengden ble derfor tung å jobbe med.

Det korte intervallet gjør at endringene i måleverdiene blir veldig små. Av den grunn er det valgt å midle 10 og 10 målinger til timesverdier eller 240 og 240 målinger til døgnverdier, da dette er tilstrekkelig for å beskrive endringene som oppsto i forsøksperioden. Filen med rådata kan fås ved forespørsel. Matlabskriptet som er benyttet til midlingen av data er presentert i Vedlegg 4: Matlabskript.

Enkeltvis har det kommet ut data som åpenbart er gale. Grunnen til dette er ukjent. I klimafilene som er laget til WUFI® og i presentasjonen av resultatene er feilverdiene fjernet. Verdiene fra overliggende celle blitt kopiert ned. Det korte loggeintervallet gjør at også neste verdi er tilnærmet helt lik den forrige slik at feilen ikke vil ha betydning for vurderingen av resultatene. «Hullene» kan finnes med hjelp av søkefunksjon i rådataene.

4.2 Sammenligning av forsøks-elementene 1D-veggen

Materialet benyttet i de ulike forsøks-elementene i 1D-oppsettet er beskrevet i Tabell 8 og hvert element har fått en forkortelse som benyttes videre i navngiving av alle figurer og tabeller i dette delkapittelet. De samme materialene og forkortelsene blir også brukt i 2D-oppsettet og i senere omtalte av simuleringer i WUFI®. Alle forsøks-elementer benytter Fermacellplate innvendig, dette materialet er derfor ikke med i beskrivelser av oppbygning, da det er likt for alle forsøks-elementene.

Tabell 8: Forkortelser benyttet i navngiving av materialkombinasjoner og grafer.

Forkortelse	Materialnavn	Type material
A12	12mm Hunton Vindtett™	Vindsperre
A50	2 x 25mm Hunton Vindtett™	Vindsperre
T	Tyvek®	Vindsperre
F	Flex isolasjon™	Trefiberisolasjon
Z	Zell isolasjon™	Løs trefiberisolasjon
M	Glava® PROFF 35	Mineralull isolasjon
D	DELTA® Luxx	Dampbrems
PE	Tommen Gram Dampspærre	Dampspærre
I	INTELLO®	Smart dampbrems
U	Uten folie produkt	-
FP	Fermacell®	Innvendig kledning

Generelt i utviklingen for forsøksenelementene ser vi rask økning i RF i ytre sjikt ved starten av forsøket. Denne raske økningen skyldes temperaturfallet utvendig («utetemperatur» aktiveres i klimarom 2) som medfører både en omfordeling av fukten utover i veggene og temperaturfallets direkte virkning på RF

Årsaken til at trefibervariantene til tider ligger høyere enn mineralullisolasjonen i starten er at den har et mye større fuktinnhold som kan omfordeles utover. RF i den innvendige delen synker raskt for mineralull og tregere for trefiberisolasjonen. Det er en effekt av materialenes bufferkapasitet. Trefiberisolasjonen skal forflytte mer fukt før RF synker enn det mineralullen skal. Tiden det tar før materialene når likevekt med fuktbelastningene er hele veien kortere for mineralullen enn for trefiberisolasjonen. Etter fuktfordelingen i starten begynner en nedadgående kurve for alle isolasjonstypene. I denne fasen kan eventuell overskuddsfukt tørke ut. I klimaperiode 2 fortsetter fuktinnholdet å synke i alle cellene. Dette skyldes at fuktbelastningen i klimaperiode 2 var lavere enn i periode 1. Min opprinnelige hensikt var at klimaperiode 2 skulle ha et fuktigere uteklima enn periode 1, årsaken til at det ikke ble slik er omtalt i kapittel 3.4.1 ovenfor.

I den siste klimaperioden øker belastningen både ute og inne. Dermed øker fuktighetsnivået i veggene. Trefibervariantene øker mindre enn mineralullisolasjonen. Årsaken er bufferkapasiteten til trefiberisolasjonen som er større enn for mineralullen og derved blir trefiberisolasjonens maksimalnivåer lavere innenfor forsøkets testperiode.

Økningen i fuktigheten innvendig i veggene i klimaperiode 3 er kraftig, og et resultat av redusert forskjell i damptrykket mellom ute og inne. Da blir trykkfallet over en eventuell dampbrems redusert. Drivkreftene for omfordeling av fukten reduseres også ved reduksjonen i temperaturdifferansen. Se Figur 30.

Resultatgrafene for hver enkelt celle finnes i Vedlegg 5. En oversikt over sensorenes plassering i hver enkelt celle er gitt i vedlegg 8.

En oversikt over kommende sammenligninger av data er listet i Tabell 9, med hovedfokus for sammenligningen og hvilke celler som inngår i sammenligningen. Videre blir hver enkelt sammenligning presentert og årsak til endringen kommentert. En diskusjon av sammenligningene kommer senere i delkapittel 6 Drøfting.

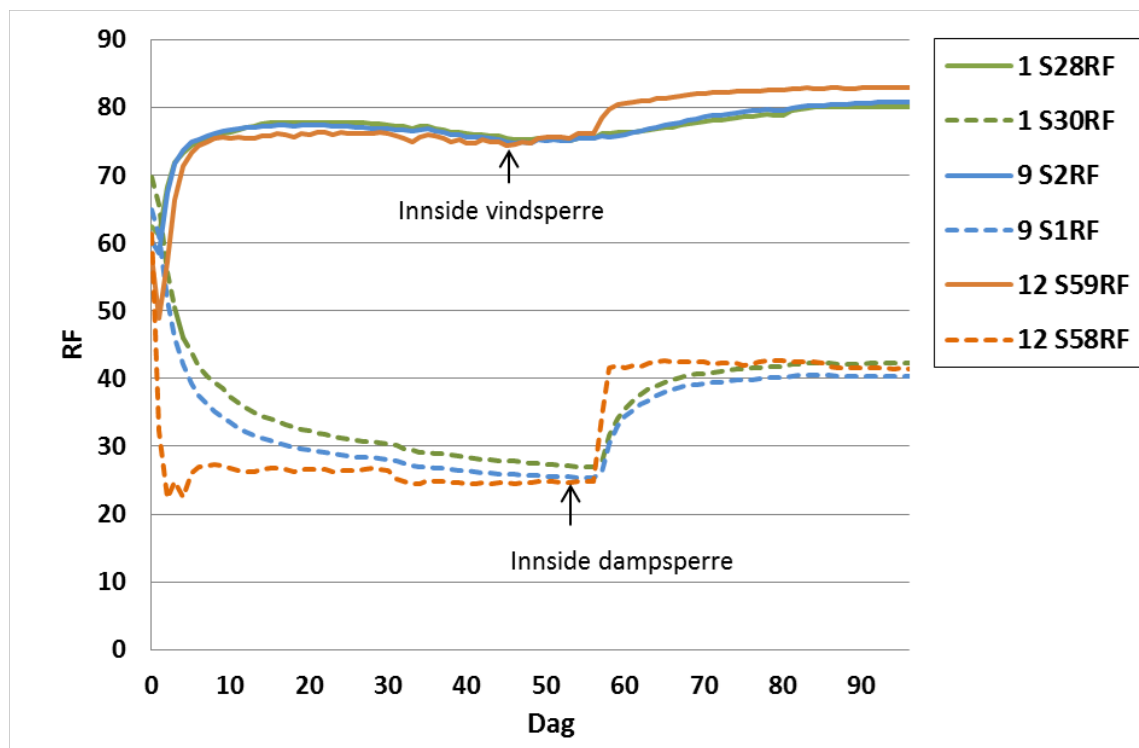
Tabell 9: Sammenligninger av forsøksenelementene.

Variabler som undersøkes	Hvilke celler	Faste parametre
Effekten av isolasjonstype	1,9,12,	A12,D
Endring i RF for isolasjonstypene F og M	2,13	A12,PE
Forskjellen i trefibervariantene F,og Z	4,10,	A50,D
Effekten av isolasjonstype med dampåpen vindsperre	7,11,14	T,D
Påvirkning av ulik vindsperre på Flex	1,4,7	F,D
Påvirkning av ulik dampbrems på Flex	1,2,3	A12,F
Påvirkning av ulik dampbrems på Flex	4,5,6	A50, F
Alternative oppbygninger med F i forhold til T,M,PE	15, 2,8,5 ev 11	celle15.
Betydning av PE og D for mineralull og Flex	7,8,14,15	T

4.2.1 Effekten av isolasjonstype, tettesjikt A12,D

Figur 30 viser endringene i RF for cellene 1 (Flux), 9 (Zell) og 12 (mineralull) gjennom de 3 klimaperiodene. Vindtetting og dampbrems er lik (12 mm Hunton Vindtett™ og DELTA® Luxx dampbrems). Denne kombinasjonen med Hunton Vindtett og DELTA® Luxx dampbrems anbefales av Hunton for oppbygging av vegger. Kombinasjonen tettesjiktene gir et S_d -forhold på 10 (Ute/Inne hhv. 2,00/<0,20)

Figur 30 viser at trefibervariantene initielt har høyere fuktighet enn mineralull. Differansen reduseres og er tilnærmet lik for de 3 isolasjonstypene for perioden fra 1000 til 1400 timer (klimaperiode 2 - Vinter) Ved bytte til siste klimabelastning (klimaperiode 3 (vår)) øker fuktigheten i mineralullen meget raskt og når 80% RF i løpet av kort tid. Trefibervariantene har en mye større buffereffekt og når 80 % RF først ca 600 timer inn i klimaperiode 3.

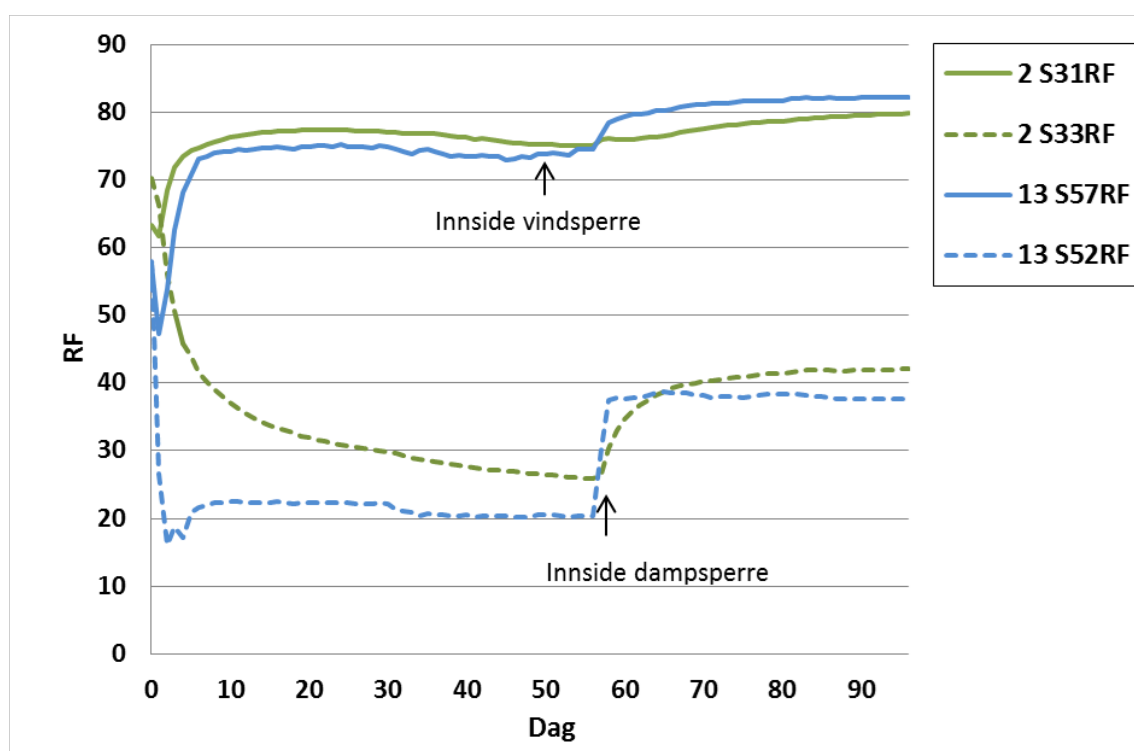


Figur 30: Effekten av isolasjonstype med A12,D, Celle 1 (F), 9(Z) og 12(M)

4.2.2 Endring i RF for Isolasjonstype F og M, tettesjikt A12,PE

Figur 31 sammenligner Flex og mineralull. Cellene har 12 mm Hunton Vindtett™ og PE-folie (Tommen Gram Dampspærre). Dette gir et S_a -forhold på 200 (Ute/Inne hhv. $\geq 40 / < 0,20$).

Ved bruk av Tommen Gram Dampspærre ses en forskjell i responshastigheten for omfordelingen av fuktinnholdet i Flex og mineralull. I tredje klimaperiode, kan en skimte at trefibermatten fordeler fuktinntaket innover i vegg, med en liten økning gjennom hele perioden. Det resulterer i reduksjon av maksimalt fuktnivå ved vindspærren og holder det under 80% RF. Mineralullen flytter fukten lettere utover og får en raskere økning i maksimalt fuktnivå utvendig som går over 80% RF. I mineralullen oppnår raskere likevekt i fuktfordelingen.



Figur 31: Endring i RF for isolasjonen med A12 og PE, Celle 2 (F) og 13 (M)

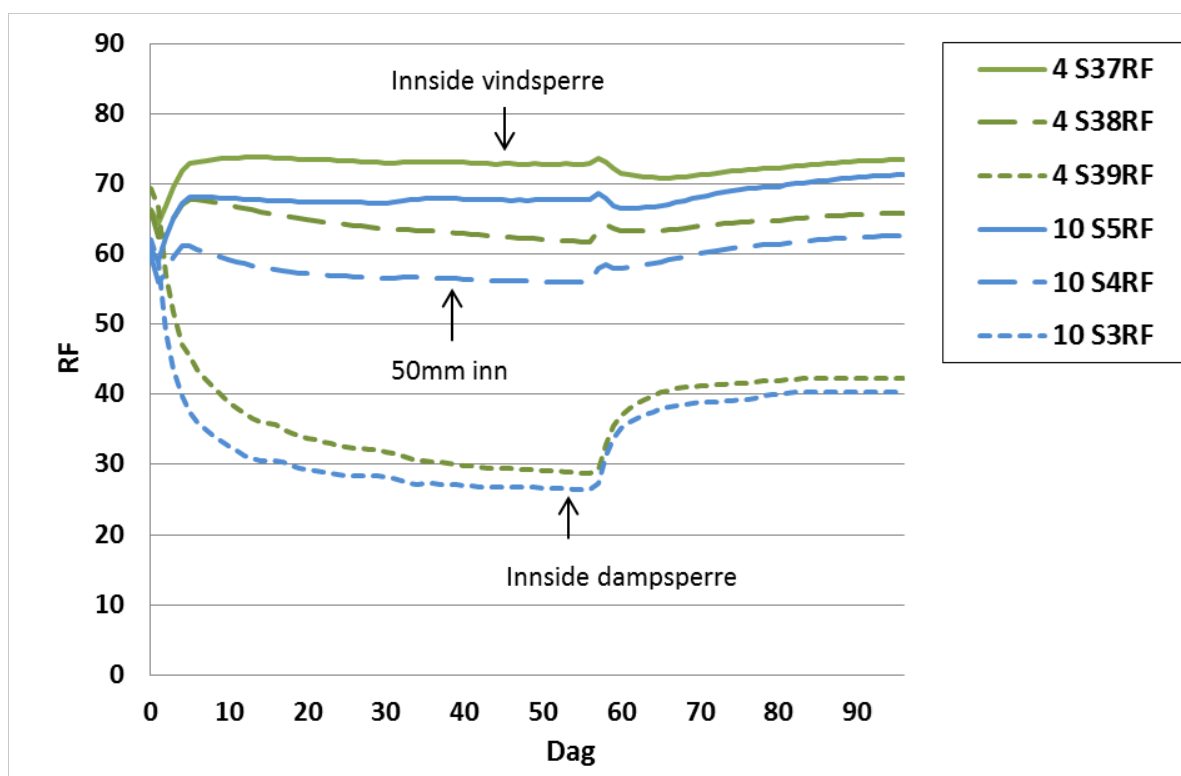
Bufferkapasiteten til trefiberisolasjonen ser vi tydelig fra sensorene inne ved dampspærren hvor Flex har en tydelig forsinkelse i utviklingen av fuktnivået sammenlignet med endringen hos mineralullen i celle 13.

Bruken av PE-folie gir en mindre forskjell i fuktnivået til isolasjonsvariantene i det utvendige sjiktet i forhold til DELTA® Luxx variantene i Figur 30, da fuktpåkjenningen fra «varm side» ved bruk av PE-folie er markant mindre.

4.2.3 Effekten av trefiberisolasjonsvariant, tettesjikt A50,D

Figur 32 sammenligner Flex og Zell brukt sammen med vindsperre Hunton Vindtett™ 50mm og dampsperre DELTA® Luxx. 50 mm asfaltimpregnert vindsperre vil også gi en tilleggseffekt i form av økt isolasjon. S_d -forholdet blir så lavt som 5 (Ute/Inne hhv. 2/0,4).

Som det fremgår av Figur 32 omfordeles fuktigheten raskere i løsfibervarianten enn i Flex-mattene. Det er tilnærmet samme totale relative endring i RF over tid. Zell har et lavere fuktinnhold gjennom hele tverrsnittet. Begge varianter ligger under 80% RF og klarer seg dermed fint i forhold til fare for biologisk vekst. Det lave maksimale RF nivået kan skyldes en høyere temperatur (ca 2 grader i forhold til Tyvek®) i overgangen mellom vindsperre og isolasjonsmateriale på grunn av vindsperrens isolasjonsevne.

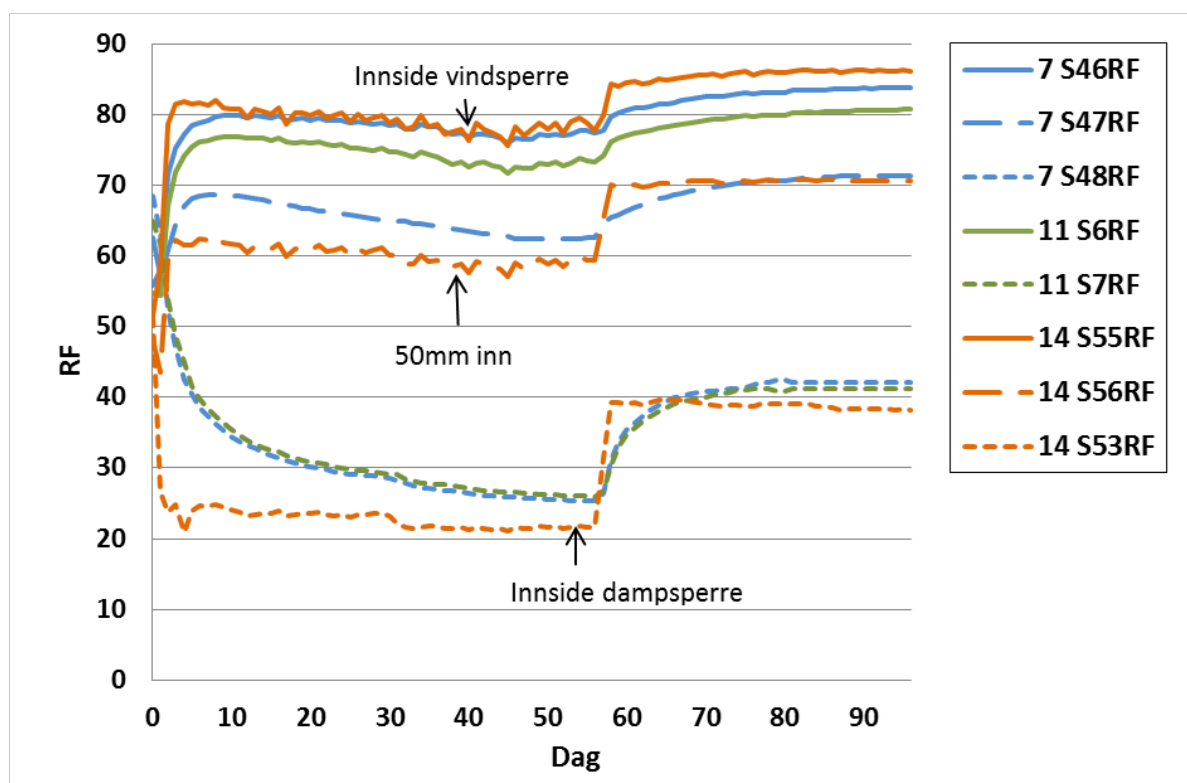


Figur 32: Effekten av trefiberisolasjonsvariant med A50,D, Celle 4(F) og 10(Z).

4.2.4 Effekten av isolasjonstype, tettesjikt T,D

En alternativ oppbygning til standard sammensetning i hus med T og PE som vanlige tettesjikt er bruk av DELTA® Luxx som dampbrems. Den vil gi større interaksjon for fukttransporten til og fra isolasjonsmaterialet og er ment som et alternativ til en smart dampbrems, da en smart dampbrems varierer etter fuktbelastning i ytelse. Forsøket kan ikke måle endringer i selve dampbremsen.

Tyvek® som vindsperre er langt mere diffusjonsåpen enn Hunton vindtett™. Det er derfor naturlig at fuktnivåer målt i ytterkant av vegg er i nærheten av luftens fuktnivå. Figur 33 viser at dette stemmer godt for celle 14 med mineralull som isolasjon. Celle 7 med Flex og celle 11 med Zell får ikke den samme tilnærmingen til uteklimaets fuktbelastning. Det tyder på at det skjer en omfordeling og utjevning av fuktinnholdet i isolasjonen lengre inn i cellen.



Figur 33: Effekten av isolasjonstype med Tyvek® og DELTA® Luxx. Celle 7(F), 11(Z), og 14(M).

Det kommer frem av figur 32 at Zell varianten har et lavere totalt fuktinnhold enn Flex, de har tilnærmet samme nivå mot innervegg men Zell ligger lavere mot yttervegg. Svingningene i det ytre laget tyder på at Zell har en raskere enn Flex, dog betydelig saktere enn mineralullen.

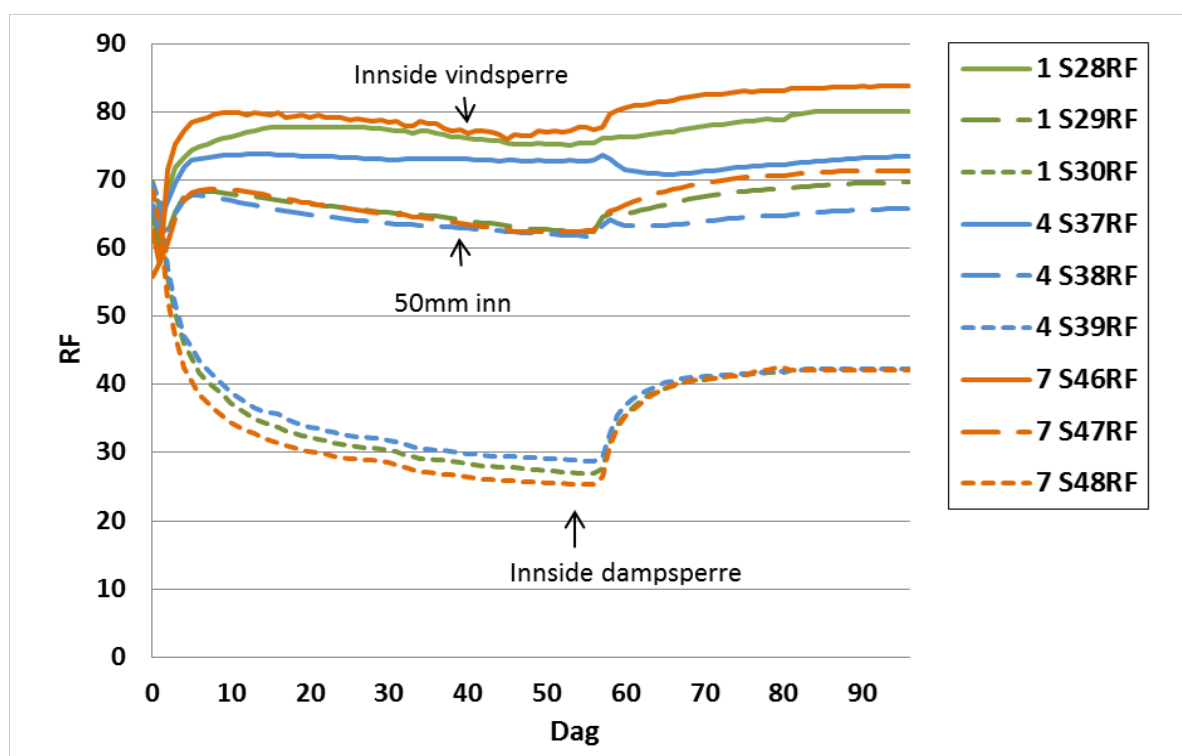
4.2.5 Effekten av ulike vindsperrer på Flex, innvendig tettesjikt D

Denne sammensetningen med kun Flex vil vise hvordan S_d og isolasjonsverdien av vindsperreren vil påvirke egenskapene i Flex. Variantene med DELTA® Luxx dampbrems og forskjellige vindsperrer er gitt i Tabell 10.

Tabell 10: Sammensetninger for sammenligning av celler med F og D

Celle	Sammensetning	S_{d-Ute} (m)	S_{d-Inne} (m)	$S_{d-forhold}$
1	A12,F,D,FP	<0,20	2,00	10,00
4	A50,F,D,FP	<0,40	2,00	5,00
7	T,F,D,FP	0,023	2,00	86,96

Det interessante med denne sammenligningen, vist i Figur 34, er at kombinasjonen Tyvek® og DELTA® luxx kommer dårligst ut med tanke på maksimalt fuktinnhold. Byggforsk sine anbefalinger om å etterstrebe høyt S_d -forhold kan synes å være uheldig ved bruk av Flex. I celle 4 med A50 som vindsperre er S_d -forholdet 5 og altså lavere enn Byggforsks anbefaling om minimum faktor 10. Vi får imidlertid i celle 4 et vesentlig lavere fuktinnhold enn i celle 7, og enda viktigere, fuktinnholdet overstiger ikke 80% RF. Årsaken kan være at en del av fukttilskuddet kommer fra utsiden og dermed blir motstandsrateen omvendt.



Figur 34: Effekten av vindsperre på celler med Flex isolasjon™ og DELTA® Luxx.

En annen faktor som kan spille inn er isolasjonsevnen til Hunton vindtett™ 50 mm som øker temperaturen innenfor vindsperrersjiktet med opptil 2 grader celsius, som igjen tilsvarer en redusert RF på tilnærmet 20 % ved 0 grader celsius (Geving & Thue 2009; Ramstad & Edvardsen 2009).

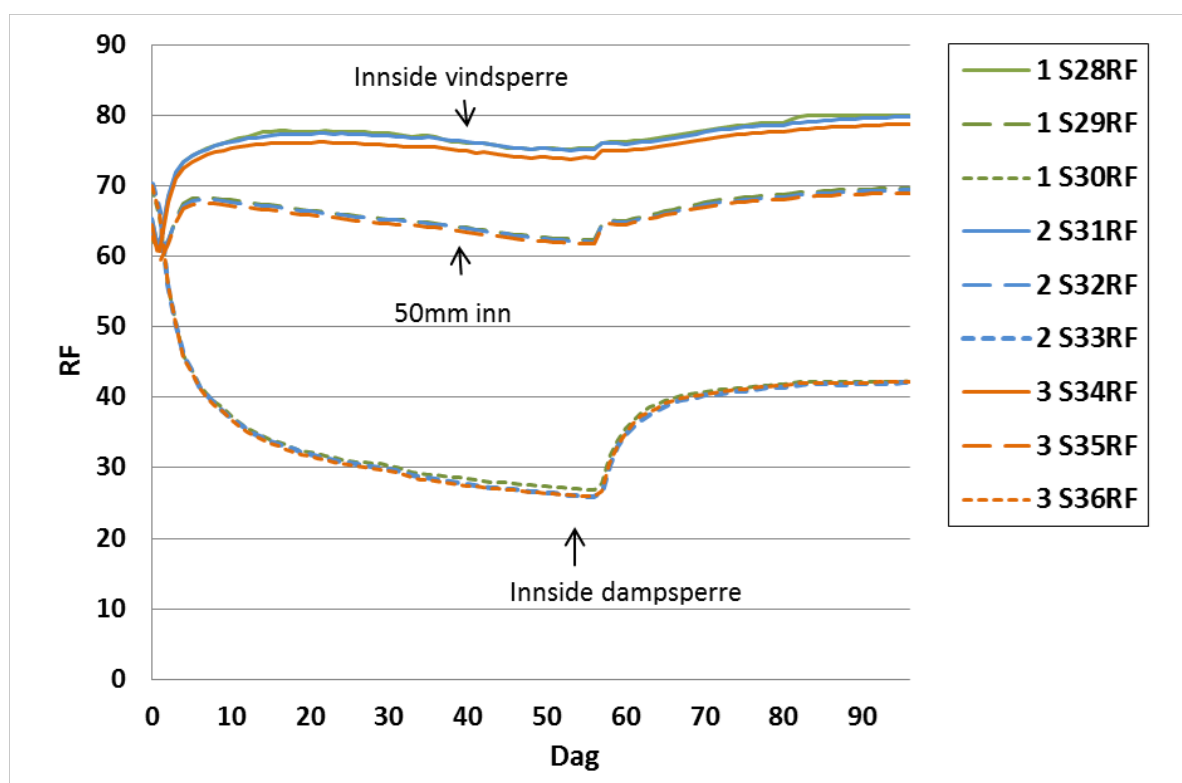
4.2.6 Effekten av ulike dampbremsere på Flex, utvendig tettesjikt A12

De 3 dampsperrere presentert i Tabell 11 gir sammen med vindsperre A12 ikke store forskjell i resultater. Figur 35 viser at det kun er celle 3 med INTELLO® som har et litt lavere fuktighetsnivå gjennom hele prøveforløpet utvendig i vegg.

Tabell 11: Sammensetninger for sammenligning av celler med A12 og F

Celle	Sammensetning	S_{d-Ute} (m)	S_{d-Inne} (m)	$S_{d-forhold}$
1	A12,F,D,FP	<0,20	2,00	10,00
2	A12,F,PE,FP	<0,20	≥ 40	200
3	A12,F,I,FP	<0,20	0,25->10	0,80-50

Trolig er grunnen til dette at en diffusjonsekvivalent luftlagstykkelse på 2 meter er tilstrekkelig i klimatilfellet der potensialet til metningstrykket ikke er større enn det som laboratorieforsøket er belastet med. Når det gjelder den smarte dampbremsen INTELLO® er dens motstand ukjent gjennom belastningsforløpet men ligger trolig i nærheten av DELTA® Luxx.



Figur 35: Effekten av dampsperre på celler med A12 og Flex isolasjon™

Mot slutten av klimaperiode 3 (vår) nærmer celle 1 og 2 seg et kritisk område med 80% RF og temperatur over ti grader, noe som gir fare for biologisk vekst. Effekten av en smart dampsperre gir ikke noen utslag i forsøket som kan tilsi at den fremhever trefiberisolasjonens hygroscopiske egenskaper.

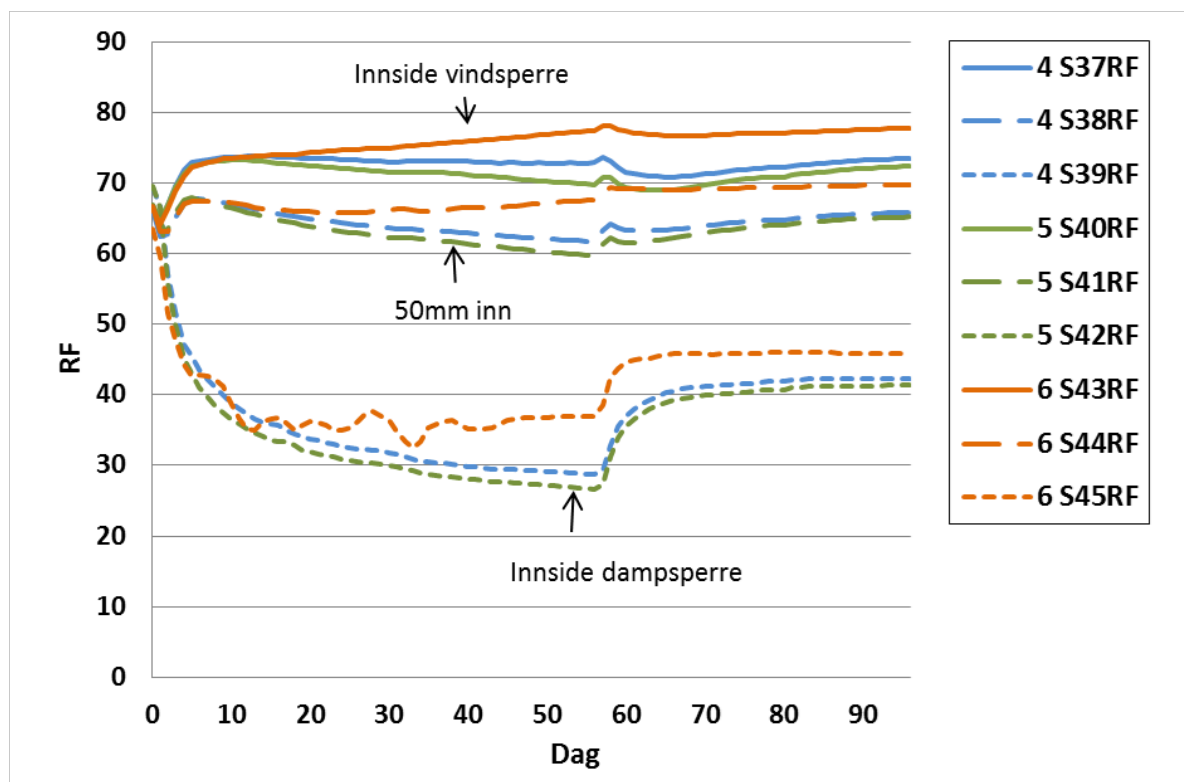
4.2.7 Effekten av ulike dampsperrer på flex, utvendig tettesjikt A50

I variantene med A50 og Flex er det også testet ut en variant uten noen form for damphemmende sjikt, celle 6 vist i Tabell 12. Dette er gjort for å se hvordan Flex takler en situasjon med en forholdsvis tett utside og ingen dampmotstand annet en kledningen innendørs. Fermacell® platen har ingen form for overflatebehandling.

Tabell 12: Sammensetning for sammenligning av celler med A50 og F

Celle	Sammensetning	S_{d-Ute} (m)	S_{d-Inne} (m)	$S_{d-forhold}$
4	A50,F,D,FP	<0,40	2,00	5,00
5	A50,F,PE,FP	<0,40	≥ 40	100
6	A50,F,U,FP	<0,40	0	0

I Figur 36 fremgår det at celle 6 uten dampsperre/brems kommer klart dårligst ut, men det overraskende er at RF ikke oversiger 80 % slik som tidligere varianter har gjort. Dette kan skyldes Flex's egen diffusjonsekvivalente luftlagstykkelse på. Dessverre er ikke dette testet mot løsfibervarianten Cell, dette fordi innblåsing ikke er mulig uten et innvendig tettesjikt. Det er heller ikke satt opp en testcelle med mineralull da denne ikke har en relevant difusjonsekvivalent motstand og dermed ville det høyst sannsynlig fort oppstå kondensasjon. Kondens ville også kunne ødelagt sensorene.



Figur 36: Effekten av dampsperre på celler med A50 og Flex isolasjon™

Av grafen fremgår det at uten innvendig dampmotstand er trefiberisolasjonen følsom for svingninger i inneklimate, men svingningene blir forsinket så mye at det ikke gir direkte utslag i RF ved utvendig sjikt innenfor testperioden, slik som enkelte av

mineralull variantene gjør. Dette skyldes trolig en kombinasjon av bufferkapasitet og omfordelingsevnen i trefiberisolasjonen.

Hvis en sammenligner klimabelastningen i Figur 21 og oppførselen til trefiberisolasjonen uten folieprodukt i celle 6, viser det en tydelig reduksjon i amplituden til fuktbelastningen som en effekt av bufferkapasiteten. I tillegg til en forskyvning av toppene og bunnene i tid.

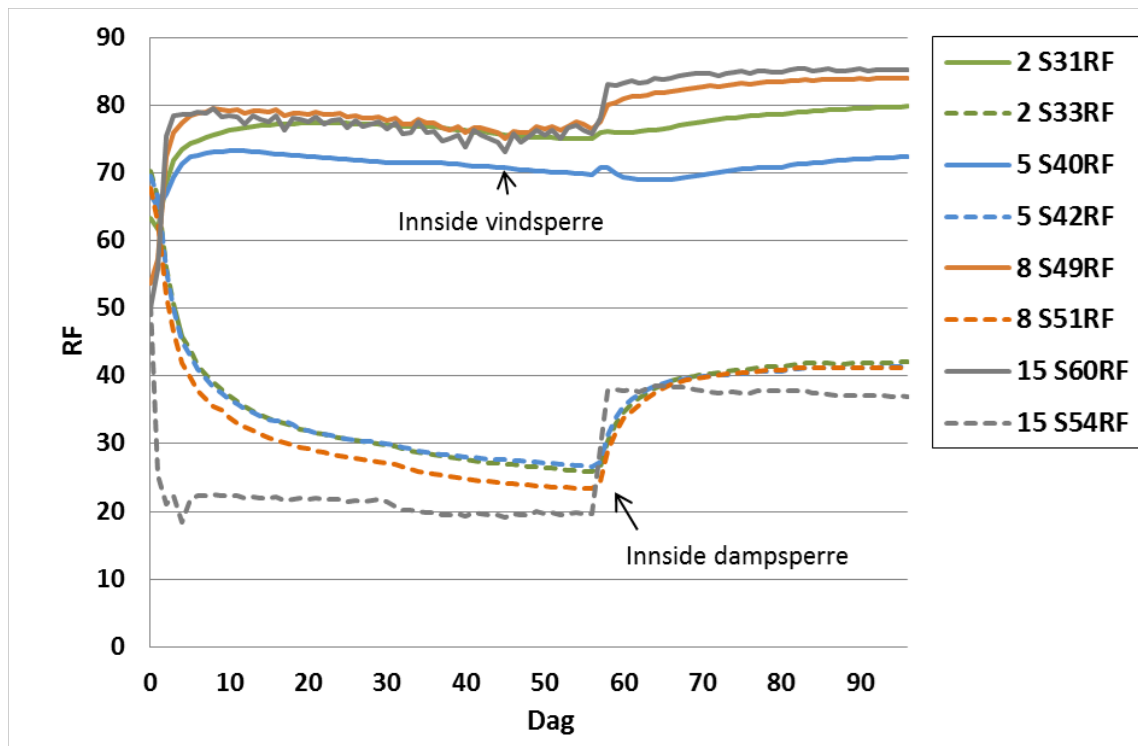
4.2.8 Alternativ oppbygning med Flex, i forhold til Tyvek, mineralull og PE-folie

I dagens byggebransje er kombinasjonen av Tyvek®, Mineralull og PE-folie en av de mest brukte i bindingsverksvegger. For å se hva som gir beste resultat sammenlignes «standardcellen» (nr 15) med variantene som er listet i Tabell 13.

Tabell 13: Sammensetning av cellene for sammenligning med standardcellen med T,M,PE

Celle	Sammensetning	S_{d-Ute} (m)	S_{d-Inne} (m)	$S_{d-forhold}$
15	T,M,PE,FP	0,023	≥ 40	1739
2	A12,F,PE,FP	$< 0,20$	≥ 40	200
5	A50,F,PE,FP	$< 0,40$	≥ 40	100
8	T,F,PE,FP	0,023	≥ 40	1739

Figur 37 viser at trefiberisolasjonen ligger lavere enn mineralull med unntak av innvendig fuktighet i klimaperiode 3 (vår). Celle 2 og 5 (Vindsperre 12 og 50 mm) holder seg også under kritisk grense 80% RF.



Figur 37: Celle 15,2,5,8 sammenligninger med standardcellen T,M,PE,FP.

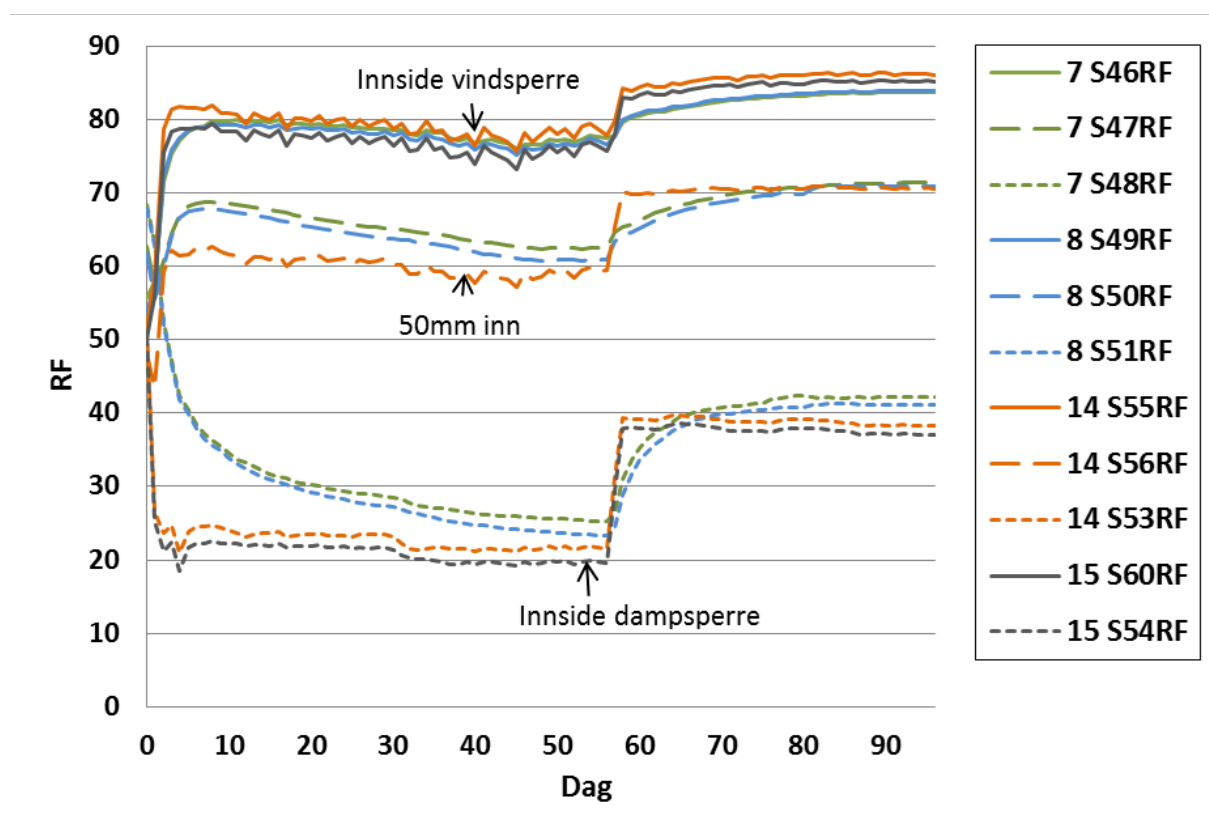
4.2.9 Betydningen av PE-folie og DELTA® Luxx for Flex og mineralull, utvendig tettesjikt Tyvek®

Tabell 14 viser ulike kombinasjoner med DELTA® Luxx og PE-folie med Flex og Mineralull. Det totale bilde av alle sensorene er gitt i Figur 38. En nøyere gjennomgang av verdiene fra resultatene følger etter.

Tabell 14: Sammensetninger for sammenligning av T med PE eller D for isolasjonsvariantene Flex og Mineralull

Celle	Sammensetning	S_{d-Ute} (m)	S_{d-Inne} (m)	$S_{d-forhold}$
7	T,F,D,FP	0,023	2,00	86,96
8	T,F,PE,FP	0,023	≥ 40	1739
14	T,M,D,FP	0,023	2,00	86,96
15	T,M,PE,FP	0,023	≥ 40	1739

To og to av materialkombinasjonene har samme S_{d-} forhold. Det gir et godt utgangspunkt for å sammenligne isolasjonstypenes avhengighet av høy innvendig dampmotstand.



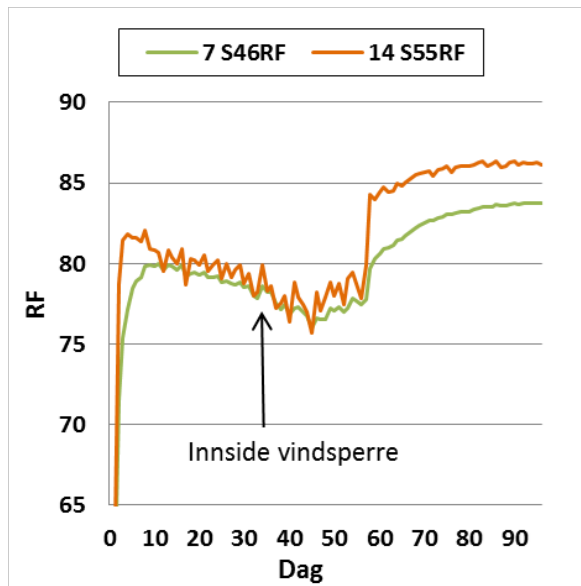
Figur 38: Sammenligning av Flex og mineralull, sammensetning tabell 14.

Grafene i Figur 38 viser tydelig at trefiberisolasjonen ikke reagerer like raskt på endringer i fuktbelastningen som mineralull. Variasjonen mellom cellene med Flex er liten i ytre del av vegg. Det antyder at tettheten på dampbremsen ikke har så stor betydning for trefiberisolasjonen i gitte tilfelle. Innover i vegg er også forskjellen

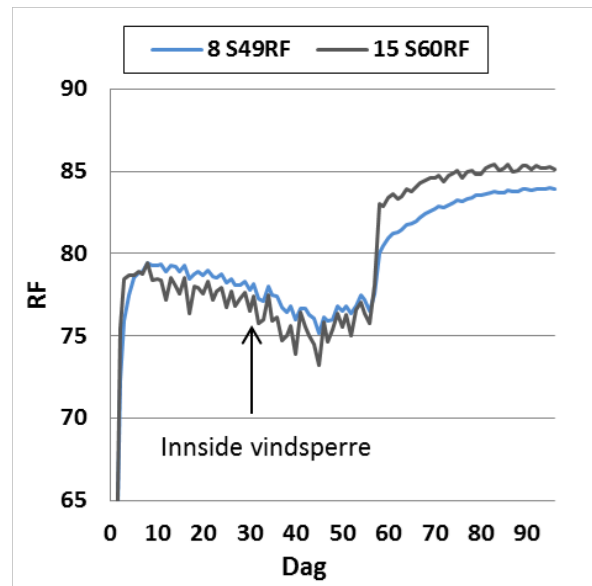
mellom cellene med mineralull litt større enn for trefiber. Flex har et høyere totalt fuktinnhold en mineralullen.

For lettere å kunne se forskjellen er de utvendige sensorene for cellene med DELTA® Luxx dampbrems vist i Figur 39 og for cellene med PE-folie i Figur 40.

Den trege reaksjonen i trefiberisolasjonen gjenspeiler sorpsjonskurvene. Forskjellen i stigningstallet er størst i området 80-90%. Det vil si at mer fukt må til for å øke RF i materialet med størst fuktbufferevne.



Figur 39: Detalj av celle 7 (F) og 14 (M) med D, Ute.



Figur 40: Detalj av celle 8 (F) og 15 (M) med PE, Ute.

Mineralullcellenes RF-nivå utvendig i veggen varierer mer med dampbremsens tetthet enn tilfellet er for Flex. Det er fare for biologisk vekst i alle cellene i klimaperiode 3. I celle 7 er det også vekstforhold helt i starten av periode 1.

4.3 Sammenligning av veggelementene i 2D

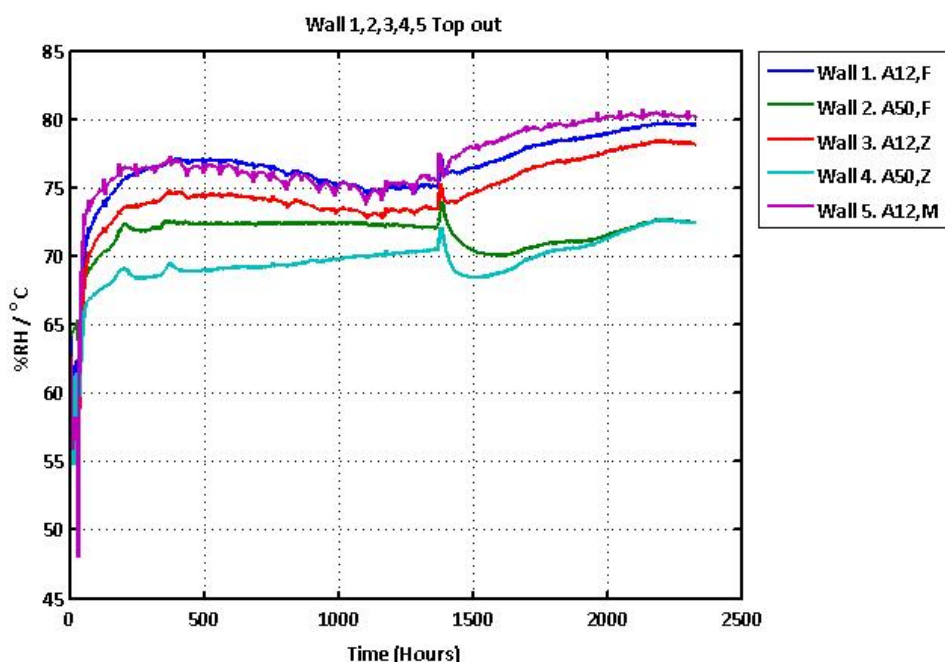
Resultatene for hvert enkelt element kan ses i vedlegg 6. I dette kapitlet presenteres sammenligninger i fuktforholdene for 2D-veggelementene. Veggelementenes oppbygning og S_d -verdier er listet i Tabell 15

Tabell 15: Veggsammensetning og S_d verdier.

Vegg	Sammensetning	S_{d-Ute} (m)	S_{d-Inne} (m)	S_d -forhold
1	A12,F,D,FP	<0,20	2,00	10,00
2	A50,F,D,FP	<0,40	2,00	5,00
3	A12,Z,D,FP	<0,20	2,00	10,00
4	A50,Z,D,FP	<0,40	2,00	5,00
5	A12,M,D,FP	<0,20	2,00	10,00

4.3.1 I toppen av veggene

Som vi ser i Figur 41 ligger trefiberisolasjonstypene likt med eller lavere i RF enn mineralullveggen. De har også mindre utslag og en saktere utjevning av fuktnivået enn mineralullveggen.



Figur 41: Sensorer bak vindsperre i toppen av alle veggelementene.

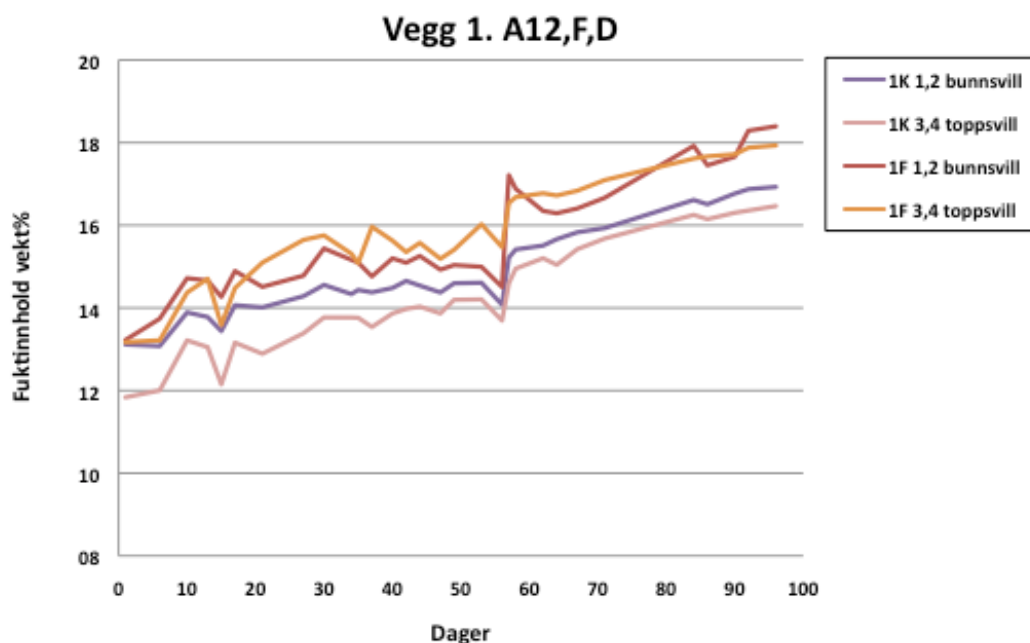
Løsfyllisolasjon i veggelementer med 300 mm tykkelse og en høyde på 2,4m kan ved høye stasjonære fuktforhold gjennom hele snittet bli utsatt for setning på grunn av høy egenvekt i den fuktige isolasjonen. For å unngå dette er det viktig at densiteten på trefiberisolasjonen er tilstrekkelig (Rasmussen 2002). Densiteten er i mitt forsøk kun målt i de små cellene hvor det var større usikkerhet rundt densiteten på grunn av det lille volumet, dermed kan ikke setning i 2D-veggelementene utelukkes. Dette vil kunne

kontrolleres ved nedrigging av forsøksveggen, eller antydes ved termofotografering av elementene. Det anbefales at dette undersøkes når bruken av forsøksriggen avsluttes. Det var ingen visuelle tegn til synk ved uttak av Zell for fastsetting av densitet i 1D-cellen forut for oppstart av forsøket. Isolasjonen hadde da en fuktighet på 73% RF, men den lille høyden på 600mm vil ikke få samme lastpåvirkning som veggelementet med 4 ganger så stor høyde, hvor altså synk ikke kan utelukkes.

4.3.2 Trefukt i svillene

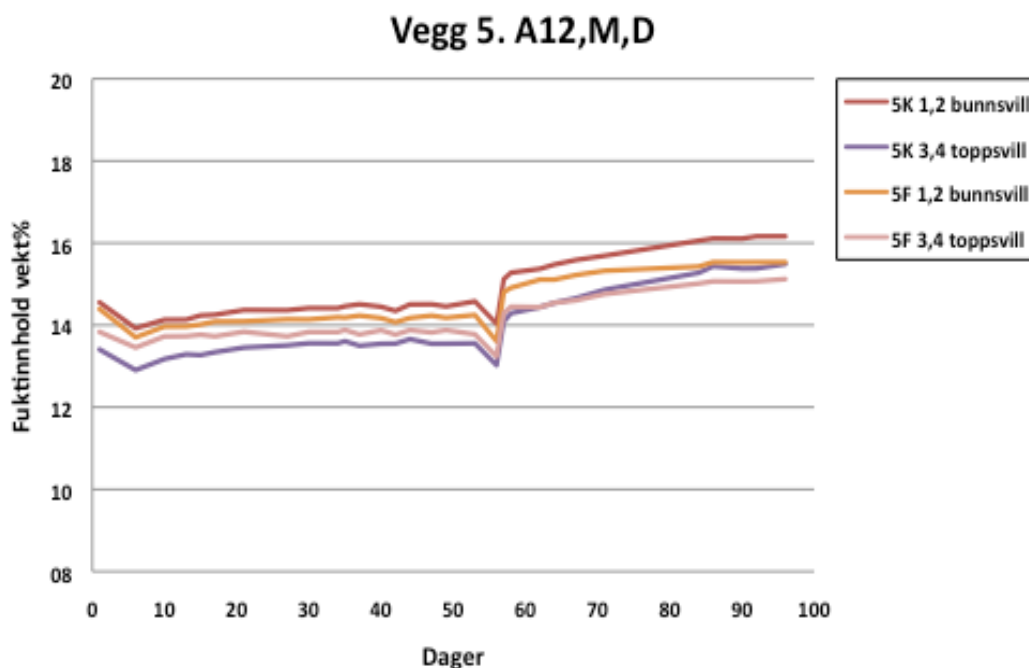
Trefuktmålingene er vedlagt oppgaven som en fil. Alle temperaturresultatene (redigert) fra målingene kan ses i vedlegg 7.

I Figur 42 vises veggelement 1, med Hunton Vindtett™ og Flex. Vi ser at fuktverdiene på flasken og i kanten av svillen følger hverandre relativt tett og samles mot slutten der konveksjonspotensialet er mindre enn i starten av forsøket.



Figur 42: Midlede trefuktmålinger fra kanten og flaten til topp og bunnsvillen i veggelement 1. K=kanten av svillen, F= flasken av svillen.

I Figur 43 vises veggelement 5, med Hunton Vindtett™ og mineralull. I dette tilfellet er fuktinnholdet mindre i toppsvillen enn for veggelement1 og differansen mellom topp- og bunnsvill er også større. Dette kan skyldes en større differanse i temperatur i veggelementet med mineralull i forhold til veggelementet med Flex.



Figur 43: Midlede trefuktmålinger fra kanten og flaten til topp og bunnsvillen i veggelement 5. K=kanten av svillen, F= flasken av svillen.

4.3.3 Konveksjon i veggelementene

I måledataene fra veggelementene gir ikke sensorenes RF-nivåer tydelige tegn på konveksjon, RF nivåene er tilnærmet like. Men sammenligner man temperaturforskjellen mellom øvre og nedre sensor i veggene med Hunton 12mm vindspærre finner man at vegg 5 (mineralull) har vesentlig større temperaturforskjell enn veggene 1 og 3 (Flex og Zell) Dette antyder at mineralullmaterialet, som er mer luftpermabelt, dermed også er mer utsatt for konveksjon. Når det gjelder Flex og Zell er det vanskeligere å se noen forskjell selv om det fra Hunton sin side opplyses at løsfibervarianten Zell gir mindre intern konveksjon. Tabell 16 viser veggene oppbygning og forskjell i temperatur. Temperaturpotensialet var henholdsvis på 23°C i klimaperiode 1 og 2 og 13°C i klimaperiode 3 basert på døgnmiddelverdier fra RF/T sensorene i rom 2 («uterommet») og rom 3 («innerommet»). Resultatene kan ikke brukes til sikre konklusjoner da sensorene har en måleusikkerhet på ±0,3°C (Elektronik) som er større enn enkelte av temperaturforskjellene.

Tabell 16: Temperaturforskjell i veggelementer oppe og nede, antydning på intern konveksjon

Veggelement	Sammensetning	ΔT med et potensial $\approx 23^\circ\text{C}$	ΔT med et potensial $\approx 13^\circ\text{C}$
1	A12,F,D,FP	0,16	-0,07
2	A50,F,D,FP	0,43	0,23
3	A12,Z,D,FP	0,46	0,33
4	A50,Z,D,FP	0,07	-0,13
5	A12,M,D,FP	0,77	0,40

5 WUFI Simuleringene.

WUFI (**W**ärme **u**nd **F**euchte **i**nstationär - Transient Heat and Moisture) et datasimuleringsprogram for varme og fukttransport i bygningskomponenter (Fraunhofer_IBP 2013). En kort gjennomgang av programmets virkemåte kan leses i programmets *WUFI® Pro 5 Manual* (Zirkelbach et al. 2013).

Datasimuleringsverktøy som WUFI ® gir en muligheten til å estimere resultater av ulike materialkombinasjoner raskt. Derved finner man også virkningen av hver enkelt faktor. Eventuelle feil i egenskapsdataene modellen bygger på gir selvfølgelig utslag i resultatene. Altså kan en liten feil i eksempelvis sorpsjonskurven til et materiale gi store utslag i beregnet resultat. I tillegg er det en ulempe at klimabelastningene i slike teoretiske modeller alltid er noe forenklet i forhold til de virkelige belastningene en konstruksjon utsettes for og de har også bare med hovedlinjene i klimaet for et gitt sted (Vinha 2007). Sistnevnte begrensinger gjelder også for forsøk i klimarom.

5.1 Valg av data og testmetode

Simuleringsresultatene avhenger av klima, materialparameterne og oppbygningen av konstruksjonen. Simuleringene i WUFI® ble kjørt med de faktiske loggresultatene i laboratorieforsøket klimafil. (tre scenarioer over tilsammen 12 uker). Simuleringen inneholdt også en test med en klimafil for et helt år, for å se hva slags fuktforhold et MDRY Trondheims klima vil gi med forsøksvariantene.

For å få gode sammenligninger kjøres simuleringer på 1D og 2D med henholdsvis WUFI 1D 5.2 PRO og WUFI 2D PRO.

WUFI® har noen begrensinger i sine beregningsmekanismer i forhold til et fullskala laboratorieforsøk. For eksempel tar ikke WUFI® hensyn til fukttransport ved hjelp av konveksjon (Künzel 1995). Forenklingene i datasimuleringsprogrammet påvirker i hovedsak 2D-resultatene. Tidligere forsøk har vist at 1D-oppsett og de endimensjonale transportprosessene stemmer bra overens med simuleringene. I Tabell 17 vises hvilke av de ulike transportmekanismene for fukt og varme som det blir tatt hensyn til og hvilke som ikke inkluderes i beregningene i WUFI®.

Tabell 17: Transportmekanismer for fukt og varme som blir inkludert eller ikke i WUFI® (Künzel 1995)

	Inkluderes i WUFI®	Inkluderes ikke i WUFI®
Varmetransport ved	Varmeledning Entalpi Kort og langbølget stråling	Konveksjon
Damptransport ved	Dampdiffusjon Løsningsdiffusjon	Konveksjon
Væsketransport ved	Kapillærledning Overflatekrypning	Hydraulisk strømning Tyngdekraften (drenering) Elektromagnetiske eller osmotiske effekter

5.2 Validering av WUFI® og inputtparametere

Målingene i laboratoriet viste at isolasjonsmaterialene inneholdt ca 60% RF når forsøket ble startet. Dette ble derfor brukt som startfukt i WUFI® 1D og 2D. Det loggførte klima fra laboratoriet ble av hensyn til belastningsinnstillingen i WUFI® redusert til timesdata ved hjelp av Matlab, og konvertert til en .kli-fil. Filen KLIMADATARED.kli er vedlagt sammen med resten av datagrunnlaget som er brukt i oppgaven, og kan fås ved forespørsel. Ved innlasting av datafilen kommer det en varselmelding om at det er inneklime på begge sider av veggen. Dette skyldes mangelen på regn og vind i klimafilen. Materialene som er brukt i simuleringen er hentet fra materialdatabasen til WUFI® og er listet i Tabell 18 sammen med deres nøkkelparametre.

Tabell 18: Materialparametre brukt til simulering i WUFI® 5.3 Pro og 2D

Forsøksmateriale	Materiale i WUFI® ⁰	Sorpsjonskurve (kg/m ³) v/RF = 80% (ca 97%)	Diffusjonsmotstand μ (-) v/RF =0% (100%)	S _d (m) v/RF =0% (100%)
Hunton Vindtett™	Trefiberskiva, porøs ¹	42,5 (85)		0,20 (konstant)
Hunton Vindtett™ (2 x 25mm)	Trefiberskiva, porøs ²	42,5 (85)		0,83 (konstant)
Tyvek®	Filtduk av polypropylen ³		17 (konstant)	
Flex isolasjon™	Pavaflex ⁴	7,0 (31,7)	1,35 (1,85)	
Zell isolasjon™	Pavaflex ⁵	5,1 (22,8)	1,35 (1,85)	
Glava® PROFF 35	ISOVER GW Integra ZFK -035 ⁶	0,7 (2,86)	1,0 (konstant)	
DELTA® Luxx	Vapour retarder ⁷			2,00 (konstant)
INTELLO®	INTELLO ⁸			26,00 (ca 0,25)
Tommen Gram Dampsperre	Vapour retarder ⁹			50,00 (konstant)
Fermacell®	Fermacell ¹⁰	15,8 (33,2)	16,0 (konstant)	
Hunton I- Bjelken™	Scandinavian spruce ¹¹	Ca 60 (81,9)	108,0 (27,0)	
K-bjelken	Scandinavian spruce ¹¹	Ca 60 (81,9)	108,0 (27,0)	

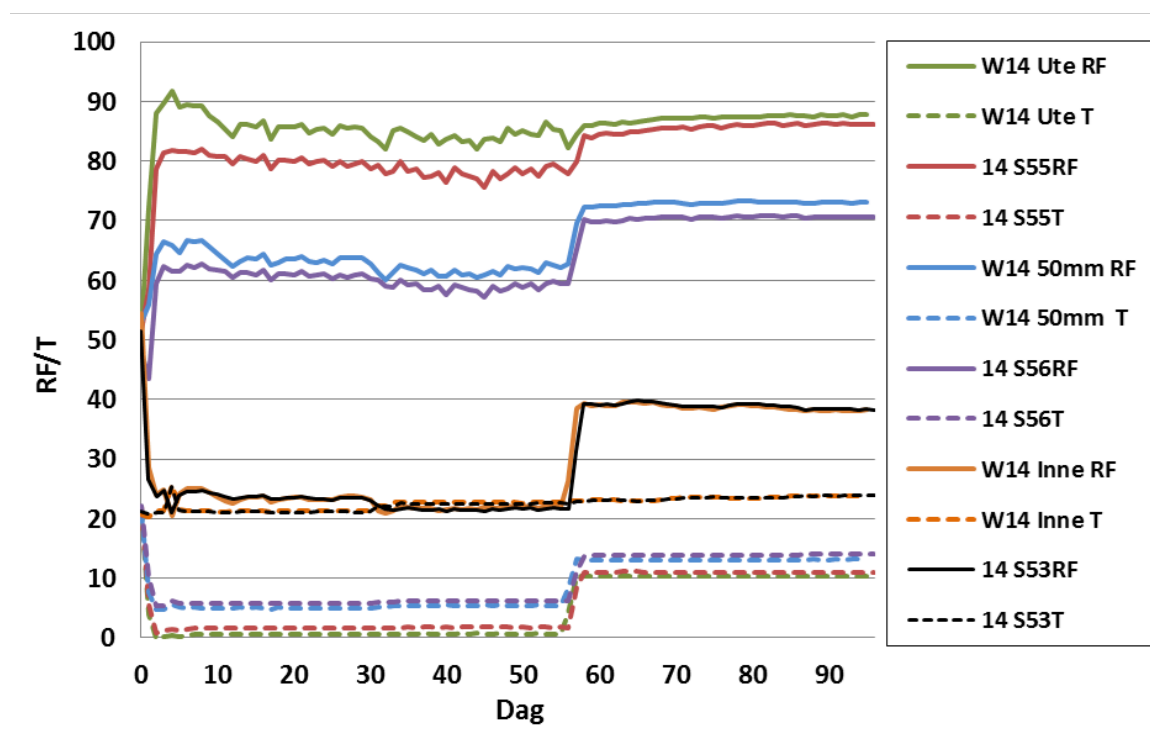
0. Materialnavn, WUFI® database, Eventuelle endringer/forskjeler for simuleringen
1. Trefiberskiva, porøs: LTH Lund University, endret S_d-verdi til 0,20.
2. Trefiberskiva, porøs: LTH Lund University, endret S_d-verdi til 0,40.
3. Filtduk av polypropylen på polyetylenfilm – vindsperre / undertak, NTNU Norwegian University of Science and Technology.
4. Pavaflex, Fraunhofer-IBP – Holzkirchen, Germany, Densitet 53 kg/m³
5. Pavaflex, Fraunhofer-IBP – Holzkirchen, Germany, Densitet endret til 38 kg/m³ (målt i testcelle 16.)
bufferkapasitet tilpasset densiteten.
6. ISOVER GW Integra ZFK -035, Fraunhofer-IBP – Holzkirchen, Germany
7. Vapour retarder (sd=2), Fraunhofer-IBP – Holzkirchen, Germany.
8. INTELLO, Fraunhofer-IBP – Holzkirchen, Germany, (sd=0,25 ved 97,5%RF)
9. Vapour retarder (sd=50), Fraunhofer-IBP – Holzkirchen, Germany.
10. Fermacell gipsfiber-plate, Fraunhofer-IBP – Holzkirchen, Germany.
11. Scandinavian spruce transverse direction II, NTNU Norwegian University of Science and Technology.

5.3 Resultater fra WUFI

Simuleringene, kalt serie 2000 i datasamlingen, ga en del resultater som avviker fra resultatene i laboratorieforsøket. Det var forventet at utdataene fra WUFI® ville ligge ganske tett på resultatene fra forsøket der mineralull er brukt, da dette materialet er godt kjent og tidligere utprøvd i WUFI®. I Figur 44 kan vi se at det i ytere deler av veggen er litt høyere fuktforhold i simuleringresultatene enn i forsøket. Innvendig er resultatene tilnærmet like.

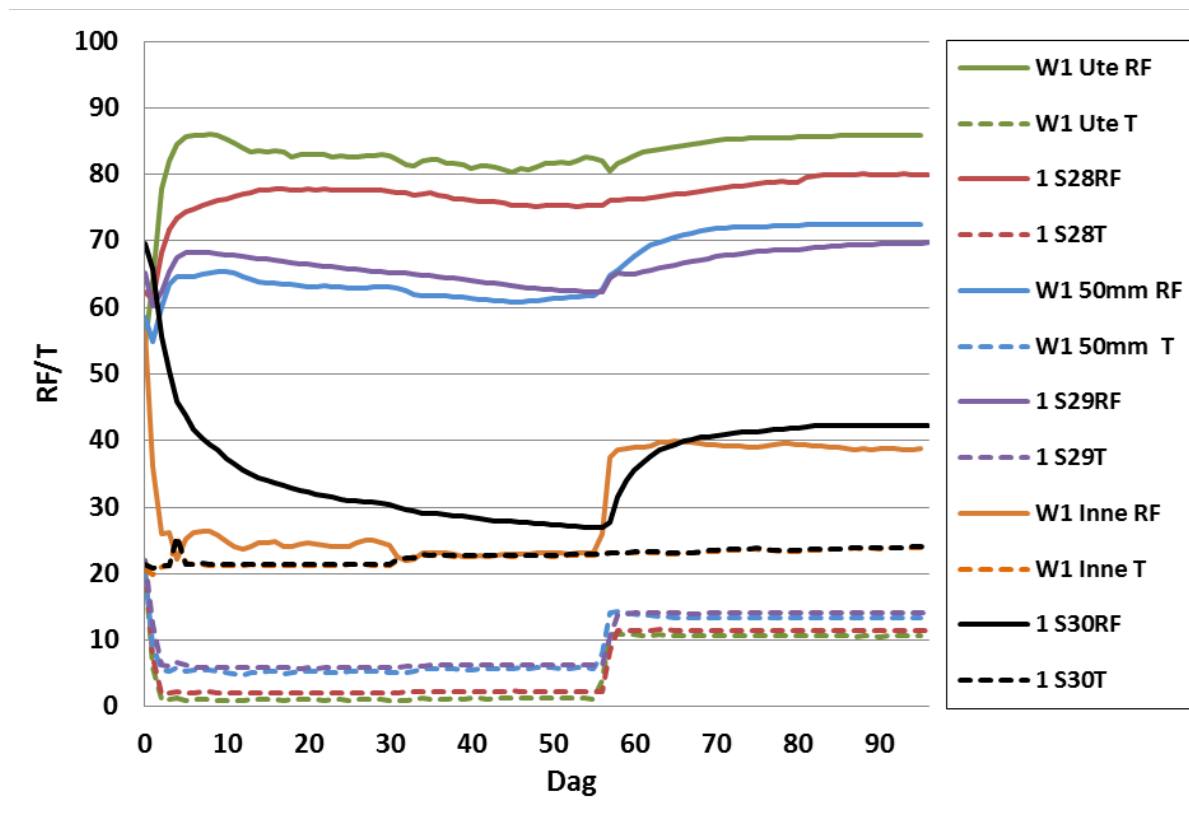
Nivåforskjeller kan tyde på forskjell i damptetthet, eller forskjeller i luftpermeabilitet i materialene brukt i forsøket sammenlignet med inngangsparamerene i WUFI®'s database. En annen faktor kan være trykkforskjeller i forsøket som kan påvirke størrelsen av luftstrømmen, eller rett og slett små temperaturforskjeller. Startfuktnivået kan også spille inn, men dette bør gi størst utslag i starten.

For at WUFI skal kunne brukes til å simulere andre tilfeller bør resultatene være ganske like og reaksjonene på klimaendringer bør følge samme utvikling. I mineralullcellene finner vi samsvar mellom forsøket og WUFI®. Det kommer også frem av Figur 44.



Figur 44: Sammenligning av WUFI® (W) og forsøksresultater, celle 14.

Når det kommer til trefiberisolasjonen er simuleringresultatene og laboratorieresultatene mer ulike. Det gjelder spesielt innover i isolasjonen. Celle 1 er presentert i Figur 45. Den viser tydelig at WUFI® ikke fanger opp fuktomfordelingen i trefiberisolasjonen slik den har foregått i laboratorieforsøket.



Figur 45: Sammenligning av WUFI® (W) og forsøksresultater, celle 1.

Da det ikke var tid til en grundig parameterstudie i denne oppgaven er det kun simulert noen andre materialvarianter enn Pavaflex, varianter som i utgangspunktet så ut til å passe best med egenskapene til Flex og Zell slik de er opplyst av Hunton. De andre variantene av trefiberisolasjon gav veldig like simuleringsresultater som Pavaflex ved testing.

For så se om plasseringen av den innvendige sensoren påvirker resultatet fordi den ligger veldig nærme dampsperran er det testet med en plassering lengre inn i konstruksjonen. Disse sensorene viste den samme utvikling. Derfor mener jeg at man kan utelukke at det er den teoretiske grenseverdien mellom sjiktene som gjør at simuleringsresultatene er annerledes enn i laboratorieforsøket. Grunn til dette kan da være typen .kli fil som er lastet inn (.kli = fil med klimadata som kan leses av WUFI).

Ved omregning fra RF til damptrykk fjernes elementet med temperatur i målepunktet og absolutt fuktinnhold i luften ved sensorpunktene kan sammenlignes. Metoden for utregning er gitt i Formel 2 og en sammenligning av resultatene i WUFI® og forsøketes celle 14 vises i Figur 46 da et mer sammenfallende resultat enn det som vises i Figur 44.

Formel 2: Utregning av damptrykk (Geving & Thue)

$$p_v = RF \cdot p_{sat}$$

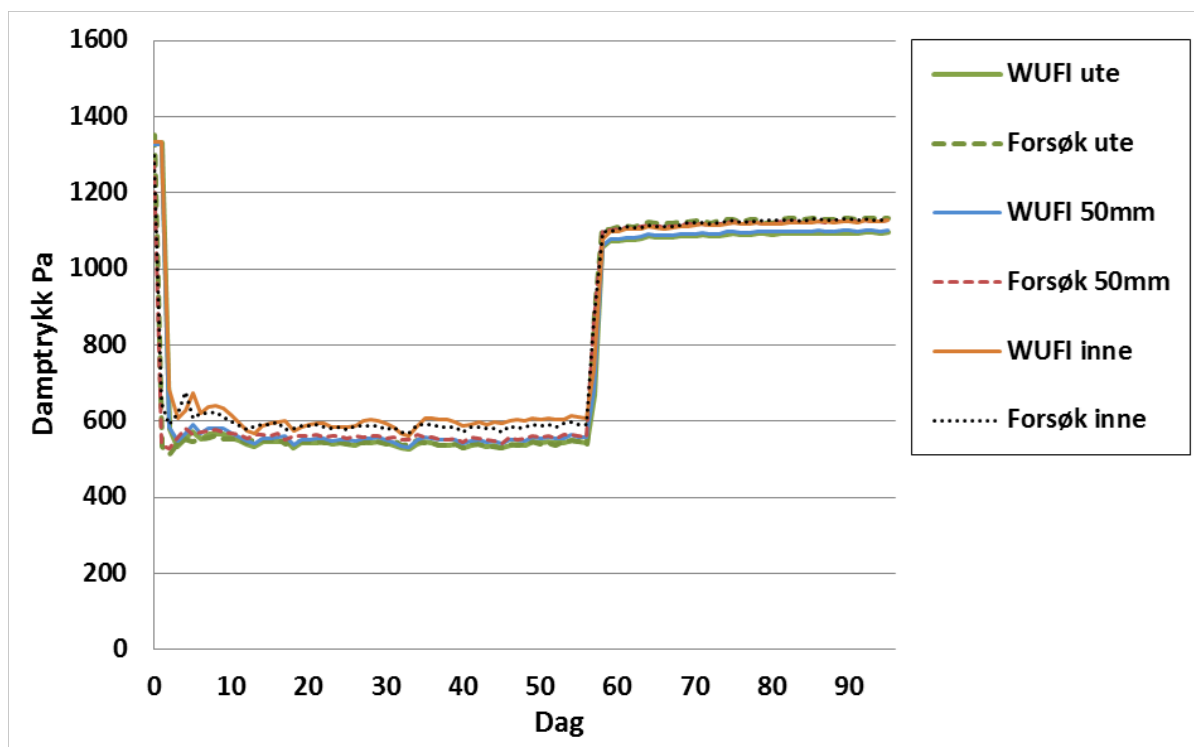
$$p_{sat} [Pa] \text{ for } 0^\circ\text{C} < t < 40^\circ\text{C}$$

$$p_{sat} = 611 \cdot \exp(72,5 \cdot 10^{-3} \cdot t - 288,1 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,79 \cdot 10^{-6} \cdot t^3)$$

$$p_v = \text{Damptrykket } [Pa]$$

$$t = \text{Temperatur } [^\circ\text{C}]$$

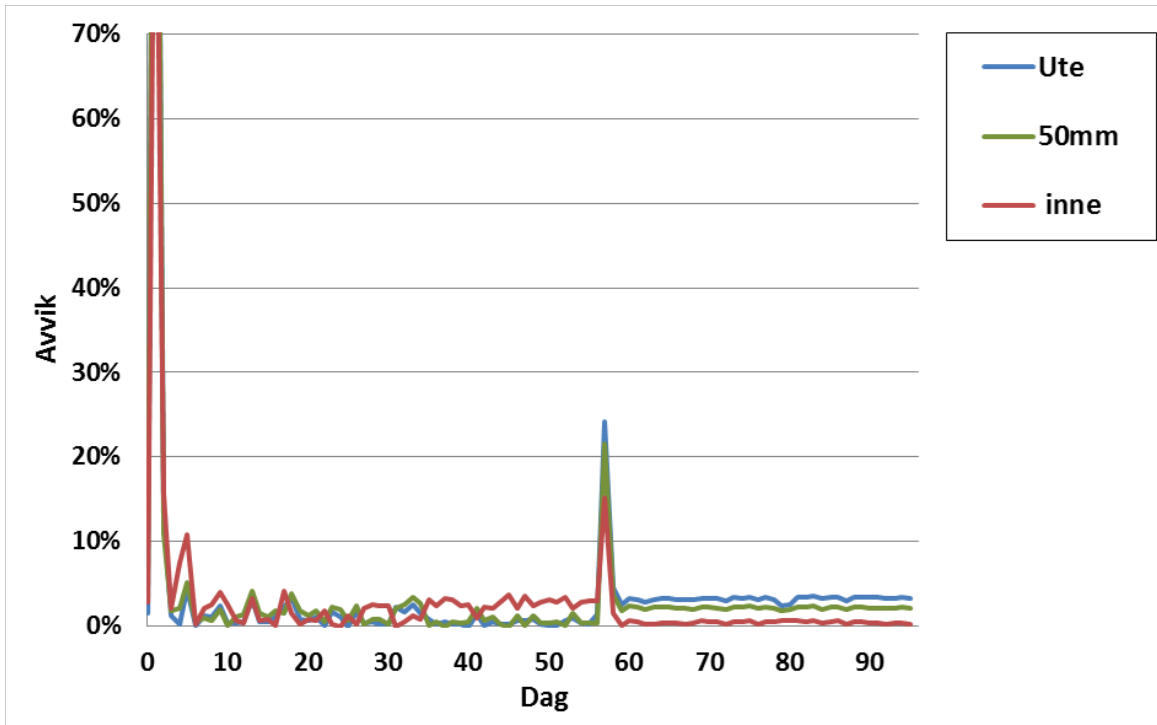
$$RF = \text{Relativ Fuktighet } [0 - 1]$$



Figur 46: Sammenligning av damptrykk, WUFI® og Forsøksresultater, celle 14.

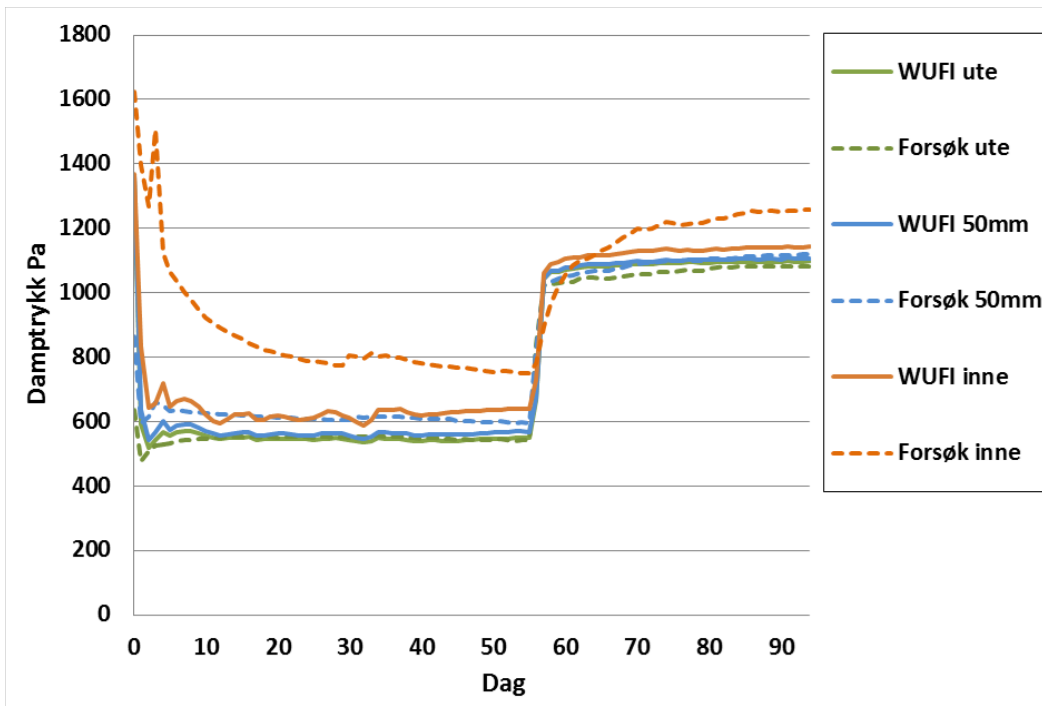
Ved sammenligning av den absolutte størrelsesforskjellen for damptrykket i WUFI® og det som er målt i laboratorieforsøket for celle 14, ligger forskjellen under 5% , jfr. Figur 47.

Forskjellene i resultatene kan også skyldes faktorer som ikke blir tatt med i WUFI® sine beregninger som; byggefeil, trykkforskjell, annen overgangskoeffisient mm..



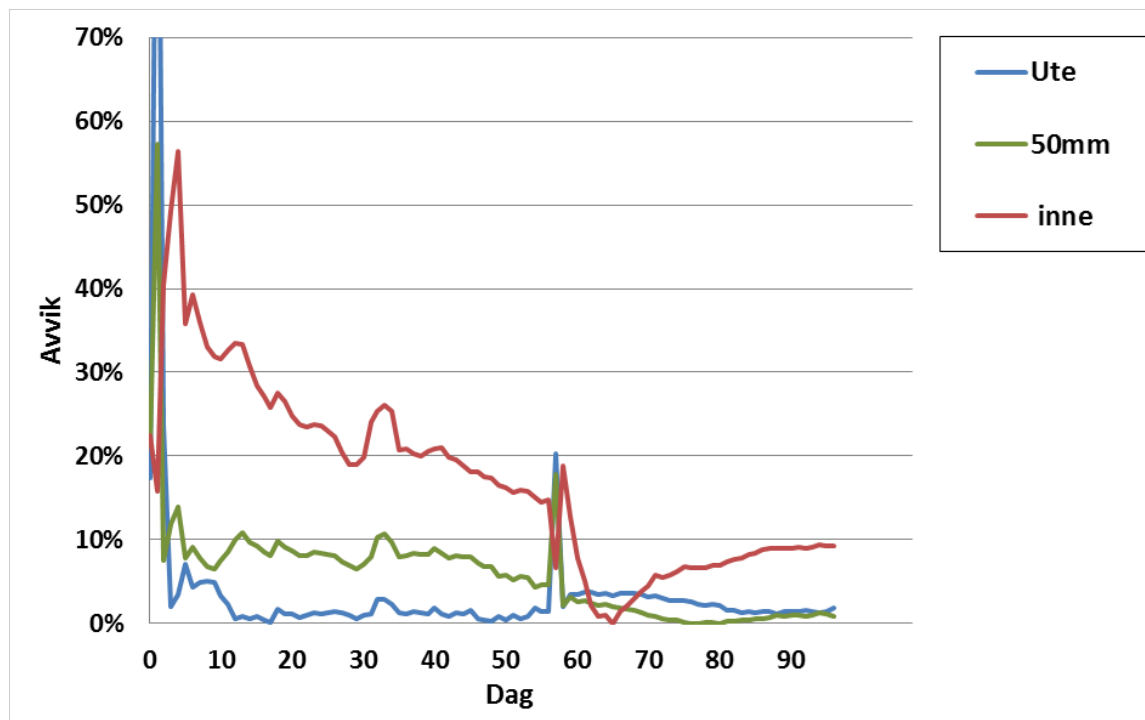
Figur 47: Prosentvis forskjell i damptrykk i celle 14, 0% =damptrykket i forsøkscellen.

For trefiberisolasjonen er det større forskjeller mellom WUFI® og forsøksresultatene. Figur 45 antyder at dette spesielt gjelder effekten av omfordeling av fukt i veggen. RF nivået på varm side av veggen er svært forskjellig i forsøksresultatene og simuleringsresultatene. Forskjellene er også tydelig ved sammenligning av damptrykket som er vist i Figur 48.



Figur 48: Sammenligning av damptrykk, WUFI® og Forsøksresultater, celle 1.

Den prosentvise differansen kommer frem i Figur 49 og er langt over 30% for de to første periodene. Jeg kan ikke forklare årsaken og anbefaler at det undersøkes nøyere i videre arbeider.



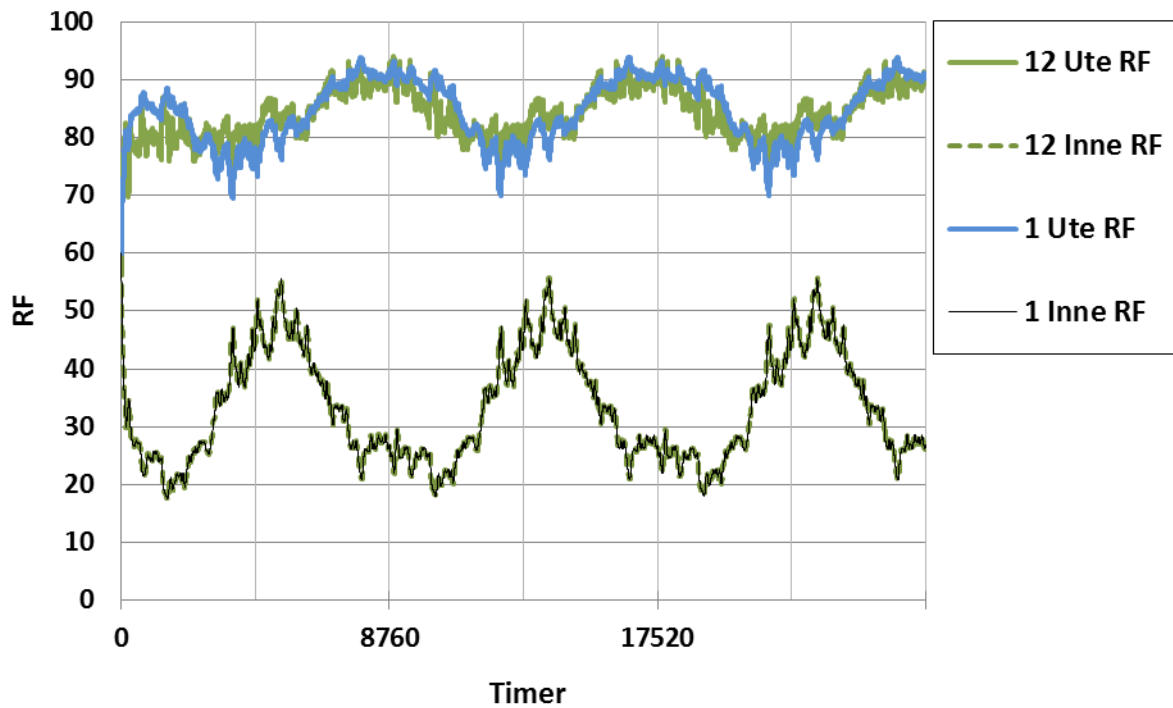
Figur 49: Prosentvis forskjell i damptrykk i celle 1.

5.4 Årssimulering i WUFI

Uteklima har stor betydning for fuktforholdet i en yttervegg. Det vil derfor ved årssimulering benyttes et utendørsklima som tilsvarer et Moisture Design Referens Year (MDRY). MDRY vil si et klima tilsvarende 90% persentilen for fuktigste år. MDRY er en viktig inngangsparameter da man ønsker å sjekke at veggen har et tilstrekkelig uttørkingspotensial (Geving & Thue 2009). For fuktbelastningen spiller nedbør en stor rolle og det er i hovedsak slagregn som gir de største belastningene. Siden det ikke er benyttet slagregn eller kledning i det gjennomførte laboratorieforsøket vil det simuleres med en 22mm kledning og et 50mm luftlag.

Det usikre samsvaret mellom simuleringene i WUFI® og forsøksresultatene fra 2D-veggen gjorde at jeg besluttet å ikke gjennomføre en årssimulering (med MDRY som klimainput).

Av ren nysgjerrighet har jeg likevel kjørt en simulering - med parameterne 22 mm utvendig kledning, 50 mm luftespalte (med luftskifte på 20), for celle 1(A12,F,D) og 12(A12,M,D) for å se om feilen kun skyldes klimafilen.kli i WUFI®.



Figur 50: MDRY simulering av celle 1 og 12

I Figur 50 ser vi en tydelig forskjell i fuktkurven utvendig. Innvendig følger både Flex og mineralullen tilnærmet samme kurve. Materialenes egenskaper skulle tilsi at de ikke er identiske. Årsaken til utfallet er ikke avklart. Jeg kommenterer derfor ikke MDRY resultatene ytterligere.

6 Drøfting av resultatene

Startfuktighet.

Trefiberisolasjonen har i alle varianter av vindsperrer og diffusjonsmateriale en likere (og langsommere) endring i startfukten enn det mineralullen har. Dette skyldes materialets store bufferkapasitet. Det innebærer også at det er enda viktigere at startfukten i trefiberisolasjonen er innenfor akseptable rammer enn for en mineralullisolert vegg. Startfukt kan også komme fra fuktig bindingsverk eller platebasert vindtetting.

Mineralullisolasjonen er mye tidligere ute med å tilpasse seg damppermeabiliteten til veggen. På grunn av trefiberisolasjonens hygroskopiske egenskaper har veggen med trefiberisolasjon mye høyere fuktinnhold (kg per kvadratmeter flate av veggen). Differansen kan være en faktor på 20. Mengden fukt kan bli kritisk for en vegg hvis startfukten er høy.

Vindsperre

Vindsperran har ikke bare betydning for veggens S_d -forhold men også for temperaturen i ytre sjikt. For elementer med samme dampsjikt innvendig viser det seg å ha stor betydning på RF nivået (damptrykket er ikke sjekket). Se Figur 34. I forsøkene er det en temperaturredifferanse på ca 2 grader i ytre del av veggen mellom 50mm Hunton Vindtett™ og Tyvek®. En slik temperaturredifferanse gir en økning på ca 20% i RF ved reduksjon fra 2°C til 0°C.

Dampbrems

Når det kommer til effekten av dampbremsen varierer den, avhengig av hvilken vindsperre den kombineres med. Forskjellen er tydeligst hvis vi sammenligner Figur 35 og Figur 36. For Flex og 12mm Hunton Vindtett™ blir resultatene i RF med DELTA® Luxx, PE-folie og INTELLLO® nesten helt like. Med 50mm vindsperre er det forskjell på cellene med DELTA® Luxx og PE-folie. Her er i tillegg en celle uten damptettende sjikt innvendig. Den skiller seg fra de andre i utviklingen ved å fortsette å stige men overraskende nok holder den seg under 80 % RF i hele testperioden. Mineralull er ikke testet med 50 mm vindsperre og ingen dampsperre. Jeg har antatt at en slik kombinasjon ville ført til kondensasjon på innsiden av vindsperran, imidlertid kan jeg ikke utelukke at isolasjonsegenskapene til 50 mm vindsperre og med de belastninger som er brukt i forsøket kunne mineralullen også unngått kondensasjon. Resultatene antyder at trefiberisolasjonen ikke er så avhengig av en innvendig dampsperre som mineralull på grunn av sine hygroskopiske egenskaper og egne dampmotstand. I Figur 37 er forskjellige varianter med Flex sammenlignet med den mer vanlige oppbygningen; Tyvek®, mineralull og PE-folie. Her ser vi at Flex i alle sammenligningsvariantene med samme og annen vindsperre har lavere RF-verdier i ytre del av veggen. Grunnen ligger i hovedsak i vindsperran. Men i Figur 31 ser vi at en økning til 12 mm Hunton Vindtett™ for mineralull også får en reduksjon i fuktighetsnivået. Mineralullen klarer seg bedre i de to første klimaperiodene. I den siste perioden overstiger den fort kritisk fuktinnhold på 80% med en temperatur over 0 grader. Her vil det være naturlig at biologisk vekst har oppstått ettersom belastningen varer i flere uker. Trefiberisolasjonen når kritisk nivå først i slutten av testperioden.

Utviklingen i resultatene viser en sen oppgang i fuktnivået for trefiberisolasjonen i siste klimabelastningsperiode. Selv om den i de fleste kombinasjonen holder seg under kritisk fuktnivå over lengre tid gjør den ikke det for alle kombinasjonen av vindspærre og dampbrems. Trefiberisolasjon har ca samme uttørkingshastighet som oppfuktingshastighet må det antas at klimabelastninger med lengre fuktige perioder og korte opptørkingsperioder vil ha større akkumulerende effekt i trefiberisolasjonen enn i mineralullen.

Ved sammenligning av 1D og 2D-veggen ser utviklingen i RF ut til å være nokså lik. Klimabelastningen på innvendig side har imidlertid vært litt forskjellig. Det gjør det vanskelig å sammenligne helt konkret. Endringen i fuktforholdene oppe og nede antyder at det er større konveksjon i mineralull enn i Zell og Flex isolasjonen, hvor det ikke kan påvises differanser relatert til konveksjon.

Det er en viss forskjell mellom Flex og Zell. Zell har en raskere justering av fukten, dette vises tydelig i Figur 32. Forskjellen kan skyldes at Flex og Cell ikke er behandlet med de samme stoffene. Det er også en viss forskjell i densiteten og fiberstørrelsen. En annen grunn kan være at blåseisolasjonen har mindre luftstrøm i løsfibervarianten. Temperaturdifferansen mellom oppe og nede i 2D-veggelementene antyder at det er mindre internkonveksjon i Flex og Zell. Differansen er imidlertid så liten at resultatene kan være påvirket av målenøyaktigheten i sensorene. Noe entydig svar kan derfor ikke gis.

Trefukten målt i topp- og bunnsvill i 2D-veggelementene har en langsom endring i vegg 5 med mineralull. I veggene med trefiberisolasjon ser fuktinnholdet ut til å variere i samsvar med isolasjonen, jfr.vedlegg 7. Det virker som om det er større interaksjon med fuktinnholdet i trefiberisolasjonen. Årsaken er trolig at trefiberisolasjonen har tilnærmet samme bufferkapasitet som rent treverk og derfor utvikler seg likere med fuktnivået i isolasjonen. Det vises ved at økningen i svillens fuktighet i siste klimaperiode er mye mindre for mineralullen da buffereffekten til treverket tar av for økningen i RF i isolasjonen. Hvis dette vinkles andre veien, vil det kunne antas at en fuktlekkasje til svillen (en økning i svillens vanninnhold) vil få større utslag for mineralullen enn for trefiberisolasjonen. Dette er ikke utprøvd i denne oppgaven.

7 Konklusjon

Hensikten med forsøket var å undersøke fuktforholdene i trefiberisolasjon i bindingsverksvegger med ulike kombinasjoner av vindsperrer og dampbrems. Dette er gjort gjennom et laboratorieforsøk. Videre skulle det utføres simuleringer i WUFI 1D PRO 5.2 og WUFI 2D PRO og sammenligne disse resultatene med laboratorieforsøket. Trefiberisolasjonsvariantene Flex og Zell er sammenlignet med mineralull av typen Glava® PROFF 35, for å si noe om ytelsen i forhold til et vanligere isolasjonsmateriale.

Resultatene fra laboratorieforsøket og simuleringene viser at:

- Trefiberisolasjonen klarer seg minst like bra som mineralull under de testede klimabelastningen.
- Trefiberisolasjonen er ikke like avhengig av en tett innvendig dampbrems som mineralullisolasjonen.
- Forsøkene og simuleringene viser at trefiberisolasjonen har bygningsfysiske egenskaper som kan være fordelaktige ved den gitte belastningen som prøvene har vært utsatt for.
- Zell og Flex har antydninger til lavere intern konveksjon enn mineralullen.
- Fuktbufferevnen til trefiberisolasjonen demper svingningene i RF fra klimabelastningene

Konklusjonene baserer seg på testkombinasjonene som er benyttet i laboratorieforsøket.

Testveggene (1D og 2D) er bygget med ulike kombinasjoner av:

- Vindsperre (Hunton Vindtett™ 12mm eller 50mm eller Tyvek®)
- Isolasjon, 300 mm (Flex, Zell eller mineralull fra Glava)
- Dampbrems (DELTA® Luxx, PE-folie, INTELLLO®, eller uten folieprodukt)
- Innvendig kledning (Fermacell®)

8 anbefalinger til videre arbeider

Denne oppgaven har hatt sine begrensinger både tidsmessig og kapasitetsmessig. Av den grunn vil det være aktuelt å fortsette arbeidet i forsøksriggen mens den fortsatt er på plass. For å tydeliggjøre forskjellen i isolasjonsmaterialene kan det være aktuelt å utsette forsøksenelementene for andre klimabelastninger. Forslag til testsenarioer kan være :

- Uttørkingsperioder, både innover og utover.
- Større endring i fuktbelastning. Dette vil kunne vise buffereffekten tydeligere.
- Påført lekkasje, ved innsprøyting av vann.
- Tvungen konveksjon i veggene, ved hulltagning i sperresjikt.
- Minusgrader utvendig.

Ved demontering av forsøksriggen oppfordres det til å kontrollere om det har begynt å gro sopp i noen av forsøksenelementene. Resultatene fra forsøket som SINTEF har gjennomført parallelt med mitt forsøk bør inngå i en oppfølgende evaluering av mitt forsøk.

Kalibrering av sensorene i etterkant er nødvendig. Det trengs målinger på flere forskjellige RF nivåer slik at det kan lages en nøyaktig kalibreringskurve for sensorene. En evaluering av resultatene i denne oppgaven bør gjøres når kalibreringskurvene er tilgjengelige dersom kalibreringen viser relevant avvik fra forutsetningen fra oppstartskalibreringene.

Årsaken til hvorfor WUFI® ikke fungerte med klimafilen fra forsøket bør undersøkes. Det kan eventuelt hindre samme problem i fremtiden.

Et parameterstudie i WUFI® bør gjennomføres. En nøyaktig sorpsjonskurve for Flex og Zell som kan kontrolleres opp mot eller benyttes i simuleringsprogrammet må fremskaffes gjennom forsøk.

9 Mulige feilkilder

9.1.1 Mulige feilkilder i laboratorieforsøket.

- Målenøyaktigheten på trefukt for gran er på $\pm 0,5$ -2vektprosent innenfor fibermetningspunktet (Geving & Thue).
- Temp i målepunktet er usikkert, da nærmeste sensor er 20 cm fra trefuktsensorene.
- Skrueelektrodene er ikke forseglest slik at dybde på gjeldene måling ikke kan fastsettes.
- Belastningen på de ulike cellene kan være forskjellig ettersom de har forskjellig plassering, særlig med tanke på trykkforskjell oppe og nede.
- Eventuell trykkforskjell mellom rom kan ha hatt innvirkning på fukttransporten.
- Virkningen av vindspærren med to lag med 25mm Hunton Vindtett™ kan gi en litt annen effekt enn en ren 50 mm (50 mm plate produseres ikke i dag) plate da det ytterste laget på platene trolig er noe tettere en selve massen i platen. Med to plater sammen vil det gi en ekstra tett vindspærre. Det er ikke tatt hensyn til dette i simuleringene eller sammenligning av resultatene.
- Originalfilene fra laboratorieforsøket har inneholdt enkelte blanke eller åpenbare feilmålinger. Disse forekom for det meste som enkeltmålinger i et målesett på ca 23000 målinger. Med det tette intervallet på 6 minutter mellom hver måling ble verdier fra overliggende frisk celle kopiert inn så ikke fremstilling av grafer eller beregninger feilet.
- I et tilfelle med strømbrudd var det et døgn som ble borte på enkelte loggere. Siden endringene i denne perioden var minimal (verdiene hadde allerede begynt å stabilisere seg) ble samme prinsipp benyttet her.
- Behandling av data. Excel er ikke egnet for håndtering av så store datamengder som ble logget. Det er derfor gjort en datareduksjonen med ett skript i Matlab. Grafer og vurderinger er gjort ut fra disse forminskede filene. Dette kan gi små utslag i maksimums- eller minimumsverdier.

9.1.2 Mulige feilkilder ved klimastyring

- Overskuddsmaterialer lagret i rom 1 påvirket starten av forsøket noe da rommets avfuktingskapasitet viste seg å være utilstrekkelig.
- Igangsettelsen av forsøket ble forsinket da den tidligere testede kjølemekanismen i klimarommet som skulle styre utendørsklima fikk en lekkasje rett før oppstarten og måtte repareres før forsøket kunne starte. På dette tidspunktet var veggene mellom rommene lukket og derfor kan det ha blitt noe endringer i starfuktfordelingen i prøvene, det kan også ha blitt en forskjell fra celleveggen og til veggelementene da de ikke hadde nøyaktig samme klima på hver sin varme side.
- Loggføringen av klimadata i rommene har foregått med en sensor i hvert rom, dette kan medføre at eventuelle variasjoner i temperatur og RF innen rommet ikke er fanget opp.

9.1.3 Mulige feilkilder i WUFI® simuleringene.

- Klimafilen.kli ser ut til å gi WUFI® problemer i simuleringene. Spesielt i innvendige partier av veggen for trefiberisolasjonen.
- Tommen Gram dampsperre har oppgitt S_d verdi $\geq 40m$, i WUFI® sin database er materialet oppgitt med S_d verdi $=50m$. Simuleringene er gjennomført med denne verdien.
- Eventuell luftomstrømning i uteklimaet er ikke loggført. Derfor er overgangsmotstanden utvendig lik normale innstillinger.
- WUFI® tolker innsetting av data for sorpsjon og adsorpsjon på en konservativ måte og tilegner materialet en lavere verdi en faktisk i starten for å tilnærme en optimalisert kurve. Dette kan på virke resultatene og da spesielt med tanke på materialer med høyt et hygroskopisk nivå for lavere fuktbelastninger.
- Det er noen forskjeller i oppgitte materialegenskaper fra leverandørene på materialene brukt i forsøket og materialdatabasen i WUFI®.

Litteraturliste

- Apneseth, T. & Hay, M. (1992). *Test av bærbare elektriske fuktighetsmålere*. Oslo: Norsk treteknisk institutt. 48 s. : ill. s.
- Aunrønning, O. (2014). *Avdelingsingeniør NTNU BAT*. Veileder for laboratorietekniske elementer og logging av forsøket. (02.02.2014).
- Ayerst, G. (1969). The effects of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. *Journal of Stored Products Research*, 5 (2): 127-141.
- Berge, B. (2007). Isolasjonsmaterialer av trevirke. *Løsfyll, matter & plater*: Gaia Lista. 38 s.
- Byggforskserien. (2003). *573.121 Materialer til luft- og dampetting*. Vanddampmotstand: Norges byggforskningsinstitutt.
- Clementz, C. A., Steiner, Y., Glasø, G., Eide, S., Bysheim, K. & Brunsell, J. T. (2011). ENTRÉ - energieffektive trekonstruksjoner delrapport 2 yttervegger i tre som kan tilfredsstille passivhuskrav. Hentet fra: www.treteknisk.no/Rapport_84_d86X8.pdf.file: Norsk treteknisk institutt.
- Doll, S. C. (2002). *Determination of Limiting Conditions for Fungal Growth in the Built Environment*: Harvard School of Public Health, Department of Environmental Health.
- Elektronik, E. E. *EE06 series Small size humidity / temperature transmitter for OEM applications*. Tilgjengelig fra: http://www.epluse.com/fileadmin/data/product/ee06/datasheet_EE06.pdf (lest 12.12.13).
- EN_ISO_12571. (2000). *Hygroskopiske egenskaper ved byggematerialer og -produkter Bestemmelse av egenskaper ved hygroskopisk sorpsjon (iso 12571:2000)*. www.standard.no (Hentet: 3.09.13): Standard_Norge.
- EN_ISO_13788. (2013). *Bygningskomponenters og bygningsdelers hygrottermiske egenskaper - Innvendig overflatetemperatur for å unngå kritisk overflatefuktighet og kondensasjon i mellomrom - Beregningsmetoder (ISO 13788:2012)*. ISO 13788:2012, (2013-03-01): Standard Norge.
- EPA. (2002). *European waste catalogue and hazardous waste list*. Hentet fra: http://www.nwcpo.ie/forms/EWC_code_book.pdf (23.11.13): Environmental protection agency.

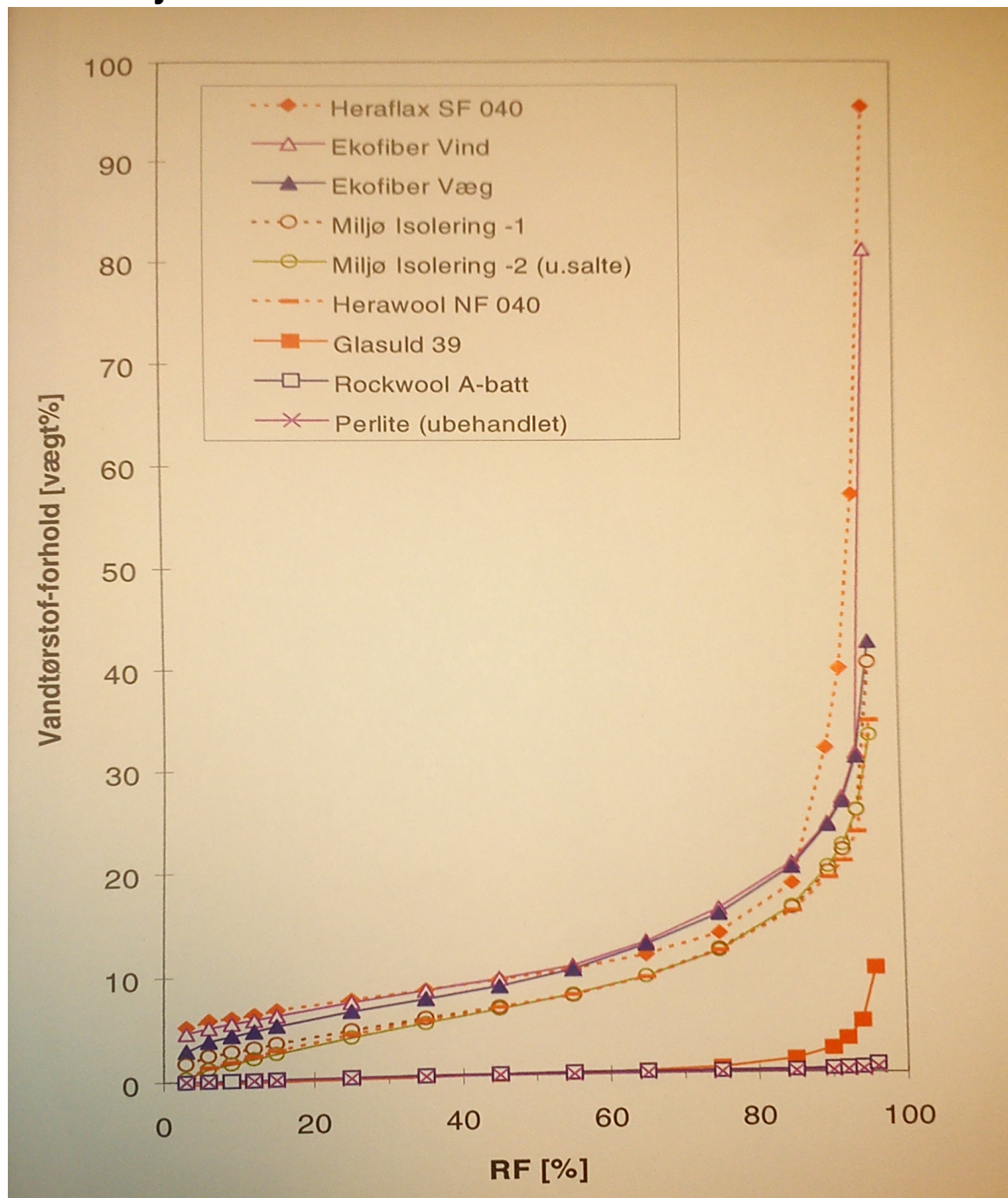
- Fraunhofer_IBP. (2013). *Software / WUFI / Introduction*. I: Fraunhofer (red.). WUFI introduction. <http://www.wufi.de>. Tilgjengelig fra: http://www.wufi.de/index_e.html (lest 16.06.2014).
- Geving, S. & Uvsløkk, S. (2000). Moisture conditions in timber frame roof and wall structures: test house measurements for verification of heat-, air and moisture transfer models. I: Byggforsk (red.). *273 Project report 2000*. Oslo: Norwegian building research institute.
- Geving, S. & Thue, J. V. (2009). *Fukt i bygninger*. 5 utg. Byggforsk Håndbok 50. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Geving, S. & Holme, J. (2010). Høyisolerte konstruksjoner og fukt, Analyse av fukttekniske konsekvenser av økt isolasjonstykkelse i yttervegger, tak, kryprom og kalde loft. I: Byggforsk, S. (red.). *Prosjektrapport 53 2010*. <http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/Bibliotek/SB%20prorrapp%2053.pdf>.
- Geving, S. & Holme, J. (2012). Mean and diurnal indoor air humidity loads in residential buildings. *Journal of Building Physics*, 35 (4): 392-421.
- Glava. (2013). *Glava proff 35 plate*. Hentet fra: <http://www.glava.no/produkter/byggisolasjon/glava-proff-35/> (lest 19.12.13).
- Glunz. (2014). *HOLZFASERDÄMMPLATTEN*. Tilgjengelig fra: http://www.glunz.de/produkt_konstruktiv/gruppe/10--agepan_flex (lest 21.06.2014).
- Greisinger. (2002). *Präzisions-Materialfeuchte-Messgerät für Holz, Baustoffe, Stroh, Heu, Papier, Textilier uvm.* GMH 3830 Produktdata, Hentet: 05.06.2014. Hentet fra: https://greisinger.de/files/upload/de/produkte/kat/k14_026_DE_oP.pdf.
- GUTEX. (2014). *GUTEX Holzfaserplattenwerk*: H. Henselmann Tilgjengelig fra: http://en.gutex.de/en/Products/Installation_and_Product_Information/ (lest 21.06.2014).
- Gaare, M. & Løtveit, K. (2012). *Kritiske fuktforhold ved lukking av høyisolerte konstruksjoner i bindingsverk av tre*. Master. Tilgjengelig fra: <http://daim.idi.ntnu.no>: NTNU, Bygg, anlegg og transport
- Hansen, K. K., Hansen, E. J. D. P., Padfield, T., Rode, C. & Kristiansen, F. H. (1999). Hovedrapport. Varme-og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer. Danmarks tekniske universitet: Institutt for bærende konstruksjoner og materialer.
- Herrera, J. (2005). Assessment of Fungal Growth on Sodium Polyborate-Treated Cellulose Insulation. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2 (12): 626-632.

- HEYDI. (2011). *Heydi KZ Mørteltilsetning - Primer - Grunning* (Produkt datablad). Heydi.no. Hentet fra: <http://www.heydi.biz/filer/prodark/106.pdf>.
- Holme, J. (2010). *Mould growth in buildings*. Doctoral. Trondheim: NTNU, Civil and transport engineering.
- Homatherm. (2014). *Moderne Dämmstoffe aus Holz und Zellulose*. Tilgjengelig fra: <http://www.homatherm.com/daemmstoffe/> (lest 21.06.2014).
- Homleid, Å. (2014, 31.03.2014). Hunton tar opp isolasjonskampen. *Byggeindustrien*.
- Hukka, A. & Viitanen, H. A. (1999). A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, 33 (6): 475-485.
- Hunton. (2012). *Flex isolasjon*. Hentet fra: http://www.hunton.no/wp-content/uploads/2013/05/Produktark_Flex_isolasjon.pdf (Hentet: 12.10.13)
- Hunton. (2013a). *Bilde av Zell* Tilgjengelig fra: http://www.hunton.no/wp-content/uploads/2013/05/STEICOzell_haufen_neu.jpg (lest 13.12.2013).
- Hunton. (2013b). *Veggprodukter* (Produktinformasjon): Hunton Trefiber AS. Tilgjengelig fra: <http://www.hunton.no/producttype/vegg/> (lest 27.11.13).
- Hunton. (2013c). *Zell*. hentet fra: <http://www.trefiberisolering.no/upload/Zell-produktark.pdf> (Hentet: 23.11.13): Hunton Trefiber AS.
- Kaemmerlen, A., Asllanaj, F., Sallée, H., Baillis, D. U. L. D. s. & Jeandel, G. (2010). Transient modeling of combined conduction and radiation in wood fibre insulation and comparison with experimental data. *International Journal of Thermal Sciences*, 49 (11): 2169-2176.
- Künzel, H. M. (1995). *Simultaneous heat and moisture transport in building components*: IRB-Verlag.
- Langmans, J. (2013). *Feasibility of exterior air barriers in timber frame construction*. Phd. Ku leuven: Arenberg doctoral school, Faculty of engineering science, building physics section.
- Loo, J. M. V., Robbins, C. A. & Swenson, L. (2004). Growth of mold on fiberglass insulation building materials - A review of the literature. *Occupational and environmental hygiene*, 1:349-354, 1 (6).
- Lunde, E. (2013). *Trefiberbasert isolasjon i bindingsverksvegger -oppsett av laboratorieforsøk for undersøkelse av fuktforhold*. Prosjektoppgave: NTNU, BAT
- Lygren, O. M. (2013). *Norsk trefiberisolering AS*. Utførende representant ved innblåsning av Zell. (13.12.1013).

- Mykleost, I. & Jansen, E. (2007). *Studie av muggsoppvekst på bygningsmaterialer -risiko for muggsopp på vindsperre*. Master. BAT: NTNU, ingenjørvitenskap og teknologi.
- NORDTEST. (1998). *NT BUILD 340*. Relativ air humidity: Calibration of electrical instruments. www.nordtest.info.
- Norsk_trefiberisolering_AS. (2013). *Norsk trefiberisolering AS*. Utførte innblåsing av Zell. <http://www.trefiberisolering.no>.
- NORTETT. (2013). *DELTA LUXX*. Hentet fra: http://nortett.no/DOKUMENTER/PRODUKTBLAD/PROD_Delta_Luxx_130912.pdf (Hentet: 12.10.13).
- Pandey, K. K. & Pitman, A. J. (2003). FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 52 (3): 151-160.
- Pavatex. (2014). *Pavatex around the world*. Tilgjengelig fra: <http://pavatex.com> (lest 21.06.2014).
- Peuhkuri, R., Rode, C. & Hansen, K. K. (2004). *Moisture buffer capacity of different insulation materials*. Proceedings of Buildings IX, Clearwater, Florida.
- Proclima. (2013). *Intello*. de.proclima.com. Tilgjengelig fra: <http://de.proclima.com/produkte/dichtung-innen/intello> (lest 01.12.13).
- Ramstad, T. & Edvardsen, K. I. (2009). *Trehus*. 3 utg. Byggforsk Håndbok 53. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Rasmussen, T. V. (2002). Creep tests and techniques for predicting densities necessary to prevent settling of loose-fill insulation in walls. *ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION*, 1426: 42-57.
- Rode, C. & Rasmussen, N. T. (1999). Beregnede fugtforhold i konstruksjoner, del af varme- og fugttekniske undersøgelser av alternative isoleringsmaterialer. Danmarks tekniske universitet: Institut for bygninger og energi.
- Salonvaara, M., Ojanen, T., Holm, A., Künzle, H. M. & Karagiozis, A. N. (2004). *Moisture buffering effects on indoor air quality-experimental and simulation results*. Proceedings of Buildings IX, Clearwater, Florida.
- SINTEF. (2008). Tommen Gram Dampsperre. *SINTEF Byggforsk Certification -Nr.2554*. Hentet fra: <http://www.sintefcertification.no/DocumentView.aspx?sectionId=11&documentId=1835>.
- SINTEF. (2009). Heydi Smøremembran. I: SINTEF (red.). *SINTEF Byggforsk Certification - Nr.2277*.

- SINTEF. (2011). Tyvek Vindsperrer og Isola stag. *SINTEF Byggforsk Certification -Nr. 2002*. Hentet fra: <http://www.sintefcertification.no/DocumentView.aspx?sectionId=11&documentId=41>.
- SINTEF. (2012a). Fermacell. *SINTEF Byggforsk Certification -Nr. 20122*. Hentet fra: <http://www.sintefcertification.no/DocumentView.aspx?sectionId=11&nodeId=-1&level=-1&documentId=2369>.
- SINTEF. (2012b). K-bjelken. *SINTEF Byggforsk Certification -Nr. 2365*. Hentet fra: <http://www.sintefcertification.no/DocumentView.aspx?sectionId=11&documentId=357>.
- SINTEF. (2013a). Hunton I-bjelken m/LVL flens. *SINTEF Byggforsk Certification - Nr.20381*. <http://www.sintefcertification.no>.
- SINTEF. (2013b). Hunton Vindtett / Hunton Bitroc. *SINTEF Byggforsk Certification - Nr. 2002*.
- Steico. (2014). *Production*. Tilgjengelig fra: <http://www.steico.com/en/the-company/production.html> (lest 21.06.2014).
- Termoträ. (2014). *Den naturliga produkten!* Tilgjengelig fra: <http://www.termotra.se> (lest 21.06.2014).
- Thermocell. (2014). *Træfiberisolering*. Tilgjengelig fra: <http://www.thermocell.dk/index-2-2.html> (lest 21.06.2014).
- Vinha, J. (2007). *Hygrothermal performance of timber-framed external walls in Finnish climatic conditions: a method for determining the sufficient water vapour resistance of the interior lining of a wall assembly*. Phd, Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu-Tampere University of Technology. Publication; 658.
- Zirkelbach, D., Schmidt, T., Kehrer, M. & Künzle, H. M. (2013). *WUFI-Pro-5 Manual*. Hentet fra: <http://www.wufi-pro.com> (Hentet: 2.12.13): WUFI.

Vedlegg 1: Sorpsjonskurver til alternative isolasjonsmaterialer.



Figur 51: Sorpsjonskurver til alternative isolasjonsmaterialer (Hansen et al. 1999). Saueull, strå og celluloseisolasjon sammenlignes med glassull og steinull og perlitt.

Vedlegg 2: Kondisjonering av trefiberisolasjon

Flex

Flex hadde et fuktinnhold på 10,5% (kg/kg) etter kondisjonering og ble velvert med 2,93% (kg/kg) fra leverandøren. Resultatene for fuktinnholdet er vist i Tabell 19. Videre er målingene for kondisjonering og uttørking presentert med forklaring.

Tabell 19: Fuktinnhold i Flex 200mm isolasjonsmatte

Tilstand	Vekt (g)	Fuktinnhold (g)	Funktinnhold %(kg/kg)	RF	Ref
Tørrvekt	7341,5	0	0	0	
Leverangsevekt	7564,7	223,2	2,95	≈11%	(Geving & Thue 2009)
Kondisjonert	8202,9	861,4	10,50	≈72%	(Geving & Thue 2009)

For at buffereffekten ikke skal påvirke starten av forsøket så mye er Flex isolasjonsmattene kondisjonert i til ca72,3% RF. Måleresultatene er vist i Tabell 20.

Tabell 20: Kondisjonering av Flex 200mm isolasjonsmatte

Måling	Dato	RF	T (°c)	Vekt (g)	Δ vekt (g)	Endring %
1	29.11	-	-	7564,7	-	-
2	30.11	69,30	21,3	7885,0	320,3	4,062
3	01.12	72,15	21,3	7998,5	113,5	1,419
4	02.12	71,97	20,9	8058,8	60,3	0,748
5	03.12	70,96	21,2	8102,6	43,8	0,541
6	04.12	70,14	21,1	8133,1	30,5	0,375
7	05.12	71,62	21,3	8164,7	31,6	0,387
8	06.12	72,30	21,2	8193,2	28,5	0,348
9	09.12	72,31	21,2	8202,1	8,9	0,109
10	11..12	72,32	21,3	8202,9	0,8	0,010

Etter igangsettelse av forsøket ble isolasjonen tørket for å finne tørrvekten og fuktinnholdet i isolasjonsmatten. Tørkingen foregikk i et tørkeskap på 70°C. Målinger fra uttørkingen er vist i Tabell 21. Veiingen av platen ble ikke gjort før den hadde stått i fem dager i kammeret. I starten ble matten veid med en grov vekt for å se etter store forandringer da dette ikke inntraff ble en vekt med tilstrekkelig nøyaktighetsgrad benyttet. Ved siste måling var endringen en hundredel av kravet til likevekt på 0,1% av vekten og derfor ble det ikke tatt flere målinger da resultatet var tilstrekkelig.

Tabell 21: Tørking av Flex 200mm isolasjonsmatte

Målenøyaktighet	Dato	Vekt (g)	Δ vekt (g)	Endring %
±10g	03.04	7,34	x	x
±10g	04.04	7,34	x	x
±10g	07.04	7,34	x	x
±0,1g	09.04	7341,6	x	x
±0,1g	10.04	7341,5	0,1	0,00136

Zell

Tørkingen av Zell foregikk i en blå og en grønn tønne i et klimarom tørkeovn i sintef sine lokaler. Tørketemperaturen var satt til 60 grader da det foregikk et parallelt forsøk i tørkeskapet og temperaturen ble satt til laveste maksverdi for de to forsøkene. Tønnene og isolasjonen ble veid rett før oppstarten av klimaet til forsøket. da den ekstra kondisjoneringscellen ble tømt og isolert på nytt med glava. Tønnene ble først puttet i tørkeskapet to måneder senere da kapasiteten på tørkeskapene var brukt opp på andre forsøk og det som eventuelt skjer i mellomtiden ikke har betydning for resultatet. Tabell 22 viser endringen i zell isolasjonens totale masse ved uttørking av fukt. I Tabell 23 ser en måledata fra de to tønnene som ble brukt for å få tørket all isolasjonen. Resultatene viser at fuktinnholdet etter kondisjoneringsen var på 10,8 % (kg/kg) som er veldig likt Flex varianten på 10,5 % (kg/kg).

Densiteten på isolasjonen etter innblåsningen i cellene på 600 x 600 x 298 mm blir da i tørr tilstand på 35,8 (kg/m³), fra leverandøren leveres blåseisolasjonen med et fuktinnhold mellom 4 – 9 % (kg/kg). Hvis en vi antar et midlere fuktinnhold fra leverandøren tilsvarer det 6,5% og en densitet på 38,1 (kg/m³), som er innfor det Hunton opplyser som blåsedensitet på vegger.

Tabell 22: Resultater fra tørking av Zell.

Dato	Råvekt sum	Δ råvekt	% endring
7.2	4257,5		
25.4	3927,9	329,6	8,3913
29.4	3878,2	49,7	1,2815
1.5	3857,1	21,1	0,5470
3.5	3848,9	8,2	0,2130
4.5	3844,6	4,3	0,1118
5.5	3841,8	2,8	0,0729
6.5	3840,9	0,9	0,0234
7.5	3839,6	1,3	0,0339

Den øverste raden i Det er ikke tatt hensyn til eventuelt fukt i ståltønnen. Råvekten i tabellen viser hvor mye selve isolasjonen veier i måletidspunktet.

Tabell 23 viser vekten på tønne før den ble fylt med isolasjon. Det er ikke tatt hensyn til eventuelt fukt i ståltønnen. Råvekten i tabellen viser hvor mye selve isolasjonen veier i måletidspunktet.

Tabell 23: Tørking av blå og grønn tønne med Zell.

Dato	Blå	Råvekt	Δ råvekt	% endring
7.2	2912,3			
7.2	4395,5	1483,2		
25.4	4260,0	1347,7	135,5	10,0542
29.4	4254,0	1341,7	6	0,4472
1.5	4249,0	1336,7	5	0,3741
3.5	4247,5	1335,2	1,5	0,1123
4.5	4246,9	1334,6	0,6	0,0450
5.5	4246,2	1333,9	0,7	0,0525
6.5	4246,3	1334,0	-0,1	-0,0075
7.5	4246,2	1333,9	0,1	0,0075
Dato	Grønn	Råvekt	Δ råvekt	% endring
7.2	2899,8			
7.2	5674,1	2774,3		
25.4	5480,0	2580,2	194,1	7,5227
29.4	5436,3	2536,5	43,7	1,7228
1.5	5420,2	2520,4	16,1	0,6388
3.5	5413,5	2513,7	6,7	0,2665
4.5	5409,8	2510,0	3,7	0,1474
5.5	5407,7	2507,9	2,1	0,0837
6.5	5406,7	2506,9	1	0,0399
7.5	5405,5	2505,7	1,2	0,0479

Vedlegg 3: Kalibrering av RF/T sensorer

Tabell 24: Kalibrering av RF/T-sensorer ved 50% RF og 22,9°C

SJEKK AV RF/TEMP FØR MONTERING					
Sensor nr	mVOLT	Temp/Rf	Rom 50%	Signal	
1	633,61	23,4	22,9	Temp	-0,46
	492,65	49,3	50,1	RF	0,84
2	631,39	23,1	22,9	Temp	-0,24
	501,14	50,1	50,1	RF	-0,01
3	629,37	22,9	22,9	Temp	-0,04
	500,19	50,0	50,1	RF	0,08
4	630,76	23,1	22,9	Temp	-0,18
	498,80	49,9	50,1	RF	0,22
5	629,56	23,0	22,9	Temp	-0,06
	498,55	49,9	50,1	RF	0,24
6	628,98	22,9	22,9	Temp	0,00
	499,09	49,9	50,1	RF	0,19
7	629,85	23,0	22,9	Temp	-0,09
	496,66	49,7	50,1	RF	0,43
8	629,04	22,9	22,9	Temp	0,00
	498,84	49,9	50,1	RF	0,22
9	629,33	22,9	22,9	Temp	-0,03
	493,43	49,3	50,1	RF	0,76
10	628,63	22,9	22,9	Temp	0,04
	497,78	49,8	50,1	RF	0,32
11	628,80	22,9	22,9	Temp	0,02
	496,66	49,7	50,1	RF	0,43
12	632,59	23,3	22,9	Temp	-0,36
	492,02	49,2	50,1	RF	0,90
13	629,45	22,9	22,9	Temp	-0,05
	498,39	49,8	50,1	RF	0,26
14	632,89	23,3	22,9	Temp	-0,39
	501,28	50,1	50,1	RF	-0,03
15	630,92	23,1	22,7	Temp	-0,39
	506,32	50,6	50,3	RF	-0,33
16	628,64	22,9	22,7	Temp	-0,16
	508,37	50,8	50,3	RF	-0,54
17	629,06	22,9	22,7	Temp	-0,21
	495,79	49,6	50,3	RF	0,72
18	628,32	22,8	22,7	Temp	-0,13
	507,13	50,7	50,3	RF	-0,41
19	628,54	22,9	22,7	Temp	-0,15
	502,24	50,2	50,3	RF	0,08
20	631,26	23,1	22,7	Temp	-0,43
	500,91	50,1	50,3	RF	0,21

SJEKK AV RF/TEMP FØR MONTERING					
Sensor nr	mVOLT	Temp/Rf	Rom 50%	Signal	
21	630,79	23,1	22,7	Temp	-0,38
	497,13	49,7	50,3	RF	0,59
22	628,72	22,9	22,7	Temp	-0,17
	505,05	50,5	50,3	RF	-0,21
23	627,44	22,7	22,7	Temp	-0,04
	503,64	50,4	50,3	RF	-0,06
24	626,75	22,7	22,7	Temp	0,03
	500,06	50,0	50,3	RF	0,29
25	629,58	23,0	22,7	Temp	-0,26
	500,43	50,0	50,3	RF	0,26
26	629,22	22,9	22,7	Temp	-0,22
	504,91	50,5	50,3	RF	-0,19
27	630,52	23,1	22,9	Temp	-0,15
	492,50	49,3	50,1	RF	0,85
28	628,17	22,8	22,9	Temp	0,08
	492,57	49,3	50,1	RF	0,84
29	628,32	22,8	22,9	Temp	0,07
	494,80	49,5	50,1	RF	0,62
30	492,80	9,3	22,9	Temp	13,62
	492,89	49,3	50,1	RF	0,81
31	632,02	23,2	22,9	Temp	-0,30
	493,74	49,4	50,1	RF	0,73
32	632,88	23,3	22,9	Temp	-0,39
	494,56	49,5	50,1	RF	0,64
33	631,70	23,2	22,9	Temp	-0,27
	492,60	49,3	50,1	RF	0,84
34	629,25	22,9	22,9	Temp	-0,02
	493,68	49,4	50,1	RF	0,73
35	628,39	22,8	22,9	Temp	0,06
	497,51	49,8	50,1	RF	0,35
36	628,98	22,9	22,9	Temp	0,00
	500,50	50,1	50,1	RF	0,05
37	629,42	22,9	22,9	Temp	-0,04
	500,04	50,0	50,1	RF	0,10
38	631,31	23,1	22,9	Temp	-0,23
	497,39	49,7	50,1	RF	0,36
39	627,31	22,7	22,9	Temp	0,17
	499,90	50,0	50,1	RF	0,11
40	626,74	22,7	22,9	Temp	0,23
	499,65	50,0	50,1	RF	0,14

SJEKK AV RF/TEMP FØR MONTERING					
Sensor nr	mVOLT	Temp/Rf	Rom 50%	Signal	
41	630,00	23,0	22,9	Temp	-0,10
	503,41	50,3	50,9	RF	0,56
42	628,64	22,9	22,9	Temp	0,04
	502,87	50,3	50,9	RF	0,61
43	629,22	22,9	22,9	Temp	-0,02
	499,88	50,0	50,9	RF	0,91
44	629,50	23,0	22,9	Temp	-0,05
	499,74	50,0	50,9	RF	0,93
45	627,74	22,8	23,0	Temp	0,23
	510,62	51,1	49,5	RF	-1,56
46	628,56	22,9	23,0	Temp	0,14
	508,63	50,9	49,5	RF	-1,36
47	627,23	22,7	23,0	Temp	0,28
	509,81	51,0	49,5	RF	-1,48
48	628,53	22,9	23,0	Temp	0,15
	512,24	51,2	49,5	RF	-1,72
49	630,07	23,0	23,0	Temp	-0,01
	501,74	50,2	49,5	RF	-0,67
50	628,10	22,8	23,0	Temp	0,19
	510,36	51,0	49,5	RF	-1,54
51	628,74	22,9	23,0	Temp	0,13
	503,23	50,3	49,5	RF	-0,82
52	628,25	22,8	23,0	Temp	0,17
	504,96	50,5	49,5	RF	-1,00
53	629,70	23,0	23,0	Temp	0,03
	504,07	50,4	49,5	RF	-0,91
54	629,28	22,9	23,0	Temp	0,07
	498,46	49,8	49,5	RF	-0,35
55	627,12	22,7	22,7	Temp	-0,01
	564,83	56,5	51,7	RF	-4,78
56	625,08	22,5	22,7	Temp	0,19
	532,11	53,2	51,7	RF	-1,51
57	623,53	22,4	22,7	Temp	0,35
	544,32	54,4	51,7	RF	-2,73
58	625,45	22,5	22,7	Temp	0,15
	550,49	55,0	51,7	RF	-3,35
59	626,88	22,7	22,7	Temp	0,01
	555,49	55,5	51,7	RF	-3,85
60	626,59	22,7	22,7	Temp	0,04
	547,01	54,7	51,7	RF	-3,00

Tabell 25: Kalibrering av RF/T-sensorer ved 70% RF og 23,2°C

SJEKK AV RF/TEMP FØR MONTERING					avvik
Sensor nr	mVOLT	Temp/Rf	Rom 75%	Signal	
1	632,35	23,2	23,2	Temp	-0,04
	734,46	73,4	74,9	RF	1,45
2	633,51	23,4	23,2	Temp	-0,15
	734,15	73,4	74,9	RF	1,49
3	631,49	23,1	23,2	Temp	0,05
	732,88	73,3	74,9	RF	1,61
4	631,07	23,1	23,2	Temp	0,09
	733,55	73,4	74,9	RF	1,55
5	632,70	23,3	23,2	Temp	-0,07
	726,53	72,7	74,9	RF	2,25
6	630,63	23,1	23,2	Temp	0,14
	733,51	73,4	74,9	RF	1,55
7	632,28	23,2	23,2	Temp	-0,03
	723,70	72,4	74,9	RF	2,53
8	629,98	23,0	23,2	Temp	0,20
	736,64	73,7	74,9	RF	1,24
9	630,03	23,0	23,2	Temp	0,20
	734,67	73,5	74,9	RF	1,43
10	630,28	23,0	23,2	Temp	0,17
	731,74	73,2	74,9	RF	1,73
11	631,94	23,2	23,2	Temp	0,01
	728,33	72,8	74,9	RF	2,07
12	631,41	23,1	23,2	Temp	0,06
	736,82	73,7	74,9	RF	1,22
13	632,44	23,2	23,2	Temp	-0,04
	731,16	73,1	74,9	RF	1,78
14	633,44	23,3	23,2	Temp	-0,14
	736,72	73,7	74,9	RF	1,23
15	637,13	23,7	23,1	Temp	-0,61
	710,50	71,1	73,1	RF	2,05
16	632,88	23,3	23,1	Temp	-0,19
	714,27	71,4	73,1	RF	1,67
17	633,85	23,4	23,1	Temp	-0,29
	705,33	70,5	73,1	RF	2,57
18	632,25	23,2	23,1	Temp	-0,13
	711,79	71,2	73,1	RF	1,92
19	634,59	23,5	23,1	Temp	-0,36
	705,94	70,6	73,1	RF	2,51
20	632,44	23,2	23,1	Temp	-0,14
	715,05	71,5	73,1	RF	1,60

SJEKK AV RF/TEMP FØR MONTERING					avvik
Sensor nr	mVOLT	Temp/Rf	Rom 75%	Signal	
21	635,03	23,5	23,1	Temp	-0,40
	706,89	70,7	73,1	RF	2,41
22	632,89	23,3	23,1	Temp	-0,19
	704,67	70,5	73,1	RF	2,63
23	630,05	23,0	23,1	Temp	0,10
	707,07	70,7	73,1	RF	2,39
24	632,96	23,3	23,1	Temp	-0,20
	707,59	70,8	73,1	RF	2,34
25	632,96	23,3	23,1	Temp	-0,20
	707,59	70,8	73,1	RF	2,34
26	632,21	23,2	23,1	Temp	-0,12
	714,19	71,4	73,1	RF	1,68
27	630,21	23,0	23,2	Temp	0,18
	728,18	72,8	74,0	RF	1,18
28	631,15	23,1	23,2	Temp	0,09
	714,19	71,4	74,0	RF	2,58
29	632,33	23,2	23,2	Temp	-0,03
	715,95	71,6	74,0	RF	2,41
30	631,34	23,1	23,2	Temp	0,07
	724,16	72,4	74,0	RF	1,58
31	632,65	23,3	23,2	Temp	-0,07
	723,91	72,4	74,0	RF	1,61
32	630,91	23,1	23,2	Temp	0,11
	728,05	72,8	74,0	RF	1,20
33	631,31	23,1	23,2	Temp	0,07
	723,02	72,3	74,0	RF	1,70
34	630,90	23,1	23,2	Temp	0,11
	719,70	72,0	74,0	RF	2,03
35	630,59	23,1	23,2	Temp	0,14
	729,17	72,9	74,0	RF	1,08
36	632,67	23,3	23,2	Temp	-0,07
	726,44	72,6	74,0	RF	1,36
37	630,60	23,1	23,2	Temp	0,14
	732,97	73,3	74,0	RF	0,70
38	631,86	23,2	23,2	Temp	0,01
	733,47	73,3	74,0	RF	0,65
39	629,35	22,9	23,2	Temp	0,26
	731,19	73,1	74,0	RF	0,88
40	629,25	22,9	23,2	Temp	0,28
	729,75	73,0	74,0	RF	1,03

SJEKK AV RF/TEMP FØR MONTERING					avvik
Sensor nr	mVOLT	Temp/Rf	Rom 75%	Signal	
41	631,59	23,2	23,2	Temp	0,04
	704,45	70,4	73,2	RF	2,76
42	631,62	23,2	23,2	Temp	0,04
	702,41	70,2	73,2	RF	2,96
43	632,44	23,2	23,2	Temp	-0,04
	700,59	70,1	73,2	RF	3,14
44	631,17	23,1	23,2	Temp	0,08
	702,91	70,3	73,2	RF	2,91
45	631,81	23,2	23,3	Temp	0,12
	754,55	75,5	74,7	RF	-0,75
46	632,87	23,3	23,3	Temp	0,01
	750,08	75,0	74,7	RF	-0,31
47	631,95	23,2	23,3	Temp	0,10
	751,79	75,2	74,7	RF	-0,48
48	632,80	23,3	23,3	Temp	0,02
	754,25	75,4	74,7	RF	-0,72
49	633,96	23,4	23,3	Temp	-0,10
	738,58	73,9	74,7	RF	0,84
50	632,04	23,2	23,3	Temp	0,10
	746,74	74,7	74,7	RF	0,03
51	632,92	23,3	23,3	Temp	0,01
	742,97	74,3	74,7	RF	0,40
52	633,33	23,3	23,3	Temp	-0,03
	740,17	74,0	74,7	RF	0,68
53	632,70	23,3	23,3	Temp	0,03
	742,42	74,2	74,7	RF	0,46
54	633,68	23,4	23,3	Temp	-0,07
	732,58	73,3	74,7	RF	1,44
55	635,00	23,5	23,5	Temp	0,00
	761,00	76,1	73,3	RF	-2,80
56	631,80	23,2	23,5	Temp	0,32
	744,65	74,5	73,3	RF	-1,17
57	629,60	23,0	23,5	Temp	0,54
	754,80	75,5	73,3	RF	-2,18
58	631,72	23,2	23,5	Temp	0,33
	763,80	76,4	73,3	RF	-3,08
59	632,70	23,3	23,5	Temp	0,23
	765,09	76,5	73,3	RF	-3,21
60	632,64	23,3	23,5	Temp	0,24
	758,09	75,8	73,3	RF	-2,51

Vedlegg 4: Matlabskript

Skriptet som er brukt til å midle dataene til times og døgnverdier er presentert i Figur 52.

```
clc
clear all
close all

%% LES INN DATA
filenamein = 'KLIMADATA start28.01.2014_08.33.txt';
filenameout = 'KLIMADATA start28.01.2014_08.33 240RED.txt';
NUMMEAN = 240;
KLIMADATA = load(filenamein);
[m_n_] = size(KLIMADATA);
NUMRED = floor(m_/NUMMEAN);
KLIMADATARED = zeros(NUMRED,n_);

for i_ = 1:1:NUMRED
    for k_ = 1:1:n_
        j_ = (i_ - 1)*NUMMEAN + 1;
        KLIMADATARED(i_,k_) = sum(KLIMADATA(j_:(j_+NUMMEAN-1),k_))/NUMMEAN;
    end
end

KLIMADATARED(1:10,:)

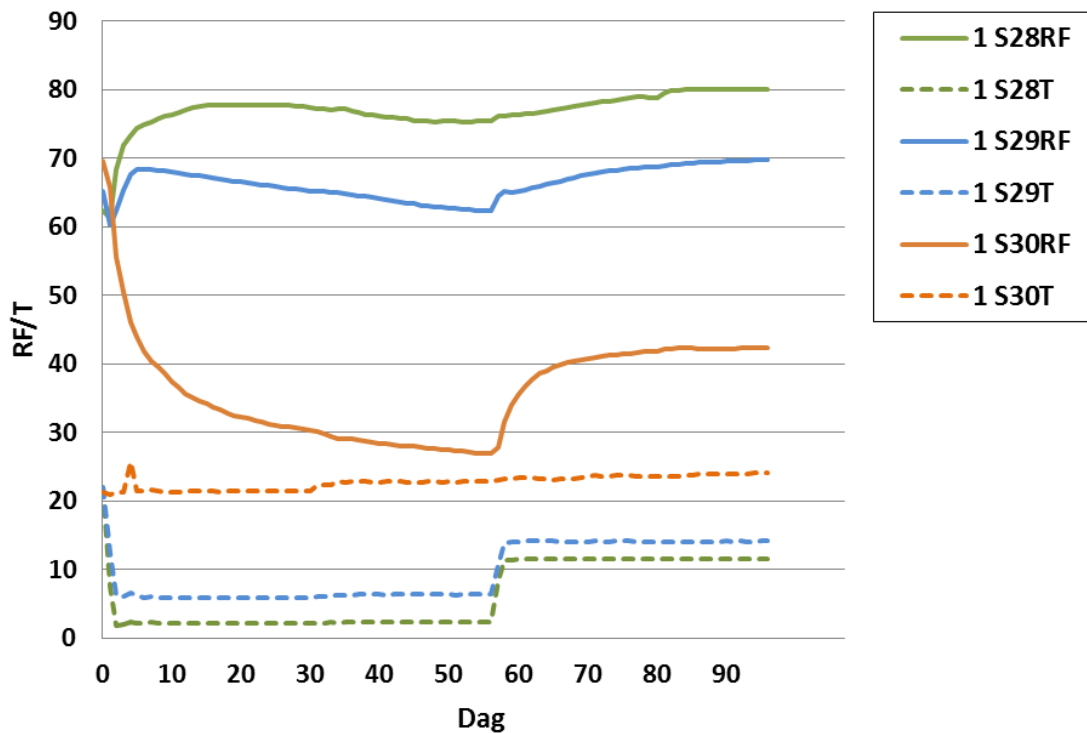
%% PLOTTE VERDIER
KOLONNEPLOTT = [3,4,5,6,1,2];
figure(1)
plot(KLIMADATARED(:,KOLONNEPLOTT))
xlabel('Time (days)')
ylabel('%RH / C')
grid on

%% LAGRE DATA
save(filenameout,'KLIMADATARED','-ASCII')
```

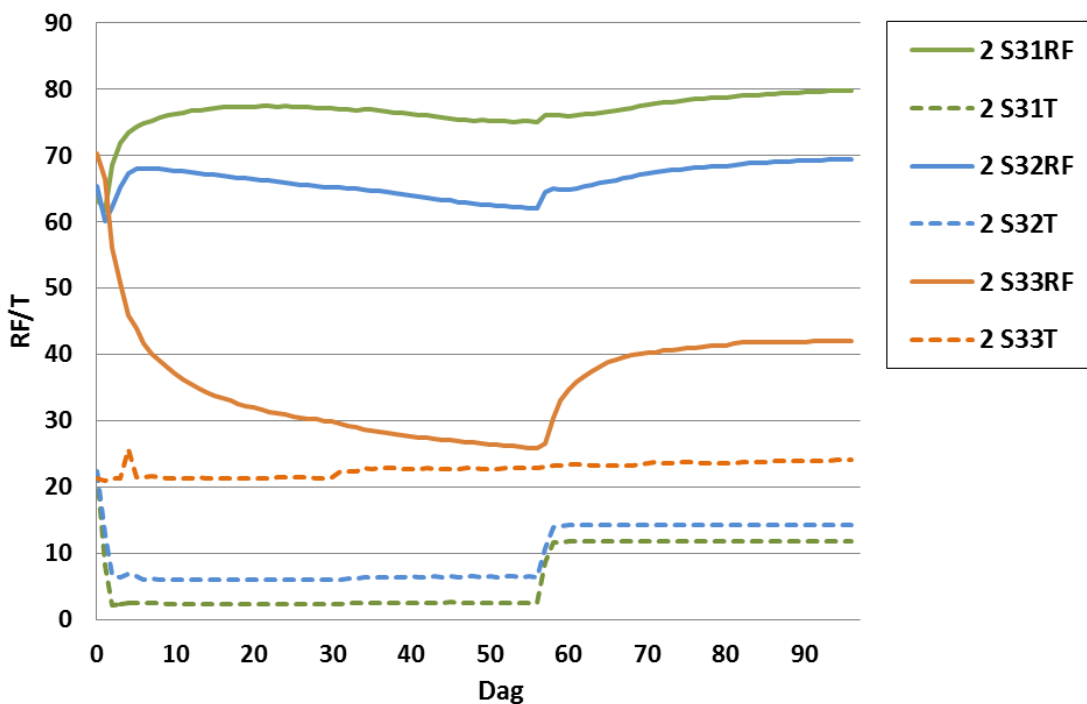
Figur 52: Matlabskript til midling av data.

Vedlegg 5: Resultater fra Cellene i 1D-veggen.

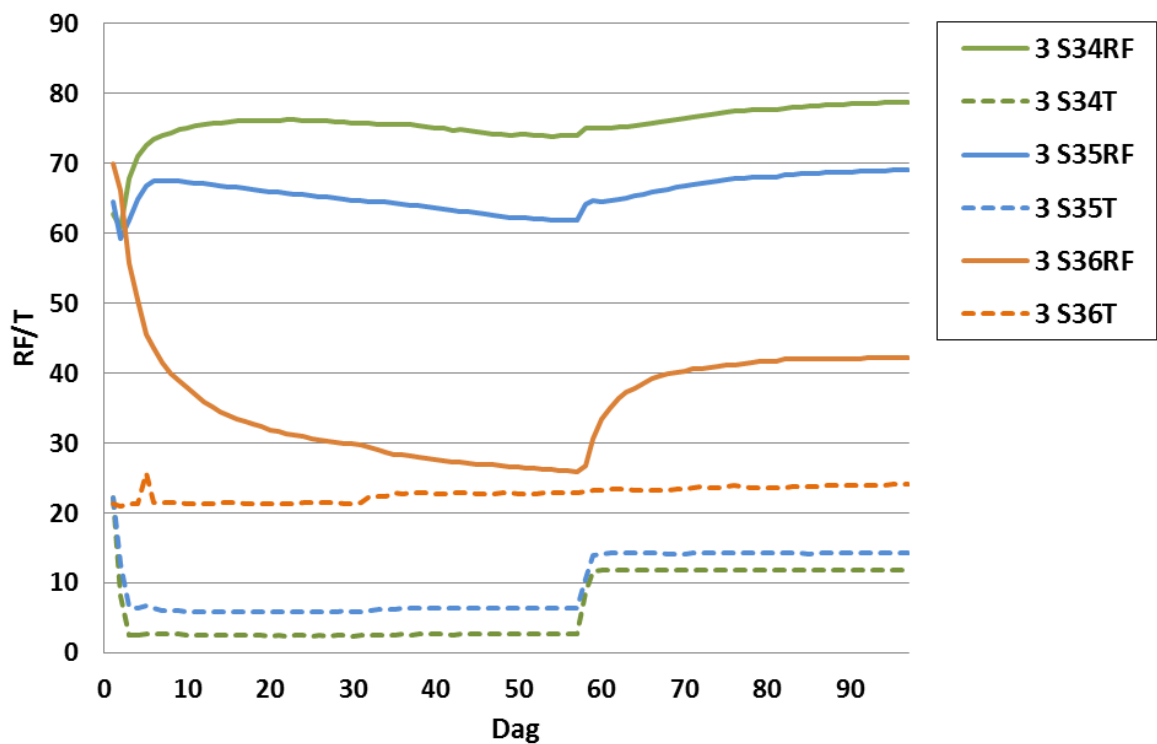
I Figur 53 til Figur 67 presenteres alle måleresultatene fra cellene, dataene er forenklet til døgnverdier. SXX refererer til sensornummeret under forsøket.



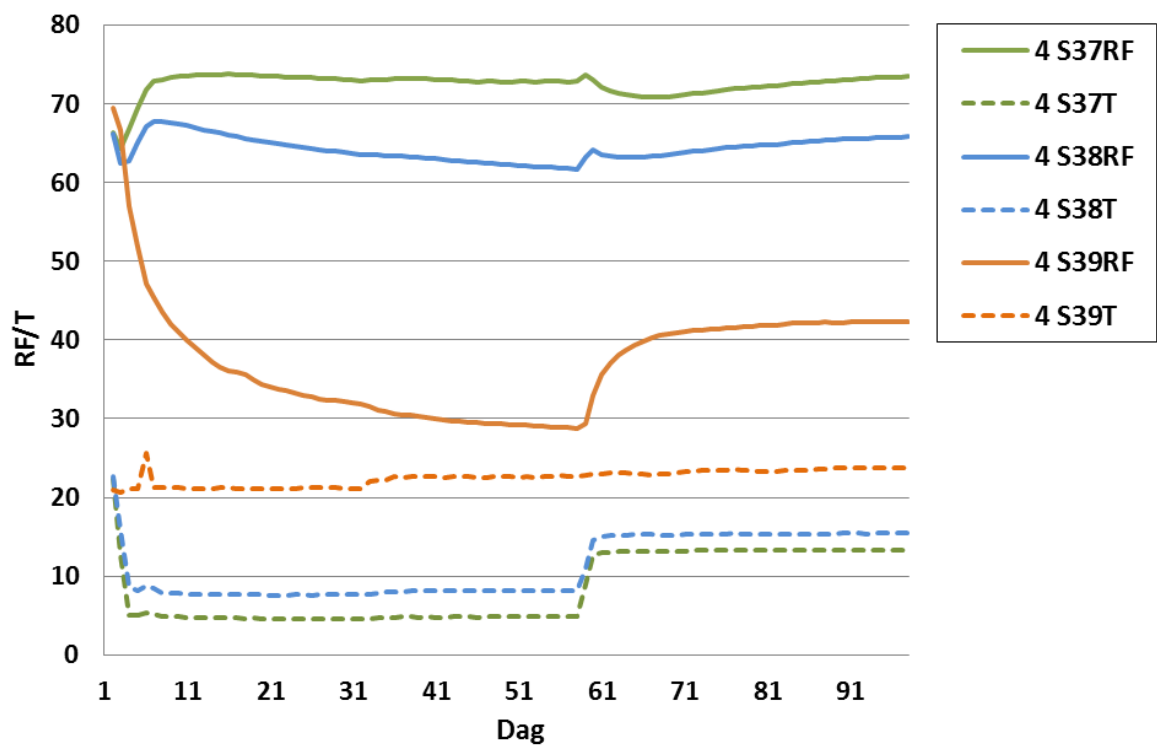
Figur 53: Resultater fra celle 1, A12,F,D. S28-bak vindspærre, S29-50mm inn, S30-innside dampspærre



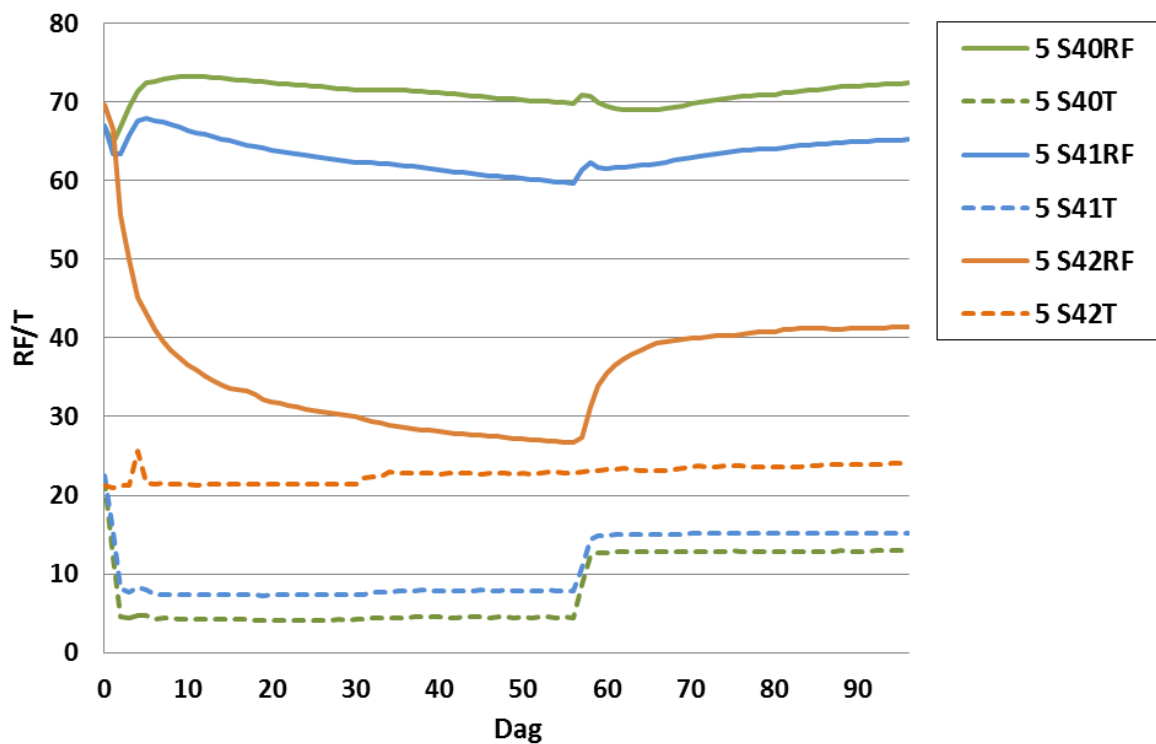
Figur 54: Resultater fra celle 2, A12,F,PE. S31-bak vindspærre, S32-50mm inn, S33-innside dampspærre



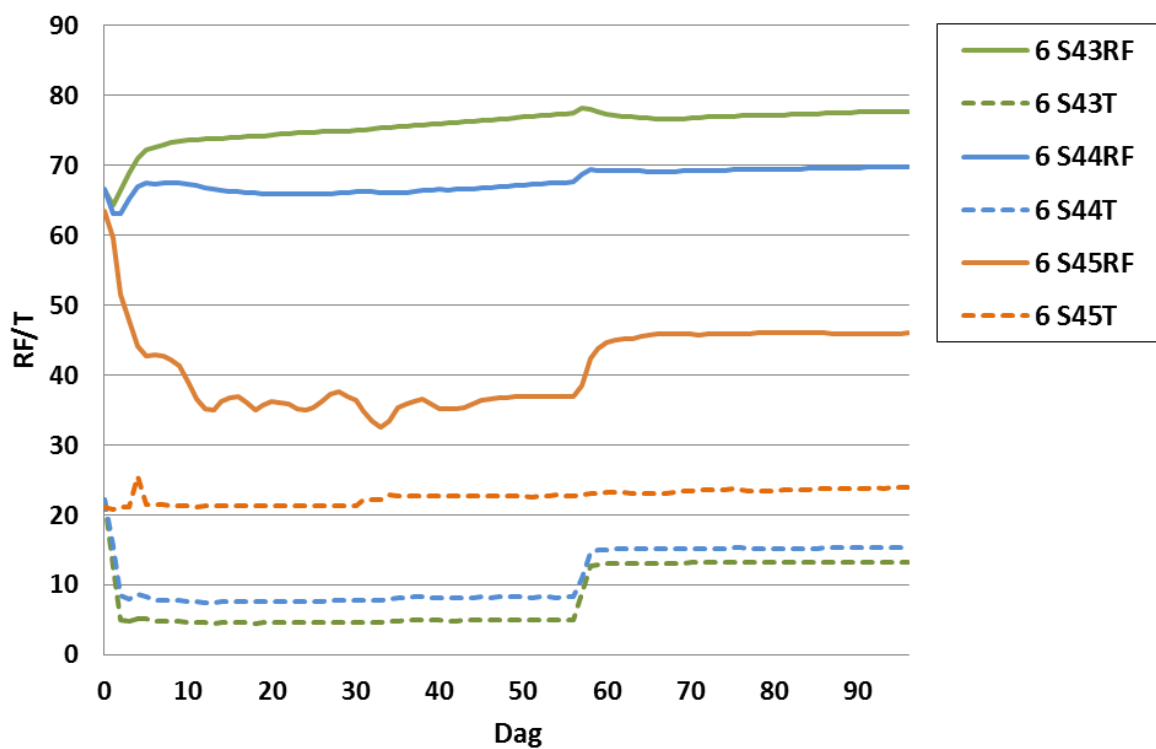
Figur 55: Resultater fra celle 3, A12,F,I. S34-bak vindspærre, S35-50mm inn, S36-innside dampspærre



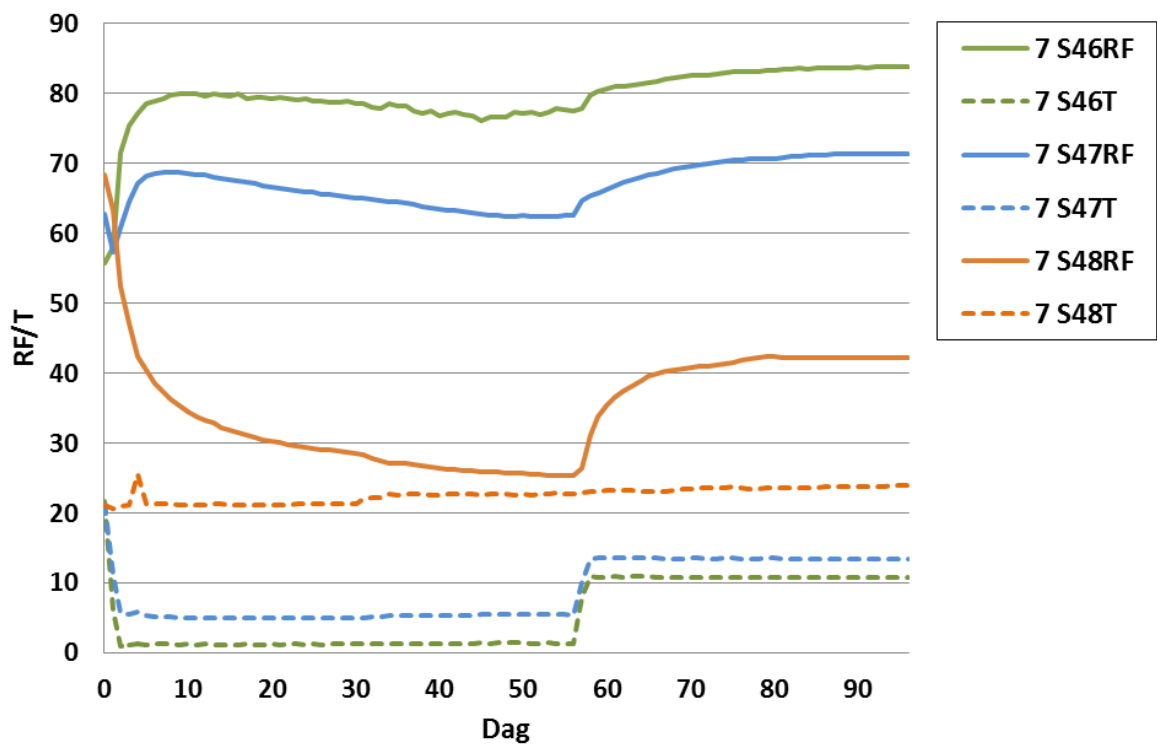
Figur 56: Resultater fra celle 4, A50,F,D. S37-bak vindspærre, S38-50mm inn, S39-innside dampspærre



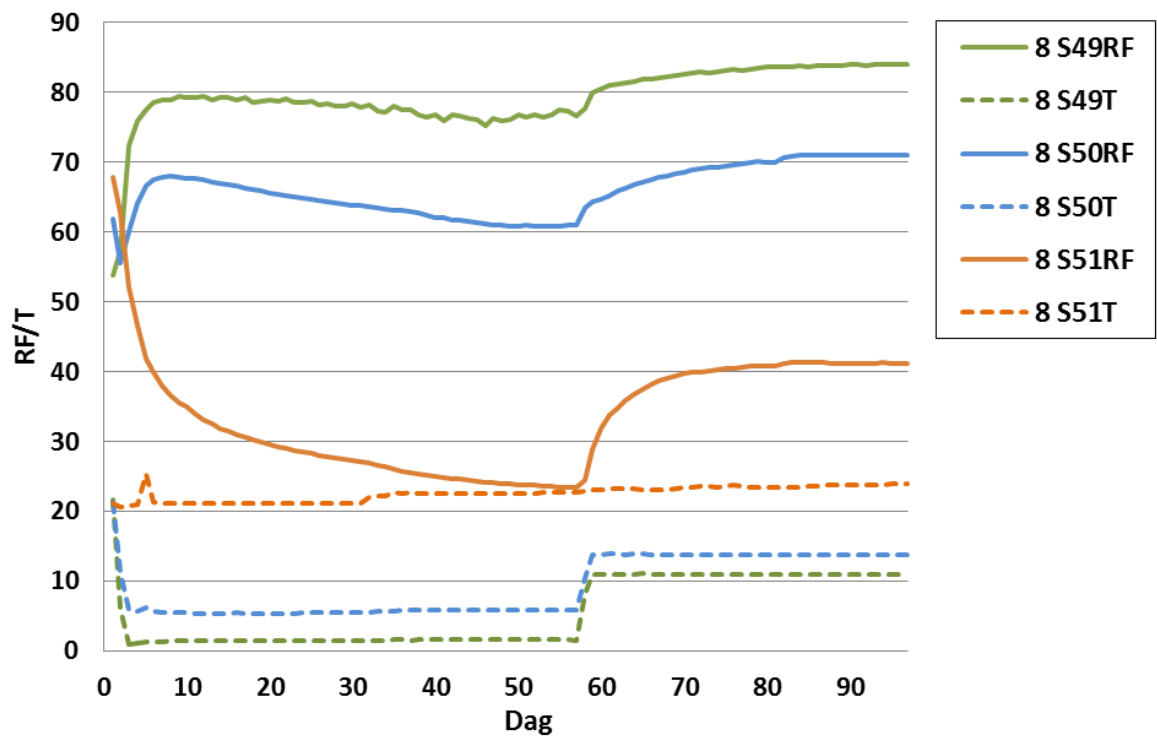
Figur 57: Resultater fra celle 5, A50,F,PE. S40-bak vindspærre, S41-50mm inn, S42-innside dampspærre



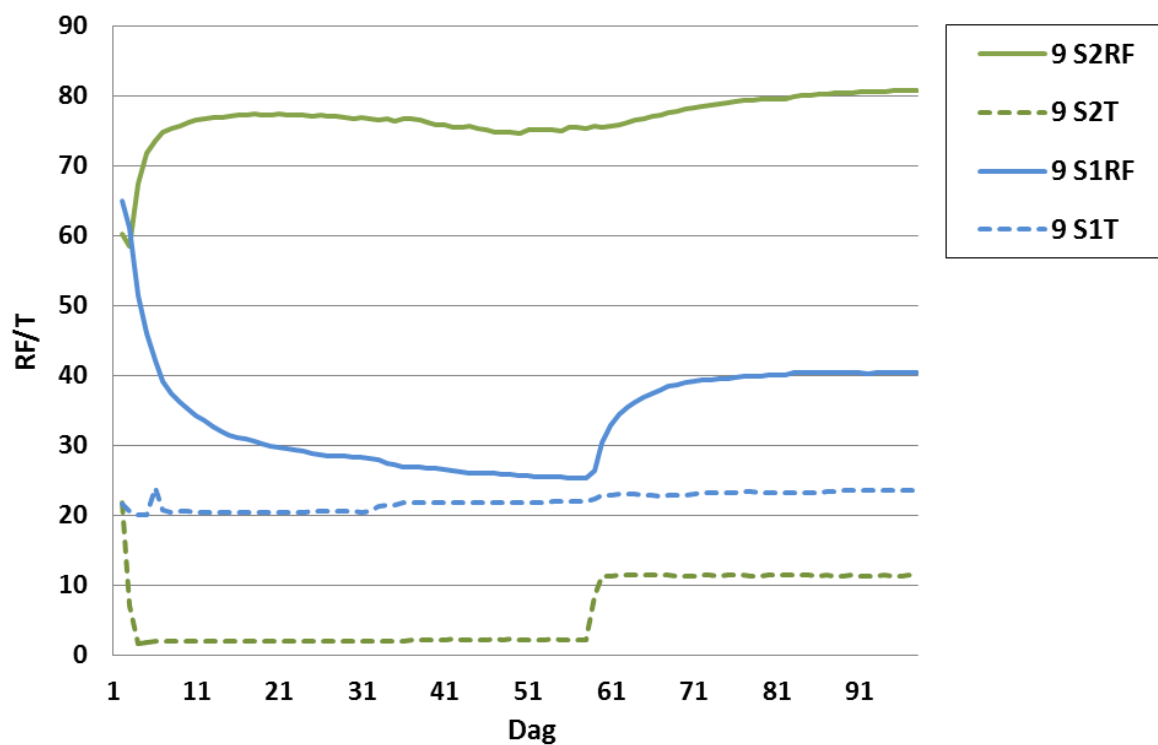
Figur 58: Resultater fra celle 6, A50,F,U. S43-bak vindspærre, S44-50mm inn, S45-innside dampspærre



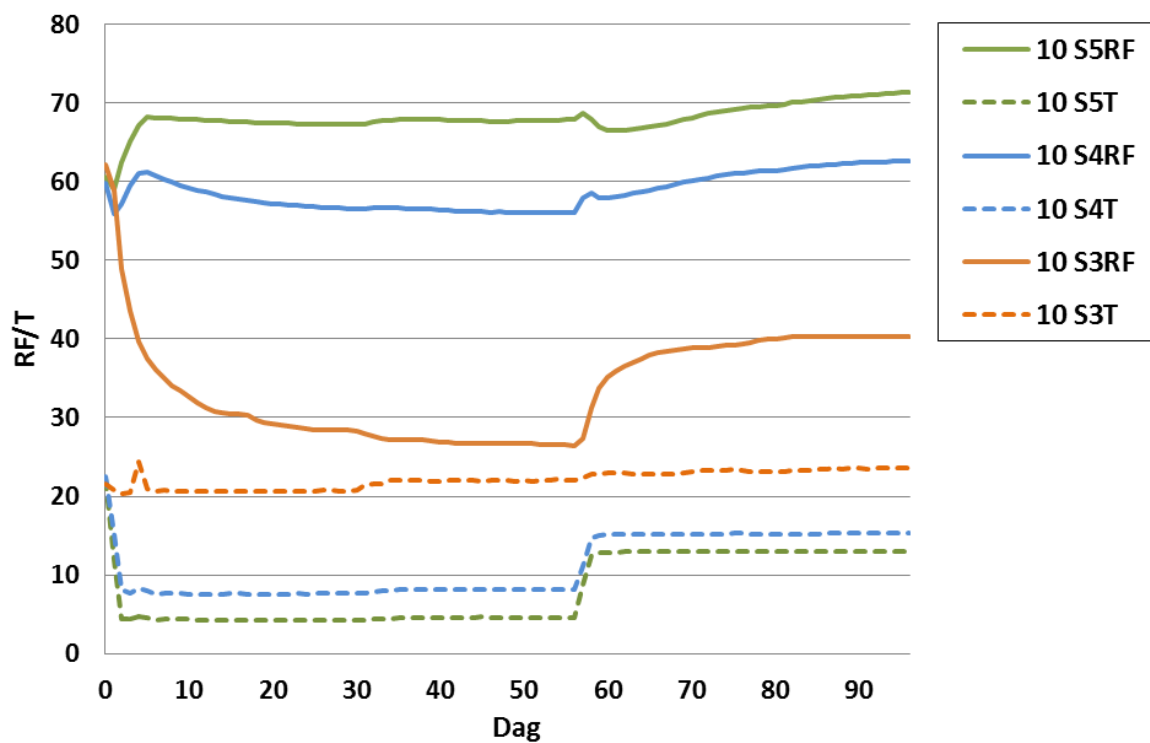
Figur 59: Resultater fra celle 7, T,F,D. S46-bak vindspærre, S47-50mm inn, S48-innside dampspærre.



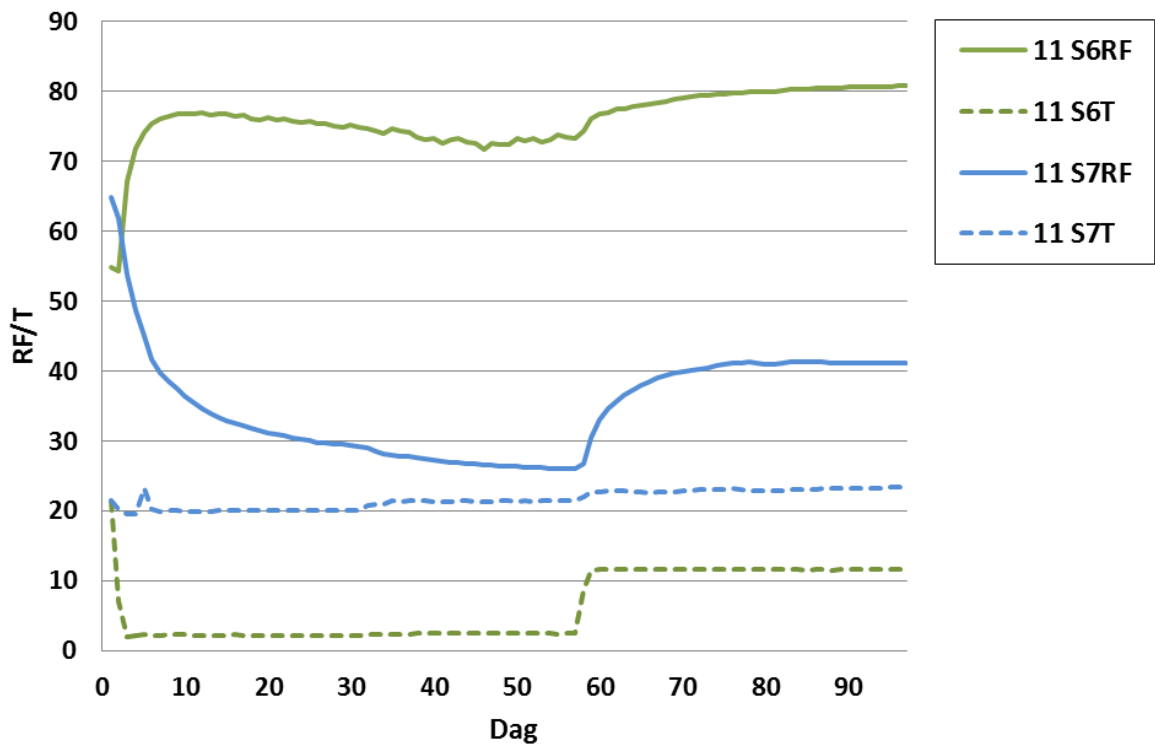
Figur 60: Resultater fra celle 8, T,F,PE. S49-bak vindspærre, S50-50mm inn, S51-innside dampspærre.



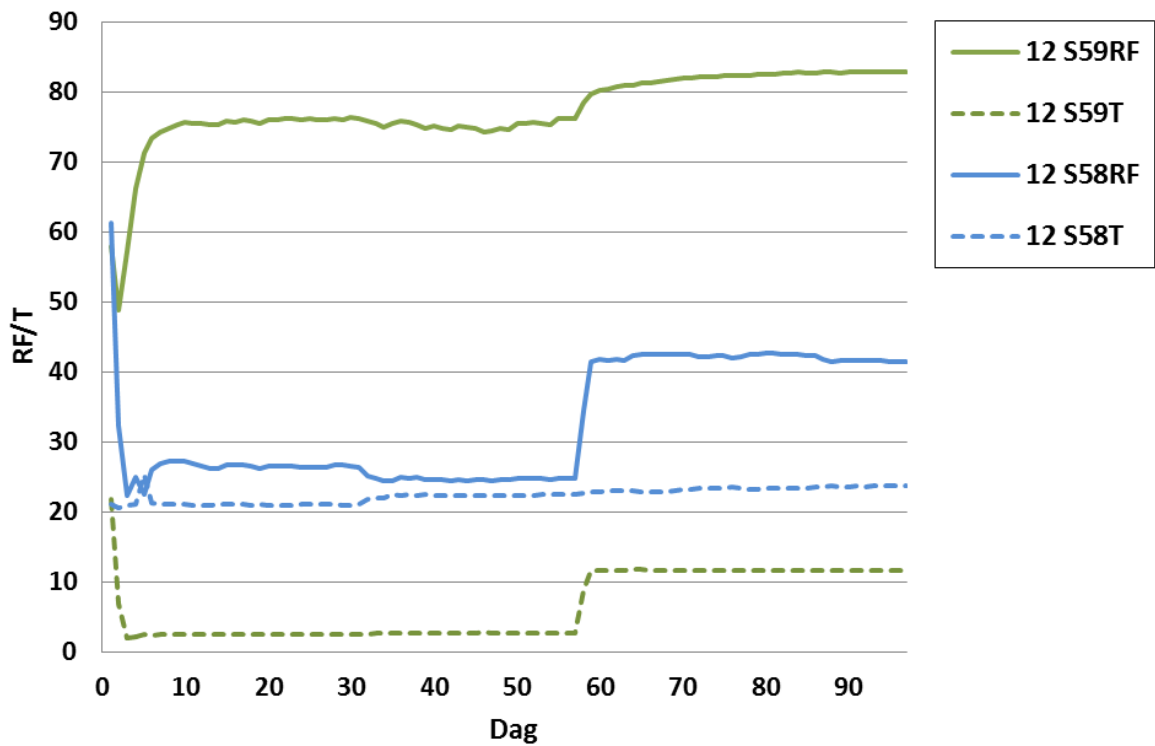
Figur 61: Resultater fra celle 9, A12,Z,D. S2-bak vindsperre, S1-innside dampsperre.



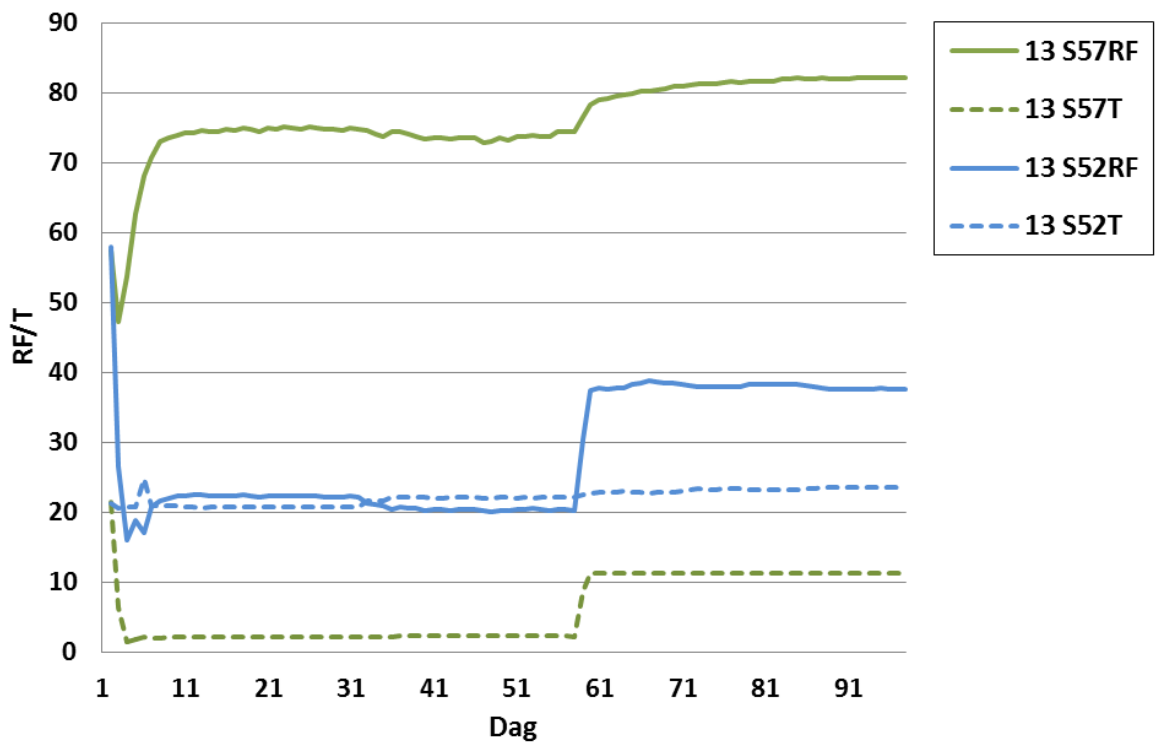
Figur 62: Resultater fra celle 10, A50,Z,D. S5-bak vindsperre, S4-50mm inn, S3-innside dampsperre.



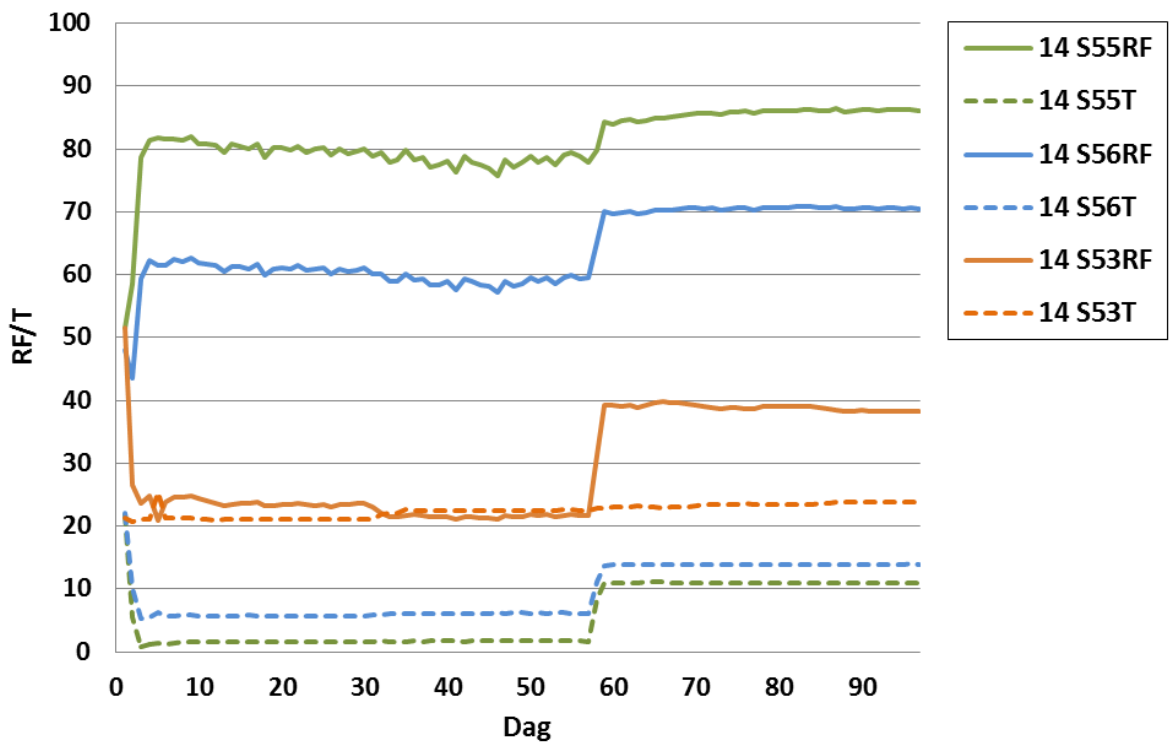
Figur 63: Resultater fra celle 11, T,Z,D. S6-bak vindsperre, S7-innside dampsperre.



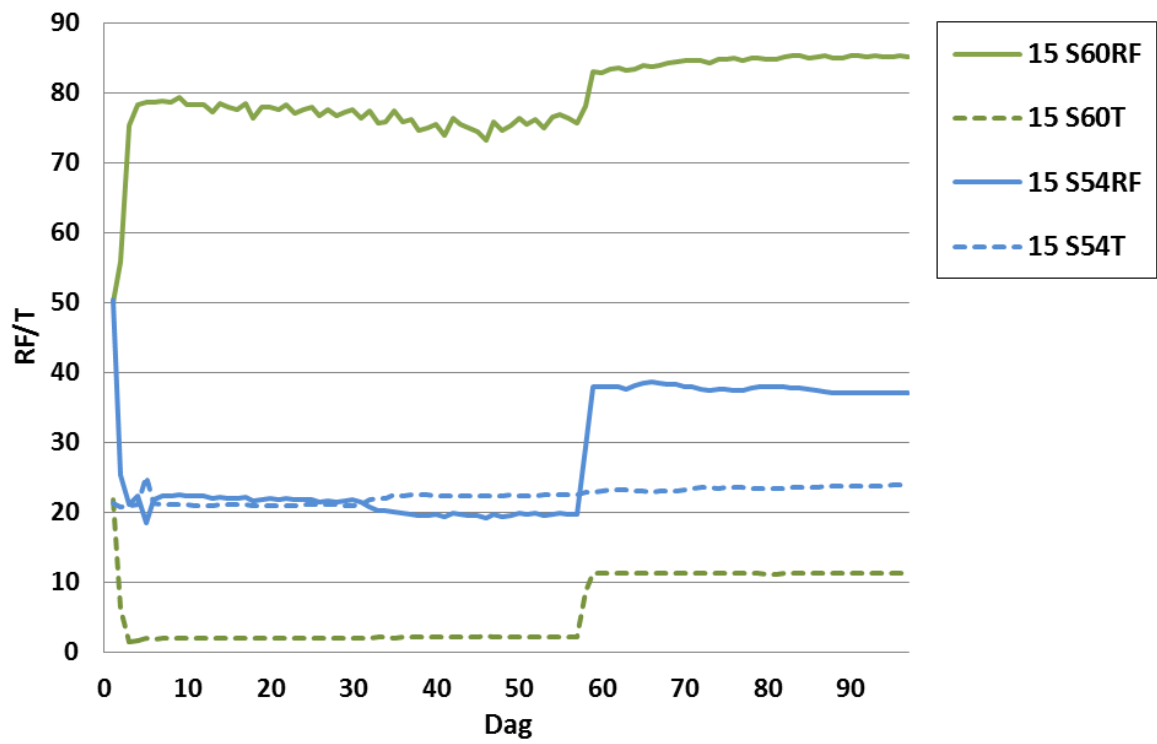
Figur 64: Resultater fra celle 12, A12,M,D. S59-bak vindsperre, S58-innside dampsperre



Figur 65: Resultater fra celle 13, A12,M,PE. S57-bak vindsperre, S52-innside dampsperre.



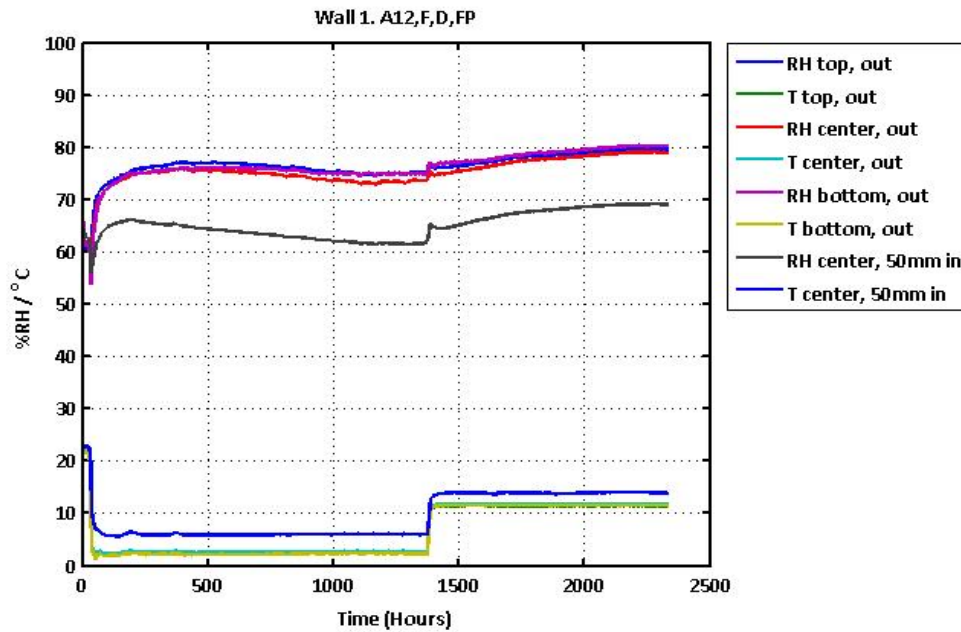
Figur 66: Resultater fra celle 14, T,M,D. S55-bak vindsperre, S56-50mm inn, S53-innside dampsperre.



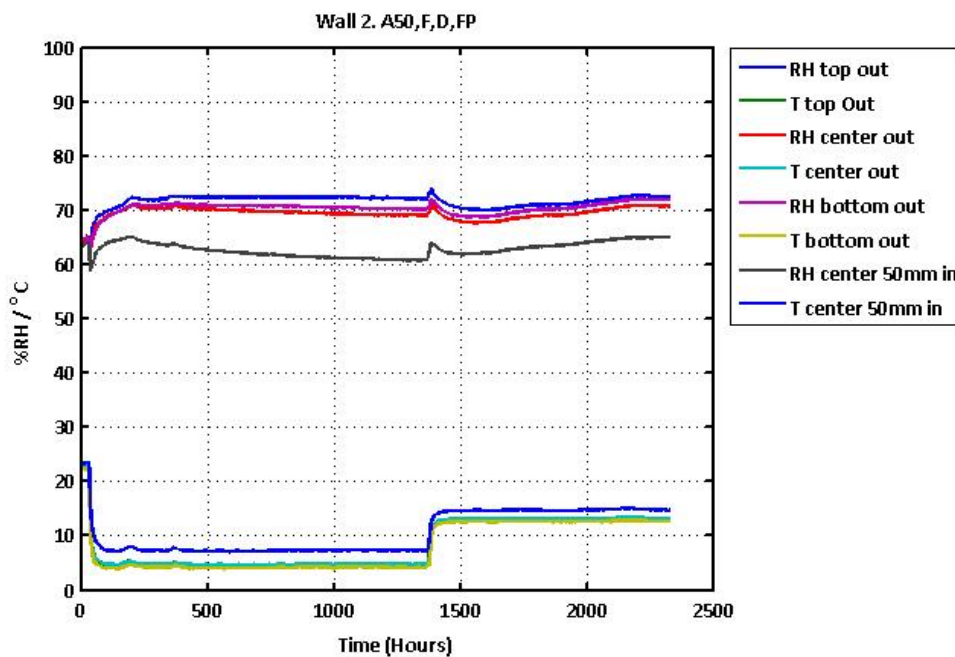
Figur 67: Resultater fra celle 15, T,M,PE. S60-bak vindsperre, S54-innside dampsperre.

Vedlegg 6: Resultater fra veggelementene

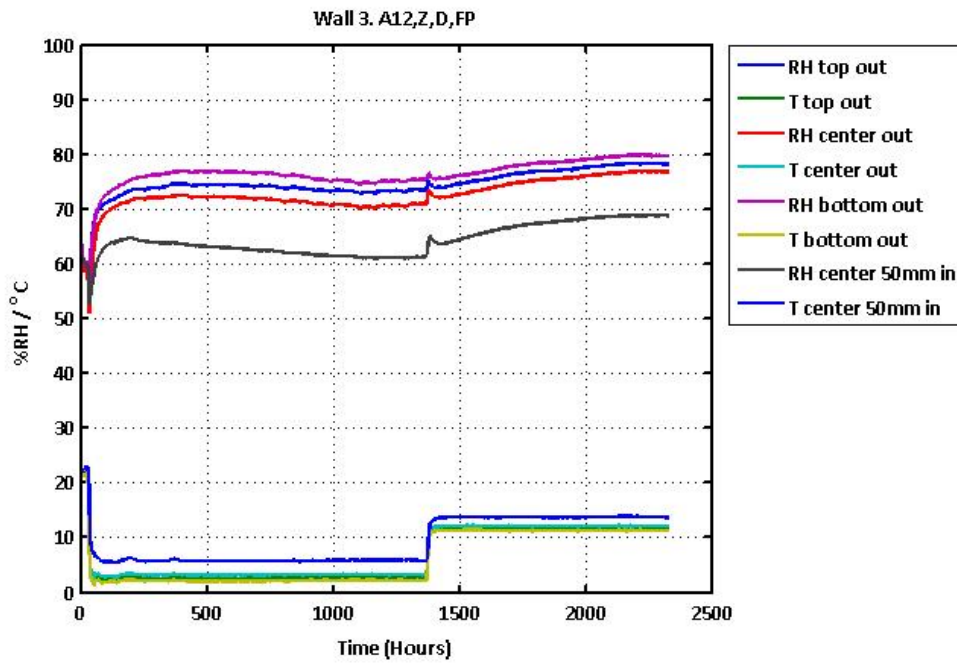
I Figur 68 til Figur 72 presenteres resultatene til hvert enkelt veggelement fra laboratorieforsøket.



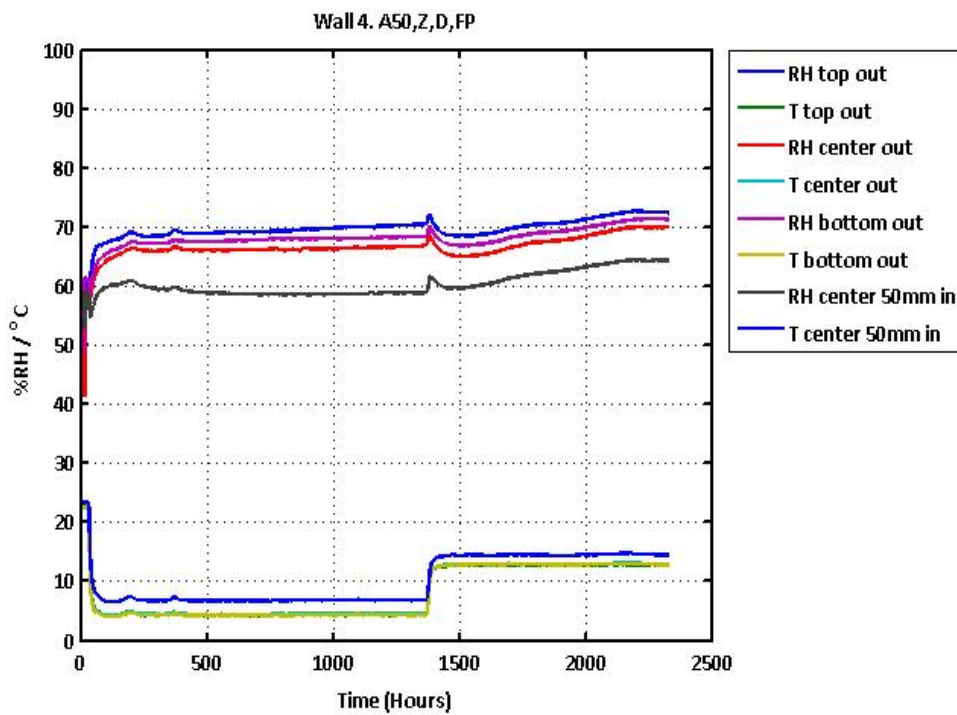
Figur 68: Vegg 1. A12,F,D,FP



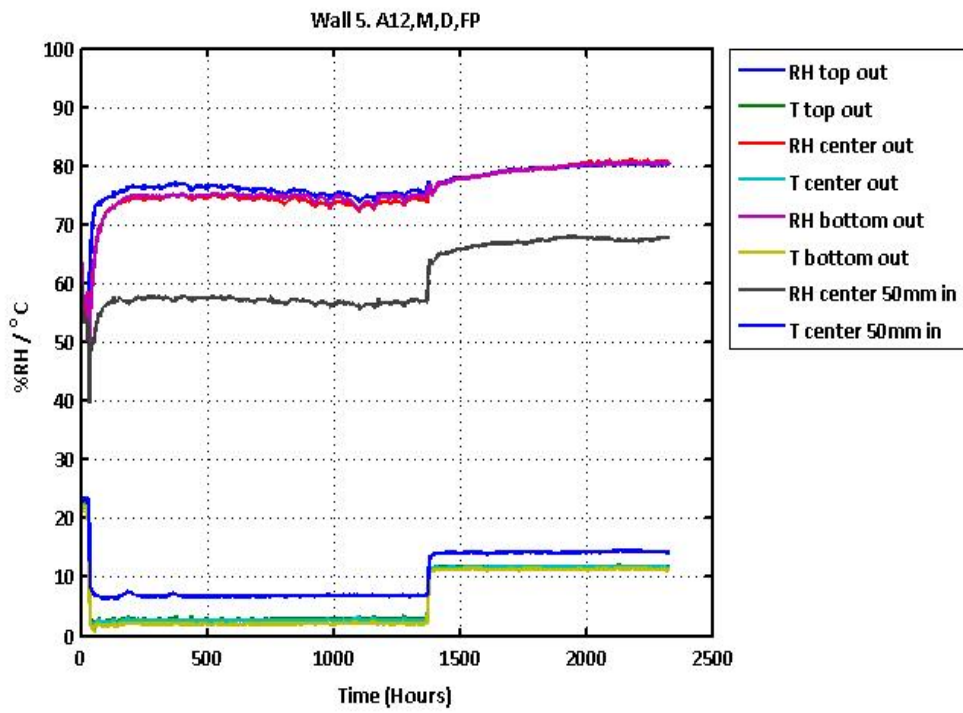
Figur 69: Vegg 2. A50,F,D,FP



Figur 70: Vegg 3. A12,Z,D,FP



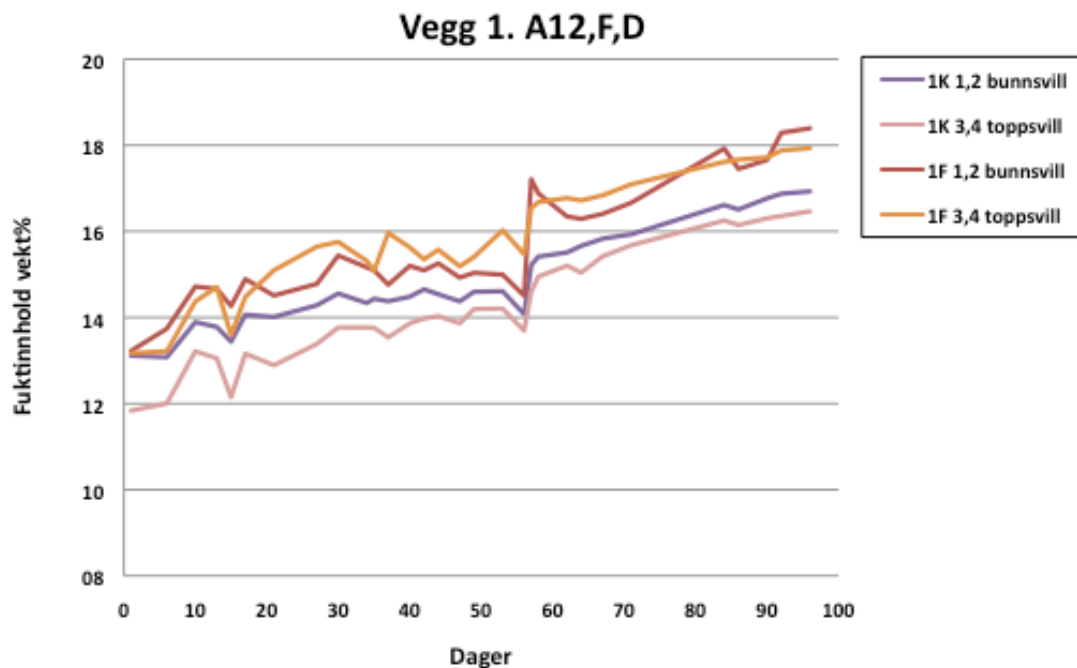
Figur 71: Vegg 4. A50,Z,D,FP



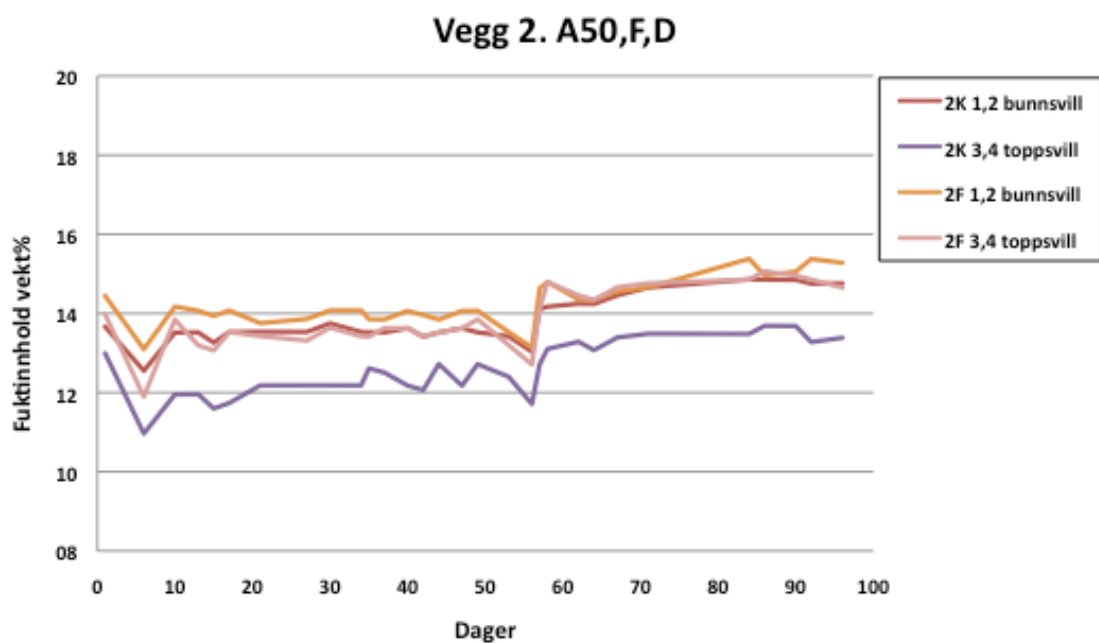
Figur 72: Vegg 5. A12,M,D,FP

Vedlegg 7: Trefuktmålinger i topp og bunnsvill.

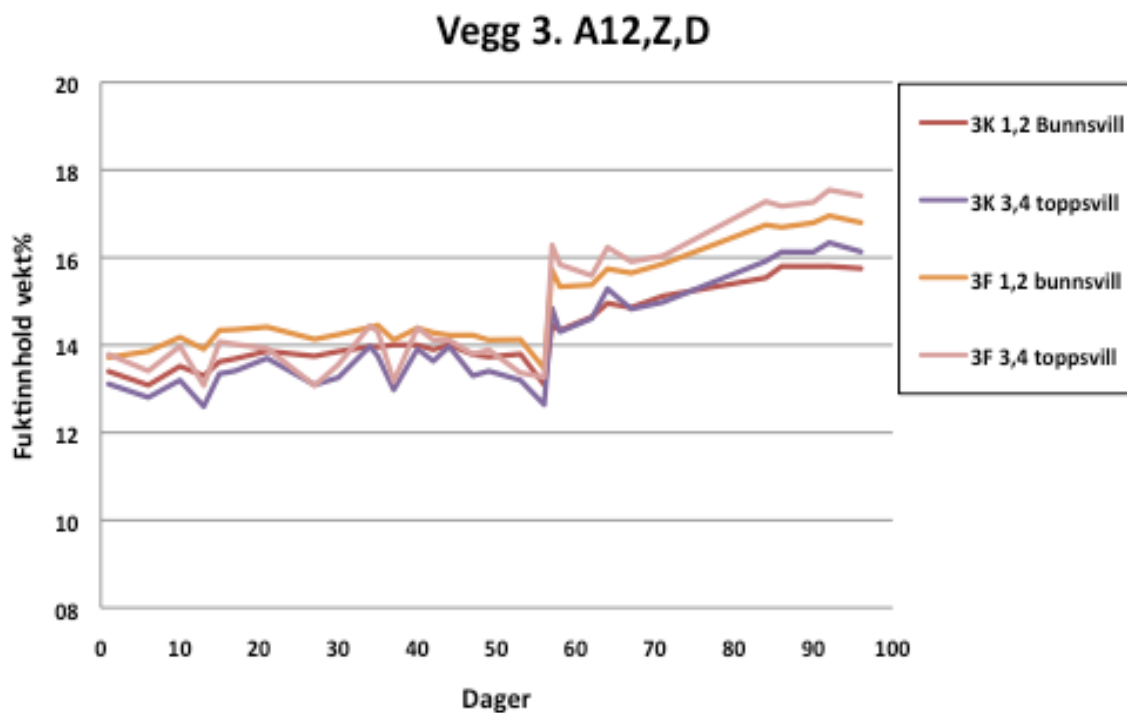
Resultatene er justert for tilnærmet måletemperatur i målepunktet og midlet verdi av dupliseringen av punktene.



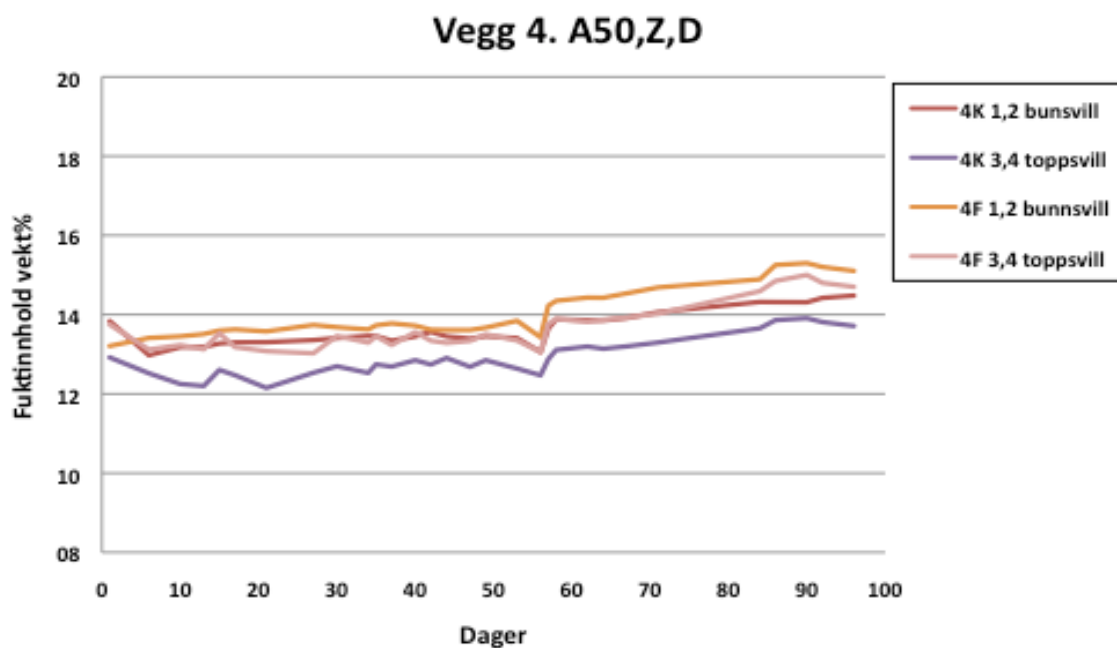
Figur 73: Trefuktmålinger, topp- og bunnsvill i veggelement 1.



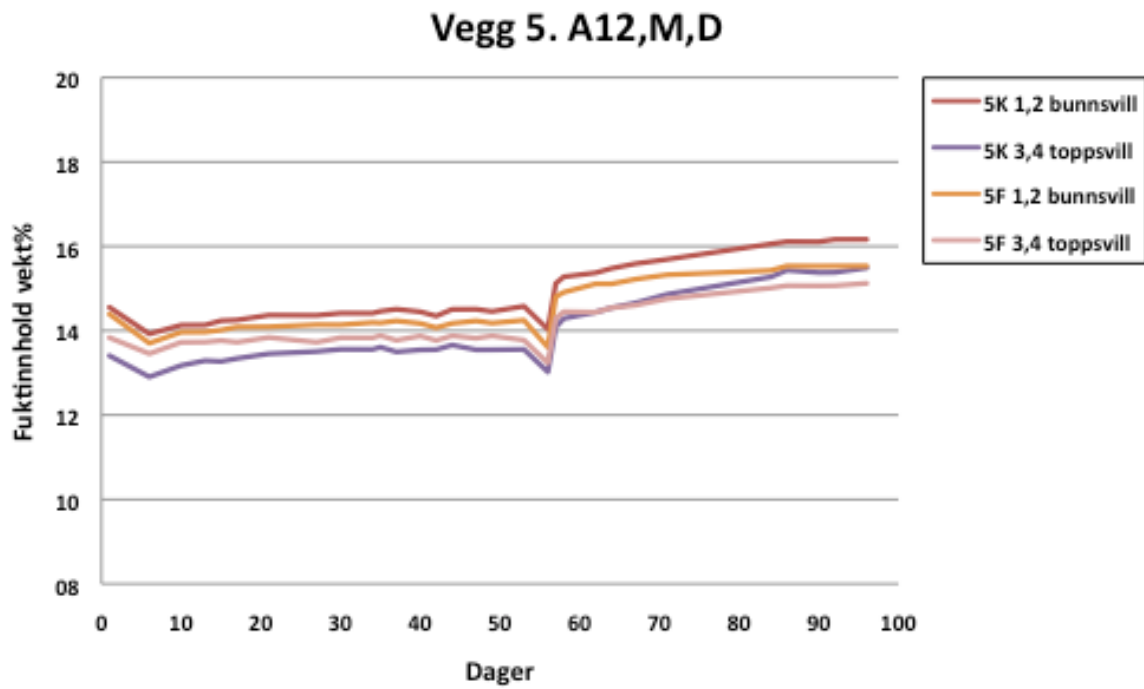
Figur 74: Trefuktmålinger, topp- og bunnsvill i veggelement 2.



Figur 75: Trefuktmålinger, topp- og bunnsvill i veggelement 3.



Figur 76: Trefuktmålinger, topp- og bunnsvill i veggelement 4.



Figur 77: Trefuktmålinger, topp- og bunnsvill i veggelement 5.

Vedlegg 8: Sensorplasseringer i 1D og 2D veggen.

1D forsøksvegg materialkombinasjoner, sensorplassering og nummereing.				
1	2	3	4	
A12	A12	A12	A50	Sensor: 37
F	F	F	F	Sensor: 38
D	PE	I	D	Sensor: 39
FP	FP	FP	FP	
5	6	7	8	Sensor: 49
A50	A50	T	T	Sensor: 49
F	F	F	F	Sensor: 50
PE	U	D	PE	Sensor: 51
FP	FP	FP	FP	
9	10	11	12	Sensor: 59
A12	A50	T	A12	Sensor: 59
Z	Z	Z	M	
D	D	D	D	Sensor: 58
FP	FP	FP	FP	
13	14	15	16	Sensor: 60
A12	T	T	Vindsperre	Sensor: 60
M	M	M	Isolasjon	
PE	D	PE	Dampbrems	Sensor: 54
FP	FP	FP	Fermacell	

A12=asfalt vindtett 12mm
 A50=Asfalt vindtett 25mm x2
 T = Tyvek Vindperre
 F=Fleks
 Z=Zell
 M=Minneralull
 D=Delta luxx
 PE=Pefolie
 I=intello
 U=Uten dampbrems
 FP=Fermacellplate

Figur 78: Oversikt over sensorplasseringene, med nummer og oppbygning, 1D-veggen.

2D materialsammensetning, sensor nummerering og plassering

1		RF/T	Nr		2		RF/T	Nr	
A12 F D FP	Oppe ute		24		A50 F D FP	Oppe ute		20	
	Midt ute		25			Midt ute		22	
	Nede Ute		26			Nede Ute		23	
	Midt 50mm inn		27			Midt 50mm inn		21	
	Trefukt					Trefukt			
	Oppe flask	1F3	1F4			Oppe flask	2F3	2F4	
	Oppe kant	1K3	1K4			Oppe kant	2K3	2K4	
	Nede flask	1F1	1F2			Nede flask	2F1	2F2	
Nede kant	1K1	1K2		Nede kant	2K1	2K2			

3		RF/T	Nr		4		RF/T	Nr	
A12 Z D FP	Oppe ute		8		A50 Z D FP	Oppe ute		12	
	Midt ute		9			Midt ute		13	
	Nede Ute		10			Nede Ute		14	
	Midt 50mm inn		11			Midt 50mm inn		15	
	Trefukt					Trefukt			
	Oppe flask	3F3	3F4			Oppe flask	4F3	4F4	
	Oppe kant	3K3	3K4			Oppe kant	4K3	4K4	
	Nede flask	3F1	3F2			Nede flask	4F1	4F2	
Nede kant	3K1	3K2		Nede kant	4K1	4K2			

5		RF/T	Nr	
A12 M D FP	Oppe ute		16	
	Midt ute		17	
	Nede Ute		18	
	Midt 50mm inn		19	
	Trefukt			
	Oppe flask	5F3	5F4	
	Oppe kant	5K3	5K4	
Nede flask	5F1	5K2		
Nede kant	5K1	5K2		

Materialkode
A12=asfalt vindtett 12mm
A50=Asfalt vindtett 25mm x2
F=Fleks
Z=Zell
M=Minneralull
D=Delta luxx
FP=Fermacellplate

Figur 79: Oversikt over sensorplasseringene, med nummer og oppbygning, 2D-veggen.