

Uttørking av kompakte tretak med smarte dampsperrer

Bjelkelagets betydning for fuktforholdene

Tom-André Olsen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Stig Geving, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Oppgavens tittel: Uttørking av kompakte tretak med smarte dampsperrer – Bjelkelagets betydning for fuktforholdene	Dato: 20.06.2017		
	Antall sider (inkl. bilag): 139		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Tom-André Olsen			
Faglærer/veileder: Stig Geving			

Ekstrakt:

Kompakte tak er en sårbar konstruksjon i forhold til fukt og lekkasjer. Tidligere studier har vist at smarte dampsperrer har potensiale til å gjøre konstruksjonstypen mer robust ved å tillate innadrettet uttørking i de varme sommermånedene. Denne rapporten er todelt og tar for seg neste steg i den videre forskningen på smarte dampsperrer.

Første delen av rapporten er å validere materialparametere til smarte dampsperrer ved å etterberegne tidligere resultater fra et laboratorieforsøk ved NTNU. Etterberegningsstudiet er utført med simuleringsverktøyet WUFI Pro (1D) og WUFI 2D. Resultatene fra etterberegningsarbeidet viste at det kreves kvalitative og kvantitative materialparametere for å oppnå likt uttørkingsforløp med reelle resultater. Det antas også at materialparametere må justeres for å tilpasses simuleringsverktøyets grensesnitt dersom man skal oppnå like resultat i simulering og reelle forsøk.

Den andre delen av rapporten var eksperimentelle laboratorieforsøk. Målet med laboratorieforskene er å justere kunnskap fra tidligere utførte laboratorieforsøk ved NTNU, og vurdere effekten av bjelker i kompakte tretak med bruk av SDS. Det ble utført to laboratorieforsøk hvor en så på effekten av å plassere bjelker av trevirke mellom sperresjiktene i et kompakttak med bruk av smart dampsperre som innvendig sperresjikt. Ved sammenligning med tidligere laboratorieforsøk ved NTNU viste resultatene at bjelken og tykkelsen på isolasjonssjiktet påvirker RF inne i kompakttaket. Bjelketypen har også påvirkning på RF i kompakttaket. Forsøket viste at heltrebjelker har en fuktbufferingseffekt som gjør at svingninger i RF reduseres, samtidig er RF høyere nær siden av bjelken sammenlignet med RF lenger ut i isolasjonssjiktet. Ved bruk av I-bjelke så man at uttørkingen av flensen gikk raskere og førte til høyere RF i isolasjonssjiktet. Over 60 dager i første forsøk var det ikke vedvarende forhold som ga potensiale for mugg- og råteskader. Smarte dampsperrer kan derfor ha potensiale til å gi tilstrekkelig uttørkingmuligheter av kompakte tretak for å unngå skader på trevirke mellom tettesjiktene. I det andre forsøket ble resultatene hentet etter 21 dager. Denne oppgaven viser derfor ikke sluttresultatene.

Stikkord:

1. Smarte dampsperrer
2. Etterberegning i WUFI
3. Kompakte tak med bjelkelag
4. Laboratorieforsøk

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved NTNU våren 2017. Oppgaven er skrevet innenfor hovedprofilen Bygnings- og materialteknikk ved Institutt for Bygg- og Miljøteknikk.

Masteroppgaven omfatter etterberegning av et tidligere laboratorieforsøk ved NTNU, og to laboratorieforsøk som bygger videre på forskningen med bruk av smarte dampsperrer i kompakte tak.

Som tidligere fagarbeider i tømreryrket har jeg stor interesse for bygningsfysikk og tekniske løsninger i bygningskonstruksjoner. Det har vært spennende og lærerikt å fordype seg innenfor kompakte tak og spesielt produktgruppen smarte dampsperrer. Produktene har et potensiale til å kunne endre dagens byggeskikk. Siden det fortsatt gjenstår en del forskning på bruksområdet til produkttypen for det norske klima, har det vært givende å kunne bidra til den videre forskningen. Målet er å finne ut om smarte dampsperrer kan bidra til mer robuste konstruksjoner i møte med fremtidens klimaendringer som antas å være et villere og våtere klima.

Gjennom laboratorieforsøk har jeg lært mye nytt om forskningsprosessen og fremstilling av data fra praktiske forsøk. Dette arbeidet har vært både engasjerende og tidskrevende. Det stilles høye krav til nøyaktighet og oppfølging når man jobber med eksperimentelle laboratorieforsøk. Ved å legge inn mye innsats i dette arbeidet får man gode og nøyaktige resultater som kan gi et godt grunnlag for videre forskning på smarte dampsperrer. Tilegnet erfaring og kunnskap om forskning kommer jeg til å ta med meg videre inn i arbeidslivet.

Jeg ønsker å rette en takk til avdelingsingeniør Ole Aunrønning ved NTNU, for hjelp med tilrettelegging og oppfølging av laboratorieforsøkene. Videre vil jeg rette en takk til Tore Kvande for å inkludere prosjektet i Klima 2050-programmet. Klima 2050 har vært en nyttig program for å komme i kontakt med personer i bransjen som har interesse for forsøket og som kan bidra med informasjon. I tillegg vil jeg takke Jørgen Young i Isola as for å bidra med materialer og informasjon om dampsperreproduktene som er benyttet i laboratorieforsøkene.

Avslutningsvis ønsker jeg å rette en stor takk til veileder og professor Stig Geving ved Institutt for Bygg- og Miljøteknikk ved NTNU for god oppfølging, rådgøring og ikke minst for engasjement til forskning på smarte dampsperrer.

Trondheim, 20. Juni 2017

Tom-André Olsen

Sammendrag

Smarte dampsperrer i norske konstruksjoner er lite brukt da dampsperrere fortsatt er ansett som et nisjeprodukt. En av årsakene til at det er lite anvendt skyldes begrenset forskning på produktgruppen for det norske klimaet. Tidligere forsøk ved NTNU har vist at smarte dampsperrer har et potensiale til innadrettet uttørking av fukt i kompakte tak. Det er nødvendig med videre forskning for å sikre at den positive effekten ved å benytte smarte dampsperrer ikke medfører større problemer ifb. fukthåndtering.

Etterberegning av tidligere forsøk ved NTNU

En del av masteroppgaven har vært å etterberegne resultatene fra et tidligere laboratorieforsøk ved NTNU og validere materialparameterne for smarte dampsperrer. Tilgang på data som ble loggført under forsøket i 2012 ga gode forutsetninger for etterberegningen. Det har blitt fokusert på analyse av materialparametere, siden disse står for den største usikkerheten.

Tre dampsperreprodukter ble kontrollert i etterberegningsarbeidet. Disse var Intello, Novaflexx og AirGuard Smart generasjon 1. Materialparametere for Intello og Novaflexx var tilgjengelig i databasen til WUFI. AirGuard Smart ble definert som et nytt materiale med materialparametere hentet fra produsenten, og fra et forsøk utført ved SINTEF Byggforsk. Resultatene fra simulering med Intello stemte dårlig med laboratorieresultatene. Novaflexx stemte godt med resultatene fra laboratorieforsøket. Etterberegning med materialparameterne benyttet for AirGuard Smart generasjon 1 ga en god tilnærming til uttørkingsforløpet i laboratorieforsøket. Simuleringene viser at det er nødvendig med kvantitative- og kvalitative materialparametere for å kunne gjenskape resultater fra reelle laboratorieforsøk. Samtidig antas det at materialparameterne må tilpasses simuleringsverktøyets grensesnitt for å kunne gjenskape resultater fra reelle forsøk.

Laboratorieforsøk

Denne masteroppgaven omhandler neste steg i forskning på bruk av smarte dampsperrer i kompakte tak. Laboratorieforsøkene i denne oppgaven har vurdert effekten av å plassere en trebjelke i isolasjonssjiktet. Dersom det viser seg at trevirke inne i kompakttaket kan unngå fare for mugg- og råteproblemer ved bruk av smarte dampsperrer, er det mulig å redusere takets tykkelse, redusere materialbruk og det tillater en mer effektiv byggeprosess med økonomiske fordeler.

Ved å benytte like forutsetninger for forsøket i denne oppgaven som ved tidligere utførte laboratorieforsøk ved NTNU, har det vært mulig å sammenligne resultatene. Det ble valgt å benytte AirGuard Smart i forsøkene på bakgrunn av at dette produktet viste i tidligere forsøk ved NTNU å gi raskere uttørkingshastighet og høyest uttørkingsgrad sammenlignet med andre produkter. En ny generasjon AirGuard Smart ble også benyttet i laboratorieforsøkene, og sammenlignet med AirGuard Smart generasjon 1. Det ble utført to forsøk i denne oppgaven. I forsøk nr. 1 ble kun kryssfinerplaten fuktet opp til høyt fuktinnhold før start. I forsøk nr. 2 ble både bjelke og kryssfinerplate fuktet opp til høyt fuktinnhold.

Resultater laboratorieforsøk nr. 1

Ved sammenligning med tidligere laboratorieforsøk ble det tydelig at tykkelsen på isolasjonssjiktet påvirker svingningene og nivået til RF over dampsperrsjiktet. RF-nivået var høyere i boksene med 20 cm isolasjonstykkelse, sammenlignet med boksene med 30 cm. Mer isolasjon i taket fører til mer plass for omfordeling av fukt, større diffusjonsmotstand og lenger vei for vanndamp å diffundere fra taktro til dampsperrsjiktet. Tykkere isolasjonssjikt fører ikke til forskjellen i RF alene, bjelkene vil også ha en påvirkning på RF mellom sperrsjiktene. RF var gjennomsnittlig høyest over dampsperreren i forsøksperioden. Ved forsøkets start var RF høyest under taktroa, siden denne hadde et høyt startfuktinnhold. Resultatene viste at RF-nivået over dampsperreren var sterkt påvirket av temperaturene over prøveboksene.

Sammenligning av boksene med bjelker fra forsøket utført i denne oppgaven viser at bjelkene har en fuktbufferingseffekt. Svingningene i RF var lavere i områder nær heltrebjelken, men hadde et høyere RF-nivå på grunn av desorpsjon fra bjelken ved temperaturendringer. Heltrebjelkene hadde større fuktøkning i området nær dampsperrsjiktet sammenlignet med I-bjelkens flens. I-bjelkens flens har bedre forutsetninger for uttørking på grunn av ujevn fuktfordeling, og fordi den kan tørke ut fra flere sider. Prøveboksen med AirGuard Smart generasjon 2 viste seg å ha lavere uttørking, og større fuktopptak i bjelken. Dette forklares med at generasjon 2 har en høyere Sd ved variert RF sammenlignet med Air Guard smart generasjon 1. Uisolert installasjonssjikt på dampsperrens utside viste ikke store forskjeller i RF-nivå sammenlignet med boksen som ikke benyttet utlekting. Boksen med I-bjelken tørket ut raskere sammenlignet med boksene med heltrebjelker. Heltrebjelkenes fuktbufferingseffekt senker RF i boksen og reduserer dermed uttørkingshastigheten. Resultatet for total uttørking viste at boksene med AirGuard Smart generasjon 1 og heltrebjelke hadde lik uttørking som boksen med I-bjelke. På grunn av begrensninger ved veing, og måleusikkerheter ved første forsøk førte det til at det ikke var mulig å skille hvilken prøveboks som hadde den høyeste uttørkingsgraden.

Fuktøkningen i bjelkene oversteg ikke 20 vekt-% i vesentlig grad. Det var en periode på 17 dager at fuktinnholdet var over 20 vekt-% i kontaktflaten mellom bjelken og kryssfinerplaten for boksene med AirGuard Smart generasjon 1. Fra uttørkingen startet var fuktinnholdet for de tre boksene under 20 vekt-% etter fire dager. Konklusjon er at RF i boksene, og vekt-% fuktinnhold i trevirke ikke overskrider kriteriene for muggsoppfare over lengre perioder. Forsøkene viser derfor at smarte dampsperrer kan ha potensiale til å gi tilstrekkelig uttørkingmuligheter av kompakte tak for å unngå skader på trevirke mellom tettesjiktene i kompakte treak.

Resultater fra laboratorieforsøk nr. 2

I laboratorieforsøk nr. 2 ble kryssfinerplatene og bjelkene fuktet opp i vannbad i tre prøvebokser. I den fjerde og siste prøveboksen ble kun kryssfinerplaten fuktet i vannbad. Resultatene fra forsøk nr. 2 ble hentet ut 21 dager etter forsøkets start. I prøveboksene hvor bjelkene ble fuktet opp tørker kryssfinerplatene ut tregere sammenlignet med boksene hvor bjelken ikke var fuktet opp. Det skyldes at bjelkene med høyt fuktinnhold tørket ut og bidro til

å øke RF inne i boksen. Kryssfinerplaten i prøveboksen som ikke hadde oppfuktet bjelke tørket ut raskere sammenlignet med tilsvarende prøveboks i forsøk nr. 1. Det skyldes at kryssfinerplaten allerede hadde gjennomgått høy oppfukning etterfulgt av en tørkeperiode i forsøk nr. 1. Videre førte det til at RF økte raskere under kryssfinerplaten. I kontaktflaten mellom bjelke og kryssfinerplate økte fuktinnholdet i bjelken raskere sammenlignet med en tilsvarende prøveboks fra forsøk nr. 1. Bjelkene med høyt fuktinnhold tørket ut raskt den første uka i områder nær dampsperrsjiktet. De siste syv dagene var uttørkingen minimal da RF-nivået over dampsperrsjiktet lå mellom 85- og 95 % RF i siste periode for alle boksene.

Én av boksene i forsøk nr. 2 benyttet AirGuard Smart generasjon 2 med belagt side ut i konstruksjon. Det medfører høyere Sd-verdier ved variert RF sammenlignet med å montere belagt side inn, som gir bedre uttørking ved høy RF. Boksen med generasjon 2 og belagt side ut viste tregere uttørking og høyere RF-nivåer i prøveboksen. For de siste dagene i perioden på 21 dager hadde RF over dampsperrsjiktet nådd kondensnivå i denne boksen. Fuktmålinger viste også et fuktopptak i bjelken den siste perioden for områdene nær dampsperrsjiktet i boksen med AirGuard Smart generasjon 2 belagt side ut.

Prøveboksen med AirGuard Smart generasjon 1 hadde den høyeste uttørkingsgraden etter 21 dager. Air Guard Smart generasjon 2 med belagt side inn hadde lik uttørkingsgrad som generasjon 1 etter 7- og 14 dager, men lavere total uttørking etter 21 dager. AirGuard Smart generasjon 2 med belagt side ut hadde lavest uttørkingsgrad i forsøk nr. 2. Etter perioden på 21 dager hadde denne boksen tørket ut halvparten av fuktinnholdet sammenlignet med bruk av generasjon 2 med belagt side inn.

Videre innhenting av resultater fra forsøk nr. 2 vil vise om uttørkingen av boksene med høyt fuktinnhold i både kryssfinerplate og bjelke kan redusere risikoen for mugg- og råteproblemer ved å benytte smarte dampsperrer.

Summary

Intelligent vapour retarders in Norwegian constructions are not widely used since the vapour retarder is still considered a niche product. One of the reasons for its low use is due to limited research on the product group for the Norwegian climate. Previous attempts at NTNU have shown that intelligent vapour retarders have a potential for inward drying of moist in compact roof constructions. Further research is needed to ensure that the positive effect of using intelligent vapour retarders does not cause a greater risk for the total moisture management of buildings.

Computation of former research at NTNU

A part of this master's thesis has been post-calculations of previous laboratory research results at NTNU, and to validate the material parameters of intelligent vapour retarders. Access to data logged during the research project in 2012 provided good conditions for the post-calculation. It has been focused on analysis of the material parameters, since they represent the greatest uncertainty when reproducing the results in a simulation.

Three intelligent vapour retarders were controlled in the post-calculation. These were Intello, Novaflexx and AirGuard Smart Generation 1. Material parameters for Intello and Novaflexx were available in the WUFI-database. AirGuard Smart was defined as a new material with material parameters obtained from the manufacturer, and from an experiment conducted at SINTEF Byggforsk. The results from simulations with Intello matched poorly with the laboratory results. Novaflexx simulations had a good match with the former research results. Post-calculation with the material parameters used for AirGuard Smart Generation 1 provided a good approximation of the laboratory results. The simulations show that quantitative and qualitative material parameters are required in order to reproduce results from actual laboratory research. At the same time, it is assumed that the material parameters must be adapted to the limitations of the simulation tool in order to imitate real experiment results.

Laboratory research experiment

This master's thesis takes on the next step in research on the use of intelligent vapour retarders in compact roofs. The laboratory experiments done as a part of this master's thesis have investigated the effect of placing a wooden beam in to the insulation layers. If the results show that wood inside the compact roof can avoid the risk of mold- and rot problems using intelligent vapour retarders, it is possible to reduce the roof thickness, reduce the material usage and allow for a more efficient construction process with economic benefits.

By using the same preconditions for the research experiment in this master thesis as in previous laboratory experiments at NTNU, it has been possible to compare the results. AirGuard Smart was chosen as the intelligent vapour retarder in the experiments, since this product showed faster drying rates and highest total drying compared to other products in previous experiments at NTNU. A new generation AirGuard Smart was also tested in the laboratory research to compare with AirGuard Smart Generation 1. Two laboratory experiments were conducted in this master's thesis. In the first experiment only the plywood

had high moisture content at the start of the experiment. For the second experiment both the wooden beam and plywood were pre-moisturized to gain high moisture content in the material at start.

Laboratory experiment No. 1

By comparing previous laboratory experiments, it became apparent that the thickness of the insulation layer affected the fluctuations and the level of RH over the vapour retarder. The RH was higher in all test boxes with 20 cm insulation thickness, compared with the test boxes with 30 cm. More insulation in the roof leads to more room for redistribution of moisture, greater diffusion resistance and a longer path for the water vapour to transport from the top layer to the bottom layer over the vapour retarder by diffusion. Thicker insulation layers do not lead to the difference in RH alone, the wooden beams will also have an effect on RH between the membrane layers in the compact roof. The RH was in average highest above the vapour retarder during the test period. At the start of the experiment, RH was highest under the plywood since it had high moisture content at start. The results showed that the RH level above the vapour retarder was strongly influenced by the temperatures above the test boxes.

By comparing the test results from the boxes with wooden beams from the experiment done in this master's thesis they show that the wooden beams have a moisture buffering effect. The fluctuations in RH were lower in areas near the wooden beam, but had a higher RH level due to desorption from the wooden beam when the temperature changes. The wooden beams had a greater moisture increase in the area near the vapour retarder compared to the wooden I-beam flange. The wooden I-beam flange has better preconditions for drying due to uneven moisture distribution in the flange and because it can dry out from several sides compared to the wooden beam. The test box with AirGuard Smart Generation 2 appeared to have a lower drying potential and increased moisture absorption in the wooden beam. This is explained by the fact that the generation 2 vapour retarder has a higher Sd at varied RH compared with the AirGuard Smart Generation 1. Uninsulated installation layer on the outside of the vapour retarder did not show significant differences in RH compared to the test box that did not have this layer. The test box with the wooden I-beam dried out faster compared to the test boxes with wooden beams. The moisture buffering effect of the wooden beams reduces the RH in the box, thus reducing the drying rate. The result of total drying for each box showed that the boxes with AirGuard Smart Generation 1 and wooden beam had the same total drying as the box with the wooden I-beam. Due to limitations on weighing and measurement uncertainties in the first experiment, it was not possible to distinguish which test box had the highest drying rate.

The moisture increase in the wooden beams did not exceed 20 weight-% to a significant extent in the first laboratory experiment. It was a 17-day period that the moisture content was above 20 weight-% in the contact area between the wooden beam and the plywood for the test boxes with AirGuard Smart Generation 1. It took about four days from the period where the drying started until the three boxes were below 20 weight-%. The conclusion is that the RH in the boxes and the moisture content in weight-% does not exceed the criteria for mold danger over extended periods. The research experiment therefore show that intelligent vapour

retarders may have the potential to provide adequate drying possibilities of compact roofs to avoid damage to the materials between the membrane layers in compact roofs.

Laboratory experiment No. 2

In laboratory experiment No. 2 three test boxes had high moisture content in the plywood and the wooden beams at start. In the fourth test box only the plywood had high moisture content at start. The test results from the second experiment were collected 21 days after start. In the test boxes where the wooden beams had high moisture content the plywood dried slower compared to the test box where the wooden beam had low moisture content. This is due to the fact that the wooden beams with high moisture content dries and contributes to the rise of RH. The plywood in the test box that didn't have high moisture content in the wooden beam dried faster compared to a similar test box in experiment No. 1. This is due to the fact that the plywood had already been subjected to high moisture content followed by a long drying period. Furthermore this led to the RH increasing faster underneath the plywood. Which lead to a faster increase in moisture content in the wooden beam for the contact area between the wooden beam and the plywood for this test box compared to a similar test box from experiment No. 1. The wooden beams that had high moisture content from start dried out quickly the first week in the areas near the intelligent vapour retarder. For the last seven days the drying was minimal as the RH level above the vapour retarder was between 85- and 90 % for all test boxes.

One of the test boxes in experiment No. 2 used AirGuard Smart Generation 2 with the coated side out. This causes the vapour retarder to have higher Sd values at varied RH compared to assembling the vapour retarder with the with the coated side in, which provides better drying at high RH. The test box with AirGuard Smart Generation 2 coated side out showed slower drying and higher RH levels inside the box. For the last days in the 21 day period, the RH over the vapour retarder had reached condensation level. Moisture measurements in the wooden beam close to the vapour retarder showed moisture absorption in the wooden beam during the last period for the box with AirGuard Smart generation 2 coated side out.

The test box with AirGuard Smart generation 1 had the highest drying rate after 21 days. AirGuard Smart Generation 2 with coated side in had similar drying rate as generation 1 after 7- and 14 days, but slightly lower total drying after 21 days. AirGuard Smart Generation 2 with coated side out had the lowest drying rate. This test box had dried out half of the moisture content that was dried out using AirGuard Smart Generation 2 with the coated side in.

Further results from experiment No. 2 will indicate if intelligent vapour retarders can contribute to the drying of the high moisture contents in both plywood and wooden beams to reduce the risk of mold and rot problems.

Innholdsliste

1	Innledning.....	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Formål.....	2
1.3	Oppbygging.....	2
1.4	Metode	3
2	Beskrivelse av sperresjikt og fuktproblematikk i kompakte tak.....	4
2.1	Kompakte tak	4
2.2	Årsaker til fuktinntrengning i kompakte takkonstruksjoner	4
2.3	Forutsetninger for muggsopp- og råtevekst i konstruksjoner	5
2.4	Dampsperrmaterialer	7
2.4.1	Tradisjonelle dampsperrer	7
2.4.2	Dampbrems	7
2.4.3	Smarte dampsperrer (SDS).....	8
3	Etterberegning av tidligere laboratorieforsøk ved NTNU	10
3.1	Generelt.....	10
3.2	Oppbygging av laboratorieforsøket våren 2012	10
3.3	Simuleringsverktøy	12
3.3.1	Transportmekanismer og forenklinger.....	12
3.4	Materialparametere i WUFI	13
3.4.1	Generelt.....	13
3.4.2	Materialer benyttet til etterberegning.....	14
3.5	Grense- og startparametere.....	18
3.6	Resultater og vurderinger	21
3.7	Oppsummering og konklusjon av etterberegning.....	28
4	Laboratorieforsøk.....	30
4.1	Hensikt.....	30
4.2	Valg av SDS til laboratorieforsøk	30
4.2.1	AirGuard Smart (AGS).....	32
4.3	Laboratorieforsøkernes oppbygging.....	33
4.4	Kompakttakprøvene	35
4.4.1	Generelt.....	35
4.4.2	Oppbygging av prøveboksene	38
4.5	Oppfuktingsprosessen.....	42

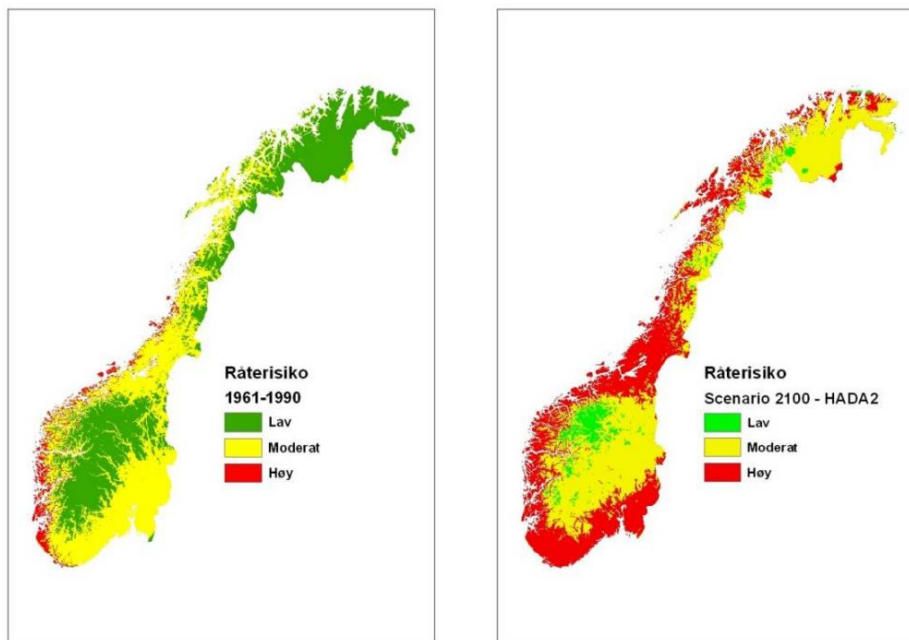
4.6	Klimaforhold	45
4.6.1	Utvendig klima.....	46
4.6.2	Innvendig klima	47
4.7	Målinger	47
4.7.1	Uttørkingsevne	48
4.7.2	Trefuktighetsmålinger	48
4.7.3	Måling av RF og temperatur	50
4.8	Måleusikkerheter og forenklinger	51
4.9	Resultater og vurderinger	56
4.9.1	Uttørkingsevne	56
4.9.2	RF-målinger	60
4.9.3	Trefuktighetsmålinger	80
4.10	Oppsummering og konklusjon for laboratorieforsøk.....	97
5	Konklusjon	102
6	Videre arbeid	105
7	Referanser	106
8	Vedlegg	109

1 Innledning

I dette kapitlet fremgår det en forklaring om bakgrunnen for prosjektet, problemstilling, dens formål, og prosjektets omfang.

1.1 Bakgrunn

I Norge har vi i løpet av året og sesongene store klimavariasjoner. Regn, vind, snø og sol skaper påkjenninger på byggene som de er nødt til å takle over byggets levetid. I de senere årene har det vært registrert en økt andel av nedbør og høyere temperaturer i landet. Dette samsvarer med de klimaendringene som forskere rundt i verden har forespeilet (Miljødirektoratet, 2013). I 2010 la SINTEF Byggforsk frem en rapport til Statens bygningstekniske etat (SINTEF Byggforsk, 2010). Denne rapporten hadde fokus på det fremtidige klimaet i Norge, hvor faren for råteskader var et sentralt tema for norske bygningsmasser i møte med fremtidige klimapåkjenninger som er forespeilet. Figur 1 viser kart over råterisikoen i Norge fra år 1990, og for år 2100.



Figur 1. Kart over potensiell råterisiko i Norge fra år 1990 og for år 2100 (SINTEF Byggforsk, 2010).

SINTEF Byggforsk startet i april 2015 et forskningsprogram kalt Klima 2050 (Klima 2050, 2017). Formålet med Klima 2050 er å finne løsninger som kan være med på å redusere risiko for samfunnet ved klimatilpasning av bygninger og infrastruktur i møte med fremtidens klimapåkjenninger. Forskningen som utføres i denne masteroppgaven omhandler fukthåndtering i bygninger, og er derfor blitt inkludert som en del av forskningsprosjektet Klima 2050.

1.2 Formål

I denne masteroppgaven skal det neste steg med studier på bruk av smarte dampsperrer, videre benevnt som SDS, i kompakte takkonstruksjoner. Det har tidligere blitt utført laboratorieforsøk med bruk av forskjellige typer SDS-produkter ved NTNU (Stellander, 2012; Thorsrud, 2012). I de tidligere forsøkene ble det benyttet endimensjonale prøveobjekter hvor det kun var isolasjon i hulrommet mellom taktro og dampsperre. Ved bruk av SDS på innvendig side er det mulig å oppnå innadrettet uttørking når forholdene for dette er tilstede. Mer om hvordan SDS fungerer kan leses i kapittel 2.4.3. Innebygd fukt eller fukt i kompakte takkonstruksjoner som forårsakes av lekkasjer kan skape store problemer i form av mugg- og råtevekst dersom det finnes organisk materiale mellom tettesjiktene.

For å kunne vurdere SDS i nye konstruksjonsløsninger og ved varierte klima, har det blitt utført en etterberegning av tidligere laboratorieforsøk ved NTNU for å validere materialparametere til ulike SDS-produkter. Etterberegningsstudiet hadde som mål å validere materialparameterne ved å gjenskape resultatene fra et tidligere laboratorieforsøk i simuleringsverktøyet WUFI. Dersom materialparameterne for SDS-produktene samsvarte godt med tidligere laboratorieresultater vil materialparameterne kunne benyttes til å utføre gode simuleringer med f.eks. andre klimaforhold, nye startbetingelser og nye konstruksjonsløsninger.

Masteroppgaven vil også ta for seg neste steg med forskning på SDS. Ved hjelp av to laboratorieforsøk skal en se på effekten av å plassere bjelker inne i et kompakttak med SDS og et høyt startfuktinnhold. Kompakte tak er en ømfintlig konstruksjon, som med dagens byggeskikk ikke har tiltenkt utlufting. Det er ønskelig å se om bruk av SDS som innvendig damptettesjikt kan gjøre konstruksjonstypen mer robust mot fuktskader. Plasseres bæresystemet for kompakttak inne i isolasjonssjiktet uten fare for fuktskader, er det mulig å redusere takets tykkelse, redusere materialbruk og det tillater en mer effektiv byggeprosess med økonomiske fordeler.

Problemstillingen for oppgaven handler om å innhente ny data til forskning på smarte dampsperrer slik at man kan justere og validere tidligere forskning ved NTNU. Videre ønsker en å se på bjelkelagets betydning for fuktforholdene i kompakte tretak med smarte dampsperrer siden dette ikke er forsket på tidligere.

1.3 Oppbygging

Masteroppgaven er todelt. Første del av oppgaven omhandler etterberegning av et tidligere laboratorieforsøk utført ved NTNU våren 2012 (Stellander). Etterberegningen har som mål å validere materialparametere til SDS ved hjelp av simuleringsprogrammet WUFI. Andre delen av rapporten omhandler to laboratorieforsøk med ulike konfigurasjoner av kompakte tretak og variert startfukt. Det første forsøket ble utført med høy startfuktighet i taktro. Det andre forsøket ble utført med høy startfuktighet i taktro og bjelke. Ved hjelp av RF-sensorer og

trefuktighetsmålere ble fuktvandring inne i prøveboksene registrert. Fuktvandring ut av boksene ble registrert ved hjelp av veiing.

1.4 Metode

Første delen av oppgaven som omhandlet etterberegning ble utført med simuleringsverktøyet WUFI. En forutsetning for å kunne sammenligne en simulert situasjon med et eksperimentelt laboratorieforsøk er et godt datagrunnlag. Data som ble loggført i laboratorieforsøket fra 2012 for innvendig-, og utvendig klima ble oversendt fra veileder (Stellander, 2012). Data fra målinger inne i boksene og manuelle registreringer ble tilsendt samtidig. Først ble rapporten for forsøket gjennomlest, slik at en var bevisst på fremgangsmetode og usikkerheter for laboratorieforsøket. Før simuleringsarbeidet startet ble det benyttet god tid på å sette seg inn i hvordan simuleringsverktøyet behandlet numeriske parametere for å få oversikt over hvilke parametere som var av størst betydning for resultatene. Det ble tatt i bruk to versjoner av WUFI til etterberegningen. WUFI Pro, som er et relativt brukervennlig verktøy med enkelt brukergrensesnitt, og WUFI 2D som har ganske lik layout, med flere avanserte valgmuligheter. I WUFI 2D kan en som navnet tilsier simulere to-dimensjonale situasjoner. WUFI Pro gir kun mulighet for en-dimensjonale simuleringer. Til etterberegningen var en-dimensjonal simulering tilstrekkelig. Begrunnelsen for å simulere i WUFI 2D var basert på at dersom en klarte å gjenskape resultatene med SDS i en-dimensjonal simulering, var det en mulighet for å validere de samme materialparametere med to-dimensjonal simulering for det første laboratorieforsøket i denne oppgaven. En nærmere beskrivelse av fremgangsmetoden som er benyttet utredes i kapittel 3, som omhandler etterberegningen.

Laboratorieforsøkene ble utført i laboratoriet til SINTEF Byggforsk og NTNU. Utstyret som er tilgjengelig i laboratoriene er av høy kvalitet, og beregnet for bruk i eksperimentelle laboratorieforsøk. Et av målene med laboratorieforsøkene er å samle inn data som kan benyttes til å validere materialparametere til SDS i etterberegninger. I lys av dette har målinger, veiinger og registrering av data blitt nøye utført og fulgt opp i alle små og store laboratorieforsøk som er utført i denne masteroppgaven. Som nevnt i avsnittet over vedrørende simuleringsarbeid, kan etterberegning av laboratorieforsøk ikke valideres uten et godt datagrunnlag. Målemetoder og instrumenter som er benyttet i laboratoriearbeidet er beskrevet i kapittel 4.7. Uforutsette problemer som tekniske feil er derimot vanskelig å sikre seg mot. I kapittel 6.8 er måleusikkerheter knyttet til laboratoriearbeidet beskrevet nærmere.

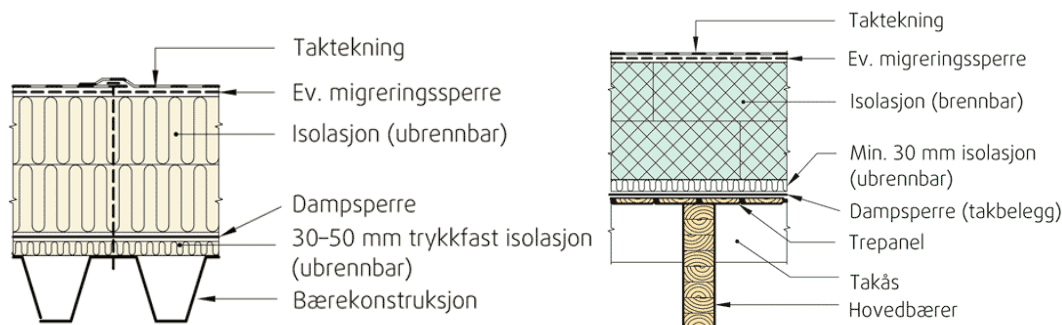
2 Beskrivelse av sperresjikt og fuktproblematikk i kompakte tak

I dette kapittelet fremgår det en beskrivelse av kompakte tak, og årsaker til fuktinntrengning i kompakte tak. Videre blir det presentert en beskrivelse av forutsetninger for mugg- og råteproblemer, og hvilke dampsperreprodukter som finnes på markedet.

2.1 Kompakte tak

Kompakte tak, som også har benevnelse varme kompakte tak, er takkonstruksjoner som består av ett eller flere lag som er tettpakket uten noen form for tilsiktet lufting mellom sjiktene (Byggforskserien, 2007). Kompakte tak konstrueres i dag med fukttettesjikt på over- og undersiden av isolasjonssjiktet. Bæresystemet av tre eller betong anbefales plassert på takets innside under første fukttettesjikt, se Figur 2. De vanligste tettesjiktmaterialene brukt for kompakte tak i dag er asfalttakbelegg (bitumen) på utvendig side og PE-folie på innvendig side. Bakgrunnen for å plassere bæresystemet i treverk under kompakttakkonstruksjonen er for å unngå fare for fuktakkumulering mellom tettemembranene som kan skade bæresystemet, og for å forhindre mugg- og soppvekst.

I Norge er det hovedsakelig tre typer kompakte takkonstruksjoner. De tre typene er rettvendte tak, omvendte tak, og duotak (Byggforskserien, 2007). Kompakttakene kan bygges som skråtak eller som flate tak (helning mindre enn 6° (1:10)). Forskingen som blir utført i denne oppgaven tar for seg flate rettvendte kompakttak (se Figur 2), og er en av de mest bygde kompakttaktypene i Norge.



Figur 2. Eksempler på rettvendte kompakte takkonstruksjoner (Byggforskserien, 2007).

2.2 Årsaker til fuktinntrengning i kompakte takkonstruksjoner

Dette kapittelet beskriver hvilke typer skadeårsaker som ofte fører til fuktproblemer i kompakte tak.

Konstruksjoner og byggverk sin største fiende er fuktrelatert. Både vann i flytende fase og i form av vanndamp. Vanndamp som transporteres i deler av konstruksjon ved diffusjon vil kondensere dersom nedkjølingen av lufta når metningspunktet. Kondens i sårbare deler av klimaskallet med organisk materiale kan føre til at materialegenskapene svekkes dersom

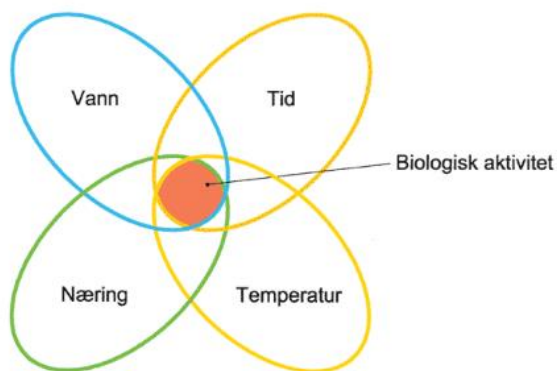
mugg- og råtevekst oppstår. Kompakte tak er ekstra sårbare for fuktproblemer da disse takkonstruksjonene er konstruert med et damptettesjikt på innvendig og utvendig side av isolasjonssjiktet, uten noen form for tilsiktet lufting, se Figur 2. Dårlig utførelse har tidligere ført til fuktskader i kompakte tak og gitt taktypen et dårlig rykte. Dette kan grunnes i dårlig kompetanse blant utførende. Man ser fremdeles en del skader i senere tid som skyldes dårlig utførelse, selv om kompetansenivået blant utførende er blitt bedre. Nedenfor er det listet opp ulike årsaker som fører til at fukt oppstår inne i kompakte tak (Noreng, et al., 2012).

- Innebygd fukt fra byggeperioden.
 - Fuktige materialer som monteres i konstruksjonen.
 - Dårlig tildekking av konstruksjon i byggeperioden når bygget er utsatt for nedbør.
- Manglende fall på tak. (Vann blir stående på taket og skaper et vanntrykk. Dette reduserer taktekkingsens levetid.)
- Tette nedløp på grunn av manglende vedlikehold demmer opp for vannavrenning.
- Manglende overvannsløp. (Forekommer ofte mot vegger eller mot andre takkonstruksjoner.)
- Hull i tekkingen. (Skyldes mekaniske påkjenninger.)
- Kondens som oppstår ved at fuktig inneluft strømmer opp gjennom utettheter i takets dampspærre, mot kaldere deler av klimaskallet.
- Dårlig utførte tekkearbeider.
- Manglende tekking og beslag på parapeter.
- Punkteringer av taktekkingen som skyldes innfesting av tekniske installasjoner på taket.

Dersom det oppstår fukt mellom tettemembranene i et kompakttak som ikke er luftet, kan isolasjonsmaterialenes isolasjonsevne reduseres. Dersom det er blitt benyttet organisk materiale i form av trevirke i et rettventt kompakttak som har fuktlekkasjer, er risikoen for mugg- og råteskader stor. Potensiale for sopp- og muggvekst er beskrevet nærmere i kapittel 2.3.

2.3 Forutsetninger for muggsopp- og råtevekst i konstruksjoner

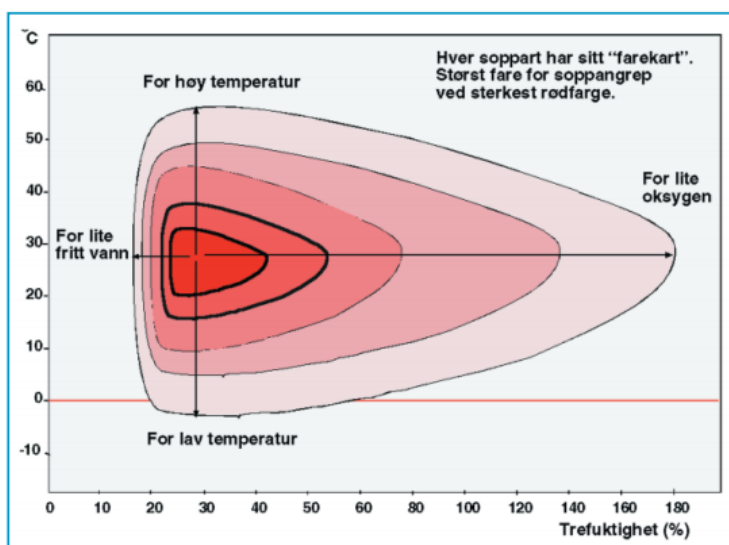
Det er fire forutsetninger som må tiltre for at biologisk aktivitet i form av muggsopp og råtevekst skal oppstå i en bygningskonstruksjon. De fire forutsetningene er vann, næring, temperatur, og tid til at soppveksten skal få utvikle seg, se Figur 3.



Figur 3. De fire forutsetningene for at vekst av muggsopp skal utvikle seg (Byggforskserien, 2005).

Hovedsakelig skyldes tilgangen til fukt i kompakte tak innebygd fukt og/eller lekkasjer. Næring til sopp- og råteangrep finnes i alt organisk materiale. I dagens kompakttak uten trevirke mellom sperresjiktene får den biologiske aktiviteten hovedsakelig næring fra isolasjonsmaterialer. Bindemiddelene som benyttes til å produsere mineralull inneholder næring som kan bidra til biologisk vekst (Bakke, 2010). Det finnes flere arter av muggsopp, og de har varierende forhold for optimal- fuktinnhold, temperatur og RF, som bidrar til at arten skal vokse og utvikle seg. For muggsopp er gunstig temperatur for biologisk aktivitet til de fleste artene mellom 25 °C til 30 °C (Holme & Geving, 2010). Ved RF over 80 % og temperatur på 20 °C, er fuktinnholdet i treverk omtrent 20 vekt-%. Ved 20 vekt-% fuktinnhold i trevirke er faren for muggvekst på treoverflater stor. Når RF nærmer seg 100 % ved treoverflater, vil flere arter få gode vekstbetingelser. Samtidig vil artenes veksthastighet også øke med økende fuktnivå (Holme & Geving, 2010).

Nedenfor vises et farekart for utvikling av muggsoppskader i trevirke. Selv om hver soppart har sitt eget farekart, gir farekartet en god indikasjon på hvilke temperatur og trefuktighetsprosent som gir økt fare for soppvekst.



Figur 4. Farekart for utvikling av soppangrep (Treteknisk, 2000).

2.4 Dampsperrmaterialer

Det finnes flere typer smarte dampsperrer på markedet. Dette kapittelet inneholder en introduksjon til dampsperrene.

Damp tettemembraner benyttes tradisjonelt i yttervegger, tak og platefundamenter i norske bygg. I Norge blir dampsperrer vurdert ut fra damp tettheten med benevnelsen Sd. Sd-verdien til et materiale, også kalt ekvivalent luftlagstykkelse, angir tykkelsen på et stillestående lag med luft som har samme diffusjonsmotstand som materialsjiktet (Byggforskserien, 2003a). Enheten til Sd er meter (m), og er beregnet ved å multiplisere materialtykkelsen d , med materialets motstandsfaktor μ .

I dag finnes det hovedsakelig tre typer dampsperrer tilgjengelig på markedet. De tre typene vi skiller mellom er tradisjonelle dampsperrer, dampbremseser og smarte dampsperrer (SDS).

2.4.1 Tradisjonelle dampsperrer

Polyetylen folie (PE-folie) er den mest anvendte tradisjonelle dampsperreren som blir benyttet i norske konstruksjoner. PE-folien er nesten helt fukt- og damp tett med Sd-verdi på mellom 24- og 90 m, avhengig av dampsperrens tykkelse. De årlige temperaturvariasjonene i det norske klimaet gjør at PE-folien er en sikker løsning mot utadrettet dampdiffusjon. Utadrettet dampdiffusjon betyr at inneluft med høyt fuktinnhold prøver å trenge ut gjennom klimaskallet. Denne problemstillingen er størst i de kalde årstidene. På grunn av gjennomføringer, overlapper og punkteringer som kan oppstå i monteringsperioden er det vanskelig å oppnå et tett dampsperrersjikt rundt hele byggets klimaskall. Lekkasje i tettesjiktet kan skape fuktproblemer i klimaskallet over tid, men med korrekt- og nøyaktig utførelse, samt å benytte egnede tettemansjetter for gjennomføringer, kan de store problemene forhindres. Problemstillingen med punkteringer, utførelse, og bruk av egnede mansjetter for gjennomføringer er gjeldene for alle typer membraner som skal forhindre fukt- og luftgjennomgang i konstruksjoner.

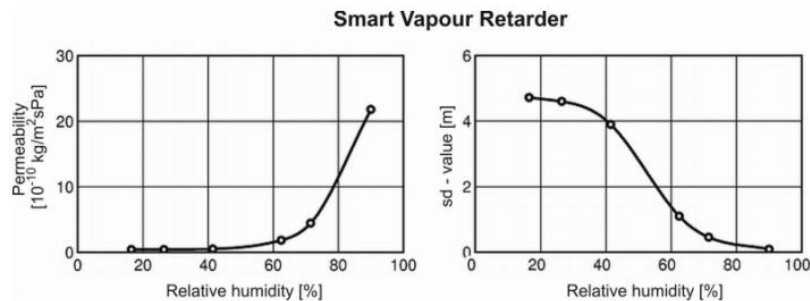
2.4.2 Dampbrems

Dampbrems er et materiale som kjennetegnes ved at den har lavere Sd enn minimumskravet til PE-folie, og høyere Sd enn maksimumskravet til vindsperreren. SINTEF Byggforsk anbefaler at Sd-verdien til dampsperrer for generell bruk er minst 10 m, og for vindsperrer ikke overstiger Sd på 0,5 m (Byggforskserien, 2003a). Det betyr at Sd til dampbremseser ligger i området $0,5 \text{ m} < Sd < 10 \text{ m}$. Sd til dampbremseser er ofte oppgitt med en konstant verdi fra produsent, men enkelte produkter kan ha et stort variasjonsområde (Geving, et al., 2010). Ved at dampbremsen er mer dampåpen sammenlignet med tradisjonelle dampsperrer, tillater den innadrettet uttørking når forholdene for dette er til stede. Bakdelen med en mer dampåpen dampsperre er at den kan bidra til økt fuktopptak i klimaskallet i oppvarmingsperioden, når innvendig luftfuktighet er høyere enn det utvendige klimaet som er tørt og kaldt. Foruten de designede dampbremsene finnes det også andre materialer som kan fungere som

dampbremsere. Eksempler på slike materialer kan være sponplater, kryssfinerplater og OSB-plater (Geving, et al., 2010).

2.4.3 Smarte dampsperrer (SDS)

Dampsperrer som har evne til å regulere sin damptetthet (S_d) avhengig av fuktigheten i lufta (RF) omtales ofte som «smarte» dampsperrer. Når RF-nivået på inn- og utsiden av dampsperreren øker eller reduseres, endres molekylstrukturen i materialet. Ved høy RF på utsiden av sperren, vil molekylene svulle opp og slippe fukt gjennom materialsjiktet. Ved lav RF på utsiden krymper molekylene og danner et tettere nettverk av molekyler som fører til at dampsperreren får høy damptetthet. Man kan si at dampsperreren har lav S_d i fuktig tilstand, og høy S_d i tørr tilstand. Figur 5 viser i prinsipp hvordan permeans og dampmotstand til smarte dampsperrer endres, avhengig av RF. Figuren er kun en illustrasjon, og er dermed ikke gjeldende for alle SDS-produkter.



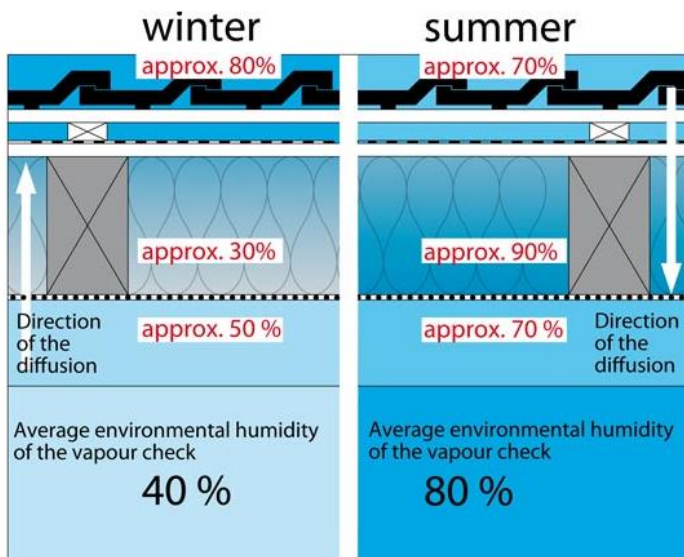
Figur 5. Permeabilitet som funksjon av RF til venstre, og vanddampmotstand som funksjon av RF til høyere (Bludau & Künzel, 2009).

Endring av RF inne i konstruksjonsdeler påvirkes av to forhold. Tilgangen på fukt-, og temperaturen inne i konstruksjon. Om sommeren oppstår det ofte høye temperaturer over tak på grunn av kortbølget stråling fra sola som absorberes på takoverflaten. Skygge påvirker også temperaturen, spesielt på saltak hvor det oppstår perioder hvor kun en takflate får direkte solstråling. Med flate tak oppnår man derimot høye temperaturer på hele takflaten på klare sommerdager dersom det ikke er nabobygg eller objekter på taket som skaper lokale skyggesoner. Temperaturen på flate tak i Norge kan om sommeren overstige 60 grader (Geving & Holme, 2009). De høye temperaturene på takoverflaten fører til at fukt i taket fordampes og øker vanddampmengden (RF) i lufta inne i taket, gitt at det er fukt i konstruksjon.

I Norge er inneklimatet om sommeren normalt 23 °C og 50 % RF i et godt isolert hus bygd etter TEK 10 standard. Hvis det har oppstått fukt i et kompakttak, kan RF i isolasjonssjiktet ved dampsperra om sommeren bli veldig høyt (for eksempel 80 % RF eller høyere avhengig av temperatur og fuktinnhold i taket). Høy RF på dampsperrers utside gjør at dampmotstanden til sperresjiktet synker (lavere S_d). Damptrykkforskjellen på hver side av dampsperreren fører til at dampmolekyler fra luftvolumet med høy vanddampkonsentrasjon vil diffundere mot luftvolumet med lavere vanddampkonsentrasjon (Thue, 2016). Når vanddamp

diffunderer inn i et bygg kalles det ofte innadrettet uttørking. Diffundert vanndampmengde per tids- og flateenhet kan beregnes med Ficks diffusjonslov.

For den kalde årstiden vil inneklimate normalt ha høyere RF i forhold til utvendig klima. Dette skyldes at de lave temperaturene ute fører til et lavt fuktinnhold i lufta, samtidig som oppvarming av inneluft og innvendig fukttilskudd øker RF innomhus. Under slike forhold vil det oppstå et utadrettet uttørkingspotensiale. Derfor er det viktig at dampsperreren har høy vanndampmotstand (høy S_d) når RF er lav på utsiden av sperresjiktet, slik at vanndamp ikke diffunderer inn i klimaskallet og kondenserer. Figur 6 viser eksempel på typiske verdier for RF over, under og inne i dampsperrsjiktet for sommer- og vinterperioden.



Figur 6. Illustrasjon av en takkonstruksjon med eksempel av typisk verdier for RF (Green Building Press, 2008).

3 Etterberegning av tidligere laboratorieforsøk ved NTNU

I dette kapitlet presenteres etterberegningsarbeidet med å validere materialparametere for SDS. Først presenteres en kort beskrivelse av laboratorieforsøket som ble utført ved NTNU våren 2012.

3.1 Generelt

Våren 2012 ble det skrevet en masteroppgave ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU, hvor det i et laboratorieforsøk ble kontrollert uttørkingsgrad til forskjellige SDS-produkter (Stellander, 2012). Målet var å vurdere hvilke av produktene som ga best uttørking i et kompakttak for et norsk sommerklima med høye temperaturer på takoverflaten. En del av masteroppgaven har gått ut på å reprodusere resultatene fra laboratorieforsøket fra våren 2012 i en simulering. Klarer man å gjenskape resultatene fra et laboratorieforsøk ved hjelp av simulering hvor det er benyttet like grenseparametere, vil det gi en bekreftelse på at dataene for materialegenskapene har god nøyaktighet. Når resultatene fra simuleringen stemmer med reelle resultater, kan de samme materialparametere benyttes til å forske på andre forhold som er av interesse. Nye forhold det kan være interessant å utforske ved hjelp av simulering kan eksempelvis være reelle klimasituasjoner, lengre tidsløp, eller nye konstruksjonsoppbygninger. Simulering gjør det enkelt å prøve ut nye problemstillinger. Laboratorieforsøk kan gi reelle- og gode data, men er tidkrevende å gjennomføre. I et fysisk forsøk må man planlegge-, konstruere- og følge opp forsøket. Dette kan være tidkrevende arbeid. Derfor kan simulering være et godt alternativ til praktiske forsøk.

Ved hjelp av simuleringsverktøyet WUFI er målet å gjenskape resultatene fra laboratorieforsøket som ble utført ved NTNU 2012, for å validere materialparametere som kan benyttes i fremtidige simuleringer (Stellander, 2012) (IBP Fraunhofer, 2017).

3.2 Oppbygging av laboratorieforsøket våren 2012

Laboratorieforsøket ble utført ved NTNU og SINTEF Byggforsk sine laboratorier i Trondheim (Stellander, 2012). Dampsperrene som ble kontrollert var Intello, Novaflexx, Hygrodiode og AirGuard Smart generasjon 1. Heretter benevnes AirGuard Smart som AGS. Til sammenligning ble det også laget en prøveboks med PE-folie. Mineralull av glass ble benyttet som isolasjon i hulrommet på prøveboksene, bortsett fra én hvor det ble benyttet ekstrudert polystyren (EPS). Til sammen ble seks takoppbygninger planlagt for forsøket. For å validere resultatene ble det laget to like prøvebokser av hver materialsammensetning som til sammen ga totalt 12 bokser. Figur 7 viser et eksempel på en av prøveboksene.

Oppbyggingen av prøveboksene fra utvendig til innvendig side var som følger:

- Takmembran (Høy Sd – simulert i forsøket ved bruk av plastboks)
- 21 mm kryssfinerplate av gran
- 200 mm mineralull av glass eller EPS
- SDS eller PE-folie
- 9 mm gipsplate
- Takmaling (høy permeabilitet. Sd-verdi på 0,135 m, for gips inkludert overflatebehandling.)



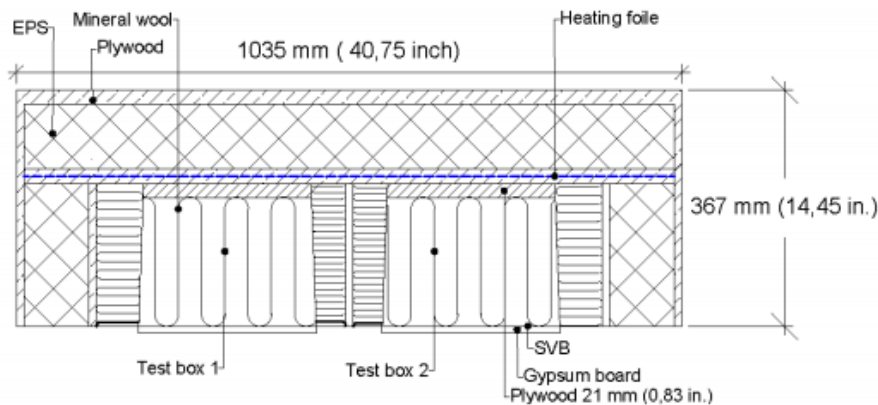
Figur 7. En av prøveboksene benyttet i forsøket fra 2012 (Stellander, 2012).

Kryssfinerplatene i boksene ble fuktet opp til omtrent 30 vekt-% fuktinnhold før de ble plassert i hver prøveboks og forseglet. Kryssfinerplatene inneholdt et høyt fuktinnhold ved forsøkets start, slik at det var mulig å måle uttøringsgraden til prøveboksene.

Inneklimaet var prosjektert til å holde konstant temperatur på 23 °C og 50 % RF som tilsvarer en varm sommerdag i Norge.

Uteklimaet ble bestemt ved hjelp av en forstudie som baserte seg på målinger av sommertemperaturer på tak ved Voll i Trondheim (Geving & Holme, 2009). Forstudien resulterte i en temperatursyklus hvor utvendig side av taket skal holde 45 °C i fire timer hvert døgn gjennom hele forsøksperioden på 60 dager. Veileder for oppgaven tok over registrering av fuktinnhold ved dag 60, og lot boksene forbli montert i riggen i ytterligere 84 dager. Til sammen resulterte det i 144 dager med registrerte data fra forsøket.

Prøveboksene ble plassert i en rigg som var designet for forsøket. Riggen står i et klimarom som gjør det mulig å kontrollere det innvendige klimaet ved hjelp av et klimaskap. Temperatursyklusen for utvendig klima ble styrt med en varmemefolie montert i riggen over prøveboksene, se Figur 8.



Figur 8. Vertikalsnitt av riggen som ble benyttet i forsøket fra 2012 (Geving, et al., 2010).

3.3 Simuleringsverktøy

WUFI er et simuleringsverktøy for koblet varme- og fukttransport i bygningskomponenter. Programvaren er utviklet av Fraunhofer Institut für Bauphysik i Tyskland, og er tilgjengelig i ulike versjoner (WUFI Pro, WUFI 2D, WUFI Pluss og WUFI Passive), avhengig av formålet med simuleringen (IBP Fraunhofer, 2017). WUFI Pro tillater kun en-dimensjonal fukt simulering, og har et intuitivt brukergrensesnitt som gjør det enkelt å bruke. WUFI 2D er mer komplekst en WUFI Pro da programmet kan simulere to-dimensjonale tilfeller av fukt- og varmetransport. Laboratorieforsøket som ble utført i 2012 var konstruert til å fremstille en-dimensjonal fukttransport. Det vil derfor være naturlig å benytte siste utgave av WUFI Pro Versjon 5.3 til etterberegning av forsøket for vertikal vandampdiffusjon ved endimensjonale forhold. Det er også benyttet WUFI 2D til å sammenligne resultatene fra en- og to-dimensjonal simulering, samtidig som det kan bli aktuelt å validere materialparameterne for to-dimensjonale simuleringer på et senere stadium dersom en-dimensjonale simuleringer viser god nøyaktighet.

3.3.1 Transportmekanismer og forenklinger

Fraunhofer Institute für Bauphysik i Tyskland er utvikler av det fysiske og numeriske underlaget for beregningene i WUFI (Künzel, 1995). Tabell 1 gir oversikt over hvilke transportmekanismer som inkluderes i simuleringsprogrammet og hvilke som er utelatt. For en nærmere utredning av transportmekanismene og forenklingene, henvises det til tidligere masteroppgave (Stellander, 2012).

Tabell 1. Oversikt over hvilke transportmekanismer som er inkludert i WUFI, og hvilke som er utelatt (Stellander, 2012).

	Transportmekanismer	
	Inkludert i WUFI	Ikke inkludert i WUFI
Varmetransport	- Varmeledning - Entalpiendringer ved faseovergang i fukt - Kort- og langbølget stråling	- Varmetransport ved konveksjon
Damptransport	- Dampdiffusjon - Løsningsdiffusjon	- Fukttransport ved konveksjon
Væsketransport	- Kapillærledning - Overflatekrypning	- Hydraulisk strømning - Dreneringsstrømning - Elektrokinetiske og osmotiske effekter

I porøse materialer er den overordnede fukttransportmekanismen kapillærtransport. I følge WUFI-wiki, som er et oppslagsverk for brukere av WUFI, er det tilstrekkelig å anse væsketransporten i porene som et diffusjonsfenomen (IBP Fraunhofer, 2017b). Hovedbegrunnelsen til at flytende væsketransport kan beskrives ved hjelp av en diffusjonsformel er at den kan reprodusere den lineære økningen av den absorberte mengden væske over kvadratroten av tiden på en korrekt måte (IBP Fraunhofer, 2017b).

Dette stemmer i henhold til tidligere vurderinger om at vanndampdiffusjon vil være den dominerende mekanismen for fuktopptak i WUFI-simuleringer (Stellander, 2012).

3.4 Materialparametere i WUFI

3.4.1 Generelt

WUFIs materialdata er inndelt i basis- og fuktavhengige parametere. Basisparameterne angir materialeegenskapene i tørr tilstand, og består av:

- Densitet [kg/m³]
- Porøsitet [m³/m³]
- Spesifikk varmekapasitet, tørr [J/kgK]
- Termisk konduktivitet, tørr (10 °C) [W/mK]
- Motstandsfaktor for vanndampdiffusjon [μ]

I de fuktavhengige parameterne er det mulig å definere materialenes egenskaper ved varierende grensebetingelser som temperatur, RF og vanninnhold. De hydrotermiske funksjonene for materialene man har mulighet til å definere i WUFI er:

- Fuktlagringsfunksjon [kg/m³]
(Vanninnhold som funksjon av RF)
- Væsketransportkoeffesient, absorpsjon [m²/s]
(Vantransportkoeffesient for absorpsjon som funksjon av vanninnhold)

- Væsketransportkoeffesient, desorpsjon [m²/s]
(Vanntransportkoeffesient for desorpsjon som funksjon av vanninnhold)
- Motstandsfaktor for vandampdiffusjon, fuktavhengig [μ-verdi]
(Vandampdiffusjonsmotstand som funksjon av RF)
- Termisk konduktivitet, fuktavhengig [W/mK]
(Termisk konduktivitet som funksjon av vanninnhold)
- Termisk konduktivitet, temperaturavhengig [W/mK]
(Termisk konduktivitet som funksjon av temperatur)
- Entalpi, temperaturavhengig [J/kg]
(Entalpi som funksjon av temperatur)

For etterberegning av forsøket fra 2012 er det kun noen av funksjonene som er blitt vurdert, avhengig av materialparameterens relevans for å kunne gjenskape resultatene fra 2012. I enkelte tilfeller er materialparametere i forhåndsdefinerte materialer endret. Dette blir utredet nærmere i kapittel 3.4.2. Parametere det har blitt fokusert på i etterberegningen i forhold til materialenes hydrotermiske egenskaper er fuktlagringsfunksjon, motstandsfaktor for vandampdiffusjon, væsketransport og termisk konduktivitet.

I WUFI finnes det en stor database med materialer som har forhåndsdefinerte materialparametere. Før en velger å bruke de forhåndsdefinerte materialene i databasen bør det gjøres en vurdering av materialparameterne for å se om disse stemmer med de reelle materialene. NTNU har en egen fane i databasen med et lite utvalg av materialer som blir mye brukt i norske konstruksjoner. I noen tilfeller har det vært nødvendig å oppdatere materialparameterne for materialene i databasen med nye numeriske verdier, og i andre tilfeller måtte det defineres helt nye materialer. I WUFI er det mulig å lage egendefinerte materialer dersom man har et godt nok datagrunnlag.

3.4.2 Materialer benyttet til etterberegning

Dette kapitlet beskriver hvordan materialene som ble benyttet i laboratorieforsøket ble definert i WUFI til etterberegningsarbeidet.

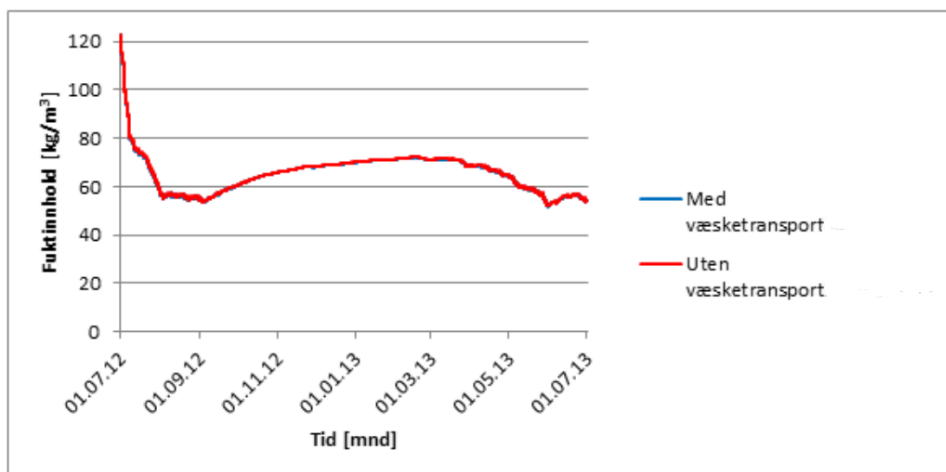
Utvendig takbelegg (bitumen)

Det er besluttet å ikke lage et materialsjikt for å simulere overflatetekking på kompakttaket. I WUFI kan man bestemme Sd-verdi for utvendig overflatesjikt. Her er det valgt en Sd-verdi på 300 m.

Kryssfiner

Databasen til WUFI inneholder flere typer kryssfiner med varierende egenskaper. Kryssfinerplaten som ble valgt var hentet fra katalogen til NTNU hvor materialparameterne er basert på norske produkter av gran. Materialet inneholder alle data for grunnegenskapene i WUFI. Den eneste justeringen som ble gjort for grunnegenskapene til materialet er materialets densitet som ble endret fra 410 kg/m^3 til 500 kg/m^3 . For de fuktavhengige beregningene er det gjort justeringer i funksjonene for fuktlagring, S_d ved variert RF, og fuktavhengig termisk konduktivitet. Endringene er basert på data fra SINTEF Byggforsk (Byggforskserien, 2003c; Byggforskserien, 2016).

I en tidligere masteroppgave fra 2012 ble det utført en studie hvor effekten av væsketransport i kryssfinerplater ble undersøkt i en WUFI simulering (Stellander, 2012). Ved å benytte væsketransportparametere for absorpsjon og desorpsjon hentet fra samme materialtypen i den nordamerikanske fanen i WUFIs materialdatabase, kunne det utføres en sammenligning med- og uten væsketransport. Forsøket viste at fuktinnholdet i kryssfinerplaten med- og uten væsketransport var uendret, se Figur 9.



Figur 9. Sammenligning av kryssfinerplate simulert i WUFI Pro med- og uten væsketransport (Stellander, 2012).

Det er dermed valgt å ikke justere kryssfinerplatenes parametere for absorpsjon og desorpsjon i simuleringene. For disse parametere ble det benyttet pre-definerte parametere fra NTNU hentet i databasen til WUFI.

Mineralull (isolasjon)

Materialparameterne for isolasjonsmaterialet tok utgangspunkt i mineralull fra materialdatabasen til WUFI. Noen materialparametere ble justert med nye verdier hentet fra SINTEF Byggforsk sine kunnskapssystemer og tidligere simuleringer utført i en masteroppgave ved NTNU (Stellander, 2012; Byggforsk, 2004). I den tidligere utførte masteroppgaven ble det utredet viktigheten av sorpsjonskurvene som benyttes i WUFI for mineralull (Stellander, 2012). Materialer som ikke har definert sorpsjonskurve i WUFI vil få tilegnet en standardfunksjon. I følge WUFI-wiki er standardfunksjonen som tildeles materialet

satt til «lavt» fuktopptak opp mot omtrent 80 % RF (IBP Fraunhofer, 2017a). Fuktinholdet blir derfor «kunstig» i forhold til virkeligheten, og bør vurderes varsomt. I følge WUFI-wiki vil kun overskudd av fuktinnhold over den frie metningen i materialet (over 80 % RF) med forsiktighet betraktes som et realistisk mål for mengden kondensert vann i materialet (IBP Fraunhofer, 2017a). Analysen i masteroppgaven fra 2012 resulterte i en egendefinert sorpsjonskurve for mineralull som ga en bedre tilnærming til mineralull sitt virkelige sorpsjonsforløp (Stellander, 2012). Det er valgt å benytte den samme sorpsjonskurven i dette forsøket, se Tabell 2 (egendefinert sorpsjonskurve i fete tall). Den egendefinerte sorpsjonskurven baseres på sorpsjonskurven til mineralull av steinmateriale, og er derfor veldig lik for RF-nivåene opp til 96 %. Viser til tidligere masteroppgave for nærmere utledning av forsøkene som resulterte til den fremstilte sorpsjonskurven benyttet her (Stellander, 2012).

Tabell 2. Ulike sorpsjonskurver for mineralull. Basert på en analyse fra en tidligere masteroppgave ved NTNU (Stellander, 2012).

RF [%]	Fuktinnhold [kg/m ³]		
	Standardfunksjon i WUFI	Sorpsjonskurve til steinull	Egendefinert sorpsjonskurve for SDS
0	0	0	0
20	0,12	0,04	0,04
40	0,31	0,07	0,07
60	0,69	0,08	0,08
80	1,79	0,12	0,12
90	3,83	0,16	0,16
95	7,38	0,23	0,8
96	8,94	0,33	1,8
99	22,71	-	7,0
99,5	30,2	-	8,0
100	44,79	-	8,5

Dampsperrer

I etterberegningsstudien er det tre SDS-produkter fra laboratorieforsøket i 2012 som er blitt kontrollert. Disse er Intello, Novaflexx og AGS generasjon 1. Hygrodiode ble ikke vurdert da dette produktet krever flere parametere i forholdet mellom Sd og RF enn det som var tilgjengelig i materialbladet tilsendt fra Icopal (ICOPAL, 2008). I materialdatabasen til WUFI er Intello og Novaflexx definert av Fraunhofer IBP. I databasen er Novaflexx registrert under navnet Isover Vario KM Duplex som er det tyske navnet på samme produkt. Det er også blitt utført en sammenligning med resultatene hvor det var benyttet PE-folie. Begrunnelsen er for å sammenligne resultatene fra et reelt forsøk i en simulering med en dampsperre som har konstant Sd-verdi, og for å se nærmere på WUFI sine begrensninger. PE-folien som ble benyttet er definert av NTNU i WUFI sin database, og det ble valgt 0,2 mm tykk PE-folie med Sd på 87 m. AGS var ikke tilgjengelig i databasen til WUFI, slik at det var nødvendig å lage et egendefinert materiale for å kunne simulere AGS i etterberegningen. Materialet er basert på Isover Vario KM Duplex (Novaflexx), hvor Sd som funksjon av RF er blitt justert. For tynne materialsjikt (< 1 mm) som dampsperrer, er det antatt at vanddampmotstand er

tilstrekkelig for å gjenskape resultatene fra laboratorieforsøket. Parameterne som er benyttet for Sd ved variert RF for AGS i etterberegningen er data hentet fra DuPont (Katsaros, 2016). Videre ble det anskaffet en prøverapport utført ved SINTEF Byggforsk våren 2013, hvor Sd-verdien til AGS generasjon 1 ble testet i forsøk ved variert RF. Resultatene fra prøverapporten kan sees i vedlegg A. Det definerte AGS materialet har blitt supplert med Sd-verdier fra SINTEF rapporten i simuleringene. AGS sin Sd-verdi fra rapporten til SINTEF Byggforsk og parametere fra DuPont er vist i Tabell 3, sammen med de andre SDS-produktene benyttet i etterberegningen. Sd-verdiene som er benyttet for å bestemme AGS sin vanndamppermeabilitet i simuleringene er som nevnt over en kombinasjon av resultater fra SINTEF Byggforsk og DuPont. Verdiene for egendefinert AGS er vist helt til høyere i Tabell 4 med fete tall.

Tabell 3. Sd-verdier ved variert RF for tre SDS-produkter benyttet i WUFI. Til høyere er en egendefinert AGS generasjon 1 som ble benyttet til etterberegningen.

Intello		Novaflexx (Isover Vario KM Duplex)		AirGuard Smart (AGS) SINTEF		AirGuard Smart (AGS) DuPont		Egendefinert AirGuard Smart benyttet i simulering	
RF [%]	Sd [m]	RF [%]	Sd [m]	RF [%]	Sd [m]	RF [%]	Sd [m]	RF [%]	Sd [m]
0	26	0	4					0	102,5*
17,5	26	10	3,92			12,5	102,5*	12,5	102,5*
25	16	20	3,78	25,45	140	25	34,3	25	34,3
50	6,9	30	3,5	41,9	50	37,5	18,3	37,5	18,3
72,5	1,5	40	3,03	43,5	12,67			43,5	12,67
90	0,32	50	2,38	54,25	7,97			54,25	7,97
97,5	0,25	60	1,64	62,8	1,23	62,5	1,53	62,8	1,23
		70	0,99	72,15	0,18			72,15	0,18
		80	0,54			75	0,17	75	0,17
		90	0,28			92,5	0,045	92,5	0,045
		100	0,14			95	0,03	95	0,03
						97,5	0,02	97,5	0,02
								100	0,014

* Hentet fra Tabell 7 i tidligere masteroppgave fra 2012 på grunn av manglende datagrunnlag (Stellander, 2012). I oppgaven var eldre Sd-verdier for AGS generasjon 1 presentert.

Sd-verdi for RF ved 0- og 100 %, er lagt til det egendefinerte materialet for å ha en komplett rekkevidde i RF. RF ved 100 % er hentet fra Isover Vario KM Duplex og derfor ikke helt korrekt. RF ved 0 % er lik som ved 12,5 % RF. I simuleringene når RF aldri et så lavt nivå, derfor er det ikke viet mer oppmerksomhet til denne usikkerheten.

For å kunne sammenligne simuleringer mot reelle data er det helt nødvendig å ha gode numeriske parametere for materialene. Ved å definere flere parametriske verdier for AGS sin dampmotstand, vil det være enklere å vurdere hvilke parametere det stilles mest usikkerhet til.

Gips

Himlingsmateriale som er benyttet i simuleringen er en 9 mm gipsplate. Materialparameterne for gipsplaten er definert av LTH Lund Universitetet i Sverige. Gipsplaten i laboratorieforsøket hadde en overflatebehandling som gir samlet Sd-verdi for gipsplate og overflatebehandling på 0,135 m. For nærmere beskrivelse av forsøket med prøving av Sd-

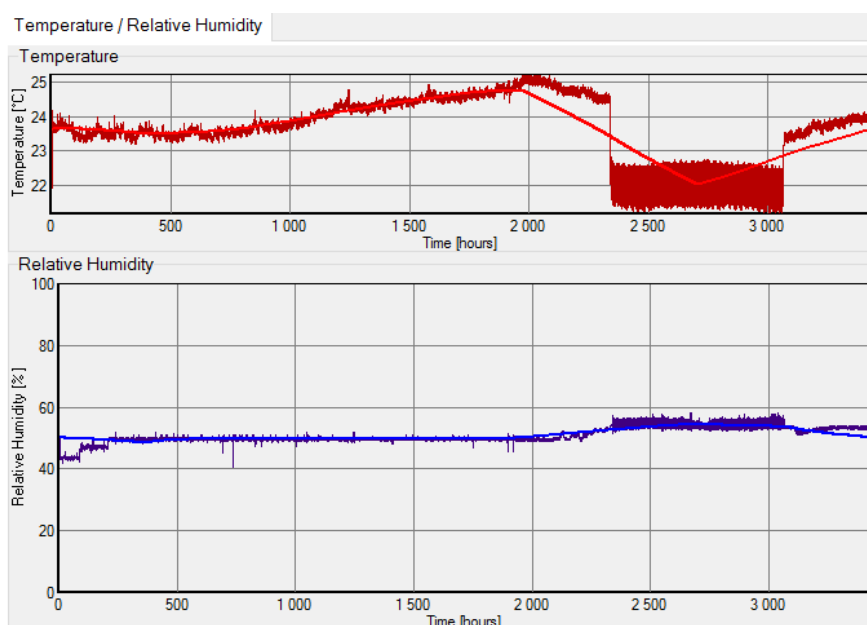
verdi for gips med overflatebehandling henvises det til masteroppgaven fra 2012 (Stellander, 2012). I WUFI er det derfor valgt en innvendig Sd-verdi på 0,135 m som inkluderer gipsplaten.

3.5 Grense- og startparametere

I dette kapittelet blir inneklima, uteklima og startfuktinnhold beskrevet.

Inneklima

Loggen fra forsøket som ble utført i 2012 viser at temperaturen varierer fra det som ble bestemt i utgangspunktet, se Figur 10. Da det fantes tilgjengelig temperaturlogg fra laboratorieforsøket er det naturlig å benytte disse dataene for å gjenskape de samme grenseparameterne i etterberegningen, se Figur 10.

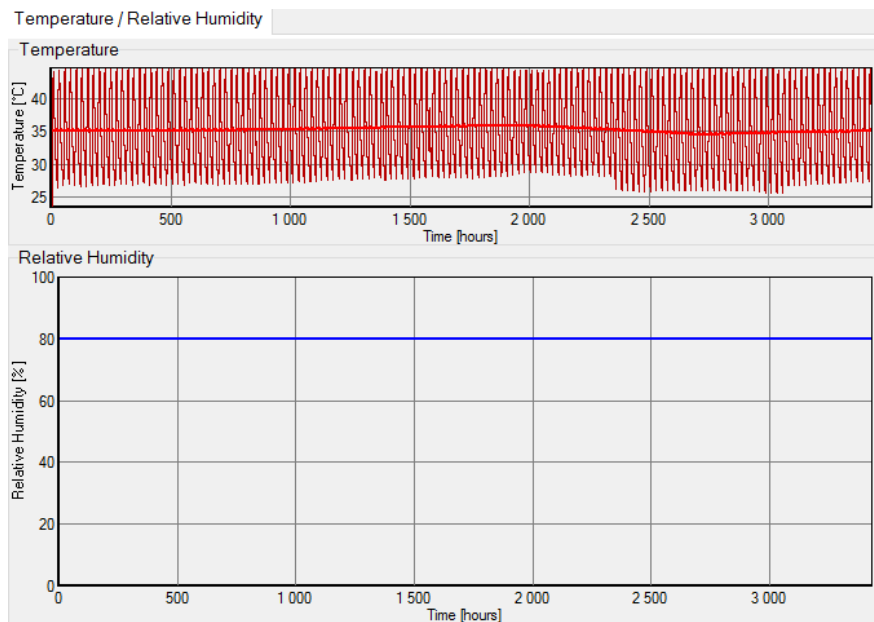


Figur 10. Klimafil for inneklima vist i simuleringsprogrammet WUFI. Dataene er hentet fra et tidligere utført laboratorieforsøk ved NTNU (Stellander, 2012).

Uteklima

Det utvendige klimaet i laboratorieforsøket ble basert på en tidligere studie fra 2009, som omhandlet temperaturforskjeller på flate tak med lyse og mørke taktekkingsmembraner i et sommerklima på Voll i Trondheim (Geving & Holme, 2009). Fremgangsmetoden som førte til den utvalgte klimasyklusen for uteklima er nærmere beskrevet i tidligere utført masteroppgave ved NTNU fra 2012 (Stellander, 2012). Det ble besluttet at det utvendige klimaet i laboratorieforsøket skulle holde 45 °C i fire timer av hvert døgn (4 av 24 timer) i hele forsøksperioden. Til sammen er varmemetoden på i åtte timer hvert døgn, siden det tar omtrent fire timer for folien å oppnå 45 °C. En sensor mellom prøveboksene og forskalingsplaten under varmemetoden har kontinuerlig loggført temperaturen over prøvene. Ved å lage en klimafil med de registrerte dataene fra forsøket vil utvendig klimasyklus i

WUFI bli lik som i laboratoriet, se Figur 11. Sensoren måler kun temperatur, så det er lagt til RF på 80 % for å kunne benytte klimafilen. RF vil uansett ikke påvirke resultatene i betydelig grad siden taktekingen er forholdsvis fuktstett med en høy Sd på 300 m.

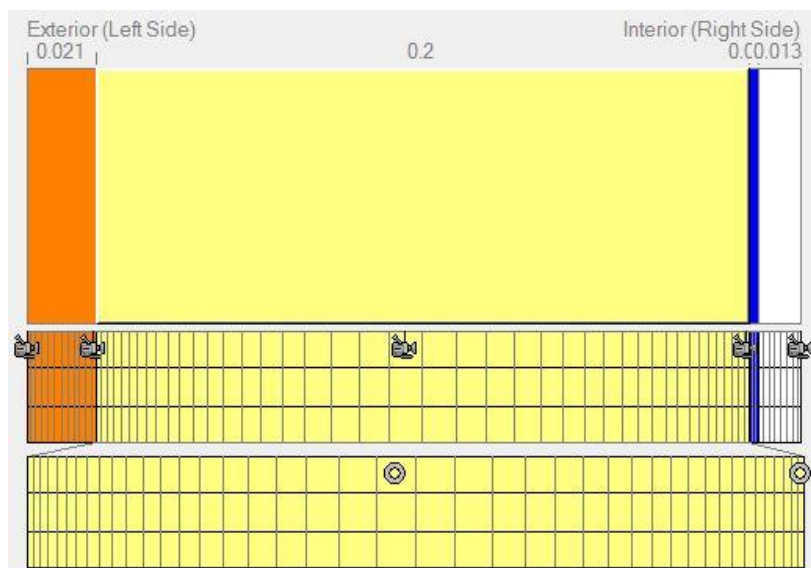


Figur 11. Klimafil for uteklima vist i simuleringsprogrammet WUFI. Dataene er hentet fra et tidligere utført laboratorieforsøk ved NTNU (Stellander, 2012).

WUFI kan importere forskjellige type klimafilene. Den anbefalte filtypen for å gjenskape laboratorieresultater i WUFI er en KLI-fil (IBP Fraunhofer, 2012). Grunnen til at WUFI anbefaler KLI-filer til bruk i etterberegning av laboratorieforsøk er at man kan sette nedbør-, og strålingsparameterne til verdi 0 for å neglisjere disse faktorene i en simulering (IBP Fraunhofer, 2008). Ved å sette strålingsparameterne til 0 blir ikke effekten av overkjøling nattetid inkludert. Det blir også korrekt med forholdene i laboratorieforsøket fra 2012 (Stellander, 2012).

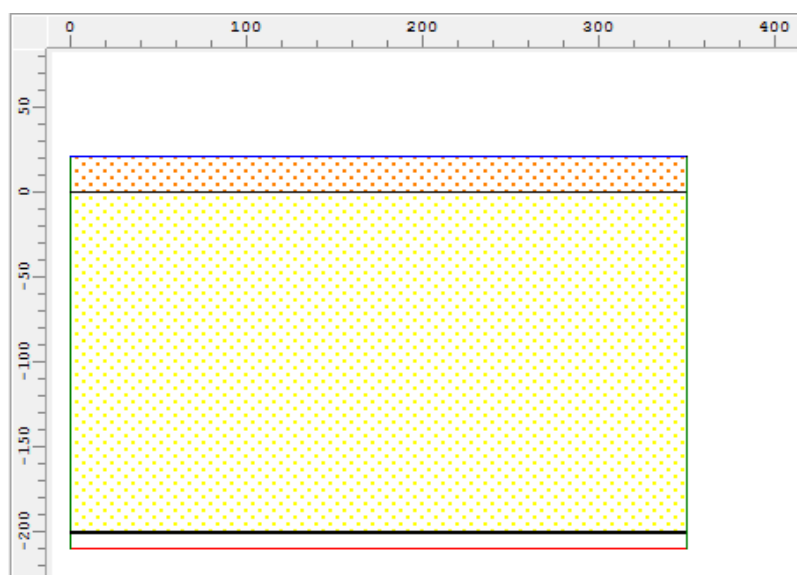
Geometrisk modell

Her vises de geometriske modellene som ble laget i henholdsvis WUFI Pro (1D) og WUFI 2D. I WUFI Pro legges hvert sjikt til modellen med korrekt tykkelse før de defineres med et materiale fra databasen. Det gir en-dimensjonal oppbygning, hvor utvendig klima er på venstre side og innvendig klima er på høyre, se Figur 12. Topp og bunn av modellen er adiabatisk grense. Ved en adiabatisk grense skjer det ingen varme- eller fuktutveksling mellom det bestemte systemet og omgivelsene.



Figur 12. Geometrisk modell av prøveboksen benyttet til etterberegningen i WUFI Pro.

I WUFI 2D modellerer man selv geometrien i høyde-, og lengderetning. Dette gjør det mulig å sette sammen flere bygningskomponenter i en simulering. Figur 13 viser den geometriske modellen som simuleres i WUFI 2D. Blå linje er utvendig klima, rød er innvendig klima og grønn linje viser adiabatisk grense.



Figur 13. Geometrisk modell av prøveboksen benyttet til etterberegningen i WUFI 2D. Fargene i modellens periferi viser overflate- og klimagrenser som kan defineres separat.

Fuktinnhold

For å simulere innebygd fukt i takkonstruksjonene har kryssfinerplaten et høyt startfuktinnhold. Data for startfukt er hentet fra resultatene til laboratorieforsøket i 2012, og viser variert startfuktinnhold for de ulike prøveboksene. I WUFI 2D oppgis startfuktinnhold for materialene med benevning kg/m^3 . I WUFI Pro benyttes benevning kg/m^2 for startfuktinnhold. Innhentet data viste startfuktinnhold i kg/m^2 , så verdiene benyttet i WUFI

2D har blitt delt på tykkelsen til kryssfinerplaten ($[\text{kg}/\text{m}^2] / 0,021 \text{ m}$). Startfuktinnholdet for de ulike kryssfinerplatene i prøveboksene er vist i Tabell 4.

Tabell 4. Startfuktinnhold i kryssfinerplater for de fire prøveboksene brukt til etterberegning i WUFI.

Prøveboks (SDS materiale)	Vekt-%	$[\text{kg}/\text{m}^2]$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
PE-folie	31,66*	1,9421	92,48
Intello	30,71*	1,8803	89,54
Novaflexx	32,13*	2,2032	104,91
AirGuard Smart	33,86*	2,1462	102,20

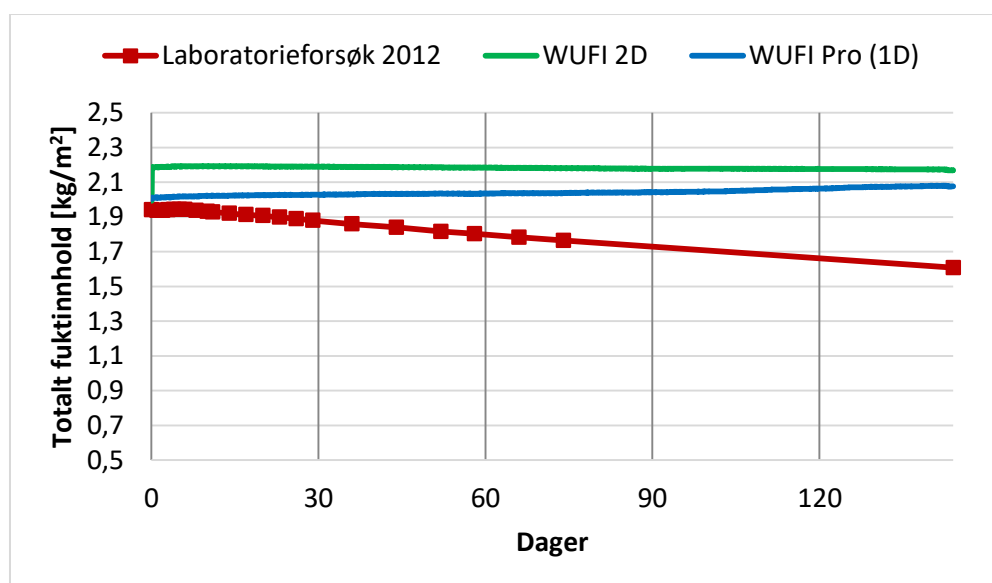
* Gjennomsnitt av to like prøvebokser i laborieforsøket fra NTNU i 2012 (Stellander, 2012).

Resultatene for total fuktuttap i simuleringene med WUFI 2D ga verdier i kg/m^3 . Dermed var det nødvendig å dele alle verdiene for total fuktuttap fra WUFI 2D med høyden på prøveboksen som var 0,232 m, slik at det var mulig å sammenligne resultatene.

3.6 Resultater og vurderinger

Dette kapitlet tar for seg resultater og vurderinger av simuleringsarbeidet med å gjenskape resultatene fra laborieforsøket ved NTNU våren 2012.

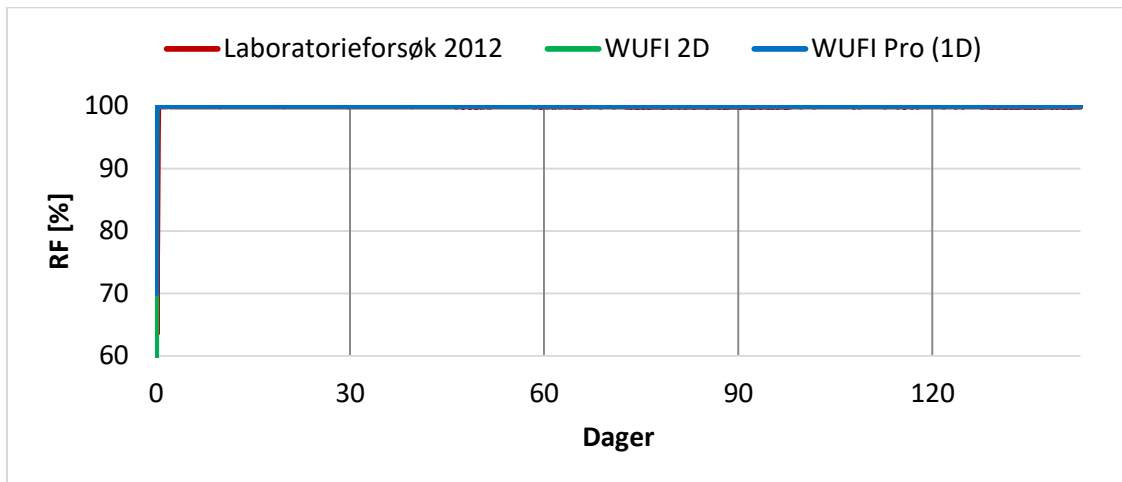
PE-Folie



Figur 14. Sammenligning av uttøringsgrad mellom laborieforsøk i 2012, WUFI Pro og WUFI 2D, ved bruk av PE-folie.

PE-folien i laborieforsøket og i simuleringer har høy Sd på 87 m. Det vil være minimalt med fukt som slipper gjennom et slikt sperresjikt, men på grunn av mekaniske skader i folien, og/eller utettheter i randen av folien ved montering kan det være et høyere fuktuttap i praksis enn i en simulering. Utettheter i randen av sperresjiktet kan være en årsak til at fuktinnholdet i laborieforsøket reduseres mer sammenlignet med simuleringene. I Figur 14 kan man observere økning av fuktinnhold i simuleringene, mot en fuktreduksjon i laborieforsøket. I forsøksperioden på 144 dager har prøveboksen i laborieforsøket tapt $0,38 \text{ kg}/\text{m}^2$ fukt, og

for simuleringene er fuktøkning på henholdsvis $0,07 \text{ kg/m}^2$ for WUFI 2D og $0,17 \text{ kg/m}^2$ for WUFI Pro.



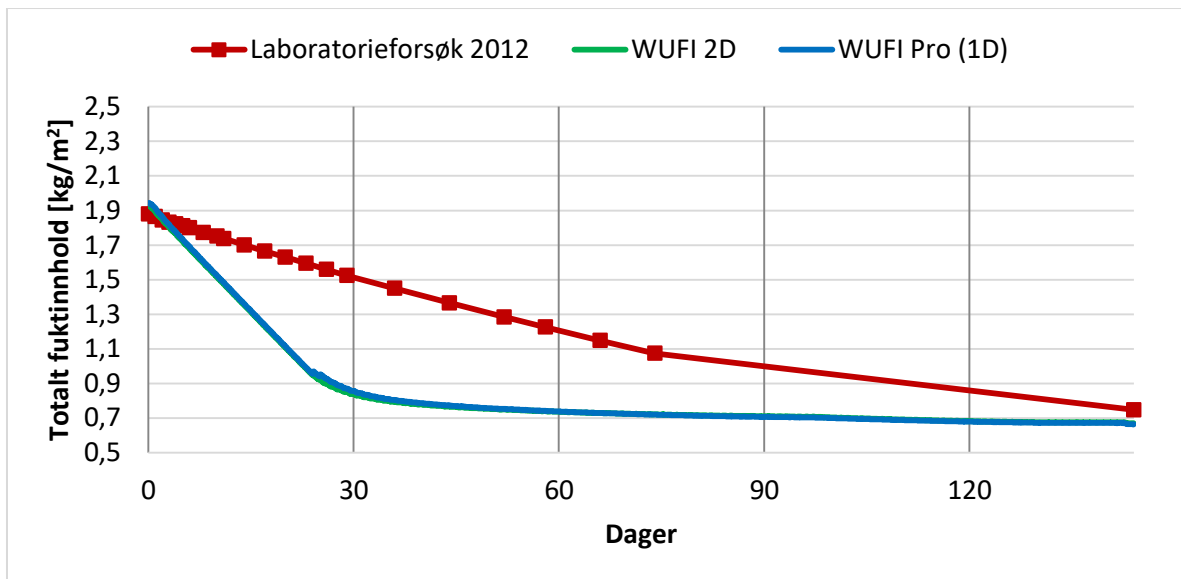
Figur 15. RF i overgangssjiktet mellom isolasjon og PE-folien.

I Figur 15 kan det observeres at RF i overgangen mellom isolasjonssjiktet og PE-folien ligger på 100 % RF gjennom hele perioden for alle tre tilfellene. Det antas dermed at fukten vil kondensere på utsiden av dampspærren.

PE-folien ble benyttet for å sammenligne reelle resultater med simuleringer for en dampspærre som har fast S_d -verdi. Det antas at årsaken til at det oppstår fukttap i laboratorieforsøket skyldes utettheter i folien. Det vil oppstå et høyt damptrykk på innsiden av takkonstruksjon når startfuktigheten i taktroa er høy før lukking. Det fører til et høyt damptrykk ved dampspærresjiktet som prøver å trenge ut gjennom dampspærren. En annen årsak til fukttapet antas å skyldes det hydrostatiske trykket på PE-folien når vanndamp kondenserer. Vann som blir liggende på folien over tid kan trenge gjennom sperresjiktet siden PE-folie ikke er hundre prosent vanntett. I WUFI er ikke denne effekten inkludert, slik at denne typen fukttransport vil utebli fra simuleringens resultater.

Konklusjon for simulering med PE-folie er at dampspærre med konstant S_d -verdi kan gi gode tilnærminger til reelle situasjoner ved bruk av WUFI. WUFI tar derimot ikke høyde for utførelsesfeil som kan være vanskelig å inkludere i simuleringer. Oppnå RF-nivåer opp mot kondenseringpunktet over lengre tid kan det stilles usikkerhet til resultatet da WUFI ikke inkluderer hydrostatiske trykkeffekter i simulering.

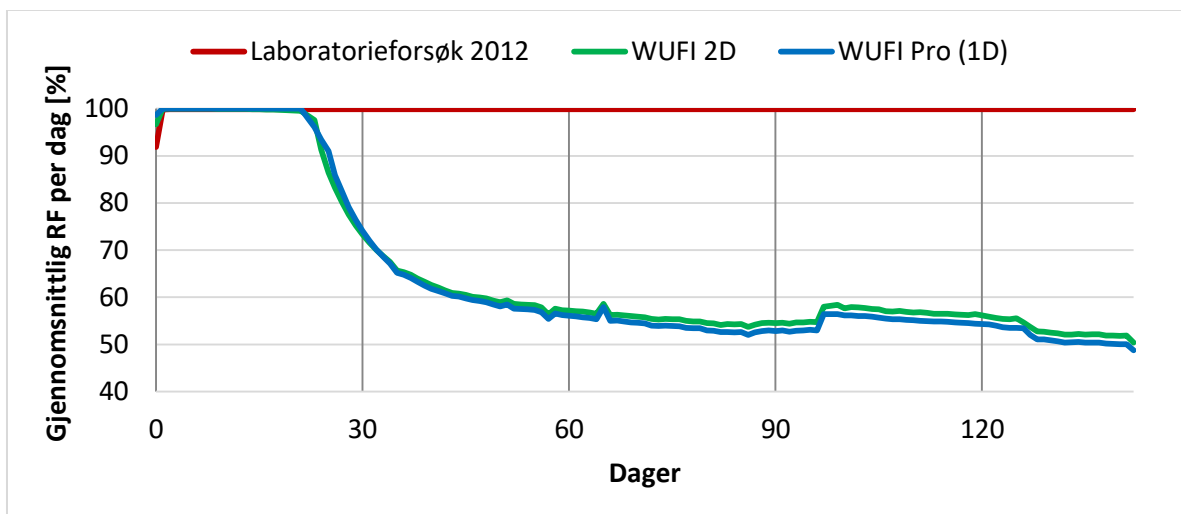
Intello



Figur 16. Sammenligning av uttørkingsgrad mellom laboratorieforsøk i 2012, WUFI Pro og WUFI 2D, ved bruk av Intello SDS.

Ved bruk av materialparameterne til Intello i databasen til WUFI ser man i Figur 16 at uttørkingshastigheten er raskere i simuleringen den første måneden i forhold til resultatene fra laboratorieforsøket. Ved forsøkets slutt kan en observere at simulering og forsøket nærmer seg likt fuktinnhold. Av hensyn til manglende data fra laboratorieforsøket fra dag 74 til 144, antas det at fukttapet stabiliserer seg tidligere dersom uttørkingen fortsetter lineært som i de første 74 dagene.

Ved å studere resultatene for gjennomsnittlig RF kommer det tydeligere frem hvorfor forskjellene mellom simulering og laboratorieforsøk er såpass store. I Figur 22 kan det observeres at gjennomsnittlig RF-nivå fra simuleringene synker fra 100 % RF etter 21 dager. For laboratorieforsøket ligger RF-nivået på 100 % gjennom hele forsøksperioden.

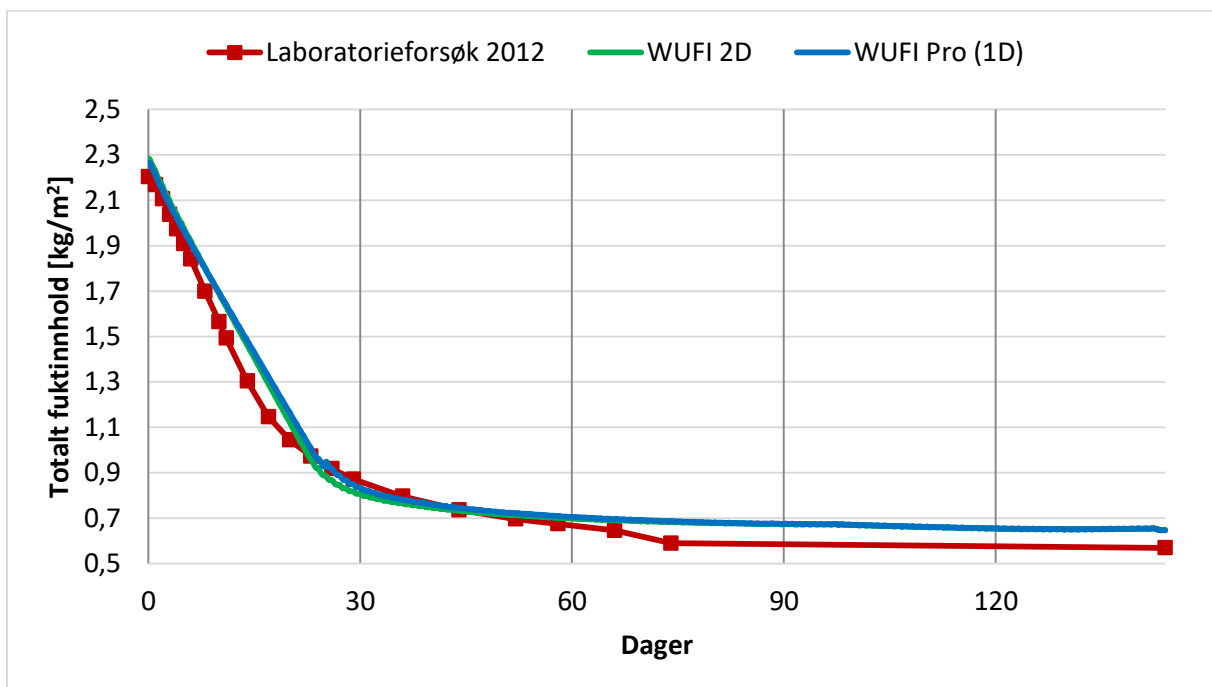


Figur 17. RF i overgangssjiktet mellom Intello SDS og isolasjon.

Etterberegningen viser at det er store forskjeller mellom materialparameterne tilgjengelig i WUFI sin database og reelle Sd-verdier for Intello. Ved å sammenligne det totale fukttapet og gjennomsnittlig RF ser man at det er en sammenheng med avvikene som ble observert for totalt fukttap. Raskere uttørking gir redusert RF. Når fukttapet reduseres raskere vil også RF bli redusert, og damp tettheten til Intello endres. Årsaken til det lineære fukttapet i laboratorieforsøket skyldes at RF-nivået er konstant gjennom hele forsøksperioden, og dermed opprettholdes en konstant vanddamppermeabilitet i dampsperrsjiktet. Det knyttes usikkerhet til RF-målinger over 95 %. RF-sensorene som er benyttet har en usikkerhet på ± 5 % ved RF mellom 95 og 100 % (Stellander, 2012). Det antas at sensorene har en treghet når fuktnivåene i lufta når kondensnivå, som fører til at mindre reduksjoner i RF fra metningspunktet ikke vises i resultatene. Når RF over dampsperran er konstant blir fukttransport gjennom sperresjiktet likt i perioder hvor Sd ikke endres. Videre ble det oppdaget feil med materialparameterne for Intello i WUFI-databasen ved etterberegning i et tidligere utført laboratorieforsøk ved NTNU (Geving Stig, et al., 2014). I dette tilfellet var det damp tettheten mot fuktopptak i vinterklima som ble kontrollert (de høye Sd verdiene ved lavere RF). Det ble da også tydelig at det er nødvendig med et bedre datagrunnlag for Intellos materialparametere for å knytte større lit til resultatene ved bruk av materialet i simuleringer.

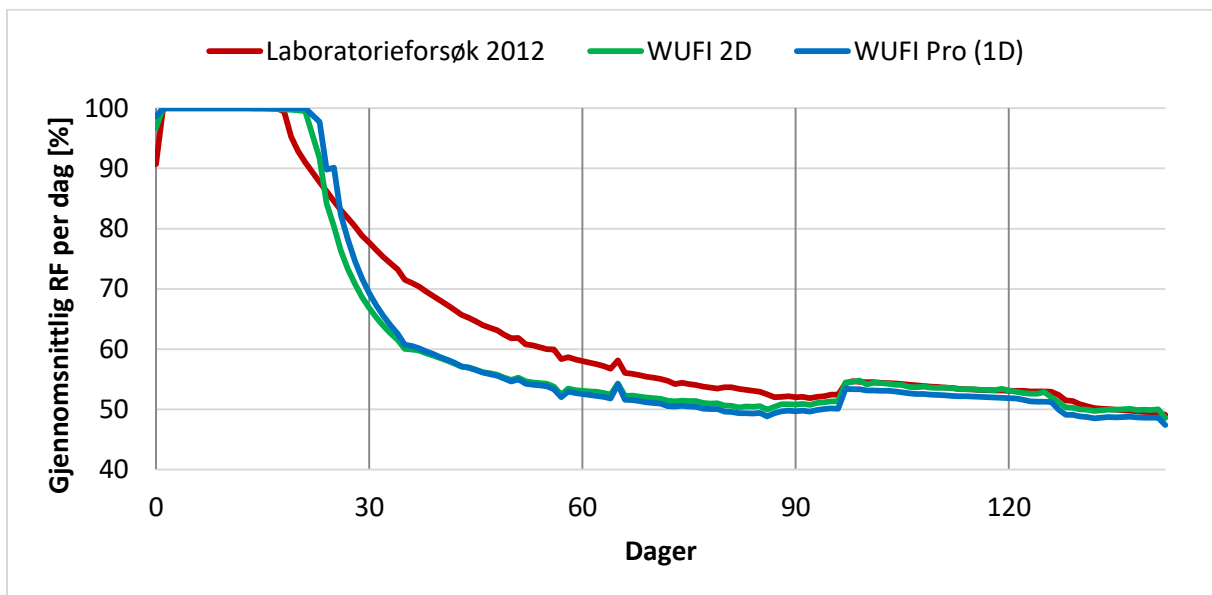
Fukttinnholdet etter 144 dager er $0,74 \text{ kg/m}^2$ for laboratorieforsøket og $0,66 \text{ kg/m}^2$ for simuleringene i WUFI. Det er en differanse på $0,08 \text{ kg/m}^2$ ved periodens slutt.

Novaflexx



Figur 18. Sammenligning av uttørkingsgrad mellom laboratorieforsøk i 2012, WUFI Pro og WUFI 2D ved bruk av Novaflexx SDS.

Ved bruk av materialet Isover Vario KM Duplex i WUFI sin database, ser det ut til at materialparameterne stemmer godt med resultatene ved bruk av Novaflexx i laborieforsøket, se Figur 18.

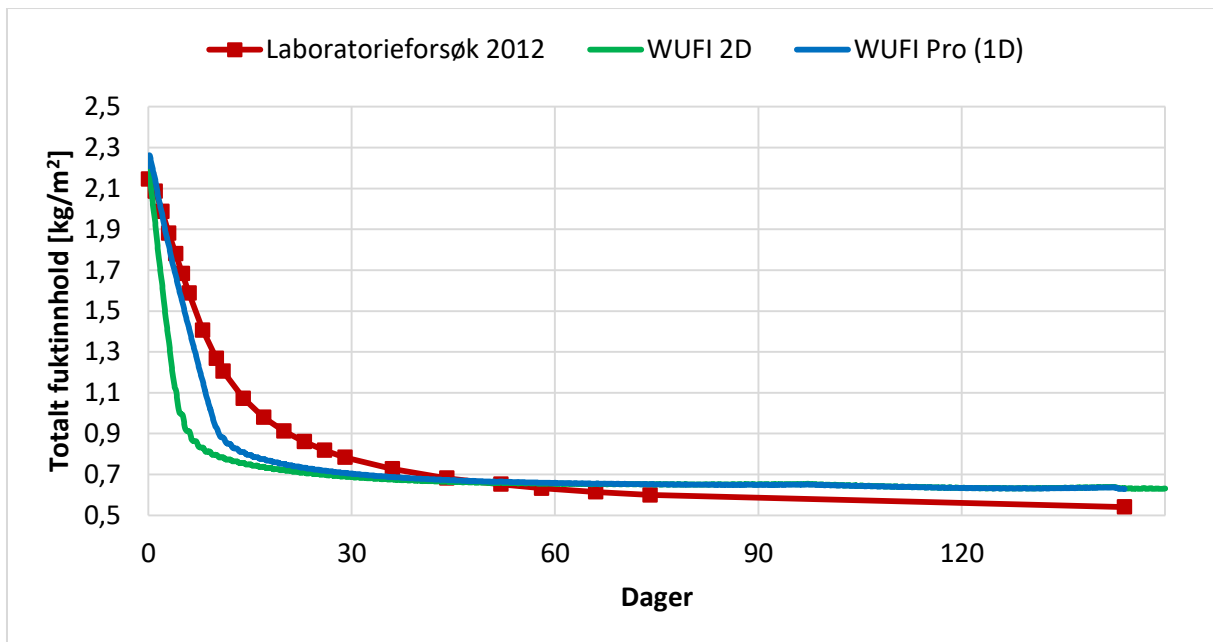


Figur 19. RF i overgangssjiktet mellom Novaflexx SDS og isolasjon.

Forløpet til RF i prøveboksen og i simuleringer har størst avvik mellom dag 3 og 60. Figur 19 viser at RF synker raskere i simuleringen ved dag 27, i forhold til laborieforsøket. Ved dag 97 er det omtrent lik RF i simuleringene og i forsøket. Videre ligger RF ved dag 90 nært 50 % for alle tre tilfellene. Når innvendig klima er satt til å holde 50 % RF vil det ikke være unaturlig at de havner på samme RF-nivå over tid, etter hvert som totalt fuktinnhold reduseres.

Simuleringene vist i Figur 18 ser ut til å stemme godt med uttørkingsforløpet i laborieforsøket. Det er økende avvik fra dag 60 til dag 74 hvor boksen i laborieforsøket oppnår 14 dager med høyere uttørkingshastighet. Dette fører til et økende avvik mellom simulering og laborieforsøk i den avsluttende perioden av forsøket. Ved periodens slutt er fuktinnholdet i laborieforsøket $0,56 \text{ kg/m}^2$, og for simuleringene er slutfuktinnholdet på $0,65$ for både WUFI 2D og for WUFI Pro. Det gir en differanse på $0,08 \text{ kg/m}^2$ mellom laborieforsøk og simulering. Siden simuleringene i WUFI ligner uttørkingsforløpet til Novaflexx kan parameterne anses å ha rimelig god nøyaktighet. Høyere RF i sjiktet mellom dampspærren og isolasjon i laborieforsøket fra dag 30 til dag 90 fører til at dampspærren opprettholder lavere Sd og fører til raskere uttørking. Dermed oppstår det avvik mellom simulert og reelt uttørkingsforløp. Det bør derfor vurderes om parameterne for Sd bør være høyere for RF mellom 60- og 100 % for å stemme helt nøyaktig med reelle målinger.

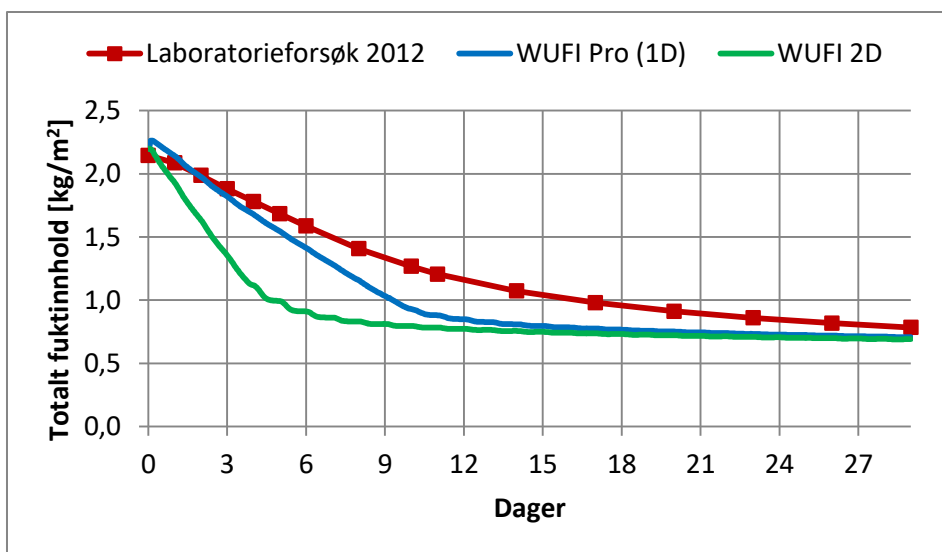
AirGuard Smart



Figur 20. Sammenligning av uttøringsgrad mellom laboratorieforsøk i 2012, WUFI Pro og WUFI 2D ved bruk av AGS.

Av Figur 20 kan det observeres at simuleringer med WUFI Pro stemmer godt med laboratorieforsøket de første fem dagene av simuleringen. Uttøringshastigheten i WUFI 2D ser ut til å gå raskere de første dagene sammenlignet med simuleringen i WUFI Pro. Uttørkingen i laboratorieforsøket viser derimot en tregere uttørkingshastighet sammenlignet med simuleringene de første 29 dagene i forsøksperioden.

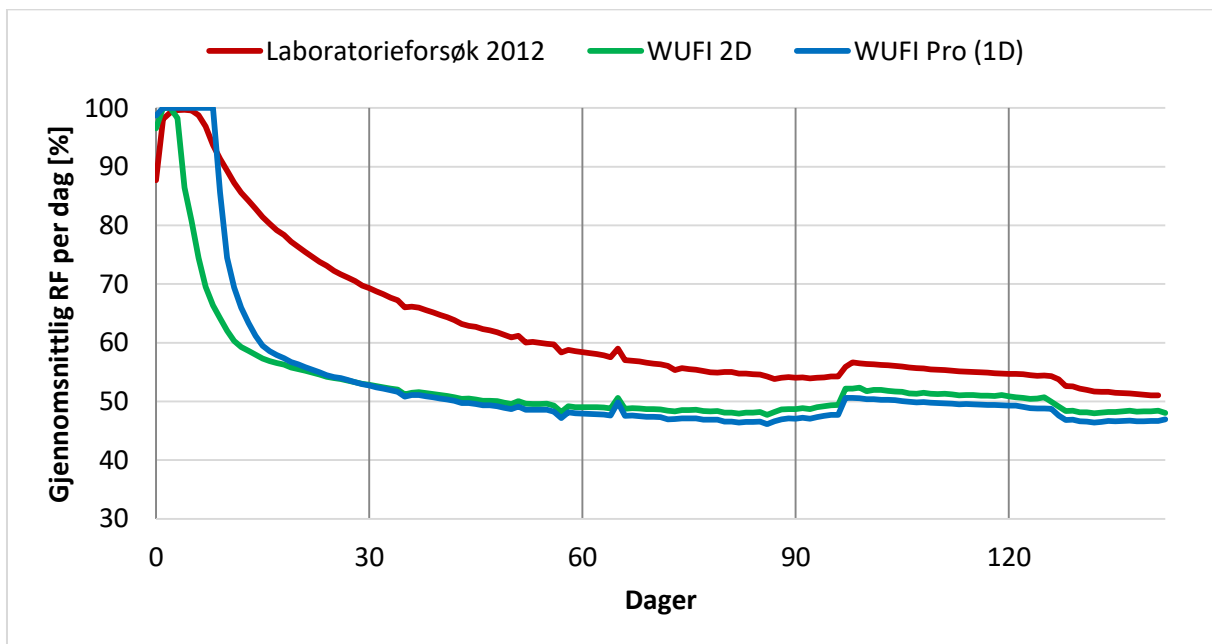
For å se nærmere på forskjellene mellom de tre tilfellene i den første perioden av forsøket, er det laget en graf med de første 29 dagene i perioden, se Figur 21.



Figur 21. Sammenligning av uttøringsgrad mellom laboratorieforsøk i 2012, WUFI Pro og WUFI 2D ved bruk av AGS, de første 29 dagene av forsøksperioden.

Man kan observere at simuleringen i WUFI 2D viser betydelig raskere uttørking sammenlignet med de to andre tilfellene. Uttørkingshastigheten for WUFI 2D-simulering stabiliserer seg ved dag ni. WUFI Pro-simuleringen har tregere uttørking sammenlignet med WUFI 2D, og har dermed bedre tilnærming til uttørkingsforløpet i laboratorieforsøket. Uttørkingshastigheten i WUFI Pro simuleringen stabiliserer seg ved dag 18, ni dager senere enn for WUFI 2D. Endringen i uttørkingshastighet skjer omtrent i samme periode fra dag- 9 til 12 for WUFI Pro-simulering og i laboratorieforsøket.

Ved å observere på resultatene for RF i overgangen mellom isolasjon og AGS i Figur 22, kan man observere hvorfor resultatene avviker i løpet av perioden.



Figur 22. RF i overgangssjiktet mellom AGS SDS og isolasjon.

Ved å observere Figur 22 ser man at RF-nivåene i laboratorieforsøket er høyere enn for simuleringene i hele forsøksperioden. RF synker raskere i simuleringene på grunn av raskere uttørkingshastighet. Det kan bety at materialparameterne benyttet for AGS i WUFI ved høye RF-nivå har lavere Sd i forhold til reelle verdier. Parameterne for Sd over 75 % RF er hentet fra DuPont (Katsaros, 2016).

Simulering med bruk av AGS og de valgte parameterne virker å gi relativt god tilnærming til uttørkingsforløpet, men ikke god nok nøyaktighet for Sd ved høye RF-nivåer. Uttørkingshastigheten i simulering er raskere sammenlignet med laboratorieforsøket. Etter hvert som RF over sperresjiktet synker, justeres damptettheten for dampsperran og gir et misvisende uttørkingsforløp. Dette er spesielt tydelig de første ti dagene. Parameterne til AGS som ble benyttet i simulering for denne delen av oppgaven bør utbedres for å få et mer reelt uttørkingsforløp ved andre simuleringssituasjoner. Forbedring av parametere gjelder forholdsvis for Sd-verdier ved RF over 60 % RF. Fra resultatene ser man at uttørkingshastigheten er raskere med de simulerte parameterne fremfor det reelle

laboratorieforsøket når RF ligger mellom 60- og 100 % RF. I den siste halvdel av simuleringsperioden tørker prøveboksen i laboratorieforsøket raskere sammenlignet med uttørkingen i simuleringene. Uttørkingen etter dag 49 for simuleringene er minimal. Dette kan skyldes utførelsesfeil og utettheter, men det kan også skyldes unøyaktighet for Sd-parametere ved RF mellom 45- og 55 %.

3.7 Oppsummering og konklusjon av etterberegning

Simulering er et godt verktøy til å utføre forsøk da man kan gjøre forsøk over lengre perioder i et kortere tidsrom. Dersom man har reelle klimaparametere tilgjengelig er det mulig å utføre forsøk med virkelige klimapåvirkninger for varierte lokasjoner. Simuleringsarbeid er mindre tidkrevende enn laboratorieforsøk og tillater utprøving av nye materialsammensetninger og startbetingelser uten mye forberedelsesarbeid. Dette forutsetter gode materialparametere for de materialene som benyttes i simuleringen. I denne delen av masteroppgaven har materialparametere for fire dampsperrer blitt sammenlignet mot et reelt laboratorieforsøk utført ved NTNU (Stellander, 2012).

For simuleringen med bruk av PE-folie stemmer resultatene ganske godt. RF er lik for alle tilfellene gjennom hele forsøksperioden. Total uttørking viser et avvik ved at fuktinnholdet i laboratorieforsøket ble redusert, mot en økning i fuktinnhold for simuleringer. Forskjellen antas å skyldes utettheter i PE-folien, og/eller fukttap på grunn av hydrostatisk trykk på dampsperrsjiktet. Denne effekten er ikke en del av de numeriske beregningene i WUFI, og vil derfor ikke være synlig i simuleringer.

Materialparameterne for Intello i WUFIs database viste seg å stemme dårlig med materialets faktiske vanndamppermeabilitet. Resultatene i simulering viste raskere uttørking sammenlignet med laboratorieforsøket. I laboratorieforsøket hadde sjiktet over dampsperran konstant RF på 100 % i hele forsøksperioden. Dette førte til at uttørkingsgraden var konstant frem til dag 74, hvor det var et hopp i registrerte data frem til dag 144. En høyere uttørkingshastighet i simuleringene førte til at RF-nivået over dampsperrsjiktet ble redusert raskere ved dag 21. Det er derfor nødvendig å fremskaffe et bedre datagrunnlag for materialets Sd som funksjon av RF for å kunne utføre mer reelle beregninger i WUFI med Intello.

For å etterberegne resultatene med bruk av Novaflexx ble Isover Vario KM Duplex fra materialdatabasen i WUFI benyttet. Resultatene viste god overenstemmelse med resultatene fra laboratorieforsøket. Selv om resultatene stemmer godt ble det tydelig at det var et mindre avvik i parameterne for Sd-verdier i RF-området mellom 60- og 100 %. Dette førte til raskere uttørkingshastighet i simuleringene. Det kan se ut til at Sd-parametere mellom 60- og 100 % RF er lavere enn materialets faktiske Sd-verdi. Klarer man å justere materialparametere for Novaflexx sin Sd ved RF mellom 60- og 80 %, er det mulig å oppnå mer reelle uttørkingsforløp.

AGS ble definert som et nytt materiale i WUFI. Det er lagt inn mye tid i etterberegningsoppgaven til å finne Sd-verdier ved forskjellig RF som gir best tilnærming til

resultatene fra laboratorieforsøket. I Tabell 3 er det vist en egendefinert AGS med Sd-verdier ved forskjellig nivåer av RF benyttet i simuleringene. Den egendefinerte AGS var den som kom nærmest i å etterligne resultatene fra laboratorieforsøket blant de variantene som ble kontrollert.

Sammenligning av laboratorieforsøk og simuleringer med bruk av egendefinert AGS viste at parameterne som ble benyttet ga god tilnærming til uttørkingsforløpet. Uttørkingsforløpet de første 30 dagene viser et avvik mellom simulert uttørkingshastighet og reell uttørkingshastighet fra laboratorieforsøket. Uttørkingshastigheten er høyere i simuleringene og fører til at RF reduseres raskere. WUFI Pro-simuleringen viser bedre tilnærming til laboratorieforsøket, ettersom uttørkingshastigheten ikke er like høy sammenlignet med uttørkingshastigheten i WUFI 2D. For å tilpasse AGS sin uttørkingshastighet de første dagene viser resultatene at Sd-parameterne bør være høyere for RF mellom 60- og 100 %. Fra dag 30 til periodens slutt er uttørkingshastigheten høyere i laboratorieforsøket sammenlignet med simuleringen. I denne perioden er RF-nivået høyere i det reelle forsøket, som antas å være årsaken til den høyere uttørkingshastigheten i laboratorieforsøket.

Simuleringer med WUFI Pro og WUFI 2D ser ut til å gi omtrentlig like resultater for en-dimensjonale simuleringer i de aller fleste tilfellene, se Figur- 14 til 22. De største forskjellene mellom de to simuleringsverktøyene var for total fuktinnhold med bruk av PE-folie (Figur 14), og totalt fuktinnhold ved bruk av AGS (Figur- 20 og 21). Årsaken til forskjellen for simulering av AGS er ikke utforsket annet enn å bekrefte at de samme parameterne er benyttet i begge simuleringsverktøyene.

For de to SDS-produktene som viste best tilnærming til reelle resultater (Novaflexx og AGS) ble det poengtert at årsaken til avvikene var grunnet raskere uttørkingshastighet i simuleringene. Det er antatt at dette skyldes feil med materialparameterne. Målet med etterberegningen er å validere parameterne, og det er sannsynlig at parameterne som er benyttet stemmer godt med de reelle produktene. For å oppnå likt uttørkingsforløp i simulering og i laboratorieforsøk vil det være tilfeller hvor det er nødvendig å tilpasse de numeriske verdiene til simuleringsverktøyets grensesnitt. Derfor er det lagt vekt på parameterne ved vurdering av avvikene for å kunne tilpasse materialene slik at de kan benyttes i videre forskning på SDS.

4 Laborieforsøk

I dette kapitlet fremgår bakgrunn for laborieforsøkene, oppbygging av prøveboksene, grenseparametere og metode for å registrere målinger og resultater.

4.1 Hensikt

Hensikten med laborieforsøkene er å se på effekten av å plassere bjelker av trevirke inne i et kompakttak med bruk av SDS. For å følge fuktvandringen i kompakttaket ved bruk av SDS vil trematerialene bli fuktet opp før de monteres i prøveboksen. Høyt fuktinnhold i trevirke (< 20 vekt-%) og temperaturer over 20 °C kan gi tilvekst for de fleste muggsopparter (Geving & Holme, 2009). Derfor er det ønskelig å se om SDS kan gi tilstrekkelig uttørking for å forhindre dannelse av muggsopp.

For å se på innadrettet uttørking i kompakte tak ved bruk av SDS, ble laborieforsøkene utført i et norsk sommerklima. Kommersielle SDS-produkter har i tidligere forsøk ved NTNU vist seg å gi varierende resultater for innadrettet uttørking i de varme sommermånedene i Norge (Stellander, 2012; Thorsrud, 2012). For å vurdere fuktvandring i prøveboksene ved varierte materialsammensetninger ble følgende forhold målt i hver prøveboks:

- RF og temperatur ved utvalgte områder i boksen.
- Trefuktighet i utvalgte områder på kryssfiner og trebjelke.
- Uttørkingsgrad ved jevnlig veiinger av boksene.

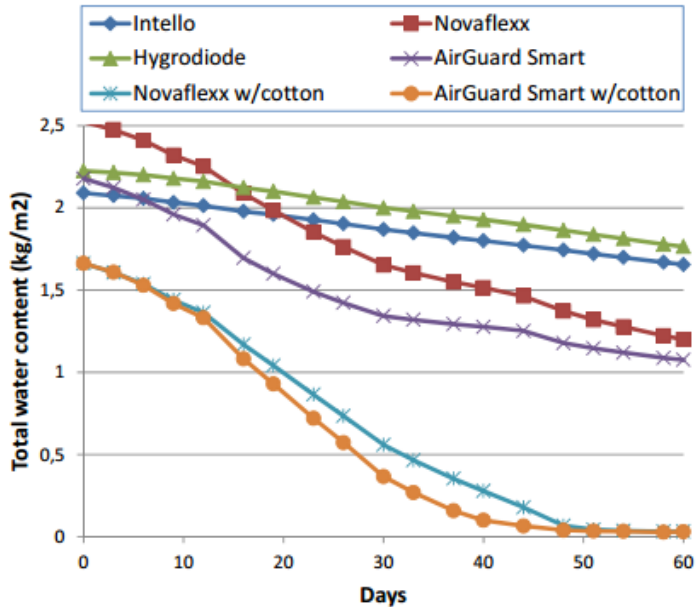
Første laborieforsøk ble utført i SINTEF Byggforsk sitt klimarom i perioden 20. januar til 24. mars, til sammen 63 dager. Forsøk nummer to ble utført i samme klimarom i perioden 24. mai til 14. juni, til sammen 21 dager.

Resultatene vil gi et inntrykk av SDS sin effekt på uttørking og fuktvandring i kompakte tretak med bjelkelag. Resultater og data hentet fra laborieforsøkene vil også bli benyttet i etterberegninger til å validere materialparametere for videre forskning på SDS.

4.2 Valg av SDS til laborieforsøk

På markedet finnes flere produsenter som har spesialdesignede SDS-produkter hvor damptettheten endres avhengig av RF. Sd-verdiene ved variert RF til de forskjellige produktene som finnes i dag varierer stort (Stellander, 2012; Thorsrud, 2012). Produktet som viste raskest uttørking i tidligere forsøk ved NTNU var AGS (Stellander 2012, Thorsrud 2012). Samtidig viste forsøk våren 2013 at AGS oppnådde god damptetthet mot oppfukning av konstruksjon for de kaldere vintermånedene (Thorsrud, 2013). Det er derfor valgt å benytte produktet Air Guard Smart i den eksperimentelle laboriestudien.

Figur 23 viser at AGS kommer best ut i forhold til uttørkingshastighet og uttørkingsgrad for et sommerklima i Norge (Geving, et al., 2013).



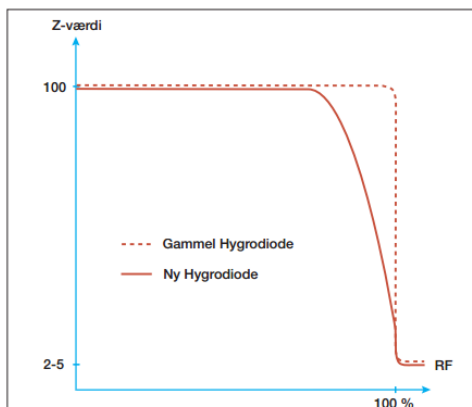
Figur 23. Totalt vanninnhold i seks kompakttakprøver i et forsøk utført ved NTNU i 2012 (Geving, et al., 2013).

Årsaken til at AGS gir raskest uttørking i forsøket er fordi denne har lavest S_d ved høyere RF-nivå (fuktig tilstand). I Tabell 5 er variasjonsområdet i S_d til 3 SDS-produkter presentert.

Tabell 5. S_d -verdier for varierte SDS-produkter. S_d varierer avhengig av RF i materialsjiktet (Stellander, 2012; Katsaros, 2016).

Produkt	S_d -verdi [m]
Intello	0,25 – 26
Novaflexx	0,08 – 4,38
Air Guard Smart	0,024 – 102,5

Hygrodiode fra Figur 23 er ikke inkludert i Tabell 5 siden det er vanskelig å estimere eksakte S_d -verdier for materialet. Hygrodiode er avhengig av høy luftfuktighet ved dampsperrsjiktet før fukten transporteres gjennom materialet, se Figur 24 (ICOPAL, 2008). Dampsperrsjiktet har en dampmotstand på $100 \text{ [m}^2 \text{ s Pa/kg]}$ ved RF opp til omtrent 75 %. Ved økende RF over 75 % synker S_d raskt ned til mellom 2- og $5 \text{ [m}^2 \text{ s Pa/kg]}$ ved metningspunktet.

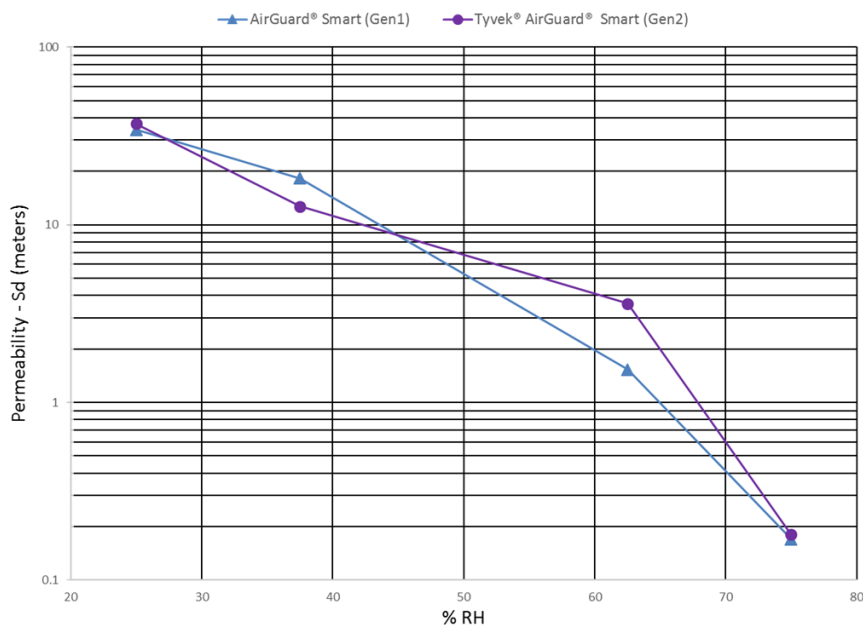


Figur 24. Variabel S_d som funksjon av RF for Hygrodiode.

At dampsperreren krever høy RF før fukttransporten starter, og er derfor lite gunstig for kompakte tak med bjelkelag i isolasjonssjiktet. Når sperresjiktet krever høy RF før innvendig uttørking starter, øker risikoen for fuktopptak i bjelkene.

4.2.1 AirGuard Smart (AGS)

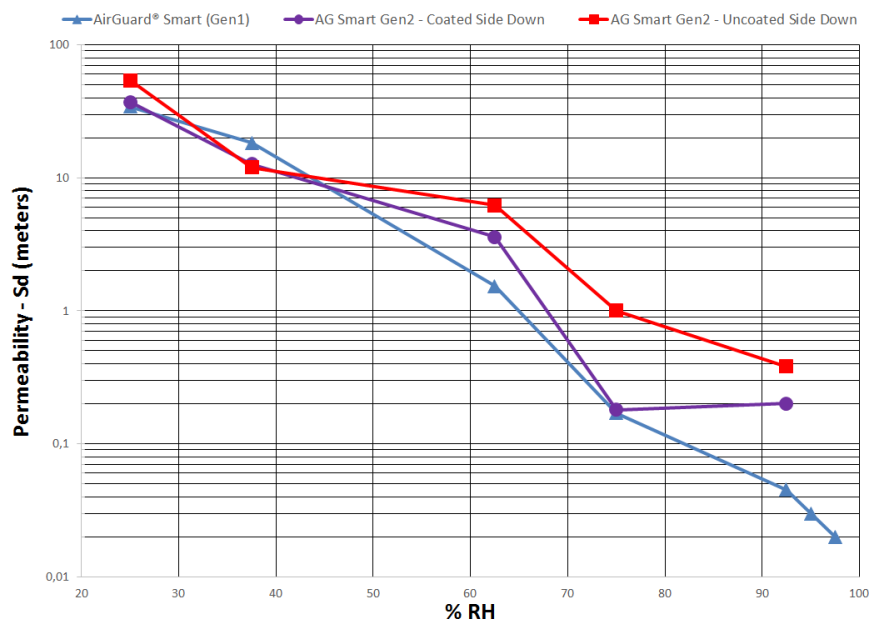
AGS er som tidligere nevnt produsert av DuPont. Under forarbeidet med laboratorieforsøket ble det av produsenten informert om at AGS generasjon 1 skulle fases ut, og at en ny AGS generasjon 2 skulle erstatte det gamle produktet. I forsøket som utføres i denne rapporten er det ønskelig å sammenligne resultatene med tidligere forsøk ved NTNU. Siden AGS generasjon 2 ikke var lansert da de tidligere forsøkene ble utført, ble det bestemt å benytte generasjon 1 AGS i flere av boksene i de nye laboratorieforsøkene. Samarbeidspartnere i Klima 2050 har hjulpet til med å anskaffe den nye AGS før det ble tilgjengelig på markedet slik at en har fått muligheten til i å sammenligne generasjon 2 AGS mot den gamle AGS som skal fases ut. En sammenligning av AGS generasjon 1 og generasjon 2 sin vanndampmotstand er presentert i Figur 25.



Figur 25. Vanndampmotstand som funksjon av RF. Sammenligning av AGS- generasjon 1 og generasjon 2 (Katsaros, 2016).

I Figur 25 kan det observeres at damptettheten til AGS generasjon 2 er lavere fra 28 % RF, til omtrent 45 % RF. Fra 45- til 75 % RF er Sd-verdien til AGS generasjon 2 høyere sammenlignet med generasjon 1, med størst differanse ved omtrent 63 % RF.

AGS generasjon 2 er bygd opp av to lag. Det ene laget består av en PVOH / EVOH blanding som fungerer som adhesjonsfremmer på den ene siden (belagt side). På den andre siden av materialsjiktet er det benyttet Tyvek 1069B (Katsaros, 2016). Denne oppbygningen fører til at AGS generasjon 2 har varierende endring i Sd, avhengig av om man monterer den belagte siden med adhesjonsfremmer inn eller ut i konstruksjon.



Figur 26. Sd-verdier som funksjon av RF. Sammenligning av AGS gen. 1, gen.2 med belagt side opp og gen. 2 med belagt side ned (Katsaros, 2016).

Figur 26 viser Sd-verdi som funksjon av RF for AGS generasjon 1, sammenlignet med AGS generasjon 2 med belagt side ut (rød linje), eller belagt side inn (lilla linje). Frem til omtrent 45 % RF er Sd ganske lik for de tre tilfellene. Deretter begynner Sd for AGS generasjon 2 å variere avhengig av om belagt side er montert inn- eller ut i klimaskallet. AGS generasjon 2 montert med belagt side mot innsiden av klimaskallet er kurven som likner kurven til AGS generasjon 1 mest (lilla linje). DuPont sin henvisning er å montere AGS generasjon 2 med belagt side mot innsiden av bygget dersom maksimal innadrettet uttørking ønskes. Det er derimot ikke feil å montere AGS generasjon 2 med belagt side opp, men det vil gi konstruksjonen høyere dampmotstand ved variert RF. Dette kan i spesielle tilfeller være gunstig avhengig av bruksformål.

4.3 Laboratorieforsøkernes oppbygging

Til sammen ble det bygd åtte ulike prøvebokser fordelt på to laboratorieforsøk som skal simulere moderne kompakte tak som bygges i dag. Utgangspunktet for hver prøveboks var en stor plastkasse av PVC som er fukt- og damp tett. Boksene ble plassert i samme takrigg som ble benyttet i tidligere forsøk ved NTNU, se Figur 27 (Stellander, 2012).



Figur 27. Prøveriggen sett fra siden.

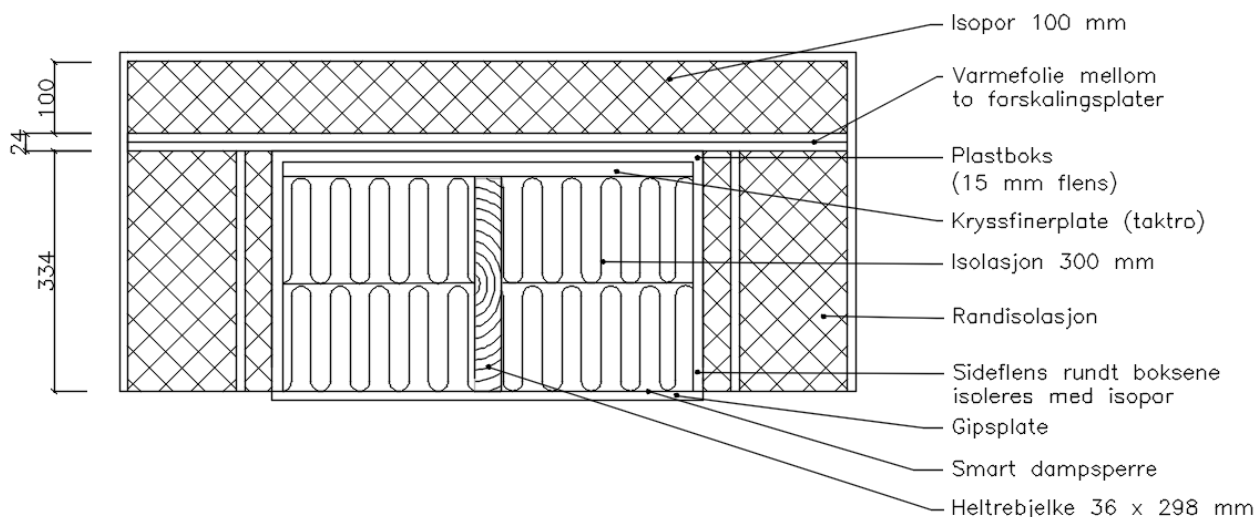
For å kunne holde fire store bokser i motsetning til tidligere forsøk som benyttet 12 bokser, ble riggen modifisert på undersiden, se Figur 28.



Figur 28. Takriggens underside med fire prøvebokser montert.

Rundt sidene av plastboksene er det montert isoporplater som hjelper til med å holde boksene fast i riggen. Isoporplatene bidrar også til å isolere mot temperaturpåvirkninger fra inneklime og nærliggende bokser.

Øverst i riggen over boksene ligger det en varmemefolie mellom to forskalingsplater, etterfulgt av en 100 mm isoporplate, og til slutt en forskalingsplate i toppen som lukker riggen, se Figur 29. Ved å isolere godt rundt prøveboksene og varmemefolien vil ikke temperaturene i klimarommet i for stor grad kunne påvirke det utvendige klimaet som styres av varmemefolien.



Figur 29. Skisse av riggen med en prøveboks montert, sett fra kortsiden.

Temperaturen i varmemfolien styres digitalt med en temperaturstyringsenhet (Omron, 2013). Temperaturstyringen er utredet nærmere i kapittel 4.6 som omhandler klimaforhold.

4.4 Kompakttakprøvene

4.4.1 Generelt

Det er i alt plass til fire av de nye prøveboksene i riggen da boksene er større sammenlignet med boksene som ble benyttet i tidligere forsøk. For å kunne simulere en reell situasjon med bjelker i et kompakt tretak, ble det vurdert mer realistisk å bruke en lengre bjelkelengde enn hva som ville passet i plastboksene for de gamle laboratorieforsøkene. For å tilnærme seg et reelt kompakttak etter TEK 10 standard, ble det valgt bokser med dybde på 300 mm som gir taket U-verdi på $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ ved kun å beregne isolasjonstykkelsen. Bredden på boksen hadde også innvirkning på valg av prøvebokser. Dimensjonen på prøveboksene er $770 \times 570 \times 300 \text{ mm}$, se Figur 30. Isolasjonssjiktet er til sammen 534 mm bredt med en delt bredde på 217 mm på hver side av bjelken når den monteres midt i boksen.



a. *b.*
Figur 30 a, og b. Plastkassene som benyttes i laborieforsøkene.

I Figur 30 ser man at flensene på sidene av boksen blir isolert med EPS-isolasjon (ekstrudert polystyren) for å fjerne luftsjiktet rundt boksen når den plasseres i riggen.

I bunnen av boksen plasseres en 21 mm kryssfinerplate som er fuktet opp i forkant. En bjelke skrues fast til kryssfinerplatene før de plasseres i kassene. Hulrommet på siden av bjelkene fylles med isolasjon før kassene blir forseglet med en AGS dampsperre, se Figur 31b.



a. *b.* *c.*
Figur 31 a, b, og c. Oppbyggingsprosessen av prøveboksene. Treverk monteres først (a), deretter måleinstrumentene før isolasjon monteres til slutt (b og c).

Materialene som ble benyttet er mineralull av glass som isolasjon, 21 mm tykk kryssfinerplate av gran som taktro, og en standard innvendig gipsplate på 12 mm som innvendig overflatesjikt. Isolasjon-, kryssfiner- og innvendig fasademateriale er likt som i tidligere

forsøk ved NTNU (Thorsrud, 2012). Dette var et konsekvent valg for å muliggjøre sammenligning av resultatene i laboratorieforsøkene mot resultater fra lignende laboratorieforsøk fra 2012. De nye materialene som benyttes for laboratorieforsøkene beskrevet i denne masteroppgaven er bjelkematerialene og AGS generasjon 2. Oversikt over materialene benyttet i dette forsøket og deres egenskaper er vist i Tabell 6.

Tabell 6. Materialeegenskaper for materialene benyttet i laboratorieforsøkene (Byggforskserien, 2003a; Byggforskserien, 2003b; Byggforskserien, 2003c; Byggforskserien, 2004)

Materiale	Masse- tetthet [kg/m ³]	Spesifikk varmekapasitet [J/(kgK)]	Varme konduktivitet, λ [W/mK]	Ekvivalent luftlagstykkelse, Sd-verdi [m]
Taktekking				
Polypropylenplast	900-910	1700	0.22	Svært høy
Taktro				
Kryssfiner av gran 21 mm	500		0.13	0.29 – 1.30 (RF: 35-70) 0.14-0.51 (RF: 70-80) 0.08- 0.25 (RF: 80-90)
Isolasjonsmateriale				
Mineralull av glass 300mm (2 x 150mm)	15	1030	0.035	0.12 – 0.18 (RF: 35-70)
Bjelker				
Justert trevirke (C24) 36 x 298 mm	500	1600	0.13	Avhengig av fiberretning (se BKS* 573.430)
I-Profil 45 x 298 mm flens	500	1600	0.13	Avhengig av fiberretning (se BKS* 573.430)
I-Profil 45 x 298 mm steg (trefiberplate)	900	1700	0.14	1.2 (RF: 35-70)
Dampsperre				
AirGuard Smart (Gen. 1 og Gen. 2)	-	-	-	0.02 -100 (RF avhengig)
Himling				
Ubehandlet gipsplate 12 mm	625	-	-	0.2-0.14 (RF: 35-80) 0.12 (RF: 80-90) 0.08-0.06 RF: 90-95)

* BKS er forkortelse for Byggforskserien.

Materialet som skal simulere bærebjelken i takkonstruksjonen for Boks- A, B, og D er justert trevirke av gran med fasthetsklasse C24. Bjelkene som ble benyttet i forsøkene har en dimensjon på 36 x 298 mm. I prøveboks C i det første forsøket, ble det benyttet en bjelke av I-profil fra Hunton, se Figur 35. I-bjelken har dimensjon 45 x 298 mm, hvor flensen har en bredde på 45 mm, og steget har bredde på 8 mm. Flensen er laget av tynne lameller av grantre som blir limt sammen som en kryssfinerplate. Steget er laget av trefiber (Medium Density Fiberboard). Bakgrunn for å benytte I-bjelken i en prøveboks er at slike bjelker ofte blir benyttet til bæring under kompakte takkonstruksjoner. Noen av fordelene med trebjelker i I-profil er at de gir mer plass til isolasjon i isolasjonssjiktet som reduserer kuldebrofaktoren, og de veier mindre som gjør at konstruksjonen blir lettere. I tillegg tillater I-bjelken enklere gjennomføringer av tekniske rørføringer.

Til å forsegle åpningen til boksene benyttes det Isola butylbånd rundt randen av åpningen før dampspærren monteres. Butylbåndet er et dobbeltsidig, armert klebebånd av kaldekstruert butyl. Armeringen består av et propylen vev som gir båndet stabilitet og styrke (Isola, 2013). For å tette rundt ledningene som går ut av boksen ble det lagt en ekstra stripe med butylbånd over ledningene før dampspærren ble montert over boksen, se Figur 32a. Gipsplaten ble deretter skrudd fast til kantene av boksen, slik at dampspærren og butylbåndet ble klemt rundt åpningen og sørget for at boksen ble helt tett.



a.



b.

Figur 32a og b. Boksene blir forseglet med butylbånd rundt randen av boksen (a), før dampspærren monteres over åpningen (b).

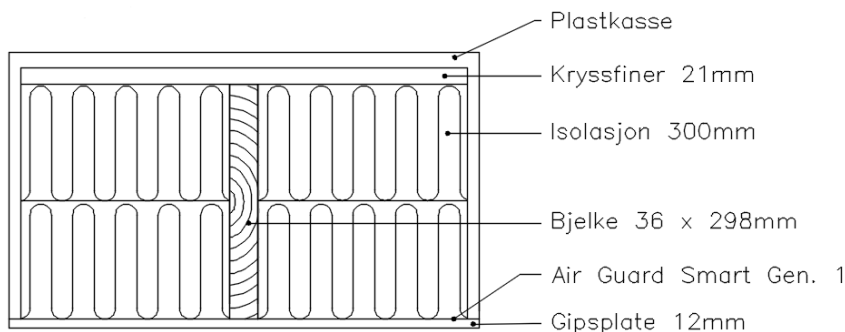
4.4.2 Oppbygging av prøveboksene

Dette kapittelet viser et vertikalsnitt for å illustrere oppbygging til hver av de åtte prøveboksene.

Laboratorieforsøk nr. 1

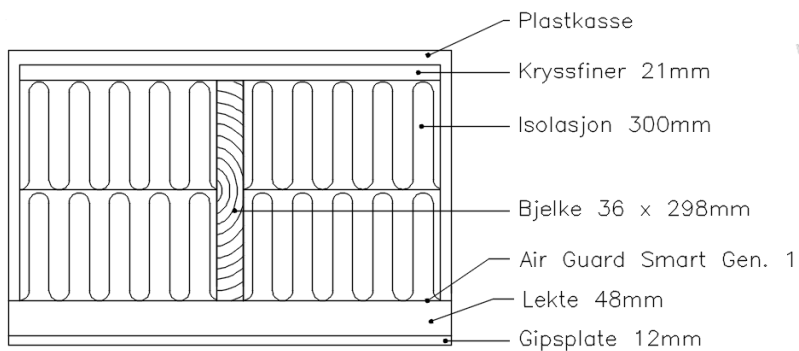
I det første forsøket er kryssfinerplaten fuktet opp til omtrent 30 vekt-%, og bjelkene har et fuktinnhold på omtrent 15 vekt-%. Mer om oppfuktingsprosessen kan leses i kapittel 4.5.

Boks A



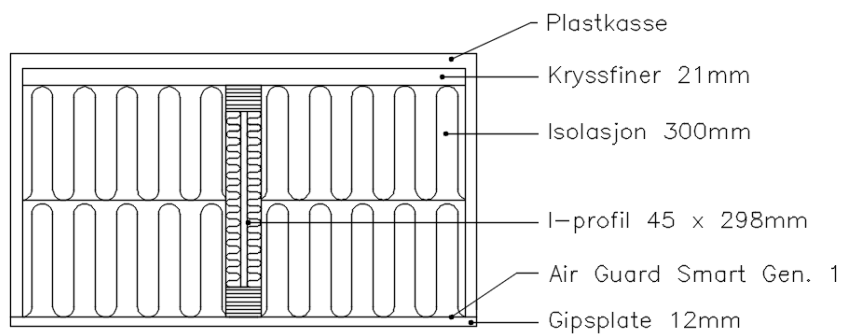
Figur 33. Boks A - Heltrebjelke med ca. 15 vekt-% fuktinnhold, kryssfiner med ca. 30 vekt-% fuktinnhold, og AGS generasjon 1 dampspærre.

Boks B



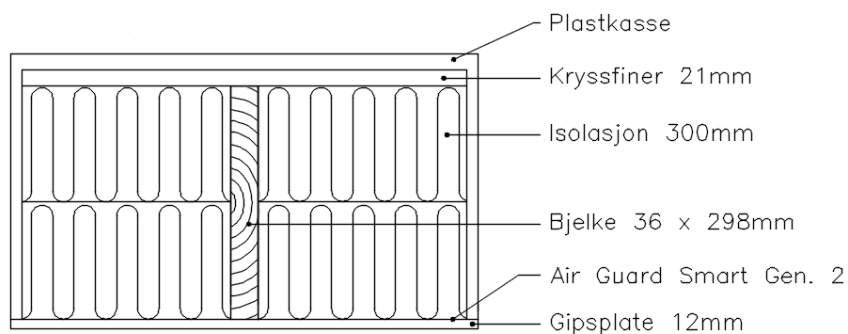
Figur 34. Boks B - Heltrebjelke med ca. 15 vekt-% fuktinnhold, 48 mm innvendig utlekting, kryssfiner med ca. 30 vekt-% fuktinnhold, og AGS generasjon 1 dampsperre.

Boks C



Figur 35. Boks C - Bjelke av I-profil med ca. 15 vekt-% fuktinnhold i flens, kryssfiner med ca. 30 vekt-% fuktinnhold, og AGS generasjon 1 dampsperre.

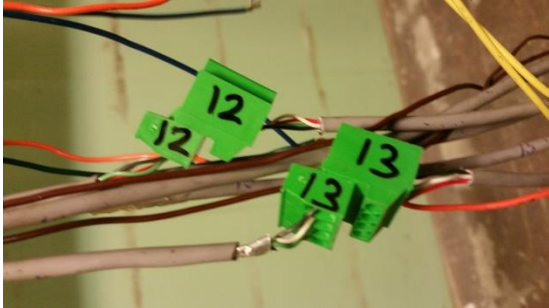
Boks D



Figur 36. Boks D - Heltrebjelke med ca. 15 vekt-% fuktinnhold, kryssfiner med ca. 30 vekt-% fuktinnhold, og AGS generasjon 2 dampsperre.

Laboratorieforsøk nr. 2

I det andre forsøket ble det montert avtakbare koblinger til RF-sensorene slik at veiing av prøveboksene kunne utføres med alle ledninger som trekkes ut av prøveboksen, se Figur 37. Avtakbare koblinger var ikke montert for det første forsøket, slik at det ga en usikkerhet ved veiingene. Mer om usikkerhetene rundt veiingen er utredet i kapittel 4.8.



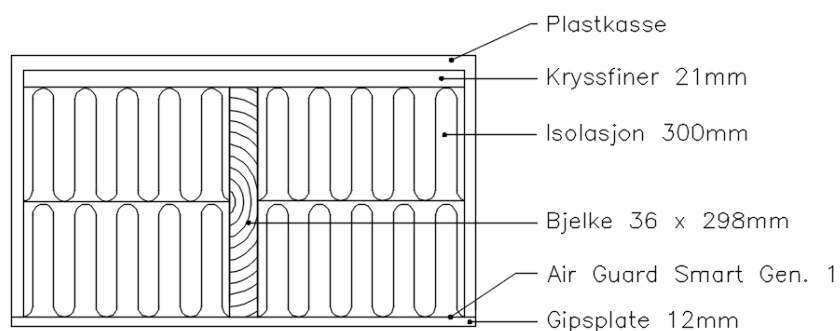
Figur 37. Avtakbare koblinger til RF-sensorene som tillater mer nøyaktige veiinger.

Boks E er helt lik Boks A fra det første forsøket. Bakgrunn for å lage eksakt samme prøveboks er å sammenligne mer nøyaktige veiinger med resultatene fra første forsøk. De største endringene for det andre forsøket vil dermed gjelde for prøveboks- F, G og H.

Hensikten med forsøk nummer to er å se på uttørkingen av bjelken dersom den inneholder et høyt fuktinnhold før lukking av konstruksjonen. Heltrebjelkene i Boks F, G og H ble fuktet opp til omtrent 26 vekt-% før de ble montert i prøveboksen. Fuktinnholdet i kryssfinerplatene vil være likt som i det første forsøket. Alle kryssfinerplatene i forsøk nummer to inneholder derfor omtrent 30 vekt-% fukt ved start. Når bjelke og kryssfinerplate har et så høyt fuktinnhold ved start, er det ment til å simulere en ekstrem situasjon med mye fukt inne i et kompakttak før lukking av konstruksjon.

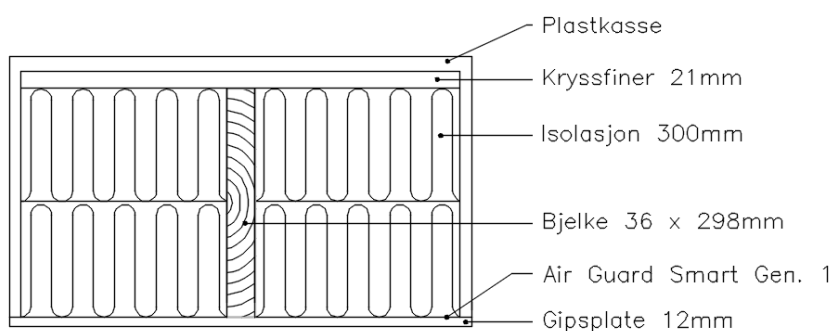
Prøveboks F vil bli montert med AGS generasjon 1 dampsperre. Prøveboks G vil bli montert med en AGS generasjon 2 dampsperre. Prøveboks H vil bli montert med en AGS generasjon 2 dampsperre hvor den belagte siden peker ut i konstruksjonen (mot isolasjonssjiktet). AGS generasjon 2 har forskjellig endring av S_d ved variert RF, avhengig av om belagt side peker ut- eller inn i konstruksjonen, derfor er det ønskelig å se nærmere på forskjellen i et eksperimentelt laboratorieforsøk. Endring i S_d som funksjon av RF for AGS generasjon- 1 og 2 er beskrevet nærmere i kapittel 4.2.1.

Boks E



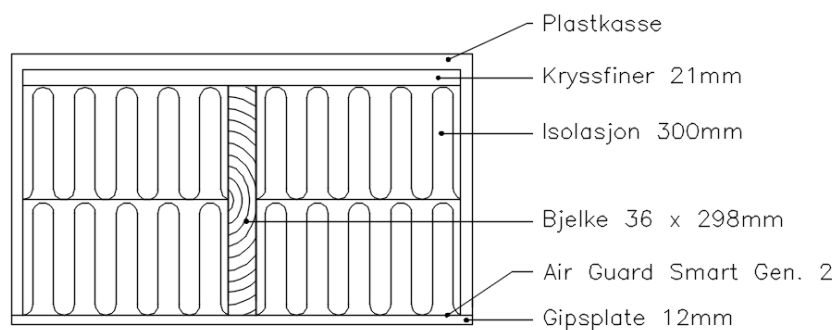
Figur 38. Boks E - Lik som Boks A med ca. 30 vekt-% fuktinnhold i kryssfiner og ca. 15 vekt-% fuktinnhold i heltrebjelke. Dampsperrer er AGS generasjon 1.

Boks F



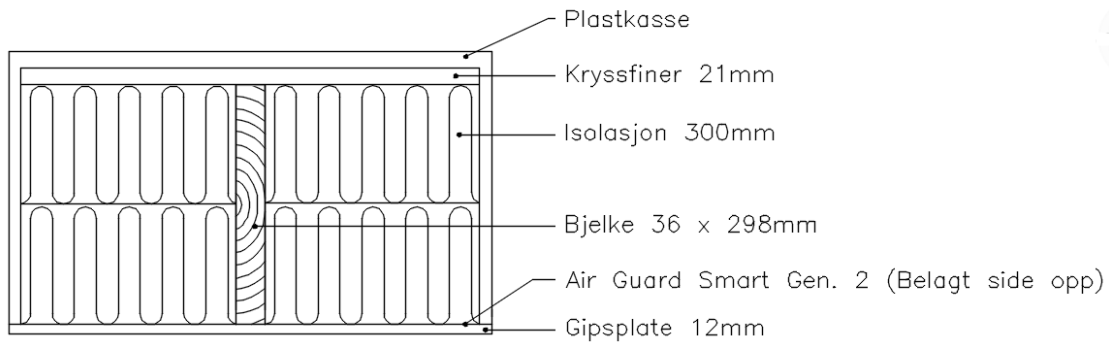
Figur 39. Boks F - Heltrebjelke med ca. 26 vekt-% fuktinnhold, kryssfiner med ca. 30 vekt-% fuktinnhold, og AGS generasjon 1 dampsperre.

Boks G



Figur 40. Boks G - Heltrebjelke med ca. 26 vekt-% fuktinnhold, kryssfiner med ca. 30 vekt-% fuktinnhold og AGS generasjon 2 dampsperre.

Boks H



Figur 41. Boks H - Heltrebjelke med ca. 26 vekt-% fuktinnhold, kryssfiner med ca. 30 vekt-% fuktinnhold, og AGS generasjon 2 dampersperre snudd med belagt side ut i konstruksjon.

4.5 Oppfuktingsprosessen

Dette kapittelet beskrives oppfuktingsprosessen til kryssfinerplatene og bjelkene for laboratorieforsøk- nr. 1 og nr. 2.

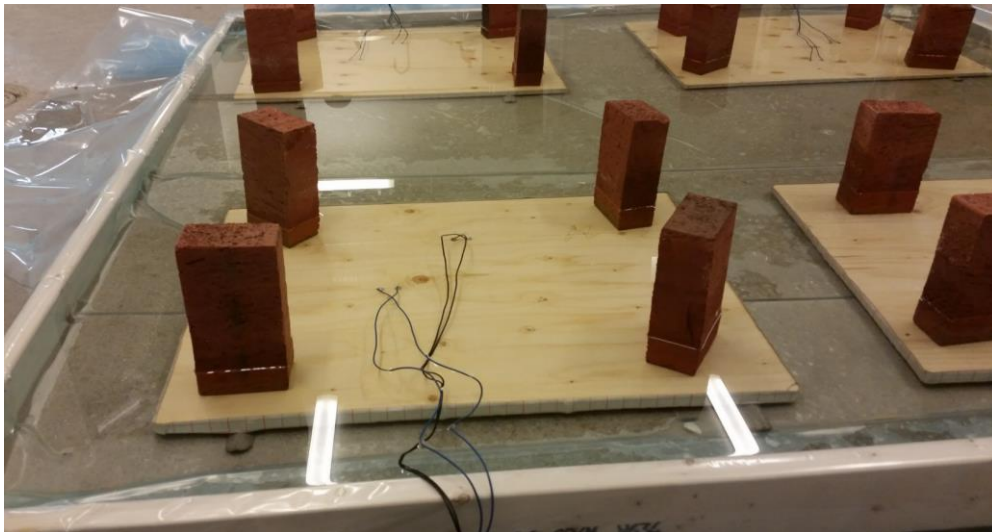
Oppfukting av kryssfinerplater

For å kunne kontrollere graden av uttørking fra boksene ble taktro av 21 mm kryssfinerplater fuktet opp i vannbad til omtrent 30 vekt-% fuktinnhold. Dette vil simulere et høyt innhold av innebygd fukt i en kompakt konstruksjon. For bjelkene ble det valgt et startfuktinnhold på omtrent 15 vekt-% forsøk nr. 1, og 26 vekt-% i forsøk nr. 2. Forhåndsoppfukting av kryssfinerplatene er basert på fremgangsmetoden som tidligere er benyttet i forsøk med SDS ved NTNU (Stellander, 2012; Thorsrud 2012). Fuktinnholdet for kryssfinerplatene ved start i laboratorieforsøkene som blir utført i denne masteroppgaven, vil være omtrentlig likt som for de tidligere forsøkene.

Det ble utført et tørke-veie forsøk med små prøver fra samme kryssfinerplate som ble benyttet til taktro i laboratorieforsøkene for å estimere fuktinnhold til taktroa i prøveboksene ved råvekt og tørrvekt. Forsøket med de små prøvene ble utført på SINTEF Byggforsk og NTNU sine laboratorier i Trondheim med et varmeskap og en liten vekt. vedlegg B viser resultatene for uttørking av kryssfinerprøvene. Først ble råvekten til hver prøve kontrollert og registrert ved veiing, før prøvene ble plassert i varmeskapet som holder konstant temperatur på 105 °C. Når vektendringen for prøvestykkene er under 0,1 % etter et døgn i varmeskap, ansees prøvene for å være tørre. Gjennomsnittlig råvekt ble beregnet til 7,24 vekt-%.

Ved å benytte forholdstallet mellom de små prøvene i tørke-veie forsøket og de store kryssfinerplatene, ble det klart at de store kryssfinerplatene til laboratorieforsøkene i snitt må fuktes opp med omtrent 800 g vann for å oppnå 30 vekt-%, se vedlegg B. For å fukte opp de store kryssfinerplatene til laboratorieforsøkene ble det laget et stort vannbad av treverk og en

plastfolie, se Figur 42. Vannbadet hadde plass til å fukte opp alle kryssfinerprøvene samtidig, i tillegg til bjelkene i forsøk nummer to.



Figur 42. Vannbad til å fukte opp kryssfinerplatene og bjelkene. Trevirke ligger på tynne stålvinkler for å tillate vannoppsug fra over- og undersiden.

Kryssfinerplatene ligger på to tynne vinkeljern av rustfritt stål, og blir holdt nede av teglsteiner som flyttes slik at vannet kan tas opp over hele platens flate på over- og undersiden. Butylbånd er festet rundt platenes endekant for å sikre endimensjonalt fuktopptak. Tabell 7 viser platenes egenskaper og fuktinnhold før oppfukting i vannbad.

Tabell 7. Prøveplatenes egenskaper og fuktinnhold før oppfukting i vannbadet.

	Tørr tilstand (med skruer og ledning, uten tettebånd) [g]	Densitet (med skruer og ledninger) [kg/m ³]	Råvekt før oppfukting [g]	Startfuktighet [vekt-%]
Plate A	3647	395,686	3932	7,81
Plate B	3571	387,440	3850	7,81
Plate C	3580	388,417	3859	7,79
Plate D	3587	389,176	3867	7,81
Plate E	Samme som Plate A	Samme som Plate A	-	-
Plate F	Samme som Plate B	Samme som Plate B	-	-
Plate G	Samme som Plate C	Samme som Plate C	-	-
Plate H	Samme som Plate D	Samme som Plate D	-	-

Gjennomsnittlig hadde platene råvekt på 7,81 vekt-% fuktinnhold.

Til å beregne fuktinnholdet i kryssfinerplatene ble formel vist under benyttet.

$$u = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 \text{ [vekt-\%]}$$

m_w = masse av våt prøve [gram]

m_0 = masse av tørr prøve [gram]

På grunn av varierende fuktopptak i de fire kryssfinerplatene under oppfukning i vannbassenget, ble platene veid hver dag. Oppfukningshastigheten ved fuktinnhold på 28 vekt-% gikk betydelig ned og førte til at enkelte plater måtte ligge lenger i vannbadet for å oppnå omtrent 30 vekt-%. Etter 70 timer ble kryssfinerplatene tatt ut av vannbadet og gjort klare for montering i boksene til forsøk nr. 1. Oppfukning av de samme platene for forsøk nummer to gikk betydelig raskere. Etter 24 timer hadde platene oppnådd 30 vekt-% fuktinnhold. Det antas at noe av belegget på platene som skal beskytte materialet mot oppfukning er blitt vasket vekk. Det er også antatt at kryssfinerplatene har blitt mer porøse etter påkjenninger fra forsøk nr. 1 med høy oppfukning etterfulgt av en tørkeperiode. Vedlegg D viser oppfukningsprosessen til kryssfinerplatene.

Tabell 8 viser fuktinnhold i vekt-% for alle platene ved siste veiing før montering (fete tall). Vekten som vises i Tabell 8 er inkludert skruer og ledninger.

Tabell 8. Utrechnet vektprosent til kryssfinerplater i laboratorieforsøkene før montering.

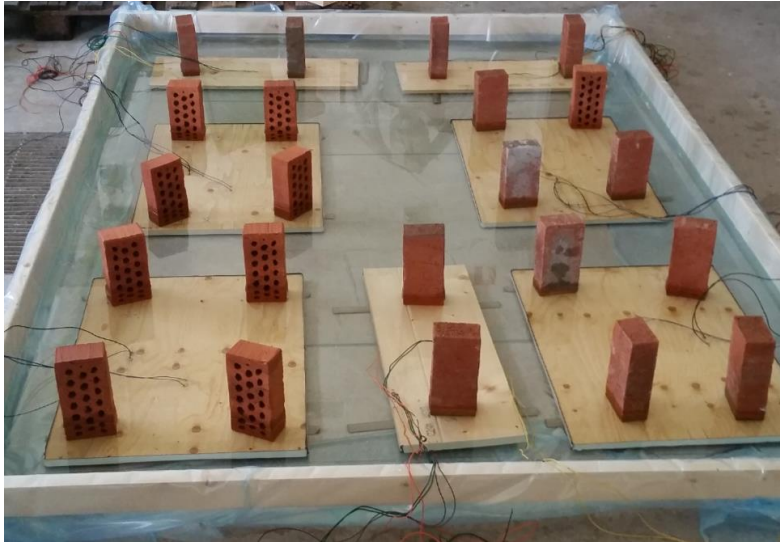
Kryssfiner-plate	Kryssfiner tørrvekt [g]	Kryssfiner ved montering [g]	Fuktinnhold i kryssfiner før montering [g]	Fukt i kryssfiner før montering [vekt-%]
Plate A	3647	4711	1064	29,17
Plate B	3571	4617	1046	29,29
Plate C	3580	4686	1106	30,91
Plate D	3587	4701	1114	31,06
Plate E	3647	4750	1103	30,24
Plate F	3571	4625	1054	29,52
Plate G	3580	4634	1054	29,46
Plate H	3587	4681	1094	30,50

Gjennomsnittlig hadde platene et startfuktinnhold på 30,02 vekt-%.

Oppfukning av bjelker

I det første laboratorieforsøket ble bjelkene fuktet opp til likevekt ved å ligge i et klimarom som holdt konstant 33 °C og 75 % RF i over fire uker. To uker er normalt tilstrekkelig tid for å oppnå likevekt. Bjelkene ble plassert i klimarommet i desember 2016, og tatt ut for montering i slutten av januar. Bjelkeendene på kappsiden ble dekket med to strøk epoxy behandling for å unngå ujevn oppfukning. Ved montering av prøveboksene hadde de fire trebjelkene et gjennomsnittlig fuktinnhold på 14,5 vekt-%.

I det andre laboratorieforsøket ble bjelkene fuktet opp i samme vannbad som kryssfinerplatene for å øke startfuktinnholdet, se Figur 43.



Figur 43. Oppfukting av bjelker og kryssfinerplater i forsøk nummer to.

Før oppstart av forsøk nr.2 ble det utført et mindre forsøk med oppfukting og tørking av små bjelkeprøver for å finne oppfuktingshastighet og tørrvekt til bjelkene. Resultatene fra forsøket med bjelkeprøvene er vist i vedlegg C. Tørrvekten til bjelkene ble i tillegg kontrollert med beregnet tørrvekt fra forsøk nr. 1 hvor de hadde likevekt etter å ha ligget i klimarom i over fire uker. De samme heltrebjelkene som ble benyttet i det første forsøk nr. 1 ble benyttet i forsøk nr. 2. Det ble anskaffet en ekstra bjelke siden ingen av boksene i det andre forsøket benyttet I-bjelke. Den nye bjelken ble også dekket med to strøk epoxy maling på de avkappede endene før bjelkene ble plassert i vannbadet. Tabell 9 viser fuktinnholdet for alle bjelkene i vekt-% før de ble montert i prøveboksene. Vedlegg E viser oppfuktingsprosessen til bjelkene for forsøk nr. 2. Vekten som er vist i Tabell 9 er inkludert skurer og ledninger.

Tabell 9. Utrechnet fuktinnhold i vekt-% for bjelkene i laboratorieforsøkene før montering.

Bjelke	Bjelke tørrvekt [g]	Bjelke ved montering [g]	Fuktinnhold i bjelke før montering [g]	Fukt i bjelker før montering [vekt-%]
Bjelke A	3432	3895	463	13,5
Bjelke B	3375	3864	489	14,5
I-Bjelke C	2362	2748	386	16,3
Bjelke D	3379	3869	490	14,5
Bjelke E	3432	3874	442	12,9
Bjelke F	3375	4305	930	27,6
Bjelke G	3302	4162	860	26,0
Bjelke H	3379	4253	874	25,9

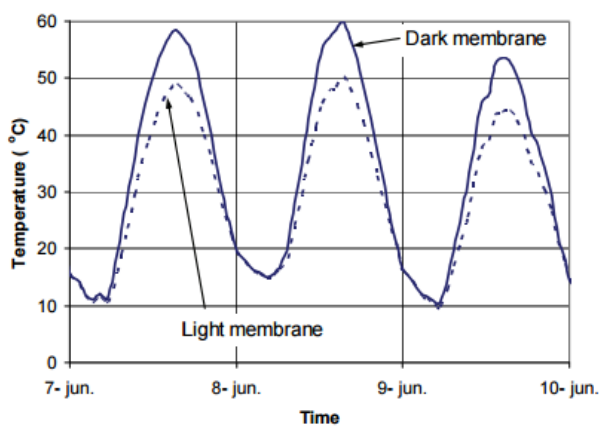
4.6 Klimaforhold

I laboratorieforsøkene skal det vurderes innadrettet uttørking ved bruk av SDS. Potensialet for innadrettet uttørking ved bruk av SDS er størst i de varme sommermånedene når solen står høyt på himmelen. Kortbølgede stråler fra sola absorberes på takoverflaten og temperaturen i

taktroa øker. Dersom fukt befinner seg i kompakttaket, øker fordampningshastigheten med temperaturøkningen i takkonstruksjon. Fordampningshastigheten er i tillegg til temperaturøkningen avhengig av mengden vandamp som er i luften fra før (Byggforskserien, 2007). Dersom vandamptrykket og temperaturen i luften inne i kompakttaket er høyere enn i luften på innsiden av klimaskallet, oppstår det vandampdiffusjon gjennom den smarte dampsperran fra varm- til kald side. Innendørsklima i Norge om sommeren er ofte kaldere og tørrere enn utendørsklima i godt isolerte bygninger med dagens TEK krav. Klimaforskjellene kan dermed utnyttes for å skape en innadrettet uttørking av konstruksjoner ved bruk av SDS under de rette forutsetningene.

4.6.1 Utvendig klima

Kortbølget stråling fra sola som absorberes av takbelegget kan bidra til at temperaturen over taket kan nå opp mot 60 °C, avhengig av type takbelegg. Et forsøk som ble utført ved Voll i Trondheim viste at det kan være store forskjeller i overflatetemperatur avhengig av om det benyttes et takbelegg med en mørk overflate, eller om det benyttes takbelegg med en lysere overflate, se Figur 44 (Geving & Holme, 2009).



Figur 44. Temperaturendringer i taktro ved bruk av lys- og mørk overflate på takmembran over en periode på tre dager.

Bitumen takbelegg som er et av de mest benyttede takbeleggene for flate tak i dag, har en mørk overflate med en høy absorpsjonsfaktor som ligger mellom 0,8 – 0,9. Lysere takbelegg som finnes på markedet kan eksempelvis være PVC takbelegg som kan produseres med både lyse og mørke nyanser. De lyse takbeleggene kan ha en absorpsjonsfaktor ned mot 0,3. Overflatetemperaturene på taket med lysere takbelegg (absorpsjonsfaktor på 0,65) viste i forsøket ved Voll å ha en temperatur som lå omtrent 10 °C under temperaturen til tak hvor det var benyttet et mørkere takbelegg (absorpsjonsfaktor på 0,9), når temperaturene i løpet av døgnet var på det høyeste (Geving & Holme, 2009). Våren 2012 ble det utført et laboratorieforsøk ved NTNU med bruk av SDS i kompakttak, hvor det utvendige klimaet ble basert på en gjennomsnittstemperatur fra forsøket ved Voll (Stellander, 2012). Temperaturen over taktroa var satt til 45 °C i åtte timer per døgn, over en periode på 60 dager. Det kan anses som et veldig optimistisk tilfelle hvor man har 60 dager med klar himmel og sol.

Det ble gjennomført et nytt laboratorieforsøk ved NTNU med bruk av SDS i kompakttak høsten 2012 (Thorsrud, 2012). Før laboratorieforsøket startet, ble det utført en forstudie for å utarbeide en klimasyklus hvor skyggeforhold er tatt med i betraktningen av temperaturvariasjonene på tak. En slik tilnærming er mer realistisk sammenlignet med de høye temperatursyklusene som ble benyttet i det foregående forsøket. Klimasyklusen for utendørsklima som ble benyttet i laboratorieforsøket utført ved NTNU høsten 2012, er den samme syklusen som ble valgt for laboratorieforsøkene som omhandles i denne rapporten (Thorsrud, 2012). Klimasyklusen er vist under, og er en mer konservativ klimasyklus sammenlignet med den som ble benyttet våren 2012. Det henvises til prosjektoppgaven fra høsten 2012 for en fullstendig utredning av forstudiet til klimaparameterne (Thorsrud, 2012).

- 1) 13 dager med 25 °C (på i seks timer, av de resterende timer av døgnet.)
- 2) 4 dager med 33 °C (på i seks timer, av de resterende timer av døgnet.)
- 3) 13 dager med 30 °C (på i seks timer, av de resterende timer av døgnet.)

Syklusen vist over viser 30 dager med variert temperatur som ble gjentatt en gang for å vurdere uttørkingspotensialet etter 60 sommerdager. Ved å bruke samme klimasyklus som tidligere kan resultatene sammenlignes med tidligere utført laboratorieforsøk.

For å kunne styre temperaturen over prøveboksene ble det benyttet en digital temperaturstyringsenhet. Strømkontakten til temperaturstyringsenheten ble koblet til et tidsstyringsapparat som er justert til å gi strømføring til temperaturstyringsenheten i seks timer hvert døgn. Ved bruk av disse apparatene var det mulig å kontrollere døgnsyklustemperaturen over prøveboksene.

4.6.2 Innvendig klima

Det innvendige klimaet som ble bestemt for laboratorieforsøkene er likt med inneklimate som har blitt benyttet i tidligere lignende forsøk ved NTNU (Stellander, 2012; Thorsrud, 2012). I klimarommet hvor forsøksriggen er plassert, ble temperatur og RF stilt inn til å holde henholdsvis 23 °C og 50 % konstant ved hjelp av et klimaskap. Klimaskapet som styrer det innvendige klimaet i rommet klarer ikke å holde konstante verdier til enhver tid, men variasjonene er ikke store nok til å utgjøre betydelige forskjeller for inneklimate. Det er hengt opp en sensor midt i klimarommet for å kontrollere og loggføre innvendig RF og temperatur. Verdierne som er bestemt for det innvendige klimaet fremstiller normale innendørsforhold en norsk sommerdag i et hus med dagens TEK krav.

4.7 Målinger

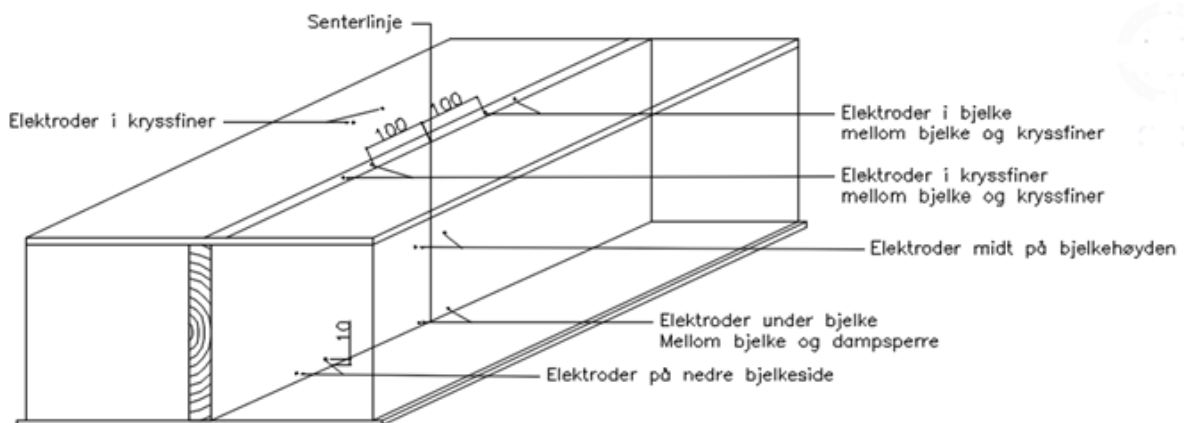
I laboratorieforsøkene var det fire parametere som ble målt, og registrert for hver prøveboks. Prøveboksenes uttørkingsevne ble registrert ved periodevis veiing, fuktinnhold i trematerialene ble målt med manuelle målinger av elektroder, RF og temperatur ble loggført med sensorer i utvalgte områder. I følgende underkapitler blir målemetodene og de utvalgte områdene for målinger nærmere beskrevet.

4.7.1 Uttørkingsevne

For å kontrollere prøveboksenes uttørkingsevne ble prøveboksene veid med jevne mellomrom. Det ble først utført en veiing når boksene var ferdig montert, like før de ble plassert i riggen. I det første forsøket ble det utført veiinger en gang i uka, og ved hver endring av ny temperatursyklus. I det andre forsøket ble det utført veiinger tre ganger i uka frem til resultatene ble hentet ut. På grunn av størrelsen og vekten til prøveboksene var det nødvendig å benytte en stor vekt som var kapabel til å vise boksenes vekt ved veiing. Det ble benyttet en vekt kalt Spider 1S fra produsent Mettler Toledo, til å veie boksene. Vekten som ble benyttet viser kg med to desimaler (0,00 kg), noe som betyr at hyppigere veiinger ikke ville vist store endringer i vekttap for prøvene. Vekten er plassert på en tralle med hjul slik at boksene ble løftet ned fra riggen og plassert rett på vekten i korte perioder under veiing. Vekttapet for hver boks fra forsøkets start til forsøkets slutt angir netto uttørking som følge av vanddampdiffusjon gjennom den smarte dampspærren.

4.7.2 Trefuktighetsmålinger

Underveis i forsøkene ble fuktinnholdet i kryssfinerplater og bjelker målt tre ganger i uka. Trefuktighetsmålinger er nyttig for forsøket siden det sier noe om fuktinnholdet øker eller reduseres med temperatur- og RF-endringene i boksen. Fuktinnholdet ble registrert ved hjelp av elektrisk motstandsmåling også kalt elektrisk resistans. For trevirke vil materialets resistans reduseres med økt fuktinnhold. For å måle resistansen ble det montert to skruer parallelt med 2 cm mellomrom for utvalgte områder i trevirke i hver boks, se Figur 45. Skruene fungerer som elektroder ved fuktmåling av elektrisk resistans.



Figur 45. Plassering av elektrodepar i prøveboksene for registrering av fuktinnhold i trevirke.

Videre kommer en forklart beskrivelse av plasseringen til elektrodeparrene benyttet til fuktregistrering.

Elektrodeplassingering i kryssfinerplate:

- Under kryssfinerplate i overkant av isolasjon (midt mellom bjelke og kant av boks).
- Under kryssfinerplate, i kontaktflaten mellom kryssfiner og bjelke.

Elektrodeplassingering i bjelke:

- Overkant av bjelke, i kontaktflaten mellom kryssfiner og bjelke.
- Midt på bjelkesidens høyde og lengderetning, ut mot isolasjonssjiktet.
- Nederst på bjelkes side over dampspærresjiktet, ut mot isolasjonssjiktet.
- Under bjelken, i kontaktflaten mellom bjelke og dampsperre.

For å muliggjøre registrering av fuktinnhold utenfor prøveboksene, ble det tvinnnet kopperledninger under skruehodet som ble trekt ut av boksene, se Figur 46.



Figur 46. Elektroder (skruer) med kopperledning for å muliggjøre registrering av fuktinnhold fra boksens utside.

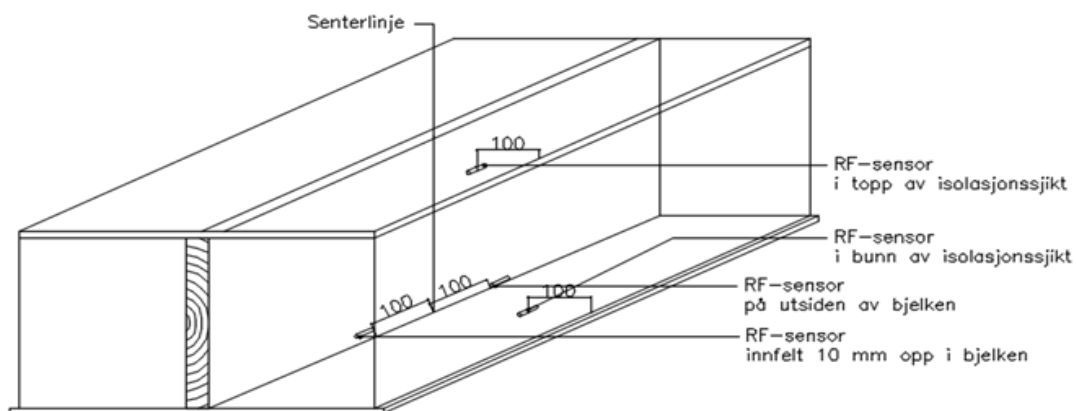
Måleapparatet som ble benyttet til å registrere fuktinnhold er produsert av AB Brookhuis og heter FME Moisture Meter, se Figur 47 (Brookhuis, 2004). Apparatet må forhåndsinnstilles til korrekt trevirke og temperatur for måleområde. Apparatet kommer ferdigprogrammert med de fleste typer trevirke fra produsenten. For skandinavisk gran som var benyttet i laboratorieforsøkene har SINTEF lagt inn parametere for denne manuelt. Temperaturene ble kontrollert før målinger ble utført, siden det i tilfeller var høyere temperaturer i øvre sjikt inne i prøveboksene.



Figur 47. FME Moisture Meter benyttet til å måle fuktinnhold i trematerialene.

4.7.3 Måling av RF og temperatur

Som beskrevet i kapittel 4.2.1 er S_d -verdi til AGS RF-avhengig. Derfor er det interessant å måle RF i områder rundt dampspærren. Samtidig er det interessant for forsøket å observere fuktvandringen inne i prøveboksene. Sensorene som benyttes i forsøket er av typen EE06-FT1A1, og måler både RF og temperatur. Sensorene produseres av E+E Elektronik, og har en lengde på 116 mm, med diameter på 12 mm (E+E Elektronik, 2016). RF er forholdet mellom vanndampmengden i lufta og den maksimale vanndampmengden som luften kan inneholde ved samme temperatur. Det er derfor nødvendig at sensorene kan måle temperatur og RF samtidig, fordi forholdet mellom temperatur og vanndampmengde vil variere gjennom hele forsøksperioden. I hver boks er det plassert fire RF-sensorer, med unntak av Boks A, B, G, og H, hvor det er plassert en ekstra sensor i sjiktet mellom dampspærre og gipsplate. Plasseringen av de øvrige fire RF-sensorene er lik for alle prøvebokser, og er vist med en skisse, se Figur 48.

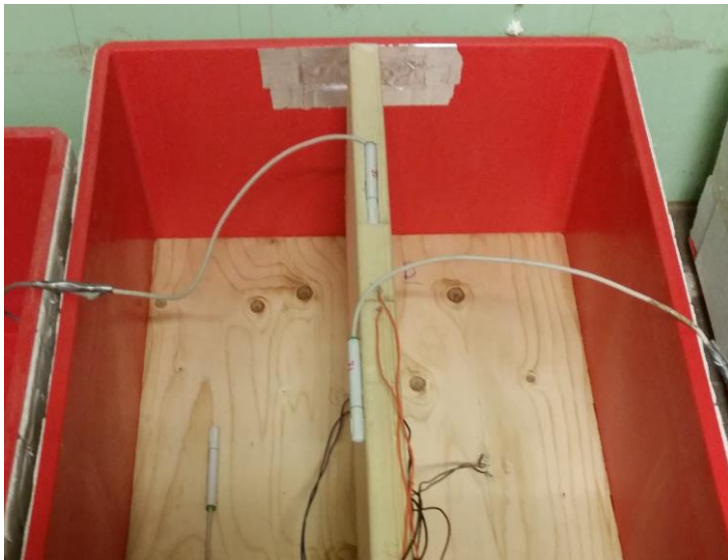


Figur 48. Plassering av RF-sensorer som er likt for hver boks.

Plassering av de fire RF-sensorene som er likt for alle boksene er videre listet opp og beskrevet.

- Øverst i isolasjonssjiktet under kryssfinerplaten (midt mellom bjelken og boksens sidekant).
- Nederst i isolasjonssjikt over dampspærren (midt mellom bjelken og boksens sidekant).
- Nederst i boksen ved siden av bjelken, like over dampspærren.
- Inne i bunnen av flasken på bjelken, over dampspærren.

For å kunne plassere en RF-sensor i bunnen av bjelken, er det blitt garpet ut et hulrom som passer nøyaktig til sensoren, se Figur 49.



Figur 49. RF-sensorer montert i prøveboks før isolasjon monteres. Øverst i figuren kan man observere RF-sensoren som er plassert inne i bunnen av bjelken.

Valget med å plassere en ekstra RF-sensor på dampspærrens innside (mellom gips og dampspærre) er begrunnet med at en ønsker å vurdere om et installasjonssjikt (uisolert) vil påvirke RF-nivået på innsiden av dampspærren. Dersom det viser seg å være forskjeller i RF-nivå ved bruk av et installasjonssjikt, kan det påvirke uttørkingsgraden til dampspærren. Målingene kan også benyttes til å vurdere gjennomsnittlig RF mellom inn- og utsiden av dampspærren. Dermed er det mulig å observere omtrentlig RF-nivå inne i dampspærresjiktet. Ved å studere RF i dampspærresjiktet, kan man vurdere vanndamppermeabiliteten til dampspærren over forsøksperioden.

4.8 Måleusikkerheter og forenklinger

Under laboratorieforsøk kan det være ulike forhold som fører til måleusikkerhet og forenklinger. I følgende kapittel vil forhold som kan være av avgjørende betydning for resultatene bli redegjort.

Oppfukning av kryssfinerplater

Fuktinnholdet som vises for kryssfinerplatene i rapporten er omtrentlig nøyaktig. Platenes råvekt og tørrvekt ble estimert ut fra et gjennomsnitt etter å ha gjennomført et forsøk med tørke-veiemetoden. Det betyr at oppfuktingen i vannbad kan ha gitt høyere eller lavere reell verdi for vekt-% i forhold til det som er blitt kalkulert. For å estimere fuktinnhold og tørrvekt til kryssfinerplatene ble prøvestykkene til forsøket med tørking og veiing tatt fra samme kryssfinerplate som ble brukt til å lage prøveboksene taktro. Det ansees sannsynlig at det er et varierende fuktinnhold i kryssfinerplaten på 1200 x 2400 mm fra fabrikk. Det kan medføre at den beregnede tørrvekten har et avvik fra reell tørrvekt.

En ytterligere faktor som gjør det vanskelig å vurdere fuktinnholdet i kryssfinerplatene er limet som brukes i materialet for å holde lamellene sammen. Limet som er fuktbestandig fører til en ujevn oppfukning av materialet. I praksis betyr dette at fuktinnholdet i platenes kjerne vil være lavere enn ved overflaten. Vekten til kryssfinerplatene som er presentert i denne masteroppgaven inkluderer skruer og ledninger med mindre annet er oppgitt, derfor er ikke vekt-% som vises i rapporten helt nøyaktig.

Oppfukning av bjelker

I det første laboratorieforsøket ble bjelkene lagt i et klimarom ved konstant RF. Etter å ha ligget over fire uker i klimarom ble alle bjelkene målt med fuktmåler for å kontrollere at materialene hadde oppnådd likevekt. Da likevekt i materialet var oppnådd ble heltrebjelkenes tørrvekt beregnet ut fra målt fuktinnhold. Gjennomsnittlig hadde heltrebjelkene et fuktinnhold på mellom 14- og 15 vekt-%. Målinger med fuktmålingsapparat er ikke hundre prosent nøyaktig, derfor kan det være avvik i målt vekt-% fuktinnhold. Da fuktinnholdet i bjelkene ikke var over 25 vekt-% og de hadde oppnådd likevekt, var det mindre sannsynlig at det målte avviket var stort. Fuktmålinger under 25 vekt-% har bedre nøyaktighet enn målinger ved høyere fuktnivå. Derfor antas det at nøyaktigheten er god for målte fuktinnhold. På grunn av at flensen til I-bjelken var består av limte lameller ble tørrvekten bestemt ved å tørke bjelken i et varmeskap etter det første forsøket var over. Beregninger av I-bjelkens tørrvekt kan sees i vedlegg F.

I forsøk nr. 2, da bjelkene skulle fuktes opp til 25 vekt-% ble fuktøkningen beregnet ut fra tørrvekten som ble kartlagt etter fuktmålingen ved likevekt i forsøk nr. 1. Det ble utført et laboratorieforsøk med korte heltreprøver og lik dimensjon for å kartlegge oppfukningshastigheten til bjelkene som skulle benyttes i prøveboksene, se vedlegg C. Oppfukning til omtrent 25 vekt-% for de små prøvene tok 73 timer. Da bjelkene til prøveboksene skulle fuktes opp tok dette vesentlig lenger tid sammenlignet med de små prøvene. På grunn av komplikasjoner med klimaskapene i laboratoriet måtte forsøk nr. 2 utsettes og bjelkene ble lagt i plast. Etter tre uker var det igjen klart for å fortsette oppfuktingen. På dette tidspunktet hadde bjelkene oppnådd omtrentlig likevekt ved 19 vekt-% fuktinnhold etter kontroll med fuktmåler. Etter 24 timer med ytterligere oppfukning i vannbad var fuktøkningen ved beregning gjennomsnittlig 4 vekt-%. Det ble derfor utført en kontroll

med fuktmåler som kun viser fuktinnholdet ytterst ved elektrodepinnene. Fuktmåleren viste at gjennomsnittlig fuktinnhold i midten av bjelkene varierte mellom 27- og 28 vekt-%. Beregningene for fuktinnhold ved 25 vekt-% ble dermed kontrollert, og det ble oppdaget en feil. Feilen ble rettet, slik at det korrekte fuktinnholdet i gram ble justert. Bjelkene tørket da monteringen foregikk, og ble veid like før de skulle monteres i boksen. Bjelkene har gjennomsnittlig fuktinnhold på 26 vekt-% ved start. Et fuktinnhold på 26 vekt-% anses som høyt for bjelker som lukkes inn i konstruksjoner. Det høye fuktinnholdet som ble valgt skulle simulere et ekstremt tilfelle med innebygd byggfukt. Derfor vil variasjon i fuktinnholdet til bjelkene ikke være kritisk for forsøkets utfall. Det er dermed ikke gitt mer oppmerksomhet til denne usikkerheten annet enn at det beskrives her. Da vekten til bjelkene som presenteres i denne masteroppgaven inkluderer skruer og ledninger, med mindre annet er oppgitt, er ikke rapportens vekt-% helt nøyaktig.

Trefuktighetsmålinger

Produsent AB Brookhuis oppgir at måleapparatet FME Moisture meter som ble brukt i forsøket kan måle fuktinnhold i trevirke mellom 5 og 99 vekt-% (Brookhuis, 2004). Videre oppgir produsenten at målenøyaktigheten for instrumentet er 0,3 vekt-% for forhåndsprogrammerte referansematerialer i instrumentet (Brookhuis, 2004). Fuktinnhold i trevirke målt med elektrodeinstrumenter vil være unøyaktig over 30 vekt-%. Måling av elektrisk resistans vil uansett gi en god indikasjon på fuktøkning og fuktreduksjon i materialene. Ved fuktinnhold over 20 vekt-% i treverk er faren for muggvekst økende med økt fuktinnhold, derfor vil måleinstrumentet som ble benyttet være tilstrekkelig for dette forsøket, og problemstillingen er derfor ikke viet mer oppmerksomhet.

Ved å benytte skruer som elektroder til fuktmålingen vil kun de høyeste verdiene av fuktinnhold registreres. De høyeste verdiene antas å være i materialets ytterste sjikt. Som tidligere nevnt er det sannsynlig at fuktfordelingen i kryssfinerplatene vil være ujevn. I kapittel 4.9.3 om trefuktighetsmålinger er måleresultatene av fuktinnhold i kryssfinerplatene er korrigert med en korreksjonsformel for å vise tilnærmet reelt fuktinnhold. Korreksjonsformelen er hentet fra et tidligere forsøk hvor fuktmåling i kryssfinerplater ble utført (Geving & Holme, 2010). Selv med korreksjonsformelen vil resultatene ikke vise et reelt fuktinnhold, men et tilnærmet realistisk fuktinnhold. Resultatene vil fremdeles gi et godt bilde av uttørkingsforløpet i forsøksperioden. Reelt fuktinnhold ved start og slutt i forsøk nr. 1 er vist ved hjelp av beregninger etter veiing.

For I-bjelkens flens som er laget av limte lameller av gran (som en kryssfinerplate), er det gjort et laboratorieforsøk for å komme frem til en avviksformel for å korrigere målt fuktinnhold til å vise reelt fuktinnhold i resultatene som presenteres i kapittel 4.9.3.

I forsøksperioden ble det oppdaget dårlig kontakt i ledningen fra måleapparatet. Verdiene som instrumentet viste brukte lang tid på å stabilisere seg. Samtidig stemte ikke verdiene med tidligere registrerte data. En ny ledning ble anskaffet til måleinstrumentet som viste seg å gi

mer stabile og korrekte måledata. Etter at den nye ledningen ble tatt i bruk ble den benyttet gjennom resten av forsøksperioden i forsøk nr.1, og i hele forsøk nr. 2.

En uke ut i første forsøk ble det oppdaget at fuktmåleren viste varierende verdier avhengig av hvilken pol som ble koblet til elektrodeparet ved samme målepunkt i boksen. Det ble derfor bestemt å gjøre to målinger for hvert målepunkt ved å bytte poler, og ta et gjennomsnitt av målte verdier for å bestemme fuktinnholdet til målepunktet.

Temperatursyklus

Prøvene tok lengre tid å montere enn hva som var forventet. Det førte til at det måtte arbeides ut over alminnelig arbeidstid for å ferdigstille prøveboksene. Boksenes størrelse og vekt førte til at det var nødvendig med to personer for å montere de i riggen. Prøveboksene for forsøk nr. 1 ble montert på en fredag. Det ble derfor valgt å la boksene stå ferdig montert på gulvet i klimarommet til over helgen. Dermed ble ikke klimasyklusen startet før mandags morgen, 3 dager etter RF-sensorene startet loggføringen. Dette vises i grafene som er presentert i kapittel 4.9.

I enkelte tilfeller havnet endringen i døgnsyklustemperatur på helgedager eller helligdager. Det var ingen tilgang til laboratoriet utenom virkedager, som gjorde det umulig å endre temperatursyklusen i helger og helligdager. Det resulterte i at enkelte av temperatursyklusene fortsatte én dag mer eller mindre enn hva som var planlagt.

RF-sensorer

RF-sensorene EE06-FT1A1 som er produsert av E+E Elektronik, har et membranfilter rundt sensoren, og er en av de mest nøyaktige utgavene av RF-sensorer produsenten har tilgjengelig. Det er fortsatt usikkerhet tilknyttet sensorene. Produsenten oppgir at nøyaktigheten ved 20 °C i området 0 til 95 % RF ligger på $\pm 3 \%$ og $\pm 5 \%$ usikkerhet i området 95 til 100 % RF (E+E Elektronik, 2016). RF-sensorene er av samme type som ble benyttet i tidligere forsøk ved NTNU i 2012 (Stellander, 2012; Thorsrud, 2012). Det antas også at sensorene har en treghet dersom RF-nivåer nær 100 % vedvarer over tid. Tregheten vil føre til at sensorene fortsetter å vise nær 100 % RF selv om reell RF er i ferd med å reduseres.

Sensorene som ble benyttet i forsøkene ble kalibrert ved SINTEF Byggforsk mellom 16. og 20. september 2016, og er ikke blitt brukt i andre forsøk etter kalibreringen. Ved 50 % RF i klimarommet var avviket målt til mellom $\pm 0,8\%$ og $\pm 2,1 \%$ RF i forhold til gjennomsnittet. Temperaturavviket var målt til mellom $\pm 0,2\%$ og $+0,4 \%$ °C ved samme RF. Ved 75 % RF i rommet var avviket målt til mellom $\pm 3,0\%$ og $\pm 4,4 \%$ RF. Temperaturavviket ble målt til mellom $\pm 0,3\%$ og $+0,1 \%$ °C. Avviket i RF er større i forhold til hva som er oppgitt fra produsenten. Dette kan skyldes slitasje av instrumentene etter flere års bruk. Resultatene fra laboratorieforsøkene har ikke blitt korrigert med de målte avvikene.

Under forsøk nr. 1 ble det oppdaget at loggeren sluttet å lagre dataene etter to uker. Feilsøking viste at loggeren sin programvare var justert til ikke å overskride lagringsplassen på

harddisken ved en gitt grense. Det gikk omtrent en uke fra problemet ble oppdaget til problemet ble løst. Det betyr at det ikke ble registrert RF og temperatur inne i prøveboksene i en periode på syv dager. Det er også registrert 10 timer tapt data ved dag 24 i forsøk nr.1. I forsøk nr. 2 har dette problemet blitt viet oppmerksomhet slik at data ikke skulle gå tapt under loggføringen.

Veiing av prøveboksene

Det ble nødvendig å benytte en stor vekt til veiingen på grunn av størrelsen og vekten på boksene. Vekten som er benyttet heter Spider 1, og er fra produsent Mettler Toledo. Vekten viser kun kg med to desimaler (0,00 kg), som gjør det vanskeligere å skille den totale uttørkingsgraden mellom prøveboksene. Det er oppgitt på vekten og fra produsenten at den har en usikkerhet på ± 20 gram (Mettler Toledo, 2006). Vekten hører til SINTEF Byggforsk sine laboratorier, det er derfor SINTEF som står ansvarlig for kalibrering av vekten. Det er usikkert når, og hvor ofte vekten kalibreres.

I forsøk nr. 1 var ledningene tilkoblet loggeren direkte. Det ble bestemt å la sensorene være tilkoblet loggeren under hele perioden i forsøk nr. 1, slik at en ikke risikerte å koble sensorene feil etter veiing. Metoden som ble benyttet for å oppnå tilnærmet likt veiingsforhold ved første forsøk var å løfte på ledningene så de lå horisontalt ut fra boksen. Det kan derfor knyttes usikkerhet til veiingen i forsøk nr.1.

I forkant av forsøk nr. 2 startet ble det montert avtakbare koblinger for enkel av- og påkobling til RF-sensorene, se Figur 37. Dermed kunne veiingen utføres med vekten av ledningene for en mer nøyaktig måling.

Inneklima

Temperaturen i rommet for første forsøk varierte med $\pm 0,3$ °C. Det høyeste avviket var en kort periode med $+0,7$ °C. RF varierte gjennomsnittlig mellom 50- og 51 % i hele forsøksperioden. Dette kan anses som små avvik, og vil ikke påvirke forsøket ytterligere. Det er derfor ikke viet mer oppmerksomhet til dette avviket.

Nattkjøling

Laboratorieforsøkene som er utført tar kun for seg innadrettet uttørking basert på høye temperaturer på takoverflaten som skyldes kortbølget stråling fra sola på dagtid en sommerdag i Norge. I en reell situasjon kan en skyfri på himmel nattestid føre til at langbølget varmestråling fra taket kjøler ned takkonstruksjon. Dette kan føre til utadrettet diffusjon inne i kompaktaket. Denne effekten er ikke inkludert i laboratorieforsøkene da det ikke finnes kjøling over prøveboksene i riggen. Inkludering av tilfellet med temperaturfall over boksene ville trolig ført til endring i omfordelingen av fukt i prøveboksene.

4.9 Resultater og vurderinger

I dette kapittelet vil resultatene fra laboratorieforsøkene bli presentert, sammenlignet, analysert og vurdert. Dataene samlet i laboratorieforsøkene kan samtidig benyttes til etterberegning og validering av materialparametere for fremtidig forskning på bruk av SDS. Oppbyggingen av prøvekonstruksjonene og startfuktinnhold er beskrevet i henholdsvis kapittel 4.4 og 4.5. Grensebetingelsene er beskrevet i kapittel 4.6 om Klimaforhold.

Laboratorieforsøk nr. 2 pågikk samtidig som analysen av det første forsøket ble utført, derfor vil vurderingene av resultatene være todelt i hvert kapittel. Først presenteres resultatene fra forsøk nr. 1, deretter blir resultater forsøk nr. 2 presentert. Begrenset tid førte til at resultatene som presenteres i denne oppgaven for forsøk nr. 2 kun tar for seg de tre første ukene av forsøksperioden. Sluttresultater er derfor ikke presentert for forsøk nr. 2 i denne oppgaven. Det er i enkelte tilfeller gjort sammenligninger av resultatene i første periode fra forsøk nr. 1 med resultatene fra forsøk nr. 2.

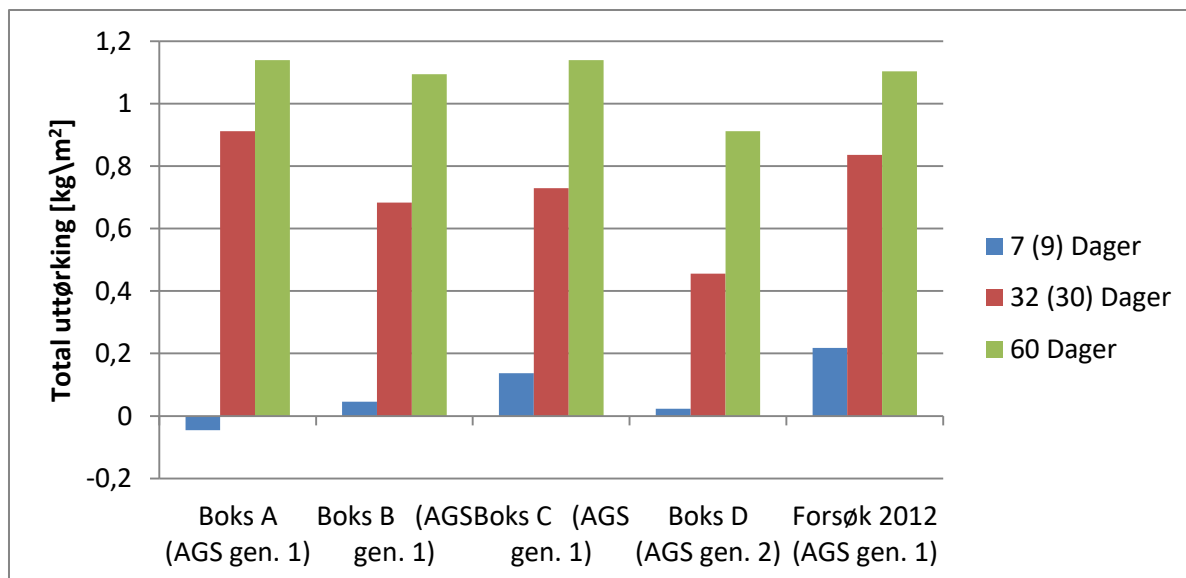
Fuktvandring inne i- og ut av prøveboksene har vært hovedfokus ved analyse av resultatene. Det er for enkelte områder gjort sammenligninger med resultater fra en tidligere masteroppgave utført ved NTNU. Forsøkene utført i denne oppgaven benyttet flere av de samme materialene, og de samme grense- og startbetingelsene (Thorsrud, 2012). Videre ble det utført en vurdering av risiko for mugg- og råtevekst i trevirke.

4.9.1 Uttørkingsevne

Prøveboksene sin uttørkingsevne er registrert ved å veie prøveboksene jevnlig gjennom hele forsøksperioden. Det stilles usikkerhet til veiemetoden i første forsøk, ettersom ledningene ut fra boksene måtte løftes for å ikke påvirke vekten. Disse usikkerhetsfaktorene er utredet nærmere i kapittel 4.8.

Resultater fra forsøk nr. 1

Diagrammet i Figur 50 viser uttørkingsgraden til de fire boksene i forsøk nr. 1, sammenlignet med et tidligere forsøk fra 2012. Tallene i parentes viser dagene hvor målinger fra det tidligere forsøket ble utført. Det er et avvik på to dager ved sammenligning etter 7- og 32 dager.

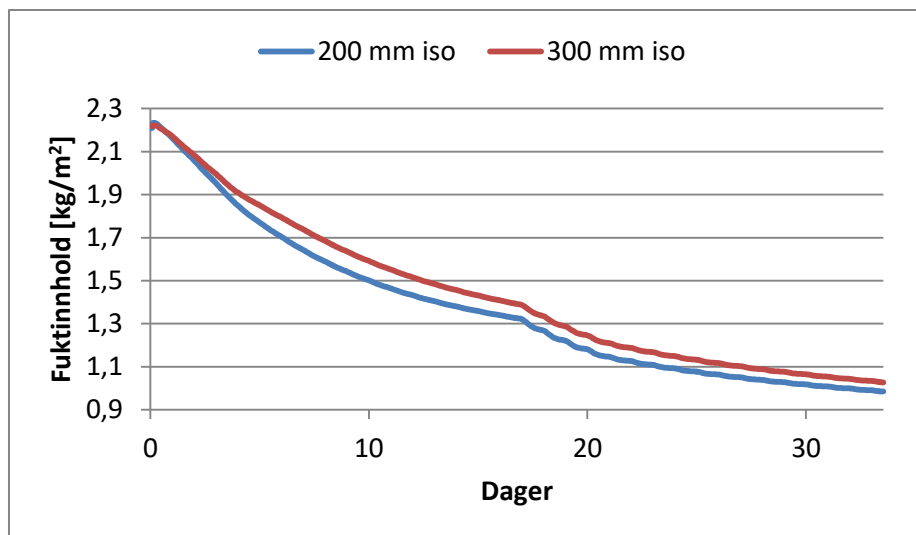


Figur 50. Total uttørking av prøveboksene i kg/m^2 etter 7-, 32- og 60 dager. Tallene i parentes (9 og 30) er dagene for fuktregistrering i forsøket fra 2012.

Uttørkingsgraden i Figur 50 er vist i kg/m^2 . En vesentlig forskjell fra forsøkene våren 2017 og det som ble utført høsten 2012 er tykkelsen på isolasjonssjiktet. Laboratorieforsøkene utført i denne masteroppgaven hadde et isolasjonssjikt på 30 cm. Prøveboksene benyttet i 2012 hadde et isolasjonssjikt på 20 cm. Det gir en differanse i isolasjonstykkelse på 10 cm for prøveboksene i de to forsøkene. Diagrammet i Figur 50 viser at uttørkingsgraden til de to boksene som kom best ut i forsøket er omtrent likt med tidligere forsøk.

Prøveboksene- A, B og D tørker ut lite den første uka i sammenlignet med prøveboksen fra 2012. Årsaken til mindre uttørking i Boks- A, B og D antas å skyldes tre faktorer. Påvirkningen av mer treverk, større volum for omfordeling av fukt, og større dampmotstand fra kryssfinerplate til dampsperre på grunn av økt isolasjonstykkelse. Boks C tørker ut omtrent 37 % mindre fukt sammenlignet med prøveboksen fra 2012. Økt isolasjonstykkelse vil påvirke hvor raskt RF over dampsperrsjiktet i boksene øker på grunn av lenger avstand mellom fuktkilde og dampsperre som videre fører til økt dampmotstand. I følge SINTEF Byggforsk tilsvarende 10 cm mineralull en dampmotstand på 0,18 m ved 70 % RF (Byggforskserien, 2003c). Det tilsvarende lik dampmotstand som for dampsperran AGS generasjon 1 ved 75 % RF. En nærmere analyse av isolasjonstykkelsens påvirkning på RF blir utført i kapittel 4.9.2.

Det ble utført en kontroll med simuleringverktøyet WUFI for å se hva slags innvirkning 100 mm isolasjon hadde på uttørkingshastigheten i en periode på 30 dager for prøveboksen fra 2012, se Figur 51.



Figur 51. Fuktinnhold i prøveboks fra 2012 med 200- og 300 mm isolasjon.

I Figur 51 kan man observere at uttørkingshastigheten påvirkes av isolasjonstykkelsen i boksen.

En sammenligning av Boks- A, B, C og D fra forsøket som ble utført i denne oppgaven, viser at prøveboks C med I-bjelke har størst uttørking de første syv dagene. I-bjelken i Boks C har ikke like stor fuktkapasitet som heltrebjelkene i de andre boksene. Heltrebjelkene vil ta opp mer fukt fra lufta når RF stiger i første perioden av forsøket. Fuktopptaket i heltrebjelkene vil dermed bremse uttørkingshastigheten. Videre er det et større luftvolum i Boks C på grunn av I-bjelkens tynne steg som tillater vanndamp å omfordeles i et større luftrom for boksen. I Tabell 10 kan man observere fuktinnholdet for de fire bjelkene ved forsøkets start og slutt.

Tabell 10. Fuktinnhold i bjelkene ved forsøkets start, og forsøkets slutt.

Bjelke	Tørrvekt [g]	Vekt ved montering [g]	Fuktinnhold ved montering [g]	Vekt ved forsøkets slutt [g]	Fuktinnhold ved forsøkets slutt [g]	Differanse i fuktinnhold (slutt - start) [g]
Boks A	3432	3895	463	3917	485	22
Boks B	3375	3864	489	3894	519	30
Boks C	2362	2748	386	2754	392	6
Boks D	3379	3869	490	3896	517	27

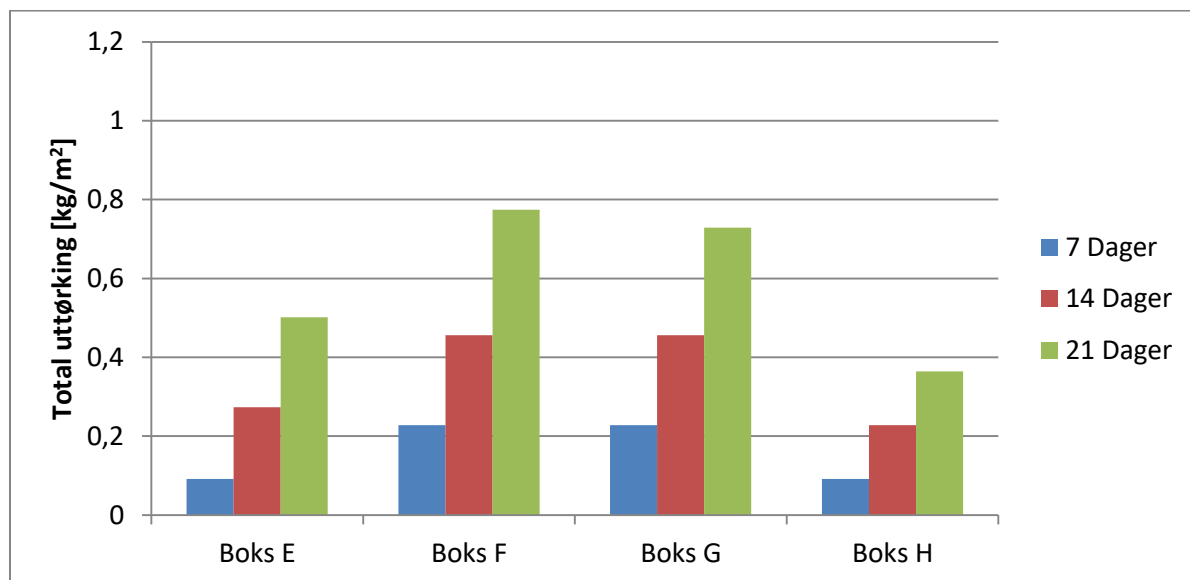
Tabell 10 viser at I-bjelken tar opp mindre fukt sammenlignet med heltrebjelkene. I tillegg inneholder heltrebjelkene mer fukt ved forsøkets start. Når heltrebjelkene tar opp vanndamp fra lufta er de med på å redusere RF i boksen. Det er med å påvirke dampsperrens vanndampermeabilitet og boksens uttørkingshastighet. Videre har I-bjelkens flens ujevnt fuktfordeling som skyldes de limte lamellene. Denne problemstillingen blir utredet nærmere i kapittel 4.9.3 om Trefuktighetsmålinger.

Etter 32 dager har Boks A størst uttørking, samtidig har Boks C bedre uttørking sammenlignet med Boks B. Boks D har lavest uttørking etter 32 dager. Ved forsøkets slutt har Boks- A og C lik total uttørking med $1,139 \text{ kg/m}^2$ tapt fukt. Dersom man kunne veid mer nøyaktig, med

tanke på ledningene og vekten som er diskutert i kapittel 4.8, antas det at forskjellene hadde kommet tydeligere frem. Boks B har mindre uttørking sammenlignet med Boks- A og C etter 60 dager, med en differanse på $0,05 \text{ kg/m}^2$. Boks D med AGS generasjon 2 har lavest total uttørking ved forsøkets slutt, med en differanse på $0,23 \text{ kg/m}^2$ sammenlignet med Boks- A og C. Boks- A og D er helt like bortsett fra dampsperre-produktet. Årsaken til at Boks D kom dårligst ut i forhold til total uttørking kan forklares med at AGS generasjon 2 har høyere dampmotstand sammenlignet med AGS generasjon 1 for RF-nivå over 45 %.

Resultater fra forsøk nr. 2

I det andre forsøket ble det montert avtakbare koblinger til RF-sensorene slik at veiing av prøveboksene kunne utføres mer nøyaktig. På grunn av begrensninger med vekten vil resultatene ikke være nøyaktige nok til å kunne skille prøveboksene ved enkelte tilfeller. Figur 52 viser den totale uttørkingsgraden fra prøveboksene etter 7-, 14- og 21 dager.



Figur 52. Total uttørking av prøveboksene i kg/m^2 for forsøk nr. 2 etter 21 dager.

Boks- F, G og H har et høyt startfuktinnhold i både bjelke og kryssfinerplate. For Boks E er kun kryssfinerplaten fuktet opp til høyt fuktinnhold ved start. Boks H benytter AGS generasjon 2 med belagt side ut i taket. Bakgrunnen for dette er beskrevet nærmere i kapittel 4.4.2 om kompakttakprøvene, men hovedsakelig har dampsperreren høyere dampmotstand dersom belagt side er montert inn.

Ved å observere Figur 52 kan man se at Boks F og Boks G har høyere uttørkingsgrad sammenlignet med de andre boksene. Dette skyldes et høyt fuktinnhold ved start i forhold til Boks E, og at disse har lavere Sd sammenlignet med Boks H. Etter 21 dager er det Boks F som har størst uttørkingsgrad. Det skyldes at denne boksen benytter AGS generasjon 1 som har lavere Sd ved variert RF sammenlignet med Boks G som benytter AGS generasjon 2. Resultatene viser at Boks H har minst total uttørking. Det skyldes at denne boksen har et

dampsperresjikt med høyere Sd-verdi ved variert RF sammenlignet med de andre prøveboksene. Boks G benytter samme dampsperre (AGS generasjon 2) som Boks H, men i Boks G er denne montert med belagt side inn. Sammenligner man disse har Boks H kun tørket ut halvparten så mye fukt som Boks G. Boks E har bedre uttørking enn Boks H, enda denne prøveboksen ikke hadde fuktet opp bjelken før start. Ved å sammenligne Boks E med Boks A som er identiske, ser man at mer nøyaktige veiinger gir et annet resultat for uttørkingen av denne oppbygningen. Ved dag 21 har Boks E tørket ut $0,50 \text{ kg/m}^2$ og ved dag 19 har Boks A tørket ut $0,18 \text{ kg/m}^2$. Det viser at veiemetoden benyttet i forsøk nr. 1 har usikkerheter som setter tvil til resultatene av veiingen.

Måleresultatene ved veiing for forsøk- nr. 1 og nr. 2 kan studeres i vedlegg G.

4.9.2 RF-målinger

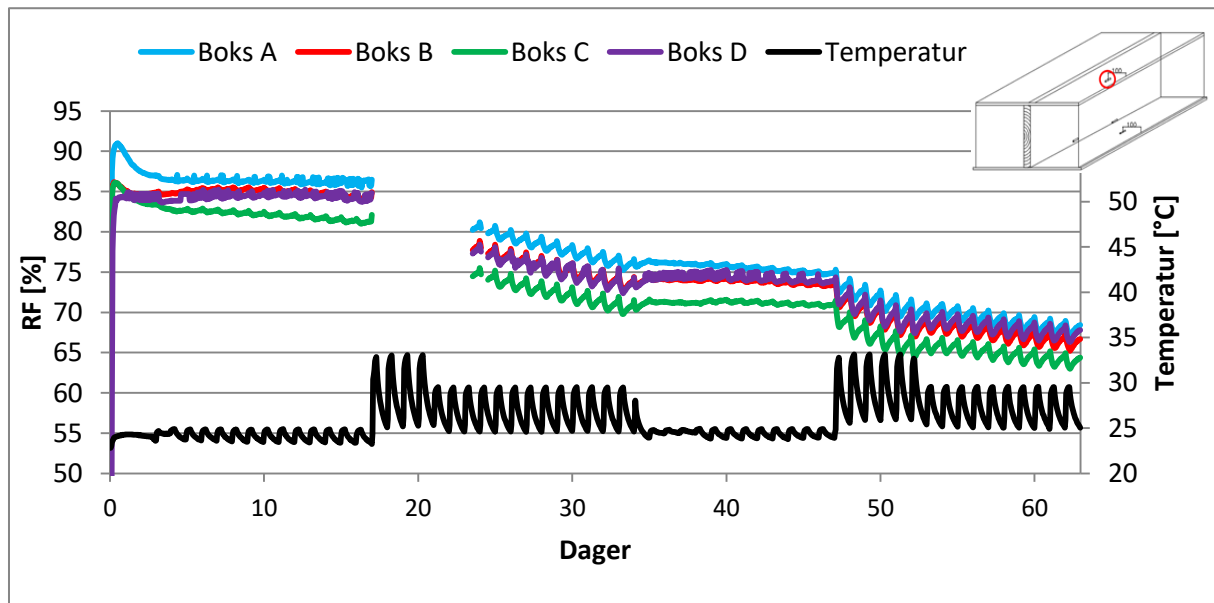
Ved hjelp av sensorer beskrevet i kapittel 4.7.3, har RF blitt loggført gjennom forsøksperioden på 60 dager i forsøk nr. 1. Som beskrevet i kapittel 4.8 ble det oppdaget en komplikasjon med loggeren underveis i forsøket som gjorde at en uke med data gikk tapt. Dette kan observeres i grafene som blir presentert for forsøk nr. 1. RF-loggen for forsøk nr. 2 ble fremskaffet tre uker etter forsøkets start, og vil derfor ikke vise sluttresultater.

Registrering av RF og temperatur ble utført i til sammen fire områder i hver prøveboks. Fire av boksene hadde en ekstra RF-sensor i sjiktet mellom gipsplate og SDS (to bokser i hvert forsøk, prøveboks- A, B, F og G). Utvendig temperatursyklus skifter mellom 25-, 30- og 33 °C. Temperatursvingningene vil påvirke RF i boksene. Temperaturene for klimasyklusen er derfor inkludert i alle grafene som vises i dette kapitlet.

Det er i hovedsak tre forhold som gjør det interessant å følge RF i laboratorieforsøkene. For det første ønsker en å observere fuktvandring inne i prøveboksene. For det andre vil RF-nivået på utvendig- og innvendig side av dampsperran påvirke damptettheten til SDS-produktet. Videre vil en også vurdere potensiale for mugg- og råtevekst inne i prøveboksene. Kapittel 2.3 beskriver at risikoen for muggsopp i treverk er stor dersom RF er over 80 % vedvarer over tid med temperaturer over 20 °C.

RF-målinger fra forsøk nr. 1

Figur 53 viser endringen i RF under kryssfinerplaten for de fire første prøveboksene.



Figur 53. RF under kryssfinerplaten for alle prøveboksene i forsøk nr. 1.

RF stiger raskt for alle boksene de første dagene av forsøket. RF i Boks- A, B, og C ligger i området mellom 83 og 85 % helt frem til temperaturen endres til 33 °C, 14 dager etter klimasyklusens start. RF i Boks C synker allerede ved dag to, og ligger mellom 80 og 85 % RF i første periode av forsøket. At RF-nivåene øker raskt i starten av forsøket skyldes det høye fuktinnholdet i kryssfinerplaten ved lukking av boksene.

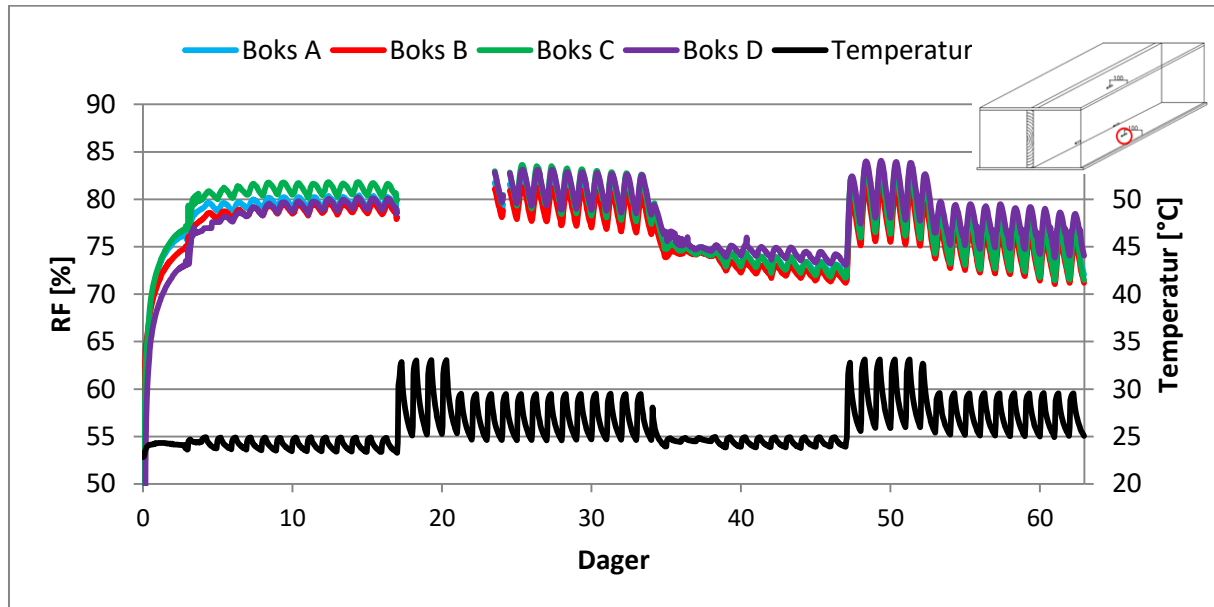
Etter 33 dager starter klimasyklusen på nytt med 25 °C. Fra denne dagen kan man se at RF stabiliserer seg og ligger omtrent på 75 % RF for Boks- A, B og D med heltrebbjelke. Boks C med I-bjelke ligger omtrent på 71 % RF. RF-nivået starter å synke igjen for alle boksene når temperaturen over boksene endres til 33 °C ved dag 47. I løpet av forsøkets periode på 63 dager har RF-nivået i snitt sunket med omtrent 20 % under kryssfinerplaten for alle boksene.

RF under kryssfinerplatene forløper relativt likt for alle boksene, men med variert RF-nivå. Den høyeste reduksjon i RF skjer i perioden mellom dag 20 og 33, når døgnsyklusen endres temperatur fra 33- til 30 °C. På dette tidspunktet har mye av overflatefukten i kryssfinerplaten allerede tørket ut. Det antas å påvirke fordampningshastigheten av fukt i materialet.

RF i prøveboks C med I-bjelke synker under nivået til de andre boksene i løpet av et døgn, og holder et lavere RF-nivå under kryssfinerplaten gjennom hele forsøket. Dette antas å skyldes at I-bjelken tillater et større volum for omfordeling av vanndamp inne i prøveboksen, samtidig som I-bjelken har mindre evne til fuktbuffering sammenlignet med heltrebbjelken. RF i Prøveboks A ligger høyest gjennom hele forsøksperioden. I det første døgnet stiger RF i Boks A til over 90 %, omtrent 5 % høyere sammenlignet med de andre boksene. Årsaken til at prøveboks A har høyere fuktinnhold kan skyldes at denne boksen ble montert først, slik at litt

av overflatefukten kan ha tørket for de andre kryssfinerplatene før boksene ble forsegleet med dampsperre.

Videre viser Figur 54 RF i sjiktet mellom isolasjon og dampsperre. RF-nivåene i boksene viser omtrent den samme trenden for alle tilfellene.



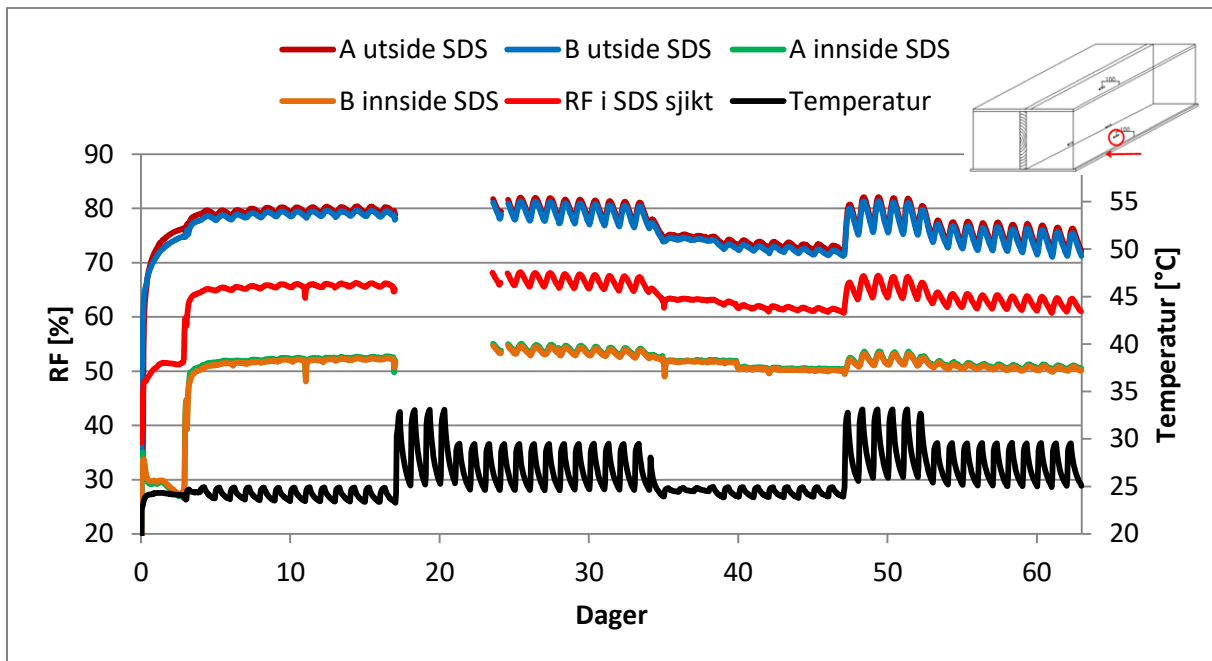
Figur 54. RF i sjiktet mellom isolasjon og dampsperre for alle prøveboksene i forsøk nr. 1.

I perioden fra dag 2 til dag 17 ligger RF-nivået for boksene på omtrent 80 %. Når temperaturen senkes fra 33- til 30 °C, 20 dager fra forsøkets start, begynner RF på utsiden av dampsperran å reduseres gradvis. Når temperaturen igjen settes til 33 °C ved dag 47, øker RF opp mot 85 %. Fra dag 53 når temperaturen reduseres fra 33- til 30 °C, starter en ny gradvis reduksjon i RF. De største svingningene i RF over en døgnsyklus skjer når temperaturen over boksene er høyest. Endringene i temperatur fører også til at største reduksjon for RF skjer når temperaturen senkes. Ved forsøkets slutt er det fortsatt potensiale for innadrettet uttørking gjennom dampsperran når RF i gjennomsnitt ligger på omtrent 75 % ved dampsperrans utside.

Gjennomsnittlig ligger RF mellom 75- og 85 % for alle boksene i første halvdel av forsøksperioden. I den andre halvdel av forsøksperioden ligger RF mellom 70- og 80 %. Når temperaturen senkes til 25 °C ved dag 33 ligger RF på mellom 70 - 75 % frem til dag 47. Det er ingen vesentlige forskjeller i RF mellom de fire prøveboksene i dette området. Prøveboks C med I-bjelke oppnår høyest RF i starten av forsøket, samtidig er RF-nivåene i Boks C blant de laveste ved forsøkets slutt. Differansen i RF ved start og slutt gjennom forsøksperioden er derfor størst for Boks C. En årsak til at RF er høyere over dampsperran i Boks C ved forsøksperiodens start, antas å være at heltrebelken i de andre boksene tar opp mer vanddamp sammenlignet med I-bjelkens flens, og fungerer som en fuktbuffer. En nærmere analyse av dette blir gjort i kapittel 4.9.3 i forbindelse med trefuktighetsmålinger. Prøveboks D har lavest RF-nivå i starten av forsøksperioden, og høyest RF-nivå i siste

halvdel. Dette kan forklares med at AGS generasjon 2 har høyere vanndampmotstand i forhold til AGS generasjon 1 ved RF over 45 %.

Videre viser Figur 55 en sammenligning mellom RF på inn- og utsiden av SDS i Boks- A og B. I tillegg er det vist gjennomsnittlig RF fra inn- og utsiden av dampspærren i Boks- A og B for å vise en tilnærming til RF-nivået inne i dampspærresjiktet.



Figur 55. RF i sjiktet mellom isolasjon og SDS(utsiden av SDS), sammenlignet med RF i sjiktet mellom gips og SDS(innsiden av SDS), for prøveboks- A og B.

Ved å sammenligne RF på inn- og utsiden av dampspærren er det mulig å få en tilnærming til RF-nivået inne i dampspærresjiktet. Det er interessant for å vurdere damptettheten til dampspærren ved varierende RF verdier gjennom forsøkets periode. Ved å observere Figur 55 ser man at RF på innvendig side følger svingningene til damppærrens utside. RF i sjiktet mellom gips og SDS påvirkes av vanndampdiffusjonen gjennom dampspærren. Differansen i RF over- og under dampspærresjiktet ligger mellom 25- og 30 %. En rask reduksjon i RF på innvendig side som opptrer ved dag 11 og dag 35 kan skyldes at døren til klimarommet har stått åpent.

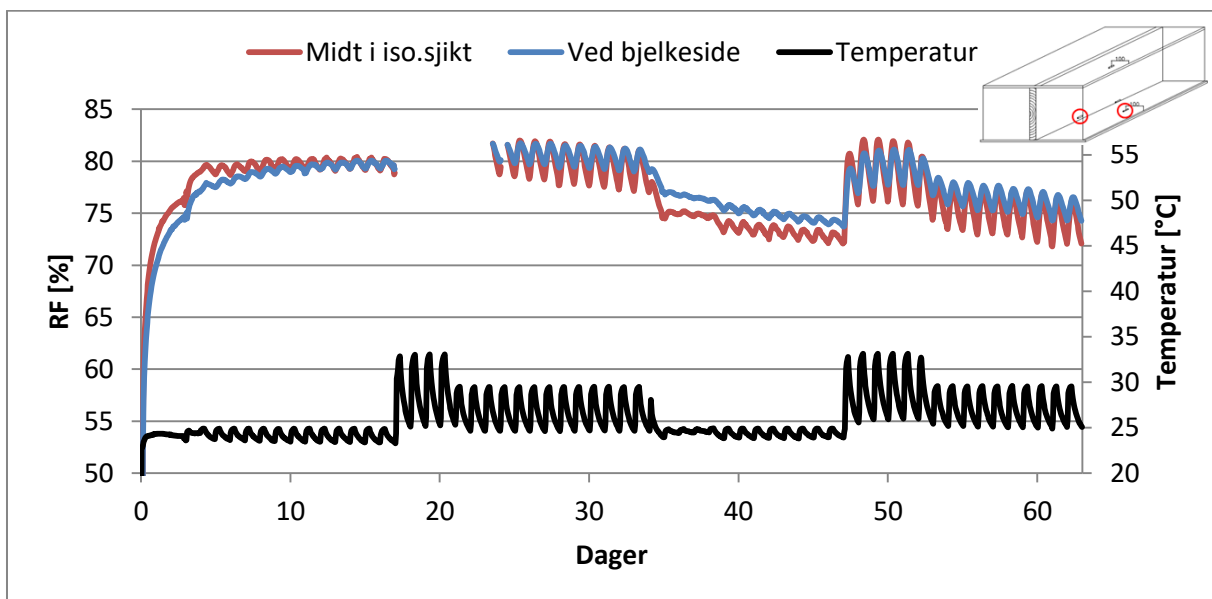
Prøvekassene A og B er helt like bortsett fra at Boks B har et uisolert installasjonssjikt på 5 cm mellom gips og dampspærre. RF-forløpet i Boks- A og B har identiske svingninger, både på inn- og utsiden av dampspærren. Det er tidligere antatt at innvendig utlekting i kompaktkonstruksjoner med SDS kan øke RF på innvendig side av dampspærren og dermed reduserer uttørkingspotensiale. Antagelsen virker ikke å stemme i forsøket utført med de gitte betingelsene for dette forsøket.

Figur 55 viser at vanndampdiffusjon gjennom dampspærren øker når RF på utvendig side av SDS øker. Dette kan observeres i første halvdel av forsøket, og ved dag 47 når temperaturen øker til 33 °C. Ved dag 34 når temperaturen over prøveboksene senkes til 25 °C synker RF over SDS ned mot 70 %. Samtidig synker RF på innvendig side ned mot konstant innvendig

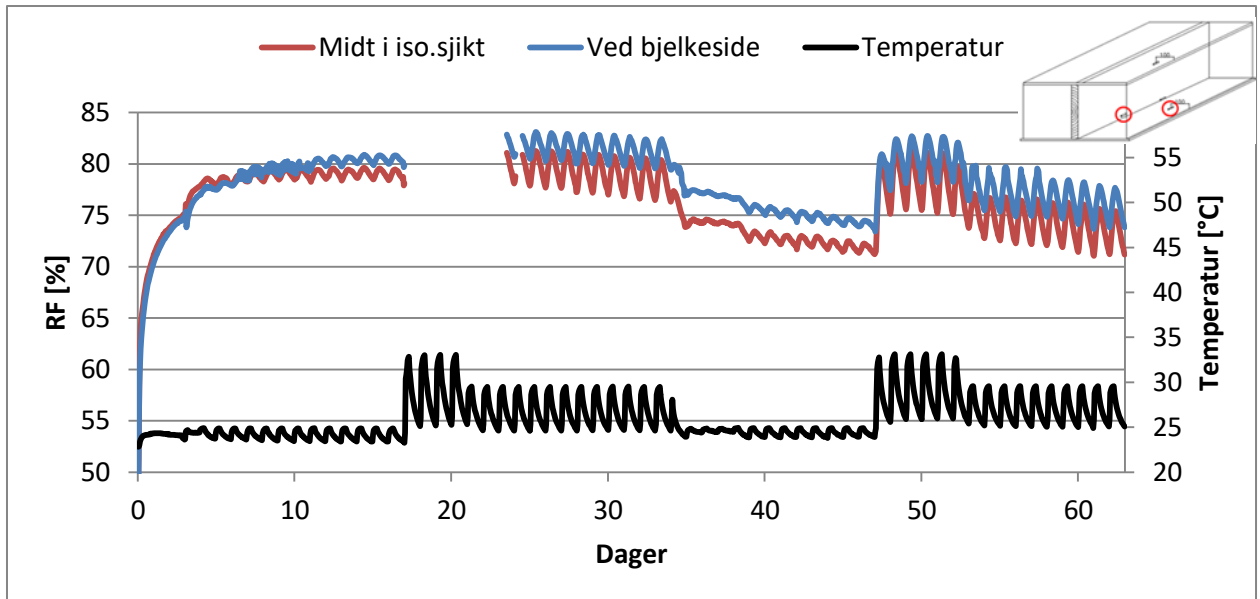
RF på 50 % som styres av klimaskapet. Vanddampdiffusjon gjennom dampspærren er i denne perioden lav nok til at inneklimateet ikke påvirkes i stor grad. Når RF nærmer seg 80 % på utvendig side av dampspærren vil vanddamptransporten gjennom dampspærren være høyere enn inneklimateet kan regulere, dermed øker RF på innvendig side av spærresjiktet. Det bekreftes også i forsøk nr. 2, se Figur 66.

Figur 55 viser RF i dampspærresjiktet ved å regne ut snittet mellom utvendig og innvendig RF fra de to prøveboksene. RF i dampspærresjiktet ligger mellom 60 og 70 % for hele forsøksperioden. Det antas at RF overstiger 70 % RF i perioden hvor data ble tapt på grunn av loggerfeil. Det ble tidligere utført et forsøk for å finne Sd-verdier ved varierte RF-nivå for AGS generasjon 1 ved SINTEF Byggforsk (se vedlegg A). Prøverapporten fra SINTEF viser at AGS generasjon 1 hadde Sd-verdi i området 1,2 og 1,3 m ved gjennomsnittlig RF-nivå på 62,8 %. I samme prøverapport ble dampspærren registrert å ha Sd på 0,18 m ved gjennomsnittlig RF på 72,15 %. Det gir en differanse i Sd-verdi på omtrent 1 m mellom 62- og 72 % RF.

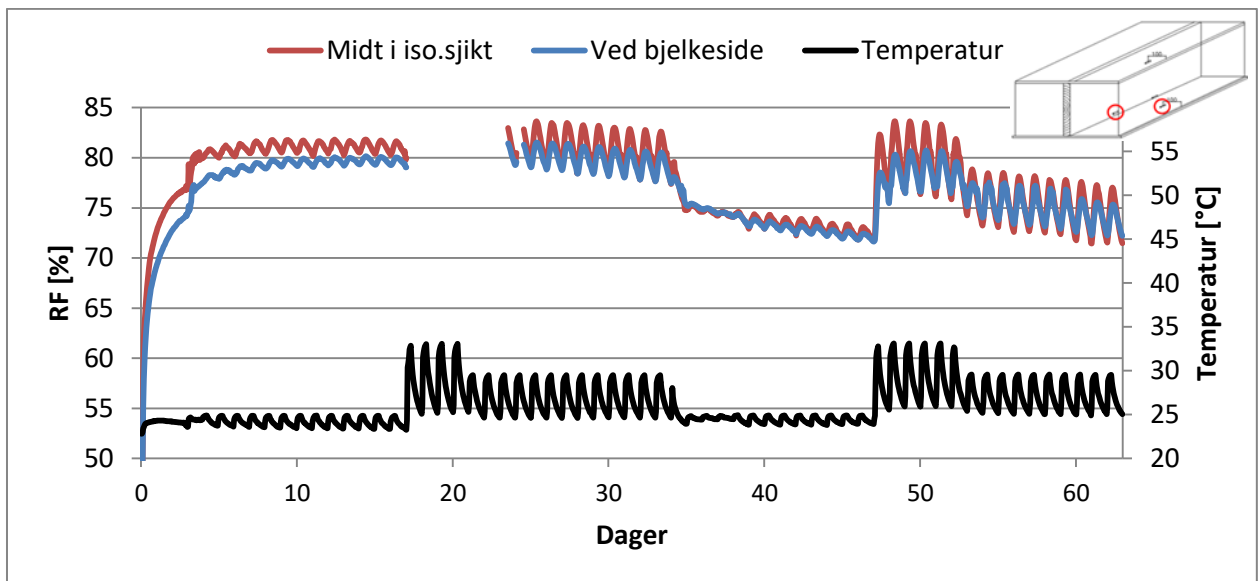
For å vurdere om bjelkene har en fuktbufferings effekt sammenlignes RF i sjiktet mellom SDS og isolasjon, 10 cm fra kanten av prøveboksen, mot RF like over SDS ved bjelkens side, se Figur 56 til 59.



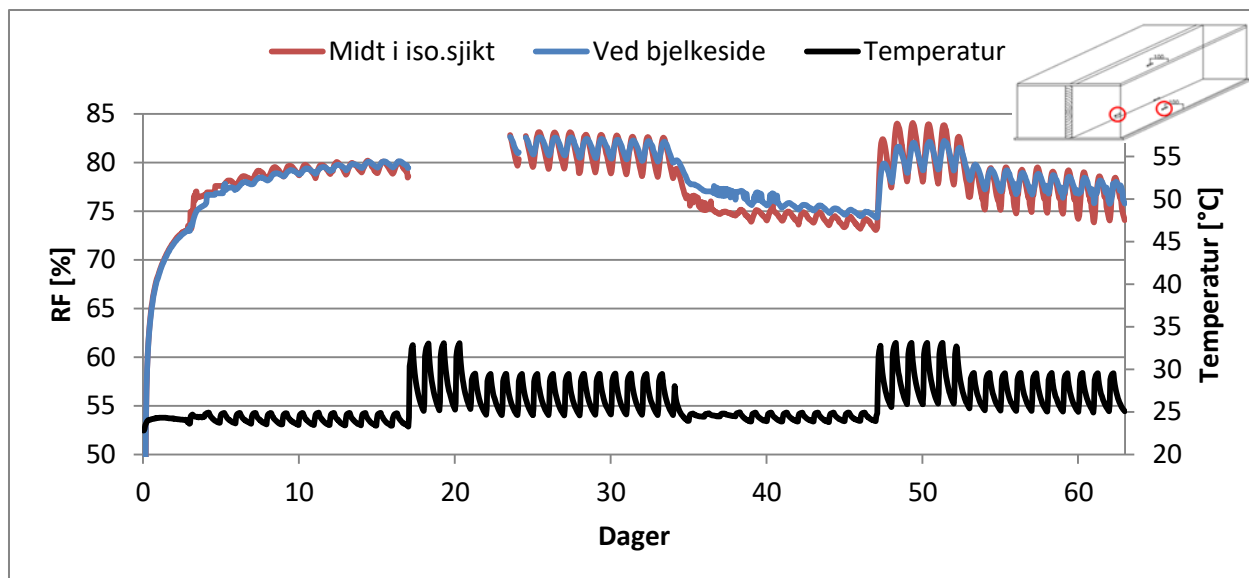
Figur 56. Sammenligning mellom RF ute i isolasjonssjiktet og RF ved bjelkesiden for Boks A.



Figur 57. Sammenligning mellom RF ute i isolasjonssjiktet og RF ved bjelkesiden for Boks B.



Figur 58. Sammenligning mellom RF ute i isolasjonssjiktet og RF ved bjelkesiden for Boks C.



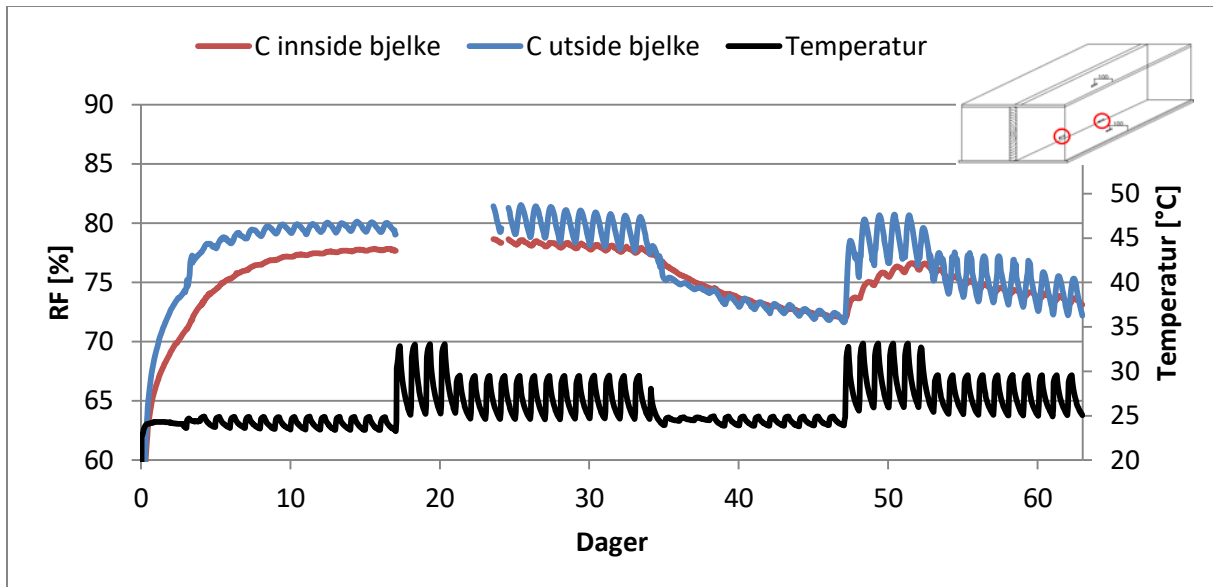
Figur 59. Sammenligning mellom RF ute i isolasjonssjiktet og RF ved bjelkesiden for Boks D.

I alle fire prøveboksene kan man se at svingningene i RF ved bjelkens side er lavere sammenlignet med svingningene ute i isolasjonssjiktet. Det gir en klar indikator på at bjelken faktisk bidrar til å redusere økningen i RF ved at vanndamp i boksene diffunderer inn i bjelken. For prøveboks- A, B og til dels D, kan man observere at RF er høyere ved bjelkesiden. Det kan tyde på at vanndamp som har diffundert inn i bjelken fordamper tilbake i luften i boksen etter hvert som fukt diffunderer gjennom dampsperran og RF i luften blir redusert. Samtidig bekrefter det antagelsen om at uttørkingen i boksene med heltrebjelker går tregere på grunn av at fuktopptaket i bjelkene bremser uttørkingspotensiale. Ved å observere RF-nivået nær bjelkene for boksene som benytter like dampsperrer i Figur 56 til 58, ser man at RF er høyere ved heltrebjelkene i hele forsøksperioden sammenlignet med RF ved flensen til I-bjelken. Dette skyldes at flensen til I-bjelken ikke har like stort potensiale til fuktopptak som heltrebjelkene, som nevnt tidligere. Samtidig har I-bjelken bedre forutsetning for uttørking siden flensen kan tørke fra flere sider. Dette fører til at RF nær I-bjelkens flens er lavere sammenlignet med RF midt mellom bjelke og boksens kant gjennom hele forsøksperioden. Samtidig er RF høyere lenger ut fra bjelken i isolasjonssjiktet, sammenlignet med boksene med heltrebjelker.

For boks D kan man se at gjennomsnittlig RF 10 cm fra boksens kant og ved bjelkesiden er omtrent lik de fleste dagene når temperaturen er over 25 °C. Når syklusen med 25 °C starter ved dag 33 er RF ved bjelkesiden høyere sammenlignet med RF i isolasjonssjiktet slik som for de andre boksene med heltrebjelker. Grunnen til at RF er forholdsvis lik ved bjelkesiden og i isolasjonssjiktet kan skyldes AGS generasjon 2 sin høyere Sd-verdi i forhold til AGS generasjon 1.

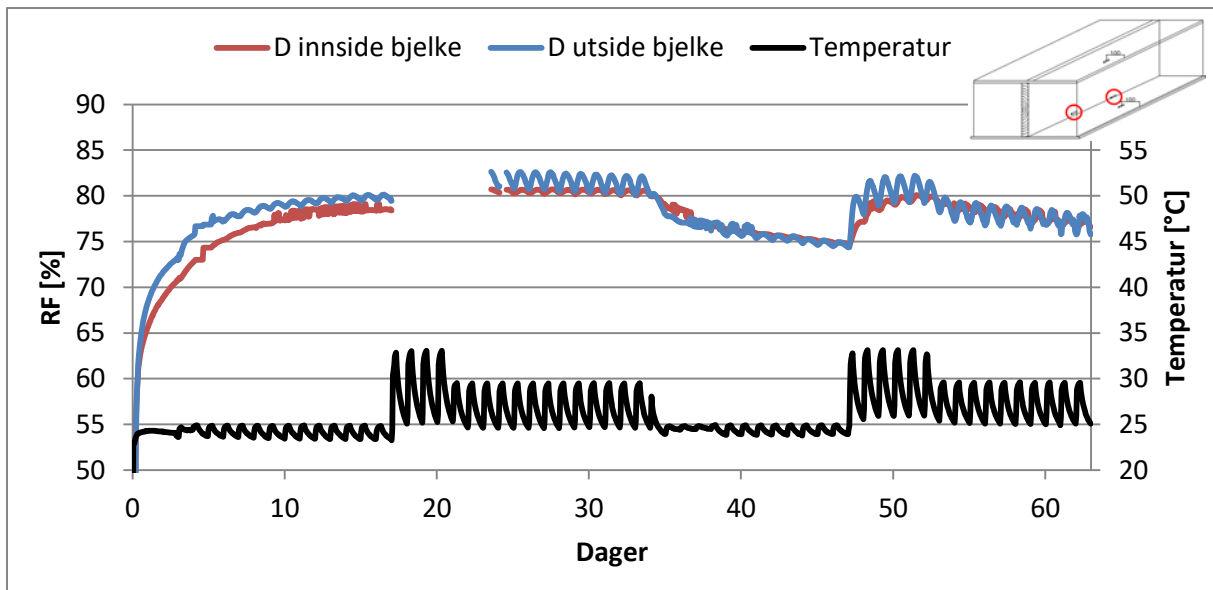
I forhold til mugg- og råtefare kan man observere at heltrebjelkens fuktlagrings-effekt fører til at RF-nivået blir høyere ved bjelkesiden og dermed ligger over 80 % RF i en lenger periode, sammenlignet med I-bjelken.

Det ble videre sammenlignet RF på bjelkens inn- og utside like over dampsperrsjiktet. Resultatene viser at RF på bjelkens innside er lavere sammenlignet med utsiden av bjelken, og har mindre svingninger i RF. Figur 60 og 61 viser RF på bjelkens inn- og utside for Boks- C og D.



Figur 60. RF ved bjelkens inn- og utside for prøveboks C med I-bjelke.

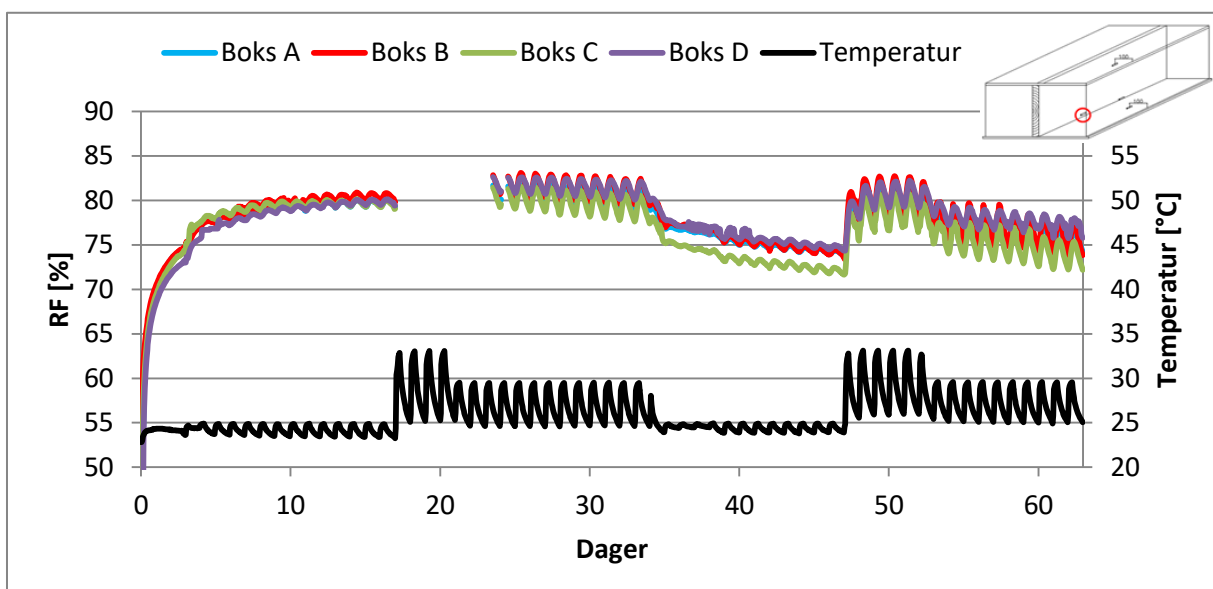
Figur 60 viser at RF-nivå og svingninger er høyere på bjelkens utside. Svingningene inne i undersiden av bjelken er korte, som tilsier at RF-nivået ikke påvirkes stort av døgnsyklusen. Fukktransport i trevirke går tregt og fører til en treghet i endring av RF inne i flensen. Ved dag 33 når temperaturen senkes fra 30- til 25 °C, ligger RF omtrent likt frem til dag 47 når temperaturen øker. Fra dag 53 til forsøkets slutt er gjennomsnittlig RF på bjelkens utside omtrent lik som innsiden av bjelken. Det antas at i løpet av forsøksperioden er RF inne i flensen til I-bjelken over 80 % når temperaturen økes til 33 °C ved første halvdel av perioden. Det er dermed ikke lange perioder hvor RF overstiger 80 % RF inne i flensen over dampsperran. Derfor vil det ikke være risiko for mugg- og råte i flensens innside med tanke på RF-nivået.



Figur 61. RF ved bjelkens inn- og utside for prøveboks D med AGS generasjon 2.

I Boks D ser man i Figur 61 at det oppstår mer svingninger i RF inne i bjelkens underside sammenlignet med Boks C. Samtidig er RF-nivået høyere inne i denne bjelken sammenlignet med I-bjelkens flens i Boks C. Man kan videre se at RF overstiger 80 % inne i bjelken i en lengre periode sammenlignet med I-bjelken. Høyere RF i bjelken antas å skyldes AGS generasjon 2 sin høyere S_d ved variert RF i forhold til generasjon 1 som ble benyttet i Boks C. Det er forholdsvis god nok uttørking av bjelken som hindrer at RF kan forårsake muggproblemer for bjelken over lengre tid.

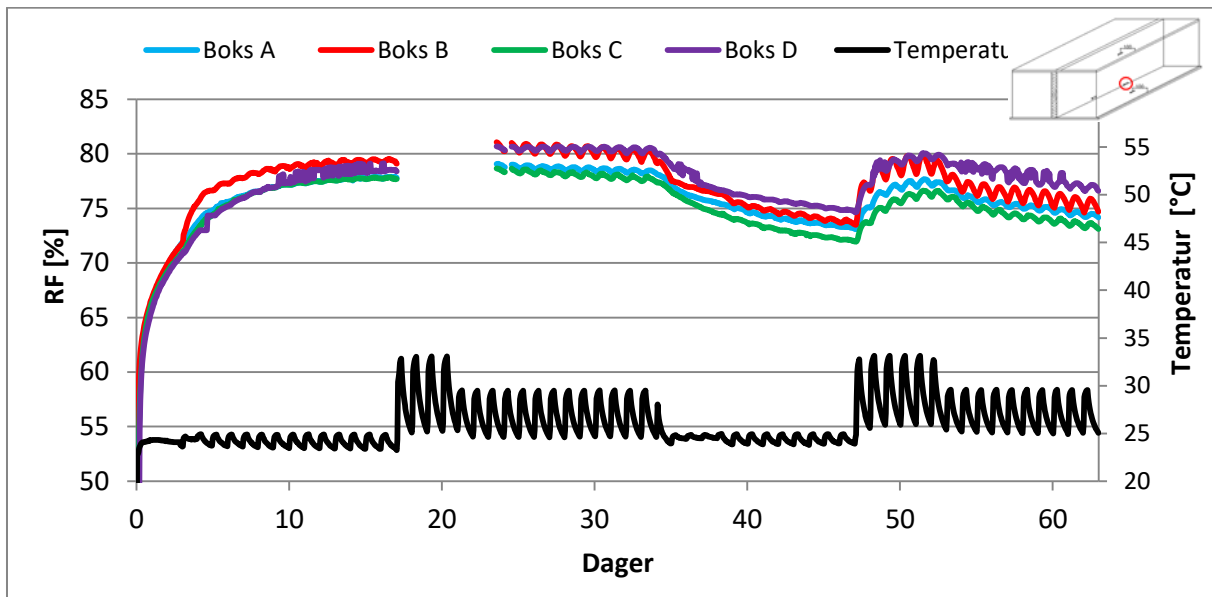
I Figur 62 kan man se RF ved bjelkesiden til alle fire boksene i første forsøk.



Figur 62. RF ved siden av bjelken over dampsperran, for boksene i første forsøk.

RF ved bjelkesiden har relativt lik trend for alle boksene med heltrebjelke. Boks C med I-bjelken har gjennomsnittlig lavere RF fra dag 24 når temperaturen endres fra 33- til 30 °C, helt til forsøket slutt. Årsaken er antatt å skyldes flensens lave fuktlagringskapasitet sammenlignet med heltrebjelken. I-bjelkens tynne steg tillater uttørking av flensen over flere flater sammenlignet med heltrebjelken. Det tynne steget fører også til at boksen får en større hulromsandel hvor vanddamp kan omfordeles.

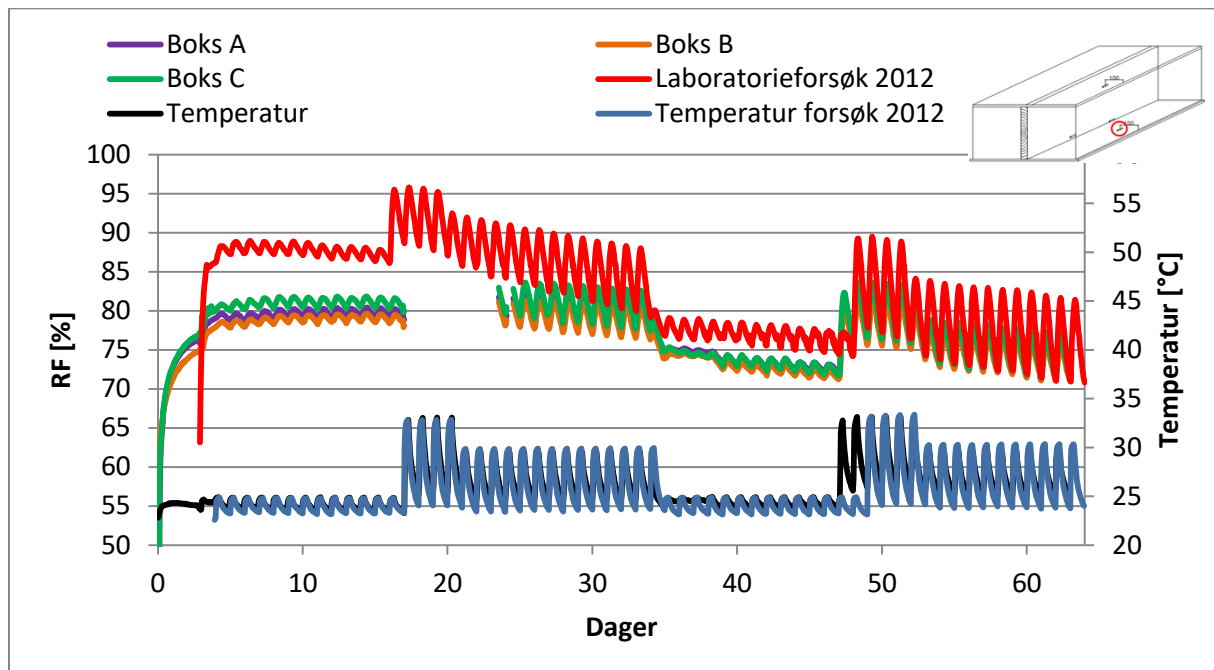
Videre i Figur 63 kan man se en sammenligning av RF inne i bjelkenes underside.



Figur 63. RF inne i bjelken for alle prøveboksene i forsøk nr. 1.

I Figur 63 kan man observere at RF i bjelken i Boks D er høyere i hele andre halvdel av forsøket. Boks- A og C har lavest RF og minst svingninger i RF inne i bjelken. I-bjelkens flens i Boks C har lavest RF gjennom store deler av forsøksperioden. Det bekrefter at uttørkingen i I-bjelkens flens går raskere sammenlignet med heltrebjelkene for de andre prøveboksene. Fra dag 36 til 47 når temperaturen over boksene er 25 °C synker RF i Boks C raskest og Boks H har lavest reduksjon i RF for denne perioden.

Videre vises det i Figur 64 en sammenligning av RF over SDS for forsøk nr. 1 mot et tidligere forsøk ved NTNU (Thorsrud, 2013). Under forsøket i 2012 ble det kun målt RF i ett område inne i boksene, i sjiktet mellom isolasjon og SDS. Resultatene fra boksene som sammenlignes har benyttet de samme grenseparameterne, startfuktinnhold i taktro, og dampsperreprodukt (AGS generasjon 1).



Figur 64. RF mellom dampsperre (AGS generasjon 1) og isolasjon, for forsøket utført i denne masteroppgaven og et forsøk utført ved NTNU i 2012.

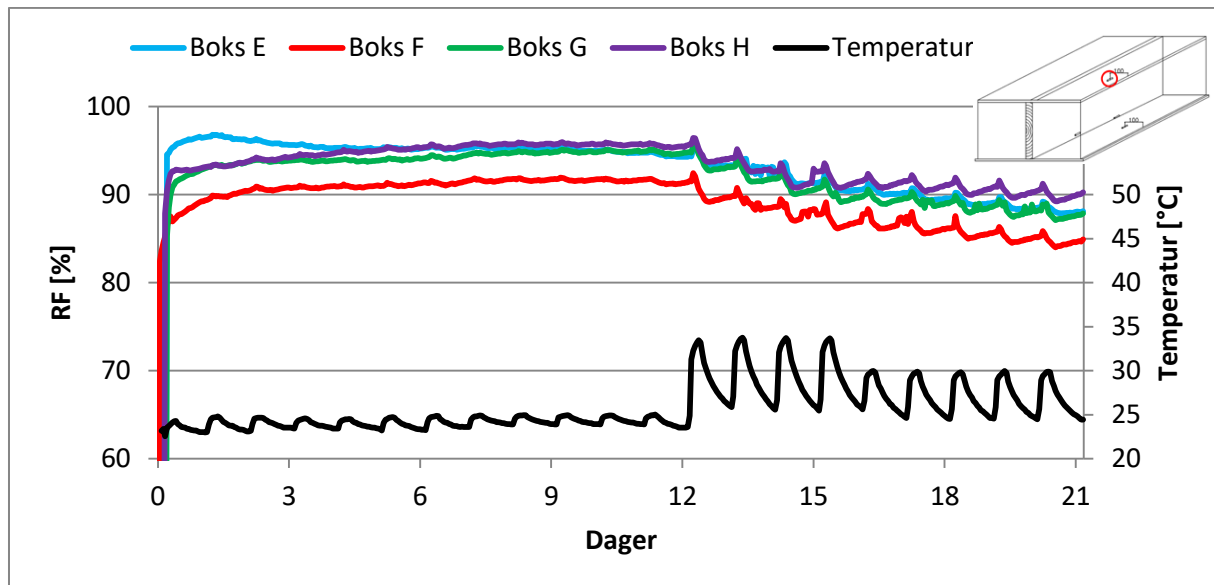
Temperatursyklusene er identiske frem til dag 47, hvor tidligere utført forsøk har en ekstra dag med 25 °C over boksene som avviker fra planlagt syklus. Videre ved dag 47 ble temperaturen over Boks- A, B, og C endret til 33 °C. Døgnsyklus temperaturen var stilt til 33 °C i seks etterfølgende dager. Dette er to dager mer enn det som var planlagt i klimasyklusen, og skyldes at dagen for endring av temperatursyklus havnet på en helgedag hvor tilgang til laboratoriet var begrenset. Dette kan også være en forklaring på avviket i planlagt temperatursyklus for forsøket fra 2012.

I Figur 64 at svingningene i RF er høyere for forsøket fra 2012 og det er betydelig forskjell mellom RF-nivåene fra forsøket utført i denne oppgaven og forsøket utført i 2012. Det er 10 cm større isolasjonstykkelse i boksene benyttet i denne oppgaven. Årsaken til at RF-nivået i gjennomsnitt er lavere, og at svingningene i RF er kortere for forsøket utført i denne masteroppgaven antas å skyldes større volum hvor vanndamp kan omfordeles, i tillegg til lengre avstand- og større dampmotstand fra fuktkilde til dampsperrsjiktet som diskutert i kapittelet om uttørkingsevne. RF-nivået i boksen fra 2012 er høyere gjennom hele forsøksperioden. Døgnsvingningene i RF vil bli mindre når det tar lengre tid for vanndamp å omfordeles i boksen, og det tar lengre tid for vanndamp å diffundere ned til dampsperrsjiktet. Bjelken vil også påvirke svingningene i RF og RF-nivået i boksen.

I siste periode av forsøkene fra dag 48 til 63, kan man observere at RF er lik i omtrent 12 timer for begge forsøk hver dag. Det er antatt å skyldes at prøveboksen fra 2012 har tørket ut mer fukt sammenlignet med de store prøveboksene fra denne masteroppgaven. Påvirkningen av bjelkenes fuktlagringskapasitet kan være en årsak til dette da disse er med på å redusere uttørkingshastigheten. Bjelkens påvirkning på RF-nivået i boksene er vist til å være forholdsvis liten. Tidligere analyse viste at det var omtrent 2- 3 % forskjell i RF ved bjelkesiden, sammenlignet med området i midt mellom bjelke og boksens sidekant. De store forskjellene i RF sin døgnsvingning skyldes derfor ikke i stor grad bjelkenes fuktlagring. Når en sammenlignet svingningene i RF mellom I-bjelken som tillater mer isolasjon og heltrebjelken, var disse stort sett like. Det var derimot observert høyere RF lenger vekk fra bjelken i boksen med I-bjelke sammenlignet med boksen med heltrebjelke. Det tyder på at RF-nivået i boksen reduseres av heltrebjelkene. Døgnsvingningene antas i større grad å være påvirket av isolasjonstykkelsen, som påvirker volumet for omfordeling av fukt, diffusjonsmotstand, og avstand fra taktro til dampsperran. En nærmere analyse av bjelkens påvirkning på RF i boksene blir utredet i kapittel 4.9.3 om trefuktighetsmålinger.

RF-målinger fra forsøk nr. 2

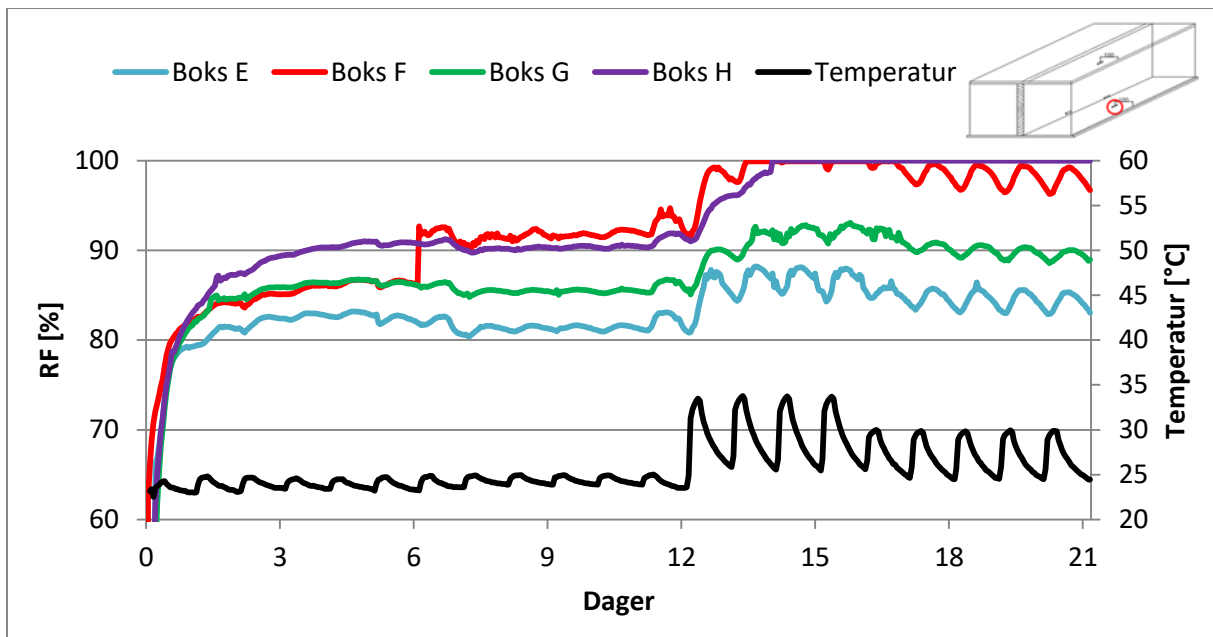
Resultatene fra forsøk nr. 2 ble hentet ut tre uker etter forsøkets start. Resultatene som blir analysert tar kun for seg de første 21 dagene av laboratorieforsøket.



Figur 65. RF under kryssfinerplater for alle prøveboksene i forsøk nr. 2.

I Figur 65 kan det observeres at RF-nivåene er høyere i forsøk nr. 2 sammenlignet med forsøk nr. 1. Årsaken skyldes det høye fuktinnholdet i heltrebjelkene for Boks- F, G og H ved start. RF under kryssfinerplaten ligger mellom 90 og 95 % for alle boksene de første 13 dagene av laboratorieforsøket. Når temperaturen øker fra 25- til 33 °C ved dag 13 ser man at RF begynner å redusere for dette området. Reduksjon i RF er lavere for Boks H sammenlignet med de andre boksene i siste del av perioden. Ved å sammenligne Boks A med Boks E kan det observeres at RF-nivået i Boks E er høyere i første periode av forsøket. Boks A ligger i gjennomsnitt på 86 % RF de første 13 dagene og Boks E ligger gjennomsnittlig på 95 % RF. Fuktinnholdet i Boks- A og E ved start skiller kun 20 gram, ved å sammenligne startfukt i bjelke og kryssfinerplate i begge boksene. Årsaken til det høye RF-nivået for Boks E antas å skyldes at kryssfinerplaten tørker ut raskere i forsøk nr. 2 siden platen allerede har vært gjennom en høy oppfukning etterfulgt av en tørkeperiode. Det har ført til at kryssfinerplaten har blitt mer porøs og den har mistet en del av belegget som begrenser fuktopptaket til platen. Dette ble tydelig da oppfukning av platen ble utført for forsøk nr. 2, hvor platen hadde nådd omtrent 30 vekt-% etter 28 timer i vannbad (se vedlegg D).

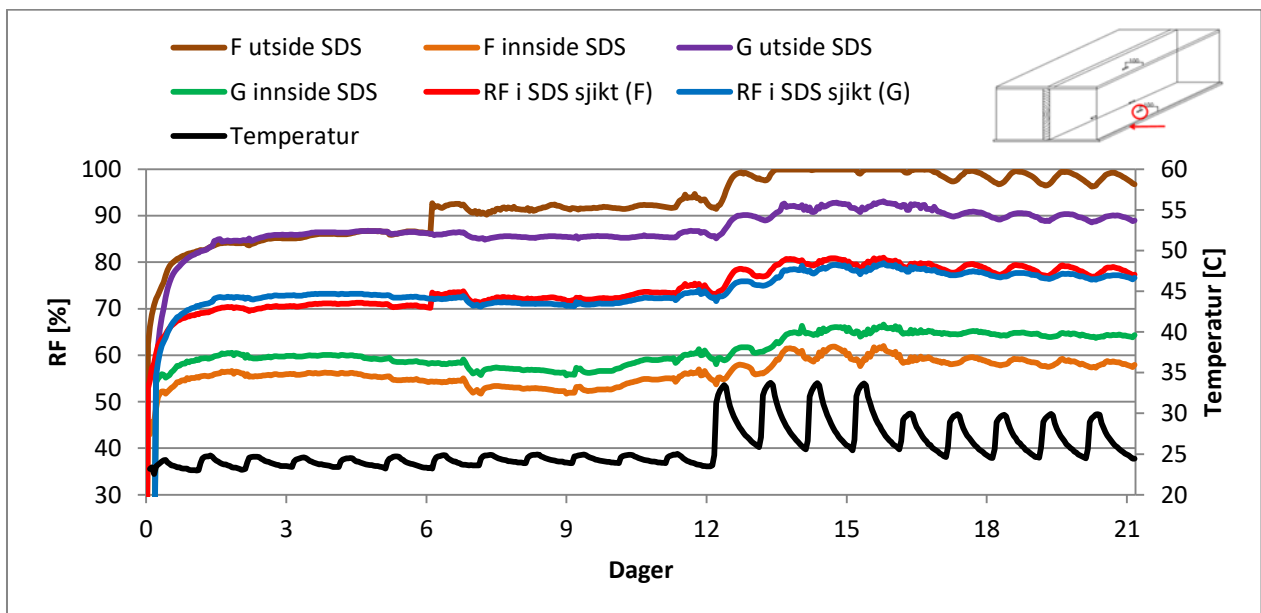
Figur 65 viser RF over dampsperrsjiktet for alle fire bokser i forsøk nr. 2.



Figur 66. RF i sjiktet mellom isolasjon og dampsperre for alle prøvene i forsøk nr. 2.

Ved å observere Figur 66 ser man at RF-nivået for Boks- F og H oppnår 100 % når temperaturen over boksene endres fra 25- til 33 °C. Prøveboks F med AGS generasjon 1 får en reduksjon i RF-nivå fire dager etter at nivået har nådd 100 %, samtidig fortsetter RF i Boks H med AGS generasjon 2 (beleggsiden ut) å holde 100 % frem til periodens slutt. Av en ukjent årsak får RF i Boks F et hopp ved dag 6, hvor RF-nivået øker med 6,4 %. Det kan antas å skyldes feil med RF-sensoren, da det ikke ligger andre årsaker til grunn for denne hurtige økningen. RF over dampsperreren i Boks E er lik RF i Boks A i første periode på 21 dager. Det kan observeres at RF-nivåene ikke overstiger 90 % RF over SDS ved første temperaturøkning i Boks E når kun kryssfinerplaten har høyt startfukttinnhold.

Figur 67 viser RF-nivået på inn- og utsiden av dampspærren. I tillegg er det vist gjennomsnittlig RF fra inn- og utsiden av dampspærren i Boks- F og G for å vise en tilnærming til RF-nivået inne i dampspærresjiktet.



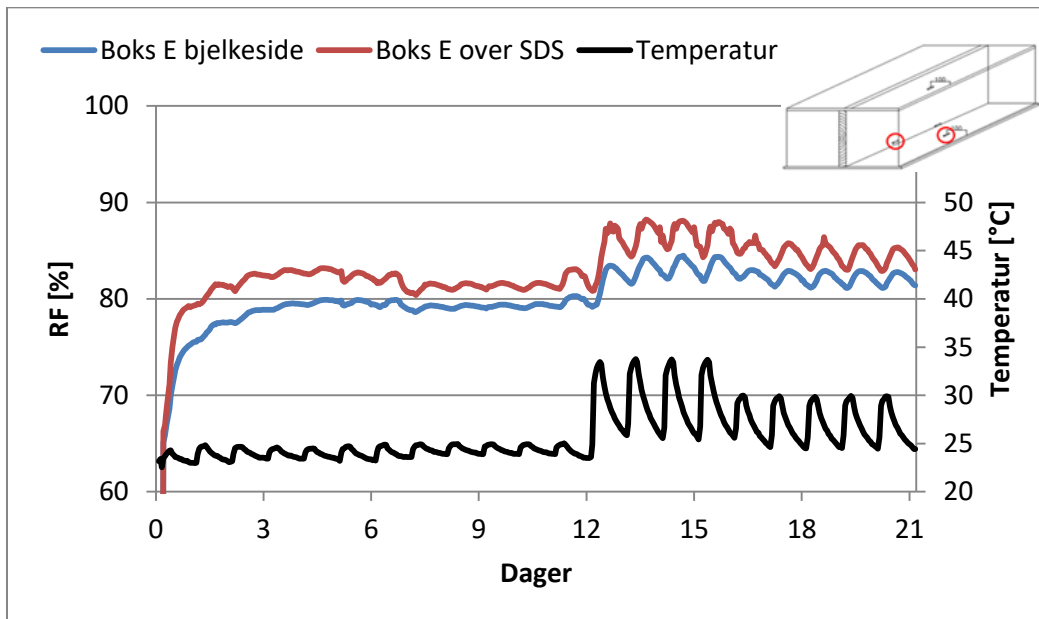
Figur 67. RF i sjiktet mellom isolasjon og SDS(utsiden av SDS), sammenlignet med RF i sjiktet mellom gips og SDS(innsiden av SDS) for prøveboks- F og G.

RF-målingene fremstilt i Figur 67 viser at RF er høyere på utsiden av dampspærren i Boks F med AGS generasjon 1, sammenlignet med Boks G med AGS generasjon 2 i. Hoppet i RF-nivå som skjer ved dag 6 er en årsak til dette. Ser man på RF-nivået ved dampspærrens innside, kan man observere at RF er lavere for Boks F. Det kan derfor tyde på at mer vanndamp diffunderer gjennom AGS generasjon 2 som ble benyttet i Boks G.

RF i dampspærresjiktet er omtrent likt for Boks- F og G gjennom perioden på 21 dager. Før temperaturøkningen ved dag 13, ligger RF i dampspærresjiktet på omtrent 71 %. Etter temperaturøkningen ligger RF på omtrent 80 % RF i dampspærresjiktet. Verdier fra produsenten av AGS oppgir at AGS generasjon 1 har Sd på 1,53 m ved 62,5 % RF og 0,045 m ved 92,5 % RF. Det vil si at dampspærren i Boks F har Sd på mellom 0,045 m og 1,53 m i perioden på 21 dager. Til sammenligning oppgir produsenten at AGS generasjon 2 har Sd på 3,6- og 0,2 m for RF på henholdsvis 62,5- og 92,5 %. Sammenlignet med RF-nivået i dampspærren fra forsøk nr. 1 (Figur 55) i samme periode, er gjennomsnittlig RF i dampspærresjiktet omtrent 10 % høyere når bjelke og kryssfiner har høyt fuktinnhold ved start.

Videre viser Figur- 68 til 71 en sammenligning av RF-nivå ved bjelkens side, og 10 cm fra boksens sidekant for alle boksene. Sammenligningen er presentert for å se hva slags effekt bjelkene har på RF-nivået i boksene. Begge de målte områdene ligger like over dampspærresjiktet.

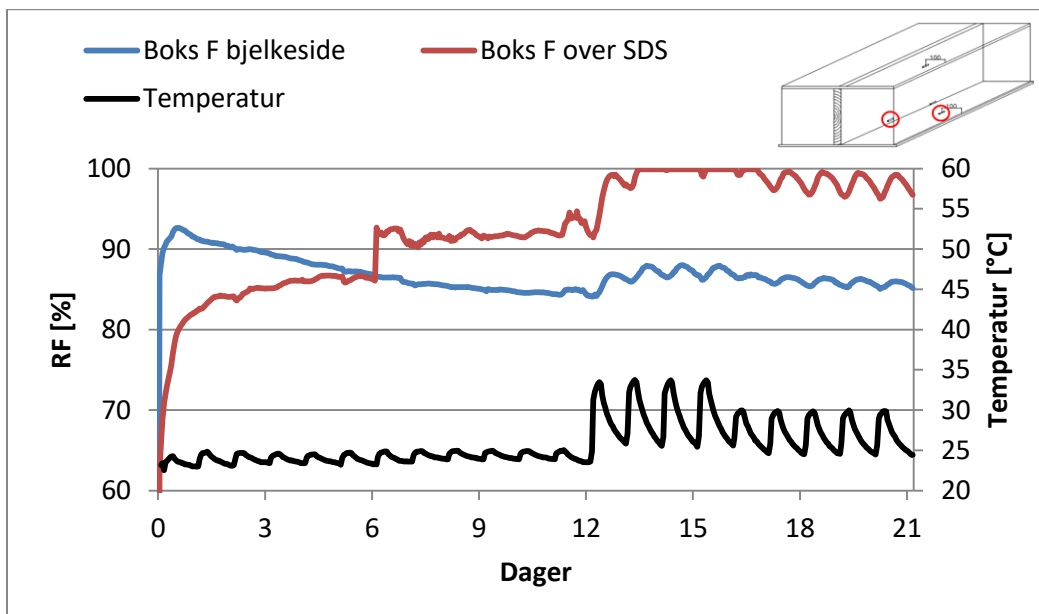
Figur 68 viser måleresultatene fra Boks E, med samme oppbygning og startfukt som Boks A. Resultatene viser omtrent likt forløp i Boks A og Boks E for den første perioden på 21 dager.



Figur 68. Sammenligning mellom RF ute i isolasjonssjiktet og RF ved bjelkesiden for Boks E.

Resultatene i Figur 68 viser at Boks E har omtrent like RF-nivå som Boks A de første 21 dagene av forsøket.

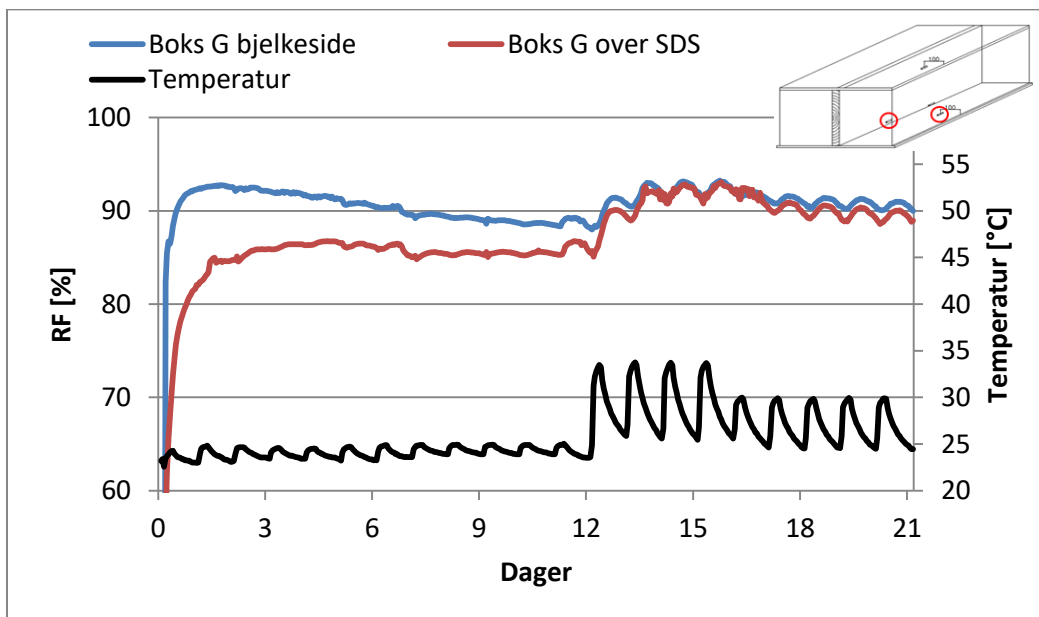
Videre viser Figur 69 viser måleresultatene for Boks F, med høyt fuktinnhold i bjelke og kryssfinerplate ved start. I prøveboksen er det benyttet AGS generasjon 1.



Figur 69. Sammenligning mellom RF ute i isolasjonssjiktet og RF ved bjelkesiden for Boks F.

I Figur 69 kan man observere at RF-nivået nær bjelkesiden er høyere den første uken. Hoppet i RF ved dag 6 gjør at fuktnivået overstiger RF ved bjelkesiden. Den lineære reduksjon i RF ved bjelkesiden de første 13 dagene skyldes at bjelken tørker ut i denne perioden og fukten omfordres i luftrommet i boksen. Når temperaturen øker ved dag 13 følger RF-nivået nær bjelken svingningene til temperaturen. Likt som i forsøk nr. 1 ser en at svingningene nær bjelken er mindre sammenlignet med svingningene lenger vekk fra bjelkesiden i isolasjonssjiktet.

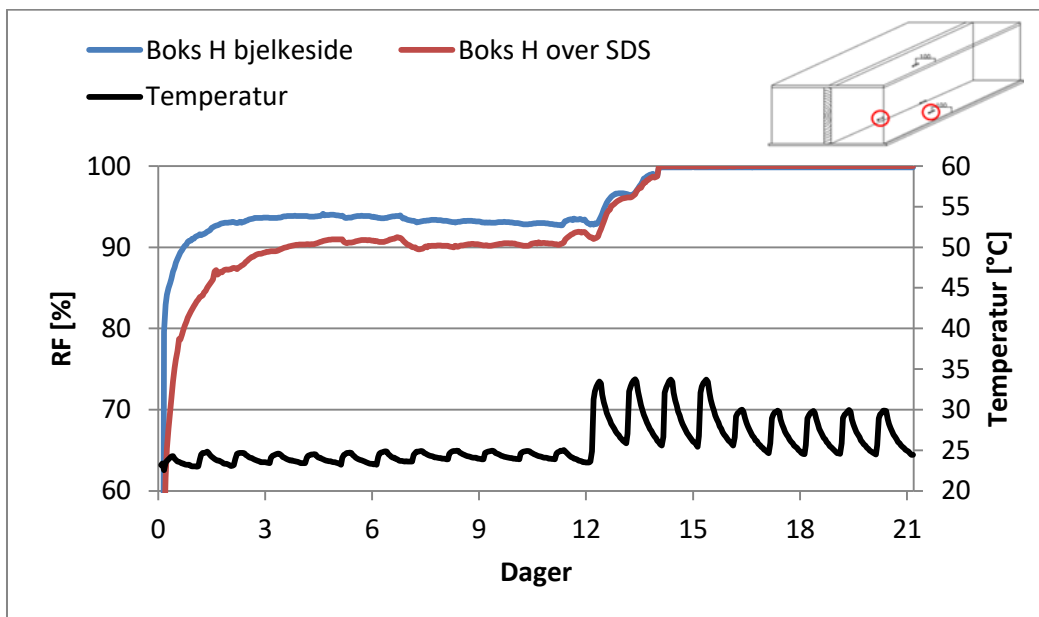
Figur 70 viser måleresultatene for Boks G, med høyt fuktninnhold i bjelke og kryssfinerplate ved start. I prøveboksen er det benyttet AGS generasjon 2.



Figur 70. Sammenligning mellom RF ute i isolasjonssjiktet og RF ved bjelkesiden for Boks G.

For Boks G med AGS generasjon 2 (belagt side inn) ser man i Figur 70 at RF-nivået er høyere nær bjelkesiden i hele perioden. Uttørkingen av bjelken de første dagene fører til at RF-nivået har en reduksjon frem til temperaturen endres ved dag 13. Høyere Sd for AGS generasjon 2 ved variert RF fører til at RF nært bjelken er høyere sammenlignet med Boks F.

Figur 71 viser måleresultatene for Boks H, med høyt fuktinnhold i bjelke og kryssfinerplate ved start. I prøveboksen er det benyttet AGS generasjon 2 dampspærre med belagt side ut i konstruksjon. Forklaring på denne monteringsmetoden er utredet i kapittel 4.4.

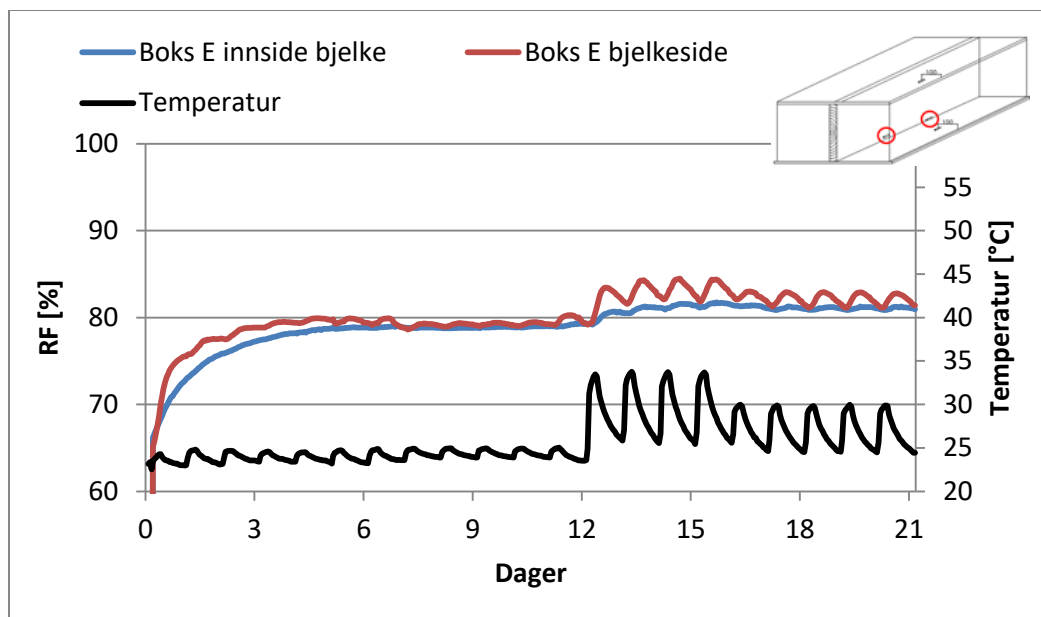


Figur 71. Sammenligning mellom RF ute i isolasjonssjiktet og RF ved bjelkesiden, for Boks H.

I Figur 71 kan man observere at RF-nivåene oppnår kondensnivå når temperaturen endres ved dag 13. Både RF nær bjelkesiden og lenger ut fra bjelkesiden har et RF-nivå opp mot 100 %. Dette skyldes at denne monteringsmetoden for AGS generasjon 2 gir høyere Sd-verdi ved variert RF over 45 %. Ved 92,5 % RF oppgir produsenten av AGS at Sd-verdien er 0,38 m, sammenlignet med 0,2 m ved samme RF og ved å montere belagt side mot innvendig side. Tallene viser dermed at i denne perioden er dampmotstand nesten er dobbelt så høy ved å montere den belagte siden ut.

Videre i Figurene 72 til 77 presenteres en sammenligning av RF på bjelkens side, og inne i undersiden av bjelkens flens. Sammenligningen er presentert for å se hvordan RF varierer inne i bjelken sammenlignet med ute i kontaktflaten mot isolasjonssjiktet. Begge de presenterte måleområdene ligger like over dampspærresjiktet.

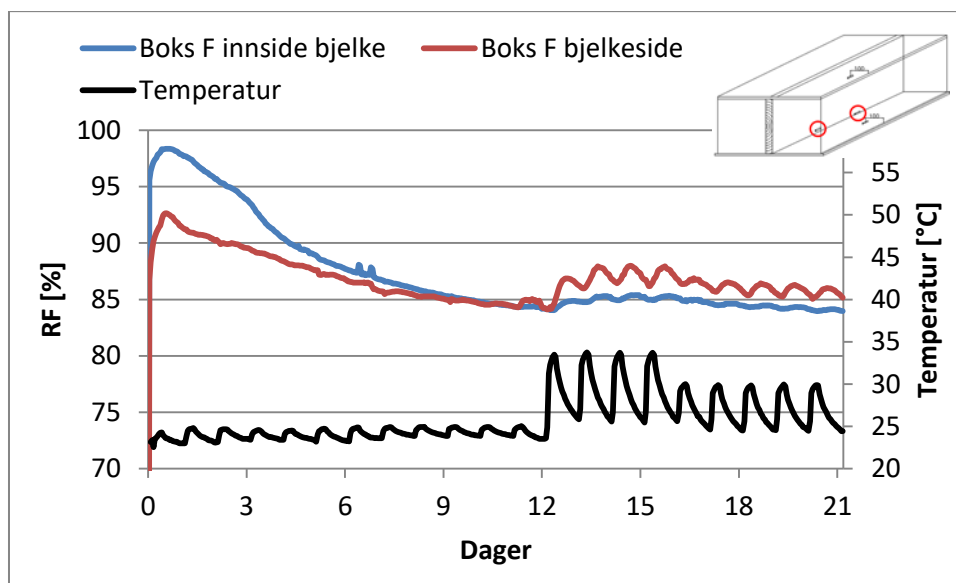
Figur 72 viser en sammenligning av RF-nivåene inne i- og ved siden av bjelken i Boks E.



Figur 72. RF ved bjelkens inn- og utside for prøveboks E med AGS generasjon 2.

Figur 72 viser at RF-nivået inne i bjelken følger RF på utvendig side av bjelken frem til dag 12, men med et lavere RF-nivå de første 5 dagene. Når temperaturen endres ved dag 13 øker gjennomsnittlig RF mer ved bjelkesiden sammenlignet med innsiden av bjelken. Ved å sammenligne resultatet med resultatet for Boks A (se vedlegg I) kan man observere at RF-nivået i bjelken er høyere i den første perioden for forsøk nr. 2.

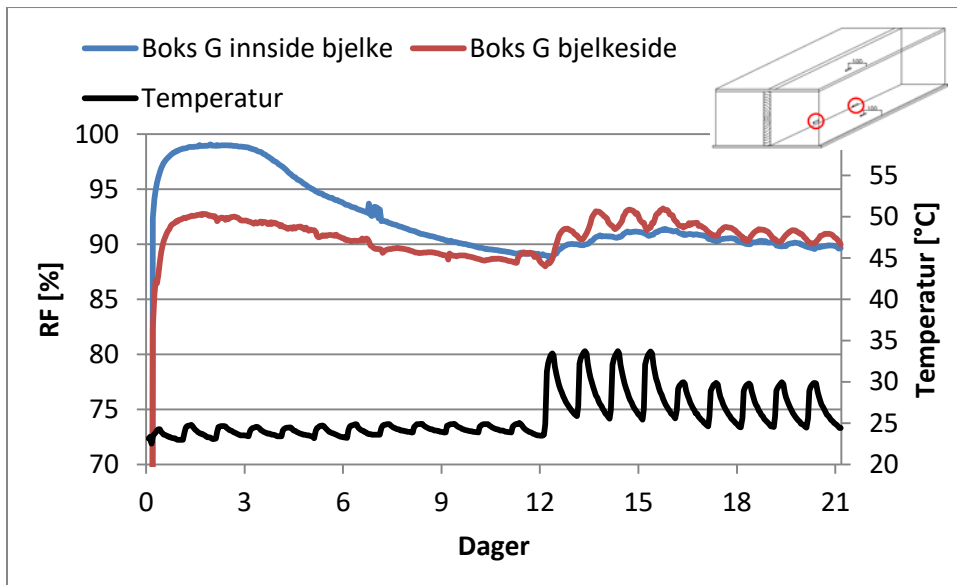
Videre viser Figur 73 en sammenligning av RF-nivåene inne i- og ved siden av bjelken i Boks F. I denne boksen er både kryssfinerplate og bjelke fuktet opp til et høyt fuktinnhold ved start. Denne boksen benytter AGS generasjon 1 dampsperre.



Figur 73. RF ved bjelkens inn- og utside for prøveboks F med AGS generasjon 2.

I Figur 73 kan man observere at RF-nivået inne i bjelken er høyere ved forsøket start, og oppnår nesten kondensnivå. Uttørkingen går raskt inne i bjelken og ved dag 13 når temperaturen endres ligger RF inne i bjelken under RF-nivået ved bjelkens side. Ved dag 21 er RF omtrent 85 % i begge måleområder. Det tyder på at RF i bjelken har stabilisert seg men med en svak reduksjon i RF som fortsetter å synke.

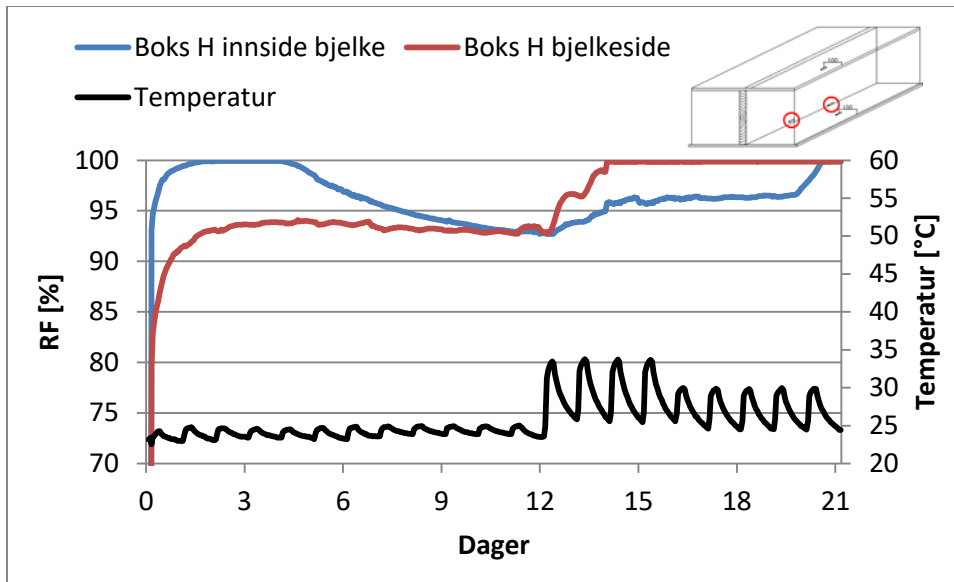
Figur 74 viser en sammenligning av RF-nivåene inne i- og ved siden av bjelken i Boks G. I denne boksen er både kryssfinerplate og bjelke fuktet opp til et høyt fuktinnhold ved start. Denne boksen benytter AGS generasjon 2 dampsperre.



Figur 74. RF ved bjelkens inn- og utside for prøveboks G med AGS generasjon 2.

I Figur 74 kan man observere omtrent samme trend som for Boks F med AGS generasjon 1. Den største forskjellen er RF-nivået som er høyere i Boks G. Etter 21 dager ligger RF-nivået omtrent på 90 %, en differanse på 5 % fra prøveboks F. Det antas å skyldes at AGS generasjon 2 har en høyere vanndampmotstand sammenlignet med generasjon 1.

Figur 75 viser en sammenligning av RF-nivåene inne i- og ved siden av bjelken i Boks H. I denne boksen er både kryssfinerplate og bjelke fuktet opp til et høyt fuktinnhold ved start. Denne boksen benytter AGS generasjon 2 dampspærre montert med belagt side ut i konstruksjon.



Figur 75. RF ved bjelkens inn- og utside for prøveboks H med AGS generasjon 2.

For prøveboks H kan man i Figur 75 observere at RF i bjelken oppnår kondensnivå etter 1 dag. RF-nivået i bjelken reduseres under 100 % ved dag 4 og er lavere enn RF-nivået ved siden av bjelken ved dag 12. Ved dag 13 øker temperaturen over prøveboksene og fører til at RF-nivået over dampspærresjiktet ved siden av bjelken øker opp til 100 % etter ett døgn. Ved dag 21 har også RF i bjelken økt til kondensnivå. Årsaken skyldes høyere Sd-verdi for denne monteringsmetoden til AGS generasjon 2 sammenlignet med monteringsmetoden i Boks G. Dersom RF ikke reduseres nok over tid er det stor fare for at muggvekst oppstår på trevirke i Boks H.

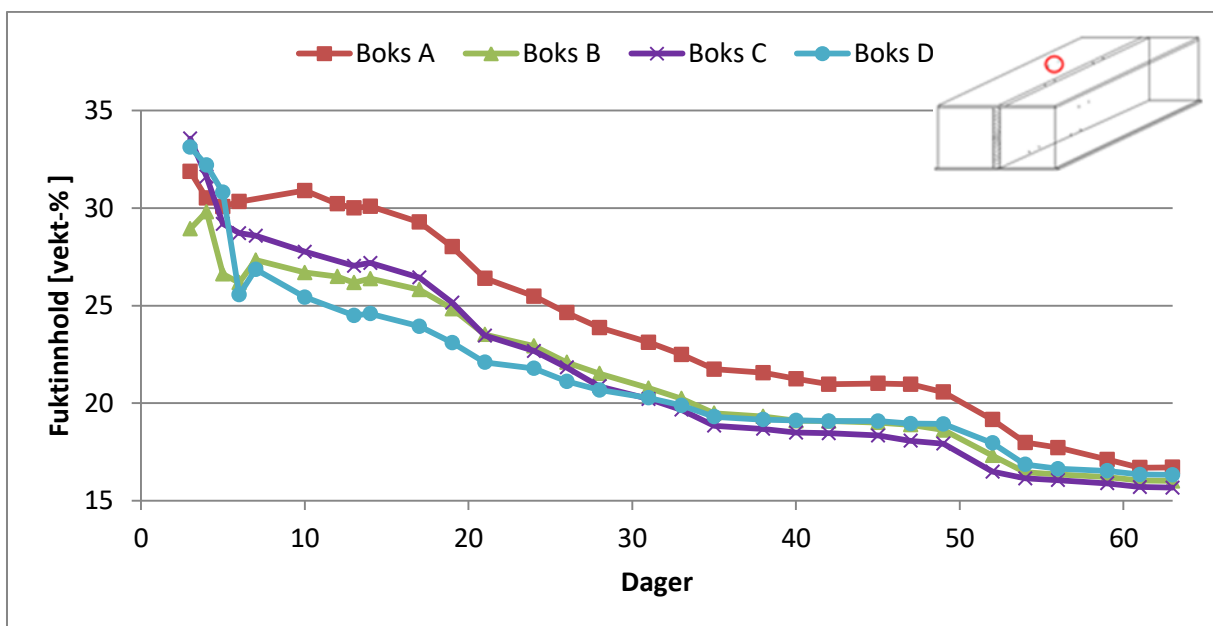
4.9.3 Trefuktighetsmålinger

Trefuktigheten ble underveis i forsøkene registrert i henhold til beskrivelsen i kapittel 4.7.2. I totalt seks områder ble fuktinnholdet i trevirket registrert for hver prøveboks. I kryssfinerplaten ble det montert to målepunkter, og i bjelken ble det montert fire målepunkter. Nærmere beskrivelse for valg av plassering til elektroder for registrering av fuktinnhold er oppgitt med figur i kapittel 4.7.2.

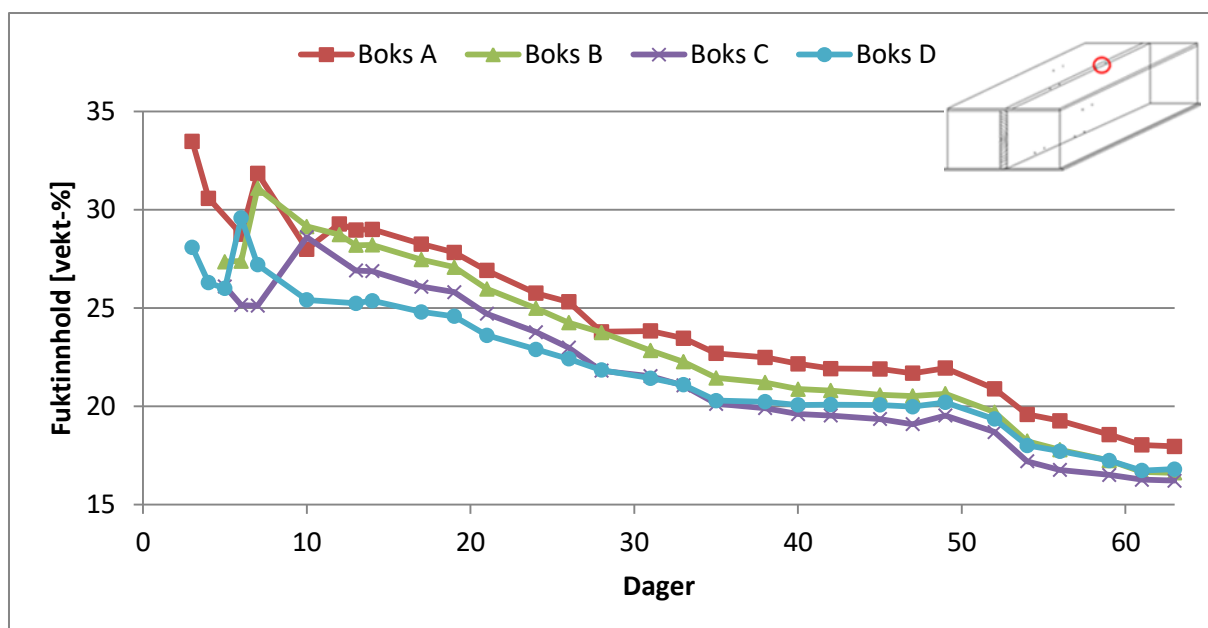
Manuelle målinger av fuktinnhold startet samme dag som klimasyklusen startet. Loggføring av RF startet to dager før klimasyklusen som beskrevet i kapittel 4.8 om måleusikkerhet. For å kunne sammenligne RF og fuktinnhold ved like dager er det valgt å starte resultatene for fuktinnhold ved dag 3 for forsøk nr. 1.

Fuktinnhold i kryssfinerplater fra forsøk nr. 1

Kryssfinerplatene ble fuktet opp til omtrent 30 vekt-% og er derfor den eneste fuktkilden i boksene for forsøk nr. 1. Bjelkene i det første forsøket lå i et klimarom over to uker for å oppnå likevekt ved 75 % RF, og hadde ved forsøkets oppstart et gjennomsnittlig fuktinnhold på omtrent 14,5 vekt-%. Uttørkingsforløpet til kryssfinerplatene for det første forsøket er vist i Figur- 76 og 77. De presenterte resultatene med måling av fuktinnhold i kryssfinerplater har blitt justert med en korreksjonsformel for å vise et nærmere reelt fuktinnhold, men vil fortsatt ikke vise helt nøyaktig fuktinnhold. Korreksjonsformelen er hentet fra et tidligere forsøk hvor det ble gjort fuktmålinger av kryssfinerplater (Geving & Holme, 2010). Selv om måleresultatene har avvik, gir figurene som er presentert et godt bilde av uttørkingsforløpet. Figur 76 viser fuktinnhold i kryssfinerplaten over isolasjonssjiktet, og Figur 77 viser fuktinnholdet til kryssfinerplaten i kontaktflaten mellom bjelke og kryssfinerplate.



Figur 76. Trefuktighetsmålinger under kryssfinerplaten over isolasjonssjiktet for Boks- A, B, C og D.



Figur 77. Trefuktighetsmålinger under kryssfinerplaten i kontaktflaten mellom kryssfiner og bjelke for Boks- A, B, C og D.

Fuktinnholdet for boksene varierer mellom 25 og 35 vekt-% ved forsøkets start i begge områdene (Figur- 76 og 77). Etter omtrent ti dager kan man observere at trefuktighetsmålingene viser mer stabilt uttørkingsforløp frem til forsøkets slutt. I kontaktflaten mellom bjelke og kryssfinerplate er det en kort periode med oppfukning etter omtrent 46 dager, se Figur 77. Dette kan skyldes at temperatursyklusen over prøveboksene endres fra 25 °C til 33 °C. Det antas at fukt fra bjelken tørker og blir dermed tatt opp i kryssfinerplaten. Det kan bekreftes i Figur 82 som viser fuktinnhold i bjelken for dette området.

Kryssfinerplaten i Boks A har det høyeste fuktinnholdet for de to målte områdene gjennom forsøksperioden. Uttørkingsforløpet for de fire boksene ser ut til å følge hverandre likt for boksene med AGS generasjon 1. Figur 76 og 77 viser at uttørkingshastigheten for Boks C med I-bjelke er raskere sammenlignet med de to andre boksene med heltrebelke og AGS generasjon 1. Boks D med AGS generasjon 2 har tregere uttørking sammenlignet med de tre andre boksene i begge områdene. Figur 76 viser at fuktinnholdet i kryssfinerplaten til Boks- B og D helt like ved dag 35 når temperaturen over boksene er satt til 25 °C. I området over isolasjon (Figur 76), er uttørkingshastigheten til kryssfinerplaten tregere for Boks D ved siste halvdel av forsøksperioden, og blir derfor passert av Boks B og Boks C før forsøkets slutt. Boks- A, B, og C ser ut til å ha omtrent likt fuktinnhold i kontaktflaten mellom kryssfiner og bjelke (Figur 77) ved dag 10. Samtidig ved dag 10 har Boks D omtrent 10 vekt-% lavere fuktinnhold sammenlignet med de andre boksene. Boks D med AGS generasjon 2 har lavere uttørkingshastighet og blir passert av boksene med AGS generasjon 1. Boks C passerer Boks D ved dag 35, og Boks B ligger likt med Boks D fra dag 52 til forsøkets slutt i området vist i Figur 77.

I Figur 76 og 77 viser målingene at alle boksene har omtrent likt fuktinnhold ved forsøkets slutt, bortsett fra Boks A i kontaktflaten mellom kryssfinerplaten og bjelken (Figur 77), hvor det er høyere fuktinnhold sammenlignet med de andre boksene. Ved å studere Tabell 11 kan man observere de reelle sluttverdiene for vekt-% fuktinnhold i kryssfinerplatene.

Tabell 11. Beregnet uttørkingsgrad for kryssfinerplater gitt i vekt-% fuktinnhold ved start og slutt fra forsøk nr. 1.

Prøveboks	Fuktinnhold i kryssfinerplate ved start [vekt-%]	Fuktinnhold i kryssfinerplate ved slutt [vekt-%]	Differanse (start – slutt) [vekt-%]
Boks A	29,17	11,02	18,15
Boks B	29,29	12,71	16,58
Boks C	30,91	12,11	18,80
Boks D	31,06	12,85	18,20

Gjennomsnittlig differanse for reduksjon av vekt-% er 17,9.

Tabell 11 viser vekt-% fuktreduksjon i kryssfinerplatene for prøveboks- A, B, C og D. Tallene er utregnet fuktinnhold ved hjelp av veiing før og etter forsøk nr. 1. Tallene som er presentert i Tabell 11 viser et lavere fuktinnhold sammenlignet med tallene som er presentert i Figur- 76 og 77. Selv med korrigerte data er det vanskelig å måle reelle verdier av vekt-% fuktinnhold i kryssfinerplater. Tallene presentert i Tabell 11 bekrefter at det er problematisk å måle korrekte verdier for fuktinnhold i kryssfinerplater og at veiing er nødvendig for å finne reelt fuktinnhold. Figur- 76 og 77 vil fortsatt gi et godt bilde av uttørkingsforløpet.

Tabell 12. Beregnet uttørkingsgrad for kryssfinerplater gitt i gram fuktinnhold ved start og slutt av første laboratorieforsøk.

Prøveboks	Fuktinnhold i kryssfinerplate ved start [g]	Fuktinnhold i kryssfinerplate ved slutt [g]	Differanse (start – slutt) [g]
Boks A	1064	402	662
Boks B	1046	454	592
Boks C	1106	433	673
Boks D	1114	461	653

Kryssfinerplatene har i gjennomsnitt tørket ut 645 g fukt.

Tabell 12 viser fuktreduksjon i kryssfinerplatene for Boks- A, B, C og D i gram. Ved å studere fuktinnholdet i gram kan man observere hvor mye fukt som gjenstår i kryssfinerplatene ved forsøkets slutt. Fra Tabell 12 kan man se at det i snitt er tørket ut 0,65 kg med fukt fra kryssfinerplatene.

Det laveste fuktinnholdet ved forsøkets slutt er i kryssfinerplaten i Boks A. Det var også denne platen som hadde lavest fuktinnhold ved starten av forsøksperioden. Kryssfinerplaten i Boks C har størst differanse i vekt-% fuktinnhold ved forsøkets slutt. At Boks C har størst uttørkingsgrad i kryssfinerplaten bekrefter analysen av grafene i Figur- 76 og 77 som viser at platen i Boks C har den høyeste uttørkingshastigheten.

Boks B med installasjonssjikt på innsiden av dampsperra har lavest uttørking av kryssfinerplaten sammenlignet med de andre boksene ved forsøksperiodens slutt. Observerer

man Tabell 12 er det lavest fuktinnhold i denne kryssfinerplaten ved forsøkets start, samtidig er fuktinnholdet ved slutten av forsøket nesten like stort som for Boks D, med AGS generasjon 2. Figur 50 som viser total uttørkingsgrad kan bekrefte at Boks B hadde mindre uttørking sammenlignet med Boks- og C som også benyttet AGS generasjon 1.

Tabell- 11 og 12 viser at kryssfinerplaten i Boks D med AGS generasjon 2 tørker omtrent ut like mye fukt som platene i Boks- A og C. Kryssfinerplaten i Boks D har det høyeste fuktinnholdet ved start (50 gram mer enn Boks A). Det kan forklare at den får omtrent like høy differanse i fuktinnhold som Boks A, selv med 59 gram mer fuktinnhold i platen ved forsøkets slutt. Studerer man total uttørking i Figur 50 har Boks D med AGS generasjon 2 minst uttørking i dette forsøket. Høy uttørking av kryssfinerplaten og lav uttørking fra prøveboksen kan forklare hvorfor RF er høyere i Boks D ved dampsperrsjiktet i store deler av forsøksperioden, sammenlignet med de andre boksene.

I forhold til mugg- og råtefare ser det ut til at AGS generasjon 1 og generasjon 2 gir gode forutsetninger for uttørking av kryssfinerplaten (taktroa) til å unngå et høyt fuktinnhold i trematerialene over lengre tid. Etter 60 dager ligger reelt fuktinnhold i kryssfinerplatene på 12,17 vekt-% i snitt, og er godt under 20 vekt-%, som anses for å være grensen for muggdannelse ved temperaturer over 20 °C.

Fuktinnhold i bjelker fra forsøk nr. 1

I det første forsøket ble bjelkene fuktet opp ved å ligge i klimarom i over fire uker. Alle bjelkene hadde fuktlikevekt ved 75 % RF ved forsøkets start, som tilsvarer omtrent 15 vekt-% fuktinnhold. En oversikt over bjelkenes gjennomsnittlige vekt-% målt med fuktapparat i flere områder av bjelken ved forsøkets start vises i Tabell 13. Ved måling av fuktinnhold med fuktmåler varierte resultatene med $\pm 0,2$ vekt-% i de målte områdene for hver bjelke. Det var en bekreftelse på at materialet hadde oppnådd likevekt. Tørrvekten til bjelkene ble beregnet ut fra målt startvekt, og fuktinnholdet ved forsøkets slutt er utregnet etter veiing.

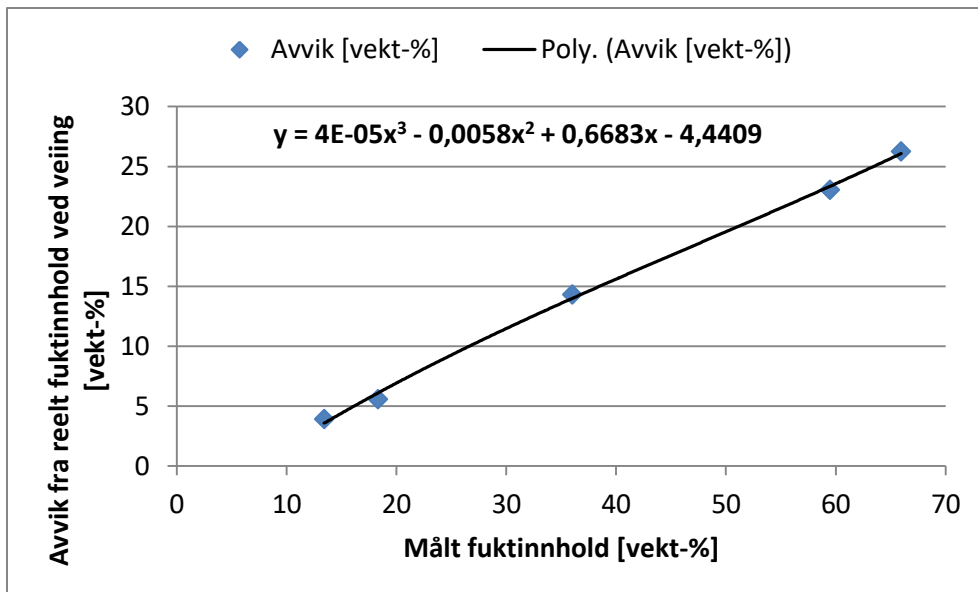
Tabell 13. Fuktinnhold i bjelker for Boks- A, B, C og D ved forsøkets start og slutt i vekt-%.

Bjelke (Boks)	Målt fuktinnhold i bjelker ved start [vekt-%]	Utregnet totalt fuktinnhold i bjelker ved slutt [vekt-%]	Differanse (slutt – start) [vekt-%]
Bjelke A	13,5	14,1	0,6
Bjelke B	14,5	15,4	0,9
I-Bjelke C	16,3	16,6	0,3
Bjelke D	14,5	15,3	0,8

I gjennomsnitt har bjelkene et startfuktinnhold på 14,7 vekt-%. Gjennomsnittlig fuktøkning for bjelkene er 0,65 vekt-%.

I Tabell 13 kan man observere at I-bjelken har et større fuktinnhold ved start sammenlignet med de andre boksene. Fuktinnholdet er lavest for bjelken i Boks A ved starten av forsøket ved 13,5 vekt-%. Selv med fuktøkning i bjelkene er ikke fuktopptaket stort nok ved forsøkets slutt til at faren for mugg- og råte oppstår. For å få et bedre bilde av fuktinnholdet i bjelkene er det nødvendig å se på forløpet for fuktinnhold gjennom hele forsøksperioden, og i forskjellige områder av bjelken hvor fuktinnholdet kan variere.

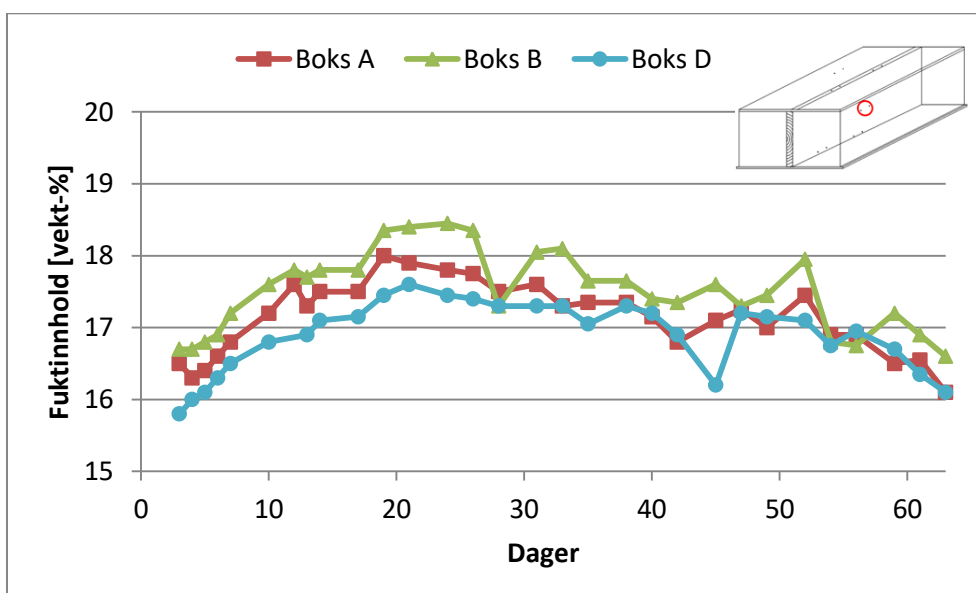
På grunn av at flensen på I-bjelken er limt sammen av tynne lameller av grantre (som en kryssfinerplate), har fuktmålinger i bjelkens flens vist høyere fuktnivå sammenlignet med heltrebjelkene. Dette er løst ved å utføre et eget laboratorieforsøk med samme type I-bjelkemateriale for å lage en korreeringsformel til målingene. Figur 78 viser avviket mellom målt, og faktisk fuktinnhold. Trendlinjen er et tredjegradspolynom som vises med formel i Figur 78.



Figur 78. Avvik mellom målt fuktinnhold og reelt fuktinnhold i I-bjelkens flens [vekt-%]. Trendlinjen er et tredjegradspolynom og vises med formel i figuren.

Figur 78 viser at avviket for målt fuktinnhold er forholdsvis lineært fra 13 til 66 vekt-%. Målingene viser et høyere fuktinnhold i forhold til det reelle fuktinnholdet. Avvikstallet ved bruk av formelen skal derfor benyttes til å trekke fra målt verdi. I vedlegg H vises data som ble samlet i forsøket for å lage korreksjonsformelen. Det er de korrigerede verdiene som vises for Boks C i Figur 80 til 82.

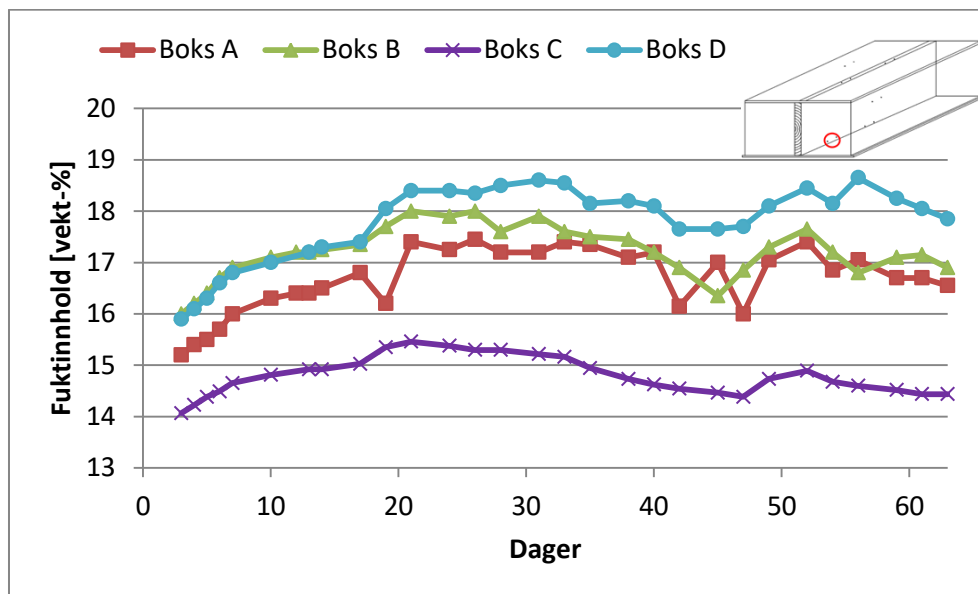
I Figur 79 vises fuktinnhold midt på bjelken i høyde- og lengderetning. Fuktmåling midt på I-bjelken ble ikke utført på grunn av at steget i bjelken er en tynn MDF plate, derfor er ikke denne boksen vist i Figur 79.



Figur 79. Fukttinnhold midt på bjelkenes høyde- og lengderetning for Boks- A, B og D.

Figur 79 viser at det er et fuktopptak midt på bjelkens høyde, og lengderetning i boksene. Vekt-% fuktinnhold øker kun med omtrent 2 % for boksene med heltrebjelke. I andre halvdel av forsøket tørker bjelkene og fuktinnholdet er omtrent tilbake til opprinnelig vekt-% ved forsøket slutt. Fuktopptaket midt på bjelkene oppnår ikke en vekt-% hvor faren for mugg- og råtevekst oppstår i dette området. Dersom trenden i siste perioden av forsøket fortsetter, vil bjelken tørke ut ytterligere midt på bjelken.

Videre viser Figur 80 fuktinnhold på bjelkenes side, like over dampspersjiktet.

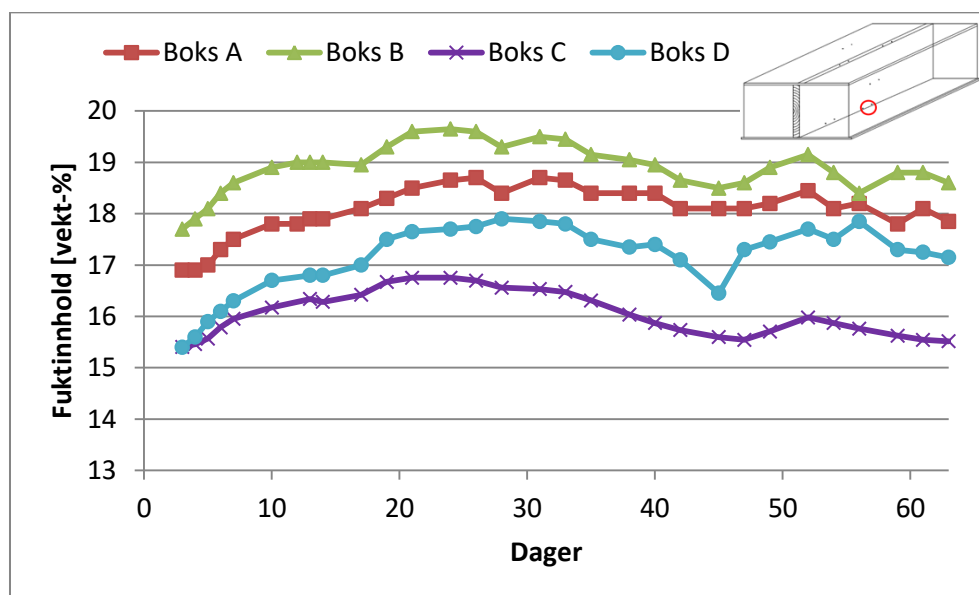


Figur 80. Fuktinnhold på bjelkenes side, like over dampspersjiktet for alle prøveboksene i forsøk nr. 1.

Figur 80 viser at fuktinnholdet i alle boksene har økt i løpet av forsøksperioden. Økningen i vekt-% for bjelkene er 1.35, 0.9, 0.17, og 1.95, for henholdsvis Boks- A, B, C, og D. Fuktopptak i bjelken er en følge av at RF-nivået er høyt i dette området gjennom store deler av forsøksperioden (RF ligger i gjennomsnitt mellom 75- og 80 %). Oppfukning og uttørking av bjelkene følger temperaturendringene, og er med å påvirke RF over dampsperran.

Årsaken til at bjelken i Boks D har høyere fuktøkning enn de andre boksene (1,95 vekt-% økning) kan skyldes at dampsperran som ble benyttet (AGS generasjon 2) har høyere Sd ved variert RF sammenlignet med AGS generasjon 1 som ble benyttet Boks- A, B og C. Det fører til at RF er høyere over dampsperran for denne boksen (se Figur 54). I-bjelken i Boks C har minst fuktøkning med 0,19 vekt-%. Det antas at skyldes steget på bjelken som er kun 8 mm tykt tillater flensen å tørke ut fra flere sider sammenlignet med heltrebjelkene. Heltrebjelkene har større potensiale for fuktlagring sammenlignet med I-bjelkens flens. Flensen til I-bjelken har ujevn oppfukning som fører til at fukt akkumuleres i ytre sjikt av flensen og påvirker dermed uttørkingshastigheten.

Videre viser Figur 81 fuktinnhold på bjelkenes underside, i kontaktflaten for bjelke og dampsperre.

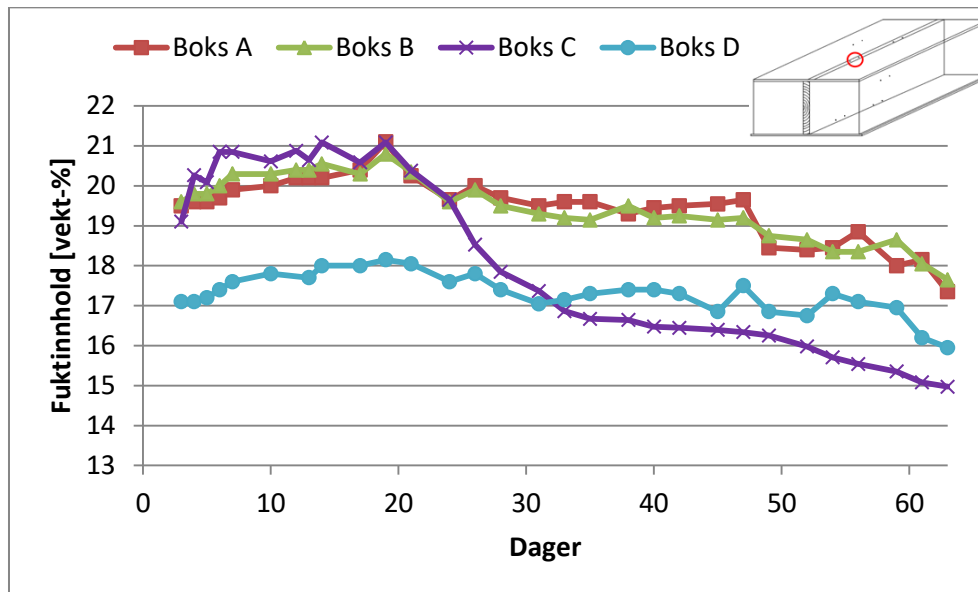


Figur 81. Fuktinnhold på bjelkens underside, i kontaktflaten mellom bjelke og dampsperre for alle prøveboksene i forsøk nr. 1.

Området under bjelken, i kontaktflaten mellom bjelke og dampsperre er utsatt for høy RF gjennom hele forsøksperioden, samme som målingene i området vist i Figur 80. Ved å sammenligne Figur- 80 og 81 ser man at fuktinnholdet under bjelkene er høyere sammenlignet med fuktinnholdet på siden av bjelken ved start. I området under bjelken er det også økning i fuktinnhold fra forsøkets start til forsøkets slutt, som for bjelkens sidekant over SDS. Differansen i vekt-% fuktinnhold ved start og slutt er 0.95, 0.9, 0.1 og 1.75 for henholdsvis Boks A-, B, C, og D. Det er omtrentlig lik økning i fuktinnhold for de forskjellige boksene som på bjelkens sidekant like over dampsperran. Det er lavere fuktøkning under bjelken ettersom fuktinnholdet i området ikke blir direkte påvirket av RF i luften, men av fukten som transporteres gjennom trevirke. Siden fuktinnholdet på denne siden av materialet endres tregere vil det ta lengre tid for området å tørke ut sammenlignet med fuktinnholdet på bjelkesiden som grenser til isolasjonssjiktet.

Bjelken i Boks D har igjen størst fuktøkning, som antas å være et resultat av at dampsperran har høyere Sd ved RF-nivå over 45 %. Boks C har minst fuktøkning og viser igjen at I-bjelken har raskere uttørking sammenlignet med heltrebjelkene.

Videre viser Figur 82 fuktinnhold på bjelkens overside, i kontaktflate til kryssfinerplate og bjelke.



Figur 82. Fuktinnhold i bjelkens overside øverst i boksen, i kontaktflaten mellom kryssfinerplate og bjelke.

I Figur 82 kan man observere fuktinnholdet øverst på bjelken, under kryssfinerplaten. Dette er området på bjelken som har det høyeste fuktinnholdet. Det skyldes høyt startfuktinnhold i kryssfinerplaten (30 vekt-%). I de 20 første dagene skjer det en fuktøkning i bjelkene for alle boksene. Ved dag 20 starter en fuktreduksjon som skyldes at temperatursyklusen over boksene endres ved dag 19, fra 33- til 30 °C. Dermed blir fordampningshastigheten fra kryssfinerplaten redusert, og RF-nivået under kryssfinerplaten reduseres når vandamp diffunderer mot dampsperrsjiktet. I denne perioden får bjelken startet uttørkingen. Fire dager senere ved dag 24 er det variert uttørkingshastighet for Boks- A, B og D frem til en ny økning av uttørkingshastigheten starter ved dag 47. Det skyldes at temperaturen over boksene endres fra 25- til 33 °C. I-bjelken i Boks C har en høy uttørkingshastighet fra dag 20, frem til dag 34. Ved dag 34 når temperaturen senkes til 25 °C reduseres uttørkingshastigheten til I-bjelken. Ved forsøket slutt viser trenden i målingene at reduksjonen av fuktinnhold i dette området vil fortsette for alle boksene.

Figur 82 viser at I-bjelken i Boks C har raskest fuktopptak de første dagene av forsøket. Dette antas at skyldes limsjiktene mellom trelamellene i flensen, som bidrar til ujevn oppfukning. Limsjiktene fører til at mer fukt akkumuleres i de ytre lagene på flensen. Når den første perioden med fuktøkning i bjelkene er over (fra forsøket start frem til dag 20), kan man observere at uttørkingen i Boks C er vesentlig raskere sammenlignet med de andre boksene. Fra forsøket start til forsøket slutt har fuktinnholdet i den øverste flensen til I-bjelken blitt redusert med 4.13 vekt-%. Dette antas å skyldes at I-bjelkens flens tørker raskere på grunn av ujevn oppfukning og tørker fra flere sider sammenlignet med heltrebjelken. I tillegg har heltre større fuktkapasitet sammenlignet med flensen til I-bjelken. Desorpsjon av fukt i heltre går tregere desto lenger inn i materialet fukten er lagret. Ved å sammenligne uttørkingsforløpet i

kryssfinerplatens kontaktflate over bjelkene (Figur 77), med området i bjelkene i kontaktflaten med kryssfinerplaten (Figur 82), viser resultatene at trevirke i Boks C oppnår en raskere uttørking i området nær varmemfolien sammenlignet med de andre prøveboksene. Den raske uttørkingen av trematerialene i Boks C samstemmer med resultatene for RF. I Boks C reduseres RF raskere under kryssfinerplaten i forhold til de andre boksene i den første perioden av forsøket, se Figur 53. Samtidig er RF over dampspærren høyere i Boks C i første halvdel av forsøket, se Figur 54. Lavere RF-nivå i øvre deler av boksen gir gunstige forhold for uttørking av kryssfinerplaten, og av I-bjelkens øverste flens. Resultatene viser at vanddampen diffunderer raskere ned mot dampspærresjiktet i Boks C, og at heltrebjelkenes påvirkning i de andre boksene er med på å redusere RF-nivået og dermed også diffusjonshastigheten.

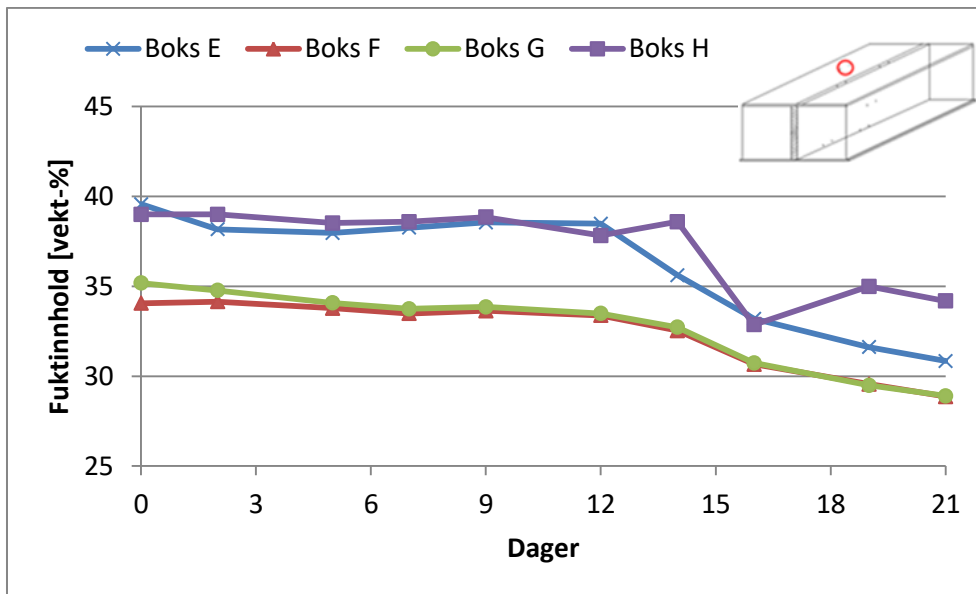
Boks- A og B, har omtrent det samme uttørkingsforløpet øverst på bjelken under kryssfinerplaten. Det er kun en liten differanse i fuktinnhold mellom Boks- A og B ved forsøkets slutt. Øverst på bjelken har Boks A en reduksjon i fuktinnhold på 2.25 vekt-%, og Boks B har en reduksjon på 1.95 vekt-%.

Bjelken i Boks D starter med 2 vekt-% lavere fuktinnhold enn de andre bjelkene. I løpet av forsøkets 60 dager har fuktinnholdet i toppen av bjelken i Boks D blitt redusert med 1.15 vekt-%. Fra kapittel 4.9.1 som tar for seg uttørkingsevne, kan man observere at Boks D har minst total uttørking. Det kan også forklare resultatene for fuktinnhold i bjelken, som viser at bjelken i Boks D har minst reduksjon av fuktinnhold i flere av de målte områdene. Bjelken i Boks D har også størst fuktopptak blant de fire boksene i de områdene som ligger nærmest dampspærresjiktet. Det skyldes RF er høyere ved dampspærresjiktet i Boks D i siste halvdel av forsøket på grunn av at AGS generasjon 2 sin Sd-verdi er høyere ved varierte RF-nivå sammenlignet med AGS generasjon 1.

Fuktinnhold i kryssfinerplater fra forsøk nr. 2

Fuktinnholdet i kryssfinerplatene presentert i Figur- 83 og 84 har blitt justert med samme korreksjonsformel som ble benyttet for kryssfinerplatene i forsøk nr. 1 (Geving & Holme, 2010). Kryssfinerplatene ble fuktet opp til omtrent 30 vekt-% før forsøket startet. Resultatene for fuktinnhold er hentet 21 dager etter laboratorieforsøk nr. 2 startet.

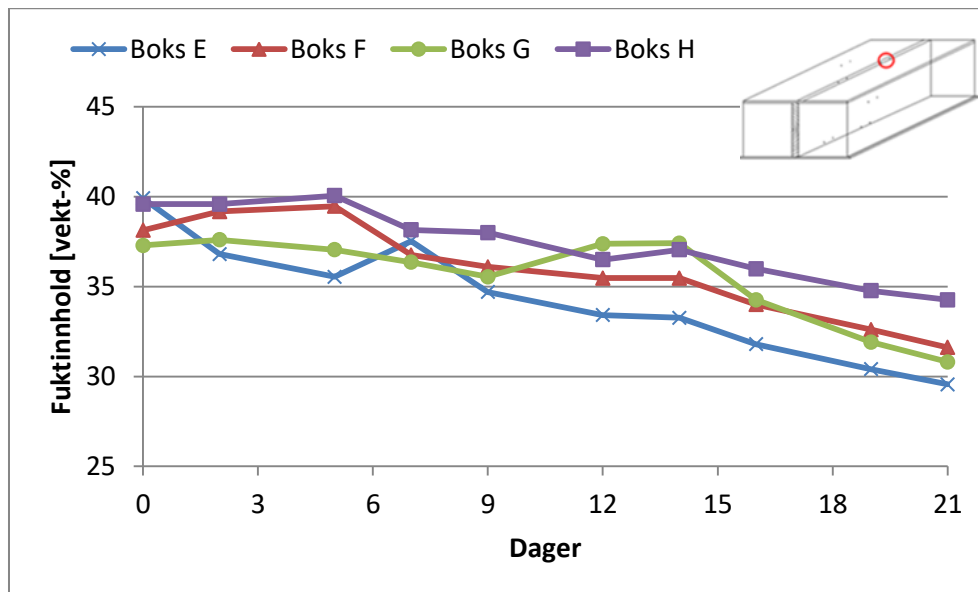
I Figur 83 presenteres fuktinnholdet til kryssfinerplatene for Boks- E, F, G og H i overgangen mellom kryssfinerplate og isolasjonssjiktet.



Figur 83. Trefuktighetsmålinger under kryssfinerplate, over isolasjonssjiktet, for alle prøvebokser i forsøk nr. 2.

Fuktinnholdet i kryssfinerplatene i Boks- F og G reduseres omtrent likt gjennom hele perioden på 21 dager. Uttørkingen av kryssfinerplaten i Boks H skiller seg ut ved at den har perioder hvor fukten øker ved dag- 12 og 16. Det kan skyldes RF-nivået i boksen som tidligere ble analysert til å oppnå kondensnivå de siste 7 dagene. Dampspærresjiktet for Boks H har den høyeste Sd-verdien ved variert RF sammenlignet med de andre prøveboksene. Ved å sammenligne uttørkingen i Boks E med Boks- F og G kan man observere at uttørkingshastigheten er raskere i Boks E når uttørkingen av kryssfinerplaten øker ved dag 12. Det antas skyldes bjelkene i Boks- F og G som er blitt fuktet opp i vannbad bidrar til å øke RF under kryssfinerplaten når de tørker ut. Til sammenligning vil bjelken i Boks E regulere fuktinnholdet i lufta ved å ta opp fukt i form av vanddamp og redusere RF. Fra Figur 88 kan man se at området øverst på bjelken i Boks E tar opp fukt i løpet av perioden på 21 dager, og at bjelkene i Boks- F, G og H har en fuktreduksjon på grunn av høyt startfuktinnhold.

Videre i Figur 84 vises fuktinnholdet til kryssfinerplatene for Boks- E, F, G og H i kontaktflaten mellom kryssfinerplate og bjelke.



Figur 84. Trefuktighetsmålinger under kryssfinerplate, i kontaktflaten mellom kryssfiner og bjelke, for alle prøveboksene i forsøk nr. 2.

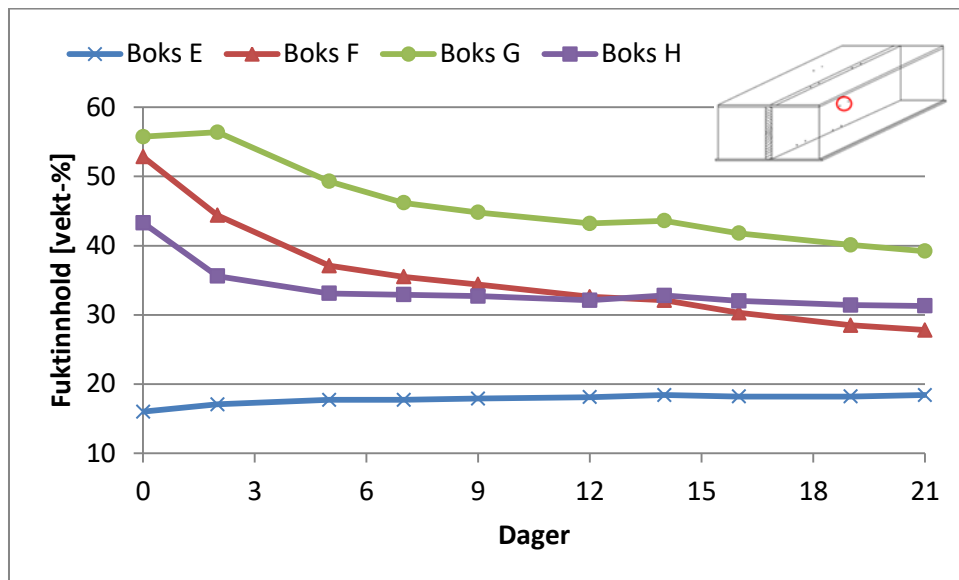
I Figur 84 kan man observere at fuktinnholdet har ujevn uttørking i kontaktflaten mellom bjelke og kryssfinerplaten for Boks- F, G og H. Når temperaturene øker ved dag 13, øker også fuktinnholdet. Boks E har en jevnere uttørking som skyldes at bjelkens fuktinnhold i denne boksen er lav og bjelken vil få et fuktopptak. Fuktinnholdet for Boks H tørket ut tregere på grunn av høyere RF i området sammenlignet med de andre boksene (se Figur 64). Ved å sammenligne uttørkingen i Boks G med Figur 87, kan en observere at fuktinnholdet i bjelken for denne boksen viser høyere vekt-% og raskere uttørking av bjelken sammenlignet med de andre bjelkene. Dette kan være årsaken til at Boks G viser høyere økning i fuktinnhold ved dag 12.

Fuktinnholdet etter 21 dager for alle boksene er fortsatt så høyt at mugg- og råteproblem kan oppstå i de to målte områdene. Videre resultater over en lengre tidsperiode vil vise om SDS kan sørge for god nok uttørking til å unngå problemer med mugg- og råte i taktro når bjelken og taktro har høy startfuktighet.

Fuktinnhold i bjelker fra forsøk nr. 2

Bjelkene i Boks F, G og H ble fuktet opp til omtrent 26 vekt-% før forsøkets start. Bjelken i Boks E har 13 vekt-% startfuktinnhold og er omtrent likt startfuktinnhold som bjelkene i forsøk nr. 1. Figur- 85 til 88 viser fuktinnholdet i bjelkene ved varierte måleområder.

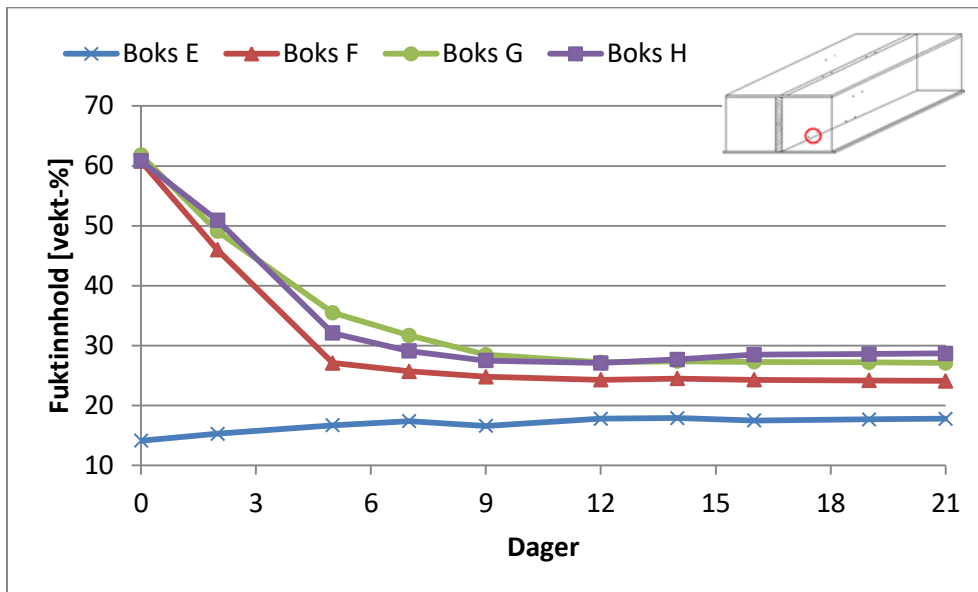
Figur 85 viser fuktinnholdet midt på bjelkenes lengde- og høyderetning for Boks E, F, G og H.



Figur 85. Fuktinnhold midt på bjelkenes høyde- og lengderetning for alle prøveboksene i forsøk nr. 2.

I Figur 85 kan man observere at bjelken i Boks F starter å tørke ut ved dag 1, og har en rask reduksjon i fuktinnhold frem til dag 9, hvor uttørkingshastigheten reduseres. Bjelken i Boks G har først en økning i fuktinnhold før uttørkingen starter. Når uttørkingen starter for bjelken i Boks G er uttørkingshastigheten tregere sammenlignet med uttørkingen i Boks F. Bjelken i Boks H tørker raskt ut de første to dagene før uttørkingen er lav fra dag 9. Etter dag 9 er fuktinnholdet ganske stabilt i Boks H, men får en fuktøkning ved dag 13 når temperaturen over boksene øker. Videre etter dag 13 skjer det en ny reduksjon i fuktinnhold for bjelken i Boks H. Bjelken i Boks E har en fuktøkning i området midt på bjelken. Økningen i fuktinnhold er lik resultatene for de første 21 dagene i Boks A som er presentert i Figur 79 fra forsøk nr. 1.

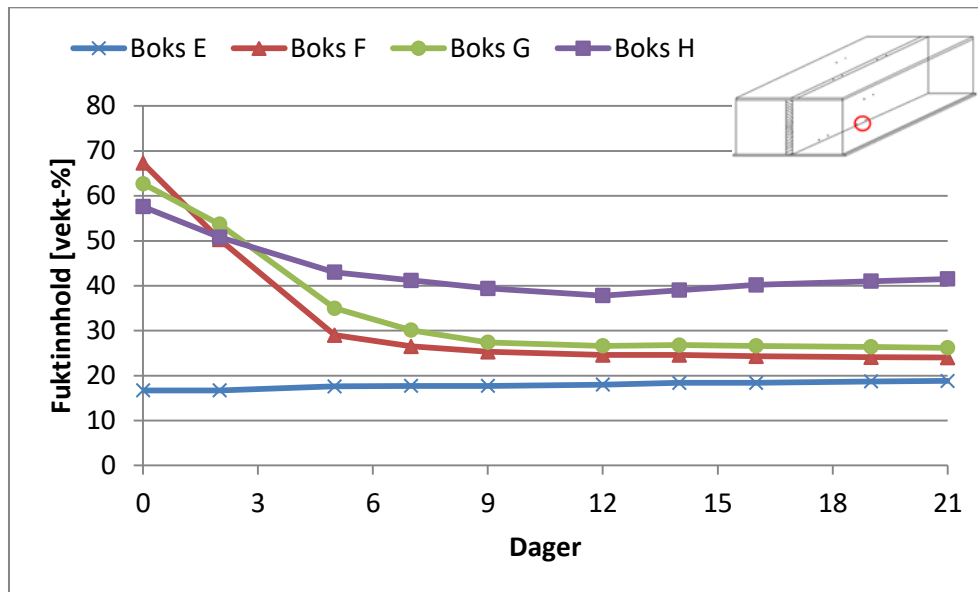
Videre viser Figur 86 fuktinnholdet på bjelkens side like over dampspærren for Boks E, F, G og H.



Figur 86. Fuktinnhold på bjelkens side, like over dampspærresjiktet for alle prøveboksene i forsøk nr. 2.

I Figur 86 kan man observere at fuktinnholdet til bjelkene som er fuktet opp til omtrent 26 vekt-% synker raskt fra dag 1 frem til dag 5. Videre fra dag- 5 til 21 er trenden for bjelkene i Boks- F og G lik. Bjelken i Boks H starter et fuktopptak i dette området ved dag 13 når temperaturen over prøveboksene endres fra 25- til 33 °C. Fuktoppakket for bjelken i Boks H varer frem til dag 21. Bjelken i Boks E viser lik trend som for Boks A i samme periode ved å sammenligne Figur 86 og Figur 80.

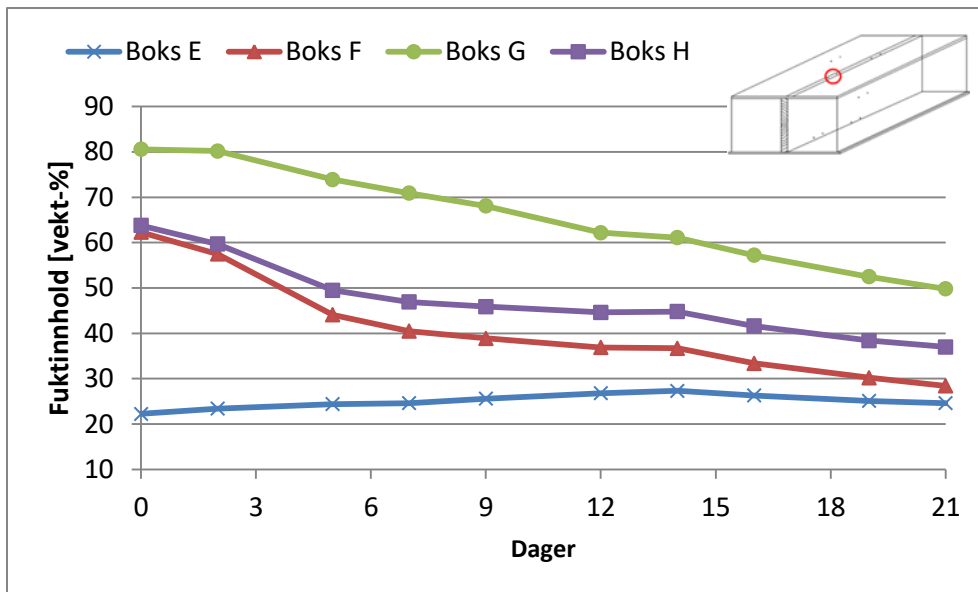
Videre viser Figur 86 fuktinnholdet på bjelkenes underside i kontaktflaten mellom bjelken og dampspærren.



Figur 87. Fuktinnhold på bjelkens underside, i kontaktflaten mellom bjelke og dampspærre.

I Figur 87 kan man observere at fuktinnholdet på bjelkenes underside tørker raskere for bjelkene i Boks- F og G frem til dag 7. Videre reduseres uttørkingshastigheten ved dag 9 og bjelkene har lav reduksjon i fuktnivå frem til periodens slutt. Bjelken i Boks H tørker ut tregere og har dermed et høyere fuktnivå sammenlignet med bjelkene i Boks- F og G. Når temperaturen øker over boksene ved dag 13 oppstår det en fuktøkning i bjelken i Boks H frem til dag 21 som skyldes at RF når kondensnivå. Årsaken til høy RF over dampspærren er antatt å skyldes høyere Sd ved variert RF for dampspærren i Boks H. Det er lik trend for fuktøkning i Boks E (Figur 87) som i Boks A (Figur 81) fra forsøk nr. 1 også i dette området.

Videre i Figur 88 vises fuktinnholdet på bjelkenes overside i kontaktflaten mellom bjelken og kryssfinerplaten.



Figur 88. Fuktinnhold i bjelkens overside øverst i boksen, i kontaktflaten mellom kryssfinerplate og bjelke.

I Figur 88 kan man observere at bjelken i Boks G har et høyere fuktinnhold ved start sammenlignet med de andre bjelkene i dette området. Ved dag 2 starter bjelken å tørke og har høy uttørkingshastighet frem til dag 21 sammenlignet med de andre bjelkene. Bjelkene i Boks F og H har omtrent lik startfuktinnhold. På grunn av SDS-materialenes forskjell i Sd-verdi, tørker bjelken i Boks F ut raskere sammenlignet med bjelken i Boks H. Uttørkingstrenden for bjelkene i Boks- F og H er omtrent lik bortsett fra uttørkingshastighet som påvirker forskjellen i fuktinnhold. I Boks E kan man observere at fuktinnholdet går opp mot 30 vekt-% frem til dag 14 hvor fuktinnholdet er målt til 27 vekt-%. Fra dag 14 frem til dag 21 reduseres fuktinnholdet for bjelken i Boks E. Fuktinnholdet er i dette området høyere sammenlignet med resultatene for Boks A i forsøk nr. 1. Det antas å skyldes at kryssfinerplaten tørker ut raskere i forsøk nr. 2, siden platen allerede har gjennomgått en periode med oppfukning og tørking fra forsøk nr. 1, som tidligere nevnt. Derfor er også RF høyere over SDS i Boks E sammenlignet med Boks A i første periode av forsøk nr. 1.

4.10 Oppsummering og konklusjon for laboratorieforsøk

I laboratorieforsøkene utført som en del av denne masteroppgaven var målet å se på effekten av å plassere bjelker inne i et kompakt tretak hvor SDS var benyttet som innvendig dampsperrsjikt. Målinger av RF, fuktinnhold i trevirke og uttørkingsgrad ble utført for å kontrollere fuktvandringen i prøveboksene. RF-målinger ble utført i totalt fem områder i boksene. Fuktinnhold i trevirke ble målt i seks områder. To områder i kryssfinerplaten, og fire områder på bjelken. Uttørkingsgraden ble målt ved å veie prøveboksene jevnlig. Prøveboks- A, B, C, E og F benytter AGS generasjon 1 dampsperre, og Boks- D, G og H benytter AGS generasjon 2. Boks H benytter AGS generasjon 2 med beleggsiden snudd ut i konstruksjon. Dette gir dampsperrsjiktet en høyere Sd ved variert RF, enn om den var montert med beleggsiden inn som er tradisjonelt mer gunstig. En nærmere utredning av de varierte Sd-verdiene for AGS generasjon 2 er beskrevet i kapittel 4.2.1.

Måleresultatene ble benyttet til å sammenligne varierte materialsammensetninger og startfuktinnhold i prøveboksene fra de to utførte laboratorieforsøkene. I enkelte områder er det gjort sammenligninger med tidligere laboratoriearbeid ved NTNU som har lik oppbygning, startfukt og klimaforhold. Under de tidligere laboratorieforsøkene ble det sett på en-dimensjonal uttørking gjennom homogene sjikt. Det skyldes at bjelker ikke ble benyttet i disse boksene. I tillegg er det gjort vurderinger i forhold til risiko for mugg- og råtevekst i trevirke.

Laboratorieforsøk nr. 1

I laboratorieforsøk nr. 1 kom prøveboks- A og C best ut i forhold til total uttørkingsgrad, med en fuktreduksjon på $1,14 \text{ kg/m}^2$. Det stilles noe usikkerhet til nøyaktigheten av veiingene i laboratorieforsøk nr. 1 siden det ikke var mulig å skille de to boksene. Boks B hadde en fuktreduksjon på $1,09 \text{ kg/m}^2$, og Boks D hadde lavest uttørkingsgrad med $0,91 \text{ kg/m}^2$. Forsøket fra 2012 hadde en total uttørking på $1,03 \text{ kg/m}^2$, omtrent $0,11 \text{ kg/m}^2$ lavere sammenlignet med boksene som hadde den høyeste uttørkingen i forsøk nr. 1

Veiing av kryssfinerplatene viser at fuktinnholdet blir redusert med omtrent 18 vekt-% for alle boksene. Dermed er kryssfinerplatens fuktinnhold i gjennomsnitt 12 vekt-% for de fire boksene ved forsøkets slutt. Uttørkingsgraden til kryssfinerplaten i Boks C var høyest med en differanse på 18,80 % ved utregning.

Tabell 14 viser andelen fukt tørket ut fra kryssfinerplaten, i forhold til total uttørking ut fra prøveboksen.

Tabell 14. Andel fukt tørket ut fra kryssfinerplatene, som har tørket ut av boksene.

Boks	Fuktinnhold i kryssfinerplate ved forsøkets start [g]	Fuktinnhold i kryssfinerplate ved forsøkets slutt [g]	Total uttørking av kryssfiner [g]	Total uttørking av boksen ((kg/m ²) x m ²) [g]	Andel fukt tørket ut av kryssfinerplaten, som har tørket ut av boksen [%]
Boks A	1064	402	662	500	76
Boks B	1046	454	592	478	81
Boks C	1106	433	673	500	74
Boks D	1114	461	653	399	61

Gjennomsnittlig uttørket andel for alle fire boksene er 73 %.

Tabell 14 viser at Boks B har størst andel tilført fukt som tørket ut av boksen, med 81 %. Boks- A og C har omtrent lik andel tilført fukt som har tørket ut fra boksen, og Boks D tørket ut minst andel fukt. Vedrørende den totale uttørkingsgraden som var lik for prøveboks- A og C, kan det tenkes at dersom veingene hadde vært mer nøyaktige ville uttørkingsgraden i Boks C vært høyere enn Boks A. Dette antas ved at uttørkingen i trevirke inne i Boks C går vesentlig raskere sammenlignet med Boks A. Uttørkingen fra Boks B hadde størst fuktandel tørket ut fra kryssfinerplaten med 81 %, men tørket ut mindre fukt fra kryssfinerplaten sammenlignet med de andre prøveboksene. Boks- A og C har tørket ut omtrent lik andel fukt, og Boks D har den laveste uttørkingsandelen med 61 %.

Bjelkenes påvirkning på fuktinnholdet i boksene ble tydelig ved å sammenligne RF like over dampsperrsjiktet på bjelkens side, med RF i isolasjonssjiktet lenger ut fra bjelken. I området nær bjelken ble det observert kortere svingninger i RF sammenlignet med området midt mellom bjelken og boksens sidekant. Videre viste det seg at RF i gjennomsnitt var høyere nær bjelken for boksene med heltrebjelke. Boks C med I-bjelke hadde et lavere RF-nivå ved siden av bjelkeflensen sammenlignet med RF midt mellom bjelkeflens og boksens sidekant. Når RF i gjennomsnitt er høyere nær heltrebjelkene antas dette å skyldes fuktbidraget fra bjelken ved desorpsjon. RF var høyere i isolasjonssjiktet i Boks C med I-bjelke sammenlignet med Boks- A og B med heltrebjelke. Heltrebjelken bidrar med en fuktbufferingseffekt og reduserer RF i boksen. Årsaken til lavere RF ved I-bjelkens flens skyldes lavere fuktkapasitet. I-bjelkens flens har en ujevn oppfukting som gjør at den tørker raskere når fukt akkumuleres i de ytterste sjiktene på flensen. I tillegg til at flensen har bedre forutsetning for uttørking, da den kan tørke ut fra flere sider på grunn av det tynne steget mellom flensene.

Høydeforskjellen mellom oppfuktet kryssfinerplate og dampsperre viste seg å ha påvirkning på svingningene i RF og RF-nivået ved dampsperrsjiktet. I laboratorieforsøket utført i 2012 var det benyttet prøvebokser med mindre isolasjonstykkelse. Differansen i isolasjonstykkelse mellom boksene er 10 cm. Isolasjonssjiktet i 2012 var 20 cm, mot 30 cm i forsøket utført i denne oppgaven. Ved å benytte større prøvebokser gir det et mer realistisk bilde av isolasjonstykkelse i kompakte tak med dagens TEK-krav til klimaskall. Bjelkene vil også påvirke svingningene og RF-nivået i boksen. Resultatene viste at RF nær bjelkene hadde kortere svingninger, men høyere RF-nivå sammenlignet med RF midt mellom bjelke og

boksens sidekant (omtrent 2- til 3 % forskjell i RF). Ved å sammenligne Boks C med I-bjelke mot de andre boksene med heltrebjelke, kunne de sees at RF-nivået i isolasjonssjiktet over dampspærren var lavere i boksene med heltrebjelke og lik dampspærre. Sammenlignes svingningene i RF ved bjelkene viser det seg at svingningene i RF er omtrent like uavhengig av bjelketype. RF-nivået skiller derimot mer mellom heltrebjelke og I-bjelke. Dermed har en kommet frem til at isolasjonstykkelsen må være årsaken til reduserte svingninger i RF, og at heltrebjelkenes sin fuktbuffering har større påvirkning RF-nivået i isolasjonssjiktet. Dersom det er kortere avstand fra fuktilden (kryssfinerplaten) til dampspærresjiktet vil det oppnås en raskere uttørking på grunn av raskere omfordeling, kortere diffusjonsavstand og dermed mindre diffusjonsmotstand. Disse faktorene er med på å påvirke RF-nivået over dampspærren. Ved å sammenligne resultatene for laboratorieforsøket i denne oppgaven mot resultatene fra 2012, observeres en høyere grad av total uttørking i forsøket fra 2012 de første ukene i forsøksperioden.

Betydningen av å benytte et uisolert installasjonssjikt på dampspærrens innside viste seg å være minimal, da RF-nivået på innsiden av dampspærresjiktet var omtrent likt med og uten uisolert installasjonssjikt gjennom hele forsøksperioden.

RF i dampspærren ble estimert ved å beregne gjennomsnittet av målinger på inn- og utsiden av dampspærresjiktet for Boks- A og B. Beregningene viste at dampspærren hadde RF mellom 60- og 70 % i hele forsøksperioden. I følge tall fra DuPont har dampspærren en Sd på mellom 1,53 m (RF = 63 %), og 0,17 m (RF = 75 %). Sammenlignes resultatene med resultatene fra SINTEF sin kontroll av Sd for AGS generasjon 1, ligger Sd-verdien mellom 1,23 m (RF = 63 %), og 0,18 m (RF = 72 %).

Sammenligning av RF inne i underkant av bjelken mot RF på bjelkesiden over SDS viser at RF-nivået inne i bjelken er lavere i første halvdel av forsøksperioden. I siste halvdel er RF utenfor bjelken omtrent lik som inne i bjelken. Svingningene i RF inne i bjelken er betydelig mindre, og skyldes at fukten diffunderer tregere gjennom trevirke sammenlignet med diffusjon i isolasjonssjiktet.

Målingene av fuktinnhold i bjelkene viste et fuktopptak fra forsøkets start til forsøkets slutt for enkelte områder. Dette var vesentlig tydeligere for heltrebjelkene, sammenlignet med I-bjelkens flens. På bjelkens side like over dampspærren var RF-nivået høyt i store deler av forsøket (mellom 70 og 85 % RF). I dette området økte fuktinnholdet i bjelkene for alle boksene fra start til slutt. Ingen av bjelkene oversteg 19 vekt-% og var dermed utenfor området hvor faren for muggsopp kan oppstå. Fuktmålingene utført på undersiden av bjelken viste samme tendens til fuktøkning som for siden av bjelken men med høyere fuktnivå ved start. For dette området hadde bjelken i Boks D størst fuktøkning med differanse på 1,75, og endte opp med et fuktinnhold på 17,2 ved forsøksperiodens slutt. I-bjelken i Boks C hadde lavest fuktøkning med en differanse på 0,1, og hadde ved forsøkets slutt et fuktinnhold på 15,5 vekt-%. Ingen av bjelkene nådde et fuktinnhold over 20 vekt-% for området under bjelken i kontaktflaten med dampspærresjiktet.

Fuktmålingene utført øverst på bjelkene i kontaktflaten mellom bjelke og kryssfiner viser at flensen på I-bjelken har betydelig høyere uttørking sammenlignet med heltrebjelkene. I løpet av de første 19 dagene i forsøket oversteg bjelkene i Boks A, B, og C 20 vekt-% fuktinnhold for dette området. Dette skyldes det høye fuktinnholdet i kryssfinerplaten ved forsøkets start og at bjelkene i Boks- A, B og C hadde et høyt startfuktinnhold på 19 vekt-% øverst på bjelken. Ved dag 24 har de samme bjelkene begynt å tørke ut, og har en kontinuerlig reduksjon i fuktinnhold frem til forsøkets slutt. Bjelken i Boks D hadde lavere startfuktinnhold (17 vekt-%) og hadde en topp i fuktinnhold på 18 vekt-% i dette området. Fra dag 19 til slutten av forsøket har flensen øverst på I-bjelken tørket ut 6 vekt-% fuktinnhold. Dette er det dobbelte av fuktreduksjon for heltrebjelkene i Boks- A og B, som tørket ut 3 vekt-% i det samme område. Til sammenligning var reduksjon i fuktinnhold 2 vekt-% fra start til slutt for bjelken i Boks D med AGS generasjon 2. Årsaken til et høyere gjennomsnittlig fuktinnhold i bjelken for Boks D i de målte områdene antas å skyldes at denne prøveboksen benyttet AGS generasjon 2, som har høyere Sd ved RF-nivå over 45 %. AGS generasjon 1 vil derfor gi bedre forutsetninger for uttørking av bjelkene. Boks C med I-bjelke viste raskere uttørking av fukt i starten av forsøket. Kryssfinerplaten og I-bjelkens flenser tørket raskere ut sammenlignet med de andre boksene.

Laboratorieforsøk nr. 2

Resultatene for Boks E i laboratorieforsøk nr. 2 viste mange likheter med Boks A fra laboratorieforsøk nr. 1 de første 21 dagene. Boksene A og E er identiske i oppbygning og startfuktighet. Ved å sammenligne resultatene for Boks- A og E lå den største forskjellen øverst i prøveboksen nær kryssfinerplaten. I dette området viste det seg å være høyere RF og høyere fuktinnhold for prøveboks E. Årsaken antas å skyldes at kryssfinerplaten i Boks E tørker raskere ut etter å ha gjennomgått en periode med høyt fuktinnhold og uttørking fra forsøk nr. 1. Ved å ha gjennomgått en oppfuktingsprosess og deretter en tørkeperiode, har kryssfinerplaten mistet en del av det fuktbeskyttende belegget på overflaten. I tillegg har kryssfinerplaten blitt mer porøs etter en høy oppfukting etterfulgt av en tørkeperiode. Det ble tydelig ved oppfuktingen av kryssfinerplaten. I forsøk nr. 2 tok det 28 timer fra oppfuktingen av kryssfinerplatene startet til de hadde nådd 30 vekt-%. I første forsøk tok det til sammenlikning 70 timer å fukte opp kryssfinerplatene til 30 vekt-%. Det bekrefter påstanden om at platene har blitt mer porøse og har mistet en del av det fuktbestandige belegget på overflaten.

For prøveboks- F, G og H som hadde oppfuktet bjelke og taktro, viste resultatene av uttørkingsgraden at Boks F med AGS generasjon 1 hadde størst uttørking etter 21 dager. Etter 7 og 14 dager var uttørkingsgraden lik for Boks- F og G. Boks F hadde uttørkingsgrad på $0,774 \text{ kg/m}^2$ etter 21 dager. Boks G med AGS generasjon 2 hadde lavere uttørkingsgrad på $0,729 \text{ kg/m}^2$. Boks H hadde lavest uttørking etter 21 dager med $0,364 \text{ kg/m}^2$. Dette viser at ved å montere AGS generasjon 2 med den belagte siden ut i konstruksjon (Boks H), halveres uttørkingsgraden. Resultatene som er presentert gjelder kun for de første tre ukene av forsøket. Det bør derfor hentes ytterligere resultater over en lengre periode for å danne et bedre grunnlag til å sammenligne dampsperrene.

RF-nivåene under kryssfinerplatene i prøveboksene lå mellom 90- og 95 % de første 12 dagene frem til temperaturen over boksene økte. I løpet av 9 dager ble RF redusert med omtrent 5 % for alle prøvene. I denne perioden var temperaturen over prøveboksen 33 °C de første 4 dagene og 30 °C de resterende 5 dagene mot periodens slutt. RF over dampsperrsjiktet var i perioden på 21 dager mellom 85- og 90 % RF i Boks G med AGS generasjon 2 (beleggsiden inn). RF-sensoren i Boks F med AGS generasjon 1 hadde et hopp i RF ved dag 6 som gjorde at RF nådde kondensnivå over en periode på 4 dager før RF ble redusert de siste 3 dagene av forsøket. I Boks H var RF omtrent 90 % frem til temperaturen økte til 33 °C ved dag 13. Fra dag 13 til dag 21 var RF over dampsperreren i Boks H på 100 %. Sammenlikningen av RF-nivå på inn- og utsiden av AGS generasjon 1 i Boks F og AGS generasjon 2 i Boks G viste at de hadde omtrent likt RF-forløp i denne perioden. På grunn av hoppet i RF i Boks F var det høyere RF-nivå på utsiden av dampsperreren i Boks F. RF i dampsperrsjiktet lå mellom 70- og 80 % for begge dampsperrere gjennom perioden på 21 dager. I dette området har AGS generasjon 1 Sd på mellom 1,53- og 0,045 m ved RF på henholdsvis 62,5- og 92,5 % i følge produsenten. Til sammenligning har AGS generasjon 2 en Sd-verdi på 3,6 m ved 62,5 % RF, og 0,2 m ved 92,5 % RF. RF-nivåene nær bjelkene var høyere sammenlignet med RF lenger ut fra bjelken for Boks F, G og H i de første dagene av forsøket. I Boks F var RF nær bjelken lavere enn RF-nivået lenger ut i isolasjonssjiktet etter 6 dager. Dette skyldes hoppet i RF over SDS ved dag 6. For Boks G og H er RF nær bjelken høyere i hele perioden på grunn av at bjelken tørket ut. I Boks H stiger RF-nivået til 100 % nær bjelken ved dag 14 og ligger ved kondensnivå frem til dag 21. I siste halvdel av forsøket ligger RF-nivået i Boks G ved bjelkesiden likt med RF lenger ut i boksen. RF-målinger nær SDS i Boks E var lik som Boks A i forsøk nr. 1.

Trefuktighetsmålingene viste at det tok lenger tid for fukten å tørke ut av trevirke i de øvre delene av prøveboksene når både bjelke og kryssfinerplate er fuktet opp. Fuktinnholdet i nedre deler av bjelkene nær dampsperrsjiktet sank raskt de første dagene av forsøket for bjelkene i Boks- F, G og H. I Boks H reduseres uttørkingshastigheten til bjelken tidligere sammenlignet med Boks- F og G og har dermed høyere vekt-% fuktinnhold. Årsaken er antatt å skyldes høyere RF-nivå i Boks H på grunn av dampsperrrens høyere Sd ved variert RF sammenlignet med dampsperrsjiktene i de andre prøveboksene. Bjelken i Boks E viser lik fuktøkning de målte områdene som i Boks A fra forsøk nr. 1. For bjelkene som ble fuktet opp viser alle områdene at fuktinnholdet ligger over 20 vekt-% etter 21 dager. For å vurdere om SDS-produktene kan hjelpe til med å unngå mugg- og råtevekst i trevirke må ytterligere data fra forsøk nr. 2 samles over en lengre periode. Fra resultatene som allerede er hentet ut kan det se ut til at bjelken i Boks H kommer til å få problemer med uttørkingen av det høye fuktinnholdet i prøveboksen ved start som skyldes dampsperrrens høye Sd ved variert RF sammenlignet med de andre prøveboksene.

5 Konklusjon

Etterberegningstudien viser at det kreves både et kvalitativt- og kvantitativt datagrunnlag for å definere materialeegenskapene til smarte dampsperrer. Av de tre smarte dampsperrere som ble benyttet til å etterberegne resultater fra et tidligere laboratorieforsøk ved NTNU var det kun to som var tilgjengelig i materialdatabasen til WUFI. For Intello og Novaflexx var materialparameterne definert i WUFIs materialdatabase. For Intello stemte parameterne fra WUFI sin database dårlig ved etterberegning. Ved bruk av materialparameterne til Novaflexx i databasen til WUFI, stemte resultatet fra simuleringen godt med resultatene fra laboratorieforsøket. AGS generasjon 1 måtte defineres ved å lage et nytt materiale da materialet ikke var tilgjengelig i materialdatabasen. Det ble fokusert på materialets vanndamppermeabilitet ved variert RF. Parameterne som ble benyttet til å definere AGS generasjon 1 var hentet fra produsenten av materialet, og fra resultater i en laboratorieprøve ved SINTEF Byggforsk. Etterberegningen med bruk av det egendefinerte materialet viste at materialparameterne som ble benyttet i WUFI ga god tilnærming til laboratorieresultatene. Det viste seg å være avvik i uttørkingshastigheten til den egendefinerte AGS i forhold til reell uttørking. Det har derfor blitt påpekt i rapporten at enkelte av parameterne som ble benyttet for AGS ikke var gode nok for Sd-verdier ved RF over 40 %. Selv om parameterne benyttet stemmer godt med de reelle materialene antas det at parameterne for SDS må tilpasses simuleringsverktøyets grensesnitt for å gjenskape resultater som er likt med reelle målinger.

Resultatene i laboratorieforsøk nr. 1 viser at isolasjonstykkelsen påvirker døgnsvingningene til RF og gjennomsnittlig RF-nivå i kompakte tak. Dersom det bygges et bjelkelag av heltre inn i kompaktaket vil bjelkene bidra til å redusere RF-nivået i taket. Heltrebjelkene har en fuktbufferingseffekt som bidrar til at døgnsvingninger i RF nær bjelken reduseres. Videre fører dette til at RF-nivået nær bjelken blir høyere på grunn av desorpsjon ved temperaturendringer. I-bjelkens flens viste seg å ha betydelig mindre fuktlagring i de målte områdene sammenlignet med heltrebjelkene. I alle områder hvor det ble målt fuktinnhold hadde I-bjelken lavest fuktøkningen blant alle bjelkene ved forsøkets slutt. I-bjelkens flens ved kryssfinerplaten var det området i alle prøveboksene hvor det opptrådte størst fuktøkning de første dagene av forsøket på grunn av høy startfukt i taktro. Videre viste det seg at flensen i det samme området tørket ut raskere og hadde høyere fuktreduksjon sammenlignet med heltrebjelkene. Dette forklares med at I-bjelkens flens har bedre forutsetning for uttørking siden den tørker fra flere sider, og fordi fukten akkumuleres i de ytterste sjiktene på bjelkeflensen på grunn av limlagene mellom lamellene. Ved at heltrebjelkenes fuktbuffering reduserer RF-nivået mellom sperresjiktene og bruker lengre tid på å tørke ut, bidrar det til at uttørkingshastigheten i kompaktaket reduseres. Kryssfinerplaten i boksen med I-bjelke tørket raskere i løpet av forsøksperioden sammenlignet med de andre boksene i forsøk nr. 1. I samme forsøk hadde boksen med I-bjelken størst uttørkingsgrad den første uka. I slutten av forsøksperioden hadde prøveboksen med heltrebjelke og AGS generasjon 1 uten installasjonssjikt lik uttørkingsgrad som boksen med I-bjelken. På grunn av begrensninger ved veiing var det ikke mulig å skille de to prøveboksene. Resultatene fra det første forsøket viser at det kan være fordelaktig med bruk av I-bjelke i kompakte tak med SDS. I-bjelkens flens tar opp mindre fukt, tørker raskere

ut og tillater mer fukt å omfordes i isolasjonssjiktet. Økt RF i isolasjonssjiktet kan bidra til at SDS blir mer fuktig og oppnår med dette lavere Sd som gir raskere innadrettet uttørking. Bjelken i boksen med AGS generasjon 2 hadde størst fuktøkning i måleområdene fra forsøk nr. 1. Videre hadde boksen med AGS generasjon 2 lavest total uttørkingsgrad. Dette begrunnes med at AGS generasjon 2 har høyere Sd ved RF over 45 %. Det førte til at RF-nivået var høyere over dampsperrsjiktet i denne prøveboksen i store deler av forsøket.

Analysen av mugg- og råtefaren i forsøk nr. 1 viste at det ikke var lange perioder hvor fuktinnhold i trevirke oversteg 20 vekt-%. Blant de områdene hvor fuktinnhold i trevirke ble målt, var det kun i kontaktflaten mellom bjelken og kryssfinerplaten at fuktinnholdet oversteg 20 vekt-% i løpet av forsøksperioden. For dette området var fuktinnholdet i boksene med AGS generasjon 1 mellom 20- og 21 vekt-% i en periode på 20 dager i starten av forsøket. Bjelken i boksen med AGS generasjon 2 hadde lavere startfuktinnhold og oversteg derfor ikke 20 vekt-% i samme område. Ved å sammenligne RF-nivåene for de målte områdene i hele perioden, var det i sjiktet over dampsperran at gjennomsnittlig RF var høyest. RF i boksene lå over 80 % over dampsperrsjiktet i første halvdel av forsøket. Da temperaturen ble senket fra 30- til 25 °C ved ny klimasyklus ble RF redusert til omtrent 75 % over dampsperran. Videre da temperaturen økte til 33 °C ved dag 47, førte det til en ny økning i RF som oversteg 80 % i perioder av døgnet. Da temperaturen igjen ble justert ned fra 33- til 30 °C ble RF redusert under 80 % i den siste perioden av forsøket. Fuktinnholdet i luften over dampsperran er derfor sterkt påvirket av temperatursvingningene. Bjelkene i har et fuktinnhold på mellom 14- og 17 vekt-% ved forsøkets slutt. Samtidig er det en reduksjon i fuktinnhold ved forsøkets siste dager. Det antas ikke en stor økning i RF over dampsperran inne i boksene som kan øke fuktopptaket nok til å medføre fare for muggvekst over tid.

Ved siste periode av forsøket hadde kryssfinerplatene i de fire boksene gjennomsnittlig tørket ut 18- av 30 vekt-% fuktinnhold som platen inneholdt ved start. Beregnet total uttørking av hver boks delt på total uttørking av kryssfinerplaten viser at gjennomsnittlig 73 % av fukten som har tørket ut fra kryssfinerplaten har tørket ut av hver boks ved diffusjon. Da boksene ble fjernet fra riggen ved forsøkets slutt var det ingen tegn til muggvekst på hverken bjelker eller kryssfinerplater ved demontering av prøveboksene. Resultatene fra laboratorieforsøk nr. 1 viser at faren for mugg- og råteskader er forholdsvis liten med de forutsetningene som er benyttet i forsøket.

I laboratorieforsøk nr. 2 ble kryssfinerplatene fuktet opp til omtrent 30 vekt-% og bjelkene i tre av prøveboksene fuktet opp til omtrent 26 vekt-% i tre prøvebokser. Den siste prøveboksen i forsøk nr. 2 var lik en av boksene i forsøk nr. 1 og hadde kun oppfuktet kryssfinerplate ved start. Fra laboratorieforsøk nr. 2 viser resultatene etter 21 dager at fuktreduksjon i kryssfinerplatene reduseres tregere når bjelken er fuktet opp til 26 vekt-% før start. Når bjelken tørker i første periode av forsøket vil fuktreduksjon i området øverst i boksen nær kryssfinerplaten være med på å øke luftfuktigheten, og dermed redusere uttørkingen til kryssfinerplaten. Ved å benytte en kryssfinerplate som allerede har gjennomgått en høy oppfukning etterfulgt av en tørkeperiode, viste det seg at kryssfinerplaten tar opp fukt raskere og tørker ut raskere sammenlignet med en ny plate. Dette ble observert ved oppfukning av

kryssfinerplatene fra forsøk nr. 1 før forsøk nr. 2. I boksen fra forsøk nr. 2 hvor bjelken ikke var oppfuktet i vannbad ble det observert at RF økte raskere under kryssfinerplaten sammenlignet med en tilsvarende prøveboks fra forsøk nr. 1. Bjelkene som var oppfuktet før start tørket raskere ut de første dagene i området over dampsperrsjiktet, men stabiliserte seg på et fuktnivå etter omtrent en uke. Etter en uke var RF-nivået høyt over dampsperrsjiktet til boksene med oppfuktet bjelke og kan derfor være årsak til at uttørkingen av bjelkene ble redusert.

Videre i konklusjon blir AGS generasjon 2 nevnt med beleggsiden inn eller ut i konstruksjon fra forsøk nr. 2. For å klarere er AGS generasjon 2 montert med belagt side inn i forsøk nr. 1. Montering av AGS generasjon 2 med belagt side inn vil gi best tilnærming til AGS generasjon 1 sin Sd-verdi ved variert RF.

RF-nivåene i prøveboksene med AGS generasjon 1 og AGS generasjon 2 med belagt side ut i konstruksjon nådde kondensnivå ved dag 13 da temperaturen over boksene økte fra 25- til 33 C°. Årsaken til det høye RF-nivået i boksen med AGS generasjon 1 skyldes at sensoren fikk et hopp på 6 % RF ved dag 6, og gikk fra 86- til 92 % RF. Det antas at dette skyldes en feil med RF-sensoren. I boksen med AGS generasjon 2 (belagt side ut) ligger RF på omtrent 93 % over SDS før fuktnivået reduseres ved at temperaturen ble senket fra 33- til 30 C° ved dag 17. For perioden som ble registrert vil RF-nivåene være høye da uttørkingen av trematerialene kun har begynt og fuktinnholdet i prøveboksene vil fortsette reduseres frem til forsøket er over. RF i dampsperrsjiktet for AGS- generasjon 1 og generasjon 2 var omtrent 72 % fra start til dag 14. Videre var RF i dampsperrsjiktet omtrent 80 % de siste 7 dagene av perioden på 21 dager. RF i dampsperrsjiktet fra forsøk nr. 1 ble observert å ligge på omtrent 65 % frem til dag 14.

Da det kun ble registrert målinger for de første tre ukene av forsøk nr. 2, var det ikke mulig å gi endelig vurdering av dampsperrenes egnethet til å redusere faren for mugg- og råteproblemer i en konstruksjon som inneholder høyt startfuktinnhold i bjelke og taktro før lukking. Videre data over en lenger periode må innhentes fra laboratorieforsøk nr. 2 for å se hvor god uttørkingen er over tid ved bruk av smarte dampsperrer.

6 Videre arbeid

I denne rapporten er det gjennomført etterberegninger av et tidligere laboratorieforsøk som ble utført ved NTNU i 2012. Videre er det utført to laboratorieforsøk hvor hensikten var å undersøke effekten av bjelkelag inne i et kompakt tretak med bruk av smart dampsperre og et høyt startfuktinnhold.

I etterberegningene er det i hovedsak sett på muligheten for å gjenskape resultatene fra et tidligere laboratorieforsøk ved NTNU i en simulering. Målet har vært å verifisere materialparametere for smarte dampsperrer slik at disse materialparameterne kan benyttes til videre forskning. Resultatene fra etterberegningene viste at materialparameterne som ble benyttet for de smarte dampsperrere ikke ga god nok presisjon med laboratorieresultatene. For Intello var det et vesentlig avvik i materialparameterne ved sammenligning av resultatene fra laboratorieforsøket. For Novaflexx stemte materialparameterne godt, men avvik viste at parameterne kan forbedres. Materialparameterne som ble benyttet for AGS generasjon 1 ga en tilnærming til de reelle resultatene. På grunn av avvik i uttøringshastighet bør parameterne for Sd-verdier over 40 % RF utbedres. Det vil derfor være nødvendig å finne nye og bedre tilpassede materialparametere til WUFI-simuleringer for de tre smarte dampsperrere som ble kontrollert i denne oppgaven. Gode tilpassede materialparametere som kan vise reelle uttøringsforløp i simuleringer vil videre kunne benyttes til å gjøre kvalitative og kvantitative studier av smarte dampsperrer. I tillegg er simuleringer et godt verktøy til å forske på forhold som strekker seg over et større tidsløp (flere år), sammenlignet med hva som er mulig å få til i laboratorieforsøk.

I laboratorieforsøket ble det undersøkt effekten av å benytte trebjelker i et kompakt tretak med smart dampsperre for et sommerklima. Ytterligere data fra laboratorieforsøk nr. 2 må innhentes for å gi svar på om faren for mugg- og råteproblemer kan reduseres ved bruk av smarte dampsperrer i et kompakttak med høyt startfuktinnhold i taktro og bjelke. Lokale skyggesoner på takoverflaten forårsaket av for eksempel tekniske installasjoner og nabobygg kan påvirke uttøringsgraden ved at temperaturene ikke stiger like høyt som for overflater med direkte solstråling. I studien utført i denne oppgaven var det tydelig at temperaturendringer har stor påvirkning på RF over dampsperrersjiktet. Et forsøk i større skala kan være fordelaktig for å vurdere påvirkningen lokale skyggesoner har for uttøringsgraden til kompakttak med smarte dampsperrer. Det bør også utføres en studie for å se nærmere på effekten av konveksjon i et kompakttak med bjelkelag. Et pilotprosjekt med et reelt bygg kan være neste steg i å vurdere konveksjonseffekten i kompakte tretak med bjelkelag mellom taktekking og smart dampsperre. I et pilotprosjekt er det også mulig å finne ut hvilken effekt langbølget stråling har på uttøringsgraden til kompakttaket.

7 Referanser

Bakke, J. W., 2010. Mineralull for god isolasjon og akustikk - til skade og gagn i innemiljøet. *Arbeidervern*, 19 Mars.

Bludau, C. & Künzle, H. M., 2009. *Flat Roofs in Cold Climates - Climatic Limits for Building Flat Roofs with a Permeable Vapour Retarder*, Stuttgart: Fraunhofer Institute for Building Physics, Department of Hygrothermics.

Brookhuis, 2004. *FME*. [Internett]
Tilgjengelig fra: <http://www.brookhuis.com/fme.html>
[Funnet 25 November 2016].

Byggforskserien, 2003a. *573.121 Materialer til luft- og damptetting*. Oslo: SINTEF Byggforsk.

Byggforskserien, 2003b. *471.010 Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer*. Oslo: SINTEF Byggforsk.

Byggforskserien, 2003c. *573.430 Materialdata for vandamptransport*. Oslo: SINTEF Byggforsk.

Byggforskserien, 2004. *573.344 Varmeisolasjonsmaterialer. Typer og egenskaper*. Oslo: SINTEF Byggforsk.

Byggforskserien, 2005. *701.401 Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for inneklimaet*. Oslo: SINTEF Byggforsk.

Byggforskserien, 2007. *525.207 Kompakte tak*. Oslo: SINTEF Byggforsk.

Byggforskserien, 2016. *571.049: Kryssfinerplater. Typer og egenskaper*. Oslo: SINTEF Byggforsk.

E+E Elektronik, 2016. *Alldatasheet*. [Internett]
Tilgjengelig fra: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/165393/ETC1/EE06-FT1A1-K300.html>
[Funnet 4 Desember 2016].

Geving Stig, Thorsrud, E. & Uvsløkk, S., 2014. The performance of unventilated wooden roofs with smart vapour barriers during winter conditions. *Proceedings of the 10th Nordic Symposium on Building Physics*, 15 Juni, pp. 207-214.

Geving, S. & Holme, J., 2009. *Project report 38: Compact wood frame roofs with built-in-moisture*, Oslo: SINTEF Byggforsk.

Geving, S. & Holme, J., 2010. The Drying Potential and Risk for Mold Growth in Compact Wood Frame Roofs with Built-in Moisture. *Journal of building physics*, 2010(33), pp. 249-269.

Geving, S., Holme, J. & Uvsløkk, S., 2010. *Alternative dampsperrer med uttørkingmuligheter mot innelufta*, Oslo: SINTEF Byggforsk.

Geving, S., Thorsrud, E. & Uvsløkk, S., 2013. Smart Vapour Barriers in Compact Wood Frame roofs. I: *2nd Central European symposium on building physics, Contributions to building physics*. Wien, Østerrike: CESBP, pp. 327-334.

Green Building Press, 2008. Airtightness and the 'Intelligent' membrane. *Green Building Magazine*, 18(3).

Holme, J. & Geving, S., 2010. Unngå byggskader: Reduser risikoen for mugg- og råtesopp. *Byggaktuelt* 25, Mars, pp. 56-57.

IBP Fraunhofer, 2008. *WUFI-wiki: KLI-file*. [Internett]
Tilgjengelig fra: <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:KLI-File>
[Funnet Mars 2017].

IBP Fraunhofer, 2012. *WUFI-wiki: Climate data*. [Internett]
Tilgjengelig fra: <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Climate>
[Funnet Mars 2017].

IBP Fraunhofer, 2017a. *WUFI-Wiki: Moisture Storage Function*. [Internett]
Tilgjengelig fra: <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:MoistureStorageFunction>
[Funnet 16 Mars 2017].

IBP Fraunhofer, 2017b. *WUFI-Wiki: Liquid transport coefficients*. [Internett]
Tilgjengelig fra: <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:LiquidTransportCoefficients>
[Funnet 15 Mars 2017].

IBP Fraunhofer, 2017. *WUFI*. [Internett]
Tilgjengelig fra: <https://wufi.de/en/>
[Funnet Mars 2017].

ICOPAL, 2008. *ICOPAL Danmark*. [Internett]
Tilgjengelig fra:
<http://www.icopal.dk/~media/UploadFolder/Products/DK/IcopalDK/ProductLibrary/Moisture%20Wind%20vapour%20barriers/Plastic/Moisture%20vapour%20barriers/Hygrodiode/3001Hygrodiode1208lowres.pdf>
[Funnet 8 Mars 2017].

Isola, 2013. *Isola Butylbånd*. [Internett]
Tilgjengelig fra: <https://www.isola.no/PDFs-nb-NO/tape-og-klebesystemer/isola-butylband/>
[Funnet April 2017].

Katsaros, J. D., 2016. *AirGuard Smart Gen2: Vapor Control Layer with Moisture Variable Breathability (Sd)*. Richmond, VA: Du Pont.

Klima 2050, 2017. *Klima 2050*. [Internett]
Tilgjengelig fra: www.klima2050.no

Künzel, H. M., 1995. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and twodimensional calculation using simple parameters*, Germany: IRB Verlag.

Mettler Toledo, 2006. *Manualslib: Mettler Toledo Spider 1S Operating Instructions Manual: Data For Individual Models*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.manualslib.com/manual/942421/Mettler-Toledo-Spider-1s.html?page=34#manual>

[Funnet Mai 2017].

Miljødirektoratet, 2013. *Miljøstatus*. [Internett]

Tilgjengelig fra: www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/2013/Desember-2013/Klima-i-endring/

[Funnet 30 November 2016].

Noreng, K., Gåsbakk, J. & Bøhlerengen, T., 2012. Unngå byggskader i flate, kompakte tak. *Byggaktuell*, 2 Mai, pp. 60-61.

Omron, 2013. *Omron*. [Internett]

Tilgjengelig fra: <https://www.ia.omron.com/products/family/165/>

[Funnet 4 Desember 2016].

SINTEF Byggforsk, 2010. *Klima- og sårbarhetsanalyse for bygninger i Norge: Utredning som grunnlag for NOU om klimatilpassing*, Oslo: SINTEF Byggforsk.

Stellander, M., 2012. *Smarte dampsperrer med uttørkingmulighet mot innelufta*, [Masteroppgave], Trondheim: NTNU- Institutt for bygg- og miljøteknikk.

Thorsrud, E., 2012. *Smarte dampsperrer i kompakte tretak - betydningen av skyggeforhold*, [Prosjektoppgave], Trondheim: NTNU- Institutt for bygg- og miljøteknikk.

Thorsrud, E., 2013. *Smarte dampsperrer - betydningen av vinterforhold*, [Masteroppgave], Trondheim: NTNU- Institutt for bygg- og miljøteknikk.

Thue, J. V., 2016. *Bygningsfysikk - Grunnlag*. 1 red. Trondheim: Fagbokforlaget.

Treteknisk, 2000. Trefuktighet - tørking. *Fokus på tre*, Issue 38.

8 Vedlegg

Vedlegg A - SINTEF Rapport, Prøving av AGS generasjon 1

Vedlegg B – Tørrking av kryssfinerprøver

Vedlegg C – Tørrking- og oppfukning av bjelkeprøver

Vedlegg D – Oppfukning av kryssfinerplater til forsøk- nr. 1 og nr. 2

Vedlegg E – Oppfukning av bjelker til forsøk nr. 2

Vedlegg F – Beregning av I-bjelkens tørrvekt

Vedlegg G – Veiinger av prøveboksene i laboratorieforsøk- nr. 1 og nr. 2

Vedlegg H – Målinger til korreksjonsformel for I-bjelkens flens

Vedlegg I – Grafer fra forsøk nr. 1 som ikke ble med i rapporten

Vedlegg A - SINTEF Rapport, prøving av AGS generasjon 1



PRØVINGS RAPPORT Prøving av vanddamppermeans etter ISO/DIS 12572

Produktnavn: AirGuardSmart
Oppdragsgiver: Sintef / NTNU
Prosjektnummer: 3D820605/1
Produkttype: Smart dampsperre 50/0

Tykkelse, mm: 0,35
Målenummer: 1
Prøvediameter: (mm) 164
Salttype i boksen: CaCl₂
Prøveperiode: fra: 05.04.2013
til: 18.09.2013

	Middel i prøveperioden
Relativ luftfuktighet i boksen (%RF)	0,0
Relativ luftfuktighet i rommet (%RF)	50,9
Temperatur i boksen (°C)	22,9
Temperatur i rommet (°C)	22,9
Barometertrykk (hPa)	1008,2

Lufth. over pr.(m/s): 0,3

Tabell 1 Temperatur, relativ luftfuktighet og barometertrykk i prøveperioden.

Prøve nummer	Vanndamppermeans	Vanndampmotstand	
	(kg/m ² sPa)	(m)	(m ² sPa/kg)
1	1,50E-12	140,000	6,69E+11
2	1,43E-12	140,000	7,01E+11
3	1,44E-12	140,000	6,95E+11
4		#VALUE!	
5		#VALUE!	
Middel	1,45E-12	#VALUE!	6,88E+11

Tabell 2 Vanndamppermeans og vanndampmotstand for de fem prøvestykkene. Enkeltresultatene er et middel over fem tidsintervall med stabil fukttransport. Resultatene er korrigert for overgangsmotstanden over prøven, damptransport gjennom overlappsonen, og motstanden i luftlaget i boksen.

SIGN:

PRØVINGS RAPPORT
Prøving av vanndamppermeans etter ISO/DIS 12572

Produktnavn: AirGuardSmart
 Oppdragsgiver: Sintef/ NTNU
 Prosjektnummer: 3D820605/2
 Produkttype: Smart dampsperre 50/32,9

Tykkelse, mm: 0,35
 Målenummer: 2
 Prøvediameter: (mm) 164
 Salttype i boksen: MgCl2
 Prøveperiode: fra: 05.04.2013
 til: 18.09.2013

	Middel i prøveperioden
Relativ luftfuktighet i boksen (%RF)	32,9
Relativ luftfuktighet i rommet (%RF)	50,9
Temperatur i boksen (°C)	22,9
Temperatur i rommet (°C)	22,9
Barometertrykk (hPa)	1008,2

Lufth. over pr.(m/s): 0,3

Tabell 1 Temperatur, relativ luftfuktighet og barometertrykk i prøveperioden.

Prøve nummer	Vanndamppermeans	Vanndampmotstand	
	(kg/m ² sPa)	(m)	(m ² sPa/kg)
1	4,09E-12	48,000	2,44E+11
2	4,01E-12	49,000	2,49E+11
3	3,70E-12	53,000	2,70E+11
4		#VALUE!	
5		#VALUE!	
Middel	3,94E-12	#VALUE!	2,54E+11

Tabell 2 Vanndamppermeans og vanndampmotstand for de fem prøvestykkene. Enkeltresultatene er et middel over fem tidsintervall med stabil fukttransport. Resultatene er korrigert for overgangsmotstanden over prøven, damptransport gjennom overlappsonen, og motstanden i luftlaget i boksen.

SIGN:

PRØVINGS RAPPORT
Prøving av vanndamppermeans etter ISO/DIS 12572

Produktnavn: AirGuardSmart
 Oppdragsgiver: Sintef / NTNU
 Prosjektnummer: 3D820605/6
 Produkttype: Smart dampsperre 75/11,3

Tykkelse, mm: 0,35
 Målenummer: 6
 Prøvediameter: (mm) 164
 Salttype i boksen: LiCl
 Prøveperiode: fra: 11.03.2013
 til: 10.04.2013

	Middel i prøveperioden
Relativ luftfuktighet i boksen (%RF)	11,3
Relativ luftfuktighet i rommet (%RF)	75,6
Temperatur i boksen (°C)	23,3
Temperatur i rommet (°C)	23,3
Barometertrykk (hPa)	1014,8

Lufth. over pr.(m/s): 0,3

Tabell 1 Temperatur, relativ luftfuktighet og barometertrykk i prøveperioden.

Prøve nummer	Vanndamppermeans	Vanndampmotstand	
	(kg/m ² sPa)	(m)	(m ² sPa/kg)
1	1,47E-11	14,000	6,79E+10
2	1,57E-11	13,000	6,39E+10
3	1,89E-11	11,000	5,28E+10
4		#VALUE!	
5		#VALUE!	
Middel	1,64E-11	#VALUE!	6,08E+10

Tabell 2 Vanndamppermeans og vanndampmotstand for de fem prøvestykkene. Enkeltresultatene er et middel over fem tidsintervall med stabil fuktransport. Resultatene er korrigert for overgangsmotstanden over prøven, damptransport gjennom overlappsonen, og motstanden i luftlaget i boksen.

SIGN:

PRØVINGS RAPPORT
Prøving av vanndamppermeans etter ISO/DIS 12572

Produktnavn: AirGuardSmart
 Oppdragsgiver: Sintef / NTNU
 Prosjektnummer: 3D820605/7
 Produkttype: Smart dampsperre 75/32,9

Tykkelse, mm: 0,35
 Målenummer: 7
 Prøvediameter: (mm) 164
 Salttype i boksen: MgCl2
 Prøveperiode: fra: 06.03.2013
 til: 02.04.2013

	Middel i prøveperioden
Relativ luftfuktighet i boksen (%RF)	32,9
Relativ luftfuktighet i rommet (%RF)	75,6
Temperatur i boksen (°C)	23,3
Temperatur i rommet (°C)	23,3
Barometertrykk (hPa)	1012,2

Luftf. over pr.(m/s): 0,3

Tabell 1 Temperatur, relativ luftfuktighet og barometertrykk i prøveperioden.

Prøve nummer	Vanndamppermeans	Vanndampmotstand	
	(kg/m ² sPa)	(m)	(m ² sPa/kg)
1	2,42E-11	8,100	4,13E+10
2	2,47E-11	8,000	4,05E+10
3	2,51E-11	7,800	3,98E+10
4		#VALUE!	
5		#VALUE!	
Middel	2,47E-11	#VALUE!	4,05E+10

Tabell 2 Vanndamppermeans og vanndampmotstand for de fem prøvestykkene. Enkeltresultatene er et middel over fem tidsintervall med stabil fukttransport. Resultatene er korrigert for overgangsmotstanden over prøven, damptransport gjennom overlappsonen, og motstanden i luftlaget i boksen.

SIGN:

PRØVINGS RAPPORT
Prøving av vanndamppermeans etter ISO/DIS 12572

Produktnavn: AirGuardSmart
 Oppdragsgiver: Sintef / NTNU
 Prosjektnummer: 3D820605/3
 Produkttype: Smart dampsperre 50/75,4

Tykkelse, mm: 0,35
 Målenummer: 3
 Prøvediameter: (mm) 164
 Saltype i boksen: NaCl
 Prøveperiode: fra: 27.02.2013
 til: 06.03.2013

	Middel i prøveperioden
Relativ luftfuktighet i boksen (%RF)	75,4
Relativ luftfuktighet i rommet (%RF)	50,2
Temperatur i boksen (°C)	23,0
Temperatur i rommet (°C)	23,0
Barometertrykk (hPa)	1005,5

Lufth. over pr.(m/s): 0,3

Tabell 1 Temperatur, relativ luftfuktighet og barometertrykk i prøveperioden.

Prøve nummer	Vanndamppermeans	Vanndampmotstand	
	(kg/m ² sPa)	(m)	(m ² sPa/kg)
1	1,66E-10	1,200	6,02E+09
2	1,68E-10	1,200	5,95E+09
3	1,52E-10	1,300	6,57E+09
4		#VALUE!	
5		#VALUE!	
Middel	1,62E-10	#VALUE!	6,17E+09

Tabell 2 Vanndamppermeans og vanndampmotstand for de fem prøvestykkene. Enkeltresultatene er et middel over fem tidsintervall med stabil fukttransport. Resultatene er korrigert for overgangsmotstanden over prøven, damprtransport gjennom overlappsonen, og motstanden i luftlaget i boksen.

SIGN:

PRØVINGS RAPPORT
Prøving av vanndamppermeans etter ISO/DIS 12572

Produktnavn: AirGuardSmart
 Oppdragsgiver: Sintef / NTNU
 Prosjektnummer: 3D820605/4
 Produkttype: Smart dampsperre 50/94

Tykkelse, mm: 0,35
 Målenummer: 4
 Prøvediameter: (mm) 164
 Saltype i boksen: KNO3
 Prøveperiode: fra: 27.02.2013
 til: 06.03.2013

	Middel i prøveperioden
Relativ luftfuktighet i boksen (%RF)	94,1
Relativ luftfuktighet i rommet (%RF)	50,2
Temperatur i boksen (°C)	23,0
Temperatur i rommet (°C)	23,0
Barometertrykk (hPa)	1005,5

Lufth. over pr.(m/s): 0,3

Tabell 1 Temperatur, relativ luftfuktighet og barometertrykk i prøveperioden.

Prøve nummer	Vanndamppermeans	Vanndampmotstand	
	(kg/m ² sPa)	(m)	(m ² sPa/kg)
1	1,05E-09	0,190	9,50E+08
2	1,13E-09	0,180	8,87E+08
3	1,18E-09	0,170	8,50E+08
4		#VALUE!	
5		#VALUE!	
Middel	1,12E-09	#VALUE!	8,94E+08

Tabell 2 Vanndamppermeans og vanndampmotstand for de fem prøvestykkene. Enkeltresultatene er et middel over fem tidsintervall med stabil fuktransport. Resultatene er korrigert for overgangsmotstanden over prøven, damptransport gjennom overlappsonen, og motstanden i luftlaget i boksen.

SIGN:

Vedlegg B – Tørking av kryssfinerprøver

Tabell B.1 viser resultatene fra tørke-veie forsøket med små kryssfinerprøver. Veiingene er gjort etter 23-, 47-, og 107 timer i varmeskap som holdt 105 °C. Kryssfinerprøvene hadde en dimensjon på 10 x 10 x 2,1 cm.

Tabell B. 1. Resultater fra tørke-veie forsøket med små kryssfinerprøver.

Kryssfinerprøve	Råvekt [g]	23 timer [g]	Endring i vekt-%	47 timer [g]	Endring i vekt-%	107 timer [g]	Endring i vekt-%
Prøve 1	88,090	81,897	7,562 %	81,899	-0,002 %	81,912	-0,016 %
Prøve 2	85,973	80,037	7,417 %	80,035	0,002 %	80,057	-0,027 %
Prøve 3	88,929	82,831	7,362 %	82,829	0,002 %	82,831	-0,002 %
Prøve 4	86,762	81,103	6,978 %	81,157	-0,067 %	81,116	0,051 %
Prøve 5	88,829	83,000	7,023 %	82,998	0,002 %	83,004	-0,007 %
Gjennomsnitt		81,774	7,268 %	81,784	-0,012 %	81,784	0,000 %

Endring i vekt-% er beregnet med formelen vist under.

$$u = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 \text{ [vekt-\%]}$$

m_w = masse av våt prøve [gram]

m_0 = masse av tørr prøve [gram]

Beregnet gjennomsnittlig tørrvekt benyttet til å beregne tørrvekten til taktro i prøveboksene vises i Tabell B.2.

Tabell B. 2. Beregning av gjennomsnittlig tørrvekt for kryssfinerprøvene.

Kryssfinerprøve	Råvekt [g]	Tørrvekt [g]	Fukttinnhold råvekt [vekt-%]
Prøve 1	88.090	81.912	7.54
Prøve 2	85.973	80.057	7.31
Prøve 3	88.929	82.831	7.37
Prøve 4	86.762	81.116	6.95
Prøve 5	88.829	83.004	7.02
Gjennomsnitt	87.72	81.78	7.24

Gjennomsnittlig råvekt på 7,24 % ble benyttet til å beregne tørrvekten til kryssfinerplatene i prøveboksene.

Beregning av mengde vann som skal fuktes opp i kryssfinerplate.

For å finne ut hvor mye vann som må tilføres kryssfinerplatene til forsøket, regnes ut nødvendig oppfukning fra resultatene til prøvestykkene.

Manglende vektprosent vann:

$$30 \% - 7.24 \% = 22.76 \%$$

30 vektprosent vanninnhold i kryssfiner oppgitt i gram:

$$\frac{x}{81.78 \text{ g}} = 0.30 \% \rightarrow x = 0.30 \% \times 81.78 \text{ g} = 24.534 \text{ g}$$

Manglende mengde gram vann fra råvekt til 30 vektprosent:

$$24.534 \text{ g} - (87.72 \text{ g} - 81.78 \text{ g}) = 18.594 \text{ g}$$

Resultatet fra uttørkingsprosessen viser at kryssfinerplaten må fuktes opp med 22.74 vektprosent. For prøvestykkene tilsvarer 30 vektprosent 24.53 gram vann, hvorav tilført vann som behøves fuktes er 18.594 g. Bunnen av boksene har et areal på 770 mm x 570 mm som tilsvarer 0.4389 m². Finner dermed nødvendig tilført vann til hver kryssfinerplate til laboratorieforsøket.

Forhold mellom prøvestykker og taktro i laboratorieforsøk:

$$\frac{\text{taktro i labforsøk}}{\text{prøvestykke}} = \frac{0.77 \text{ mm} \times 0.57 \text{ mm}}{0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}} = 43.89$$

Nødvendig tilført vann i kryssfinerplatene for laboratorieforsøk:

$$43.89 \times 18.594 = 816.09 \text{ g} = 0.816 \text{ kg}$$

Hver kryssfinerplate som skal plasseres inn i boksene må fuktes med omtrent 0.816 kg vann før de kan monteres.

Vedlegg C – Tørking- og oppfukning av bjelkeprøver

Tørking av bjelkeprøver

Tabell C. 1 viser endring i vekt-% for bjelkeprøvene etter et tørke-veie forsøk. Bjelkeprøvene hadde en dimensjon på 245 x 36 x 98 mm, og ble tørket i et varmeskap på 105 °C. Tørr tilstand ble oppnådd etter 336 timer i varmeskapet.

Tabell C. 1. Uttøringsforløpet til bjelkeprøvene som tørket i varmeskap i 336 timer.

Bjelkeprøve	Råvekt [g]	24 timer [g]	Endring i vekt-%	49 timer [g]	Endring i vekt-%
Prøve 1	555,40	521,90	6,03 %	519,00	0,56 %
Prøve 2	552,70	529,80	4,14 %	517,60	2,30 %
Prøve 3	559,20	527,60	5,65 %	524,40	0,61 %
Prøve 4	555,10	522,50	5,87 %	519,60	0,56 %
Prøve 5	517,50	485,20	6,24 %	482,70	0,52 %
Gjennomsnitt	547,98				

120 timer [g]	Endring i vekt-%	312 timer [g]	Endring i vekt-%	336 timer [g]	Endring i vekt-%
517,70	0,25 %	516,90	0,15 %	516,54	0,07 %
516,00	0,31 %	515,00	0,19 %	514,42	0,11 %
522,70	0,32 %	521,60	0,21 %	520,66	0,18 %
518,00	0,31 %	517,00	0,19 %	516,23	0,15 %
481,70	0,21 %	480,80	0,19 %	480,05	0,16 %
				509,58	0,13 %

Oppfukning av bjelkeprøver

Tabell C.2 viser at oppfukning av bjelker tok 124 timer (litt mer enn 4 dager).

Tabell C. 2. Oppfukning av bjelkeprøver i 124 timer.

Bjelkeprøver	Råvekt [g]	20 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	28 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]
Prøve 1	523,00	560,70	8,55	567,10	9,79
Prøve 2	520,10	560,20	8,90	567,00	10,22
Prøve 3	528,10	570,50	9,57	578,10	11,03
Prøve 4	522,20	561,80	8,83	569,20	10,26
Prøve 5	490,00	532,00	10,82	538,60	12,20
Gjennomsnitt	516,68		9,33		10,70

52 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	76 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	124 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]
597,10	15,60	626,40	21,27	640,30	23,96
595,10	15,68	627,70	22,02	642,20	24,84
606,90	16,56	637,70	22,48	652,40	25,30
597,00	15,65	624,90	21,06	637,20	23,43
569,60	18,65	600,10	25,01	616,60	28,44
	16,43		22,37	637,74	25,19

Vedlegg D – Oppfukning av kryssfinerplater til forsøk- nr. 1 og nr. 2

Oppfukning av kryssfinerplater til forsøk nr. 1

I Tabell D.1 vises oppfukningsprosessen med kryssfinerplatene for laboratorieforsøk nr. 1. Oppfuktingen av kryssfinerplatene tok 70 timer før de nådde omtrent 30 vekt-%. Vekten er med ledninger og uten butylbånd

Tabell D. 1. Oppfukning av kryssfinerplater til forsøk nr. 1.

Kryssfinerplate	Tørrvekt [g]	Råvekt [g]	20 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	24,5 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]
Plate A	3647	3932	4353	19,36	4388	20,32
Plate B	3571	3850	4428	24,00	4470	25,18
Plate C	3580	3859	4341	21,26	4383	22,43
Plate D	3587	3867	4365	21,69	4404	22,78
Gjennomsnitt	3596	3102				

43,5 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	49,5 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	70,5 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]
4553	24,84	4614	26,51	4711	29,17
4654	30,33	Lagt i plast	-	4617	29,29
4567	27,57	4636	29,50	4686	30,89
4570	27,40	4647	29,55	4701	31,06
				4679	30,10

Oppfukning av kryssfinerplater til forsøk nr. 2

Oppfukningshastigheten for kryssfinerplatene gikk vesentlig raskere i forsøk nr. 2, som forklart i oppgaven. På grunn av komplikasjoner med klimaskapene i laboratoriet, måtte platene ligge i plast i tre uker etter å ha ligget 28,5 timer i vannbadet. De ble fuktet opp i tre timer før de ble montert i prøveboksene, se Tabell D.2. Vekten er med ledninger, og uten butylbånd.

Tabell D. 2. Oppfukning av kryssfinerplater for forsøk nr. 2.

Kryssfinerplate	Tørrvekt [g]	Startvekt [g]	24 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	28,5 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]
Plate E	3647	3779	4633	27,04	4653	27,58
Plate F	3571	3794	4644	30,05	4687	31,25
Plate G	3580	3777	4641	29,64	4673	30,53
Plate H	3587	3772	4636	29,24	4679	30,44
Gjennomsnitt	3596	3781			4673	29,95

Etter å ligget i plast i 3 uker	Fuktinnhold [vekt-%]	Fuktinnhold før montering [g]	Fuktinnhold [vekt-%]
4580	25,58	4750	30,24
4634	29,77	4625	29,52
4600	28,49	4634	29,44
4620	28,80	4681	30,50
4609	28,16	4673	29,92

Vedlegg E – Oppfukting av bjelker til forsøk nr. 2

Bjelke E ble fuktet opp i klimarom ved 75 % RF, og 30 °C i fem uker for å oppnå likevekt (likt som i laboratorieforsøk nr. 1). Gjennomsnittsverdiene i Tabell E.1 inkluderer derfor ikke Bjelke E. På grunn av komplikasjoner med klimaskapene i laboratoriet, måtte platene ligge i plast i tre uker etter å ha ligget 28,5 timer i vannbadet. De ble fuktet opp i til sammen 36 timer fra de ble tatt ut av plasten, og deretter tørket i 2 timer til de ble veid før montering i prøveboksene, se Tabell E.1. Vekten er med ledninger til fuktmåling.

Tabell E. 1. Oppfukting av bjelke- F, G og H i vannbad for forsøk nr. 2.

Bjelker	Tørrvekt [g]	Startvekt [g]	24 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	48 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]
Bjelke E	3432	-	-	-	-	-
Bjelke F	3375	3694	3943	16,83	4037	19,61
Bjelke G	3302	3311	3646	10,42	3760	13,87
Bjelke H	3379	3724	3953	16,99	4039	19,53
Gjennomsnitt	4496	3576				

71,5 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	96 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	101 timer [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	Ligget i plast i 3 uker	Fuktinnhold [vekt-%]
-	-	-	-	-	-	-	-
4115	21,93	4186	24,03	4191	24,18	3883	15,05
3848	16,54	3946	19,50	3942	19,38	3928	18,96
4111	21,66	4177	23,62	4184	23,82	4168	23,35
				4106	22,46	3993	19,12

24 timer etter ny oppfukting [g]	Fuktinnhold [vekt-%]	Vekt før montering [g]	Fuktinnhold [vekt-%]
-	-	3874	12,88
4304	27,53	4305	27,56
4062	23,02	4095	26,04
4291	26,99	4253	25,87
4219	25,84	4218	25,81

Vedlegg F – Beregning av I-bjelkens tørrvekt

I-bjelkens tørrvekt ble beregnet ved tørke-veie metoden, se Tabell F.1. I-bjelken benyttet i forsøk nr. 1 ble tørket i varmeskap på 105 °C, og veid jevnlig.

Tabell F. 1. Tørke-veie forsøk med I-bjelken i forsøk nr. 1.

Startvekt [g]	24 timer [g]	Endring i vekt-%	67 timer [g]	Endring i vekt-%	75 timer [g]	Endring i vekt-%
2521,4	2378,6	5,66	2368,5	0,42	2367,2	0,05

141 timer [g]	Endring i vekt-%	165 timer [g]	Endring i vekt-%
2362,7	0,19	2362,3	0,02

Endring i vekt-% er beregnet med formelen vist under.

$$u = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 \text{ [vekt-\%]}$$

m_w = masse av våt prøve [gram]

m_0 = masse av tørr prøve [gram]

Tørrvekten til I-bjelken som er benyttet i beregninger er **2362 gram**.

Vedlegg G – Veiling av prøveboksene i laboratorieforsøk- nr. 1 og nr. 2

Her vises resultatene for hver veiling utført i forsøksperiodene med forsøk- nr. 1 og nr. 2. Veilingen i forsøk nummer en er gjort ved å løfte ledningene som går ut av prøveboksen. Det knyttes derfor usikkerhet til veimetoden. Før oppstart av forsøk nr. 2 ble det montert avtakbare koblinger til RF-sensorene slik at veilingen ble mer nøyaktig ved å veie med alle ledninger på vekta.

Resultater fra veiling i forsøk nr. 1 vises i Tabell G.1.

Tabell G. 1. Resultat av veiinger av prøveboksene I forsøk nr. 1.

Dato	Boks A	Boks B	Boks C	Boks D
23.jan	21,06	22,62	19,86	20,62
30.jan	21,08	22,60	19,80	20,49
06.feb	21,00	22,52	19,76	20,60
10.feb	20,98	22,48	19,72	20,58
17.feb	20,90	22,40	19,64	20,50
24.feb	20,66	22,32	19,54	20,42
03.mar	20,78	22,34	19,56	20,40
08.mar	20,76	22,28	19,52	20,38
10.mar	20,62	22,20	19,40	20,28
17.mar	20,60	22,12	19,38	20,28
24.mar	20,56	22,14	19,36	20,22

Resultater fra veiling i forsøk nr. 1 vises i Tabell G.2.

Dato	Boks E	Boks F	Boks G	Boks H
24.mai	21,56	22,16	21,70	22,08
26.mai	21,58	22,12	21,68	22,06
29.mai	21,54	22,10	21,64	22,04
31.mai	21,52	22,06	21,60	22,04
02.jun	21,50	22,04	21,58	22,02
05.jun	21,48	22,00	21,56	22,00
07.jun	21,44	21,96	21,50	21,98
09.jun	21,42	21,90	21,46	21,96
12.jun	21,38	21,86	21,42	21,94
14.jun	21,34	21,82	21,38	21,92

Vedlegg H – Målinger til korreksjonsformel for I-bjelkens flens

Her vises måleresultatene utført på prøver av I-bjelkens flens ved hjelp av veiing (reell vekt-%), fuktmåler, og skruer tilkoblet fuktapparat. Fire av prøvene ble fuktet opp til likevekt ved variert RF (50-, 75-, 94- og 100 % RF) i klimarom. En prøve ble fuktet opp i vannbad til omtrent 40 vekt-%.

Tørrvekten er beregnet etter tørke-veie forsøk ved å plassere prøvene i tørkeskap i laboratoriet til SINTEF og NTNU.

Tabell H. 1. Veid tørrvekt til prøvestykkene fra I-bjelkens flens

Likevekt ved RF [%]:	-	50	75	94	100
Vekt-%:	40	-	-	-	-
Prøve:					
Prøve 1	69,101 g	19,728 g	15,539 g	15,840 g	18,413 g
Prøve 2	70,341 g	17,260 g	19,905 g	16,038 g	16,524 g
Prøve 3	66,400 g	15,486 g	16,661 g	20,982 g	18,537 g

Tabell H. 2. Vekt til prøvestykkene fra I-bjelken før måling med fuktmåler og skruer koblet til fuktapparat.

Likevekt ved RF [%]:	-	50	75	94	100
Vekt-%:	40	-	-	-	-
Prøve:					
Prøve 1	96,288 g	21,649 g	17,522 g	19,319 g	25,287 g
Prøve 2	98,446 g	18,877 g	22,442 g	19,583 g	22,646 g
Prøve 3	92,797 g	16,943 g	18,784 g	25,397 g	25,016 g

Vekten til prøvene i Tabell H.1 og H.2 kan variere for samme fukt klima pga. ulik dimensjon på prøvestykkene.

Tabell H. 3. Målinger utført på flens-prøvene ved hjelp av fuktmåler med isolerte plugg.

Likevekt ved RF [%]:	-		50	
Vekt-%:	40		-	
Prøve:	Utreget vekt-%	Snitt målt vekt-%	Utreget vekt-%	Snitt målt vekt-%
1. hammer	39,34	63,7	9,74	13,8
2. hammer	39,96	62,9	9,37	12,8
3. hammer	39,75	66,4	9,41	12,9
Gjennomsnitt	39,68	64,33	9,51	13,17

75		94		100	
-		-		-	
Utreget vekt-%	Snitt målt vekt-%	Utreget vekt-%	Snitt målt vekt-%	Utreget vekt-%	Snitt målt vekt-%
12,76	19	21,96	39	37,33	58,7
12,75	18,1	22,1	39,4	37,05	60,5
12,74	17,7	21,04	37,5	34,95	63,5
12,75	18,27	21,70	38,63	36,44	60,90

Tabell H. 4. Målinger utført på flens-prøvene med fuktmålerapparat og skruer.

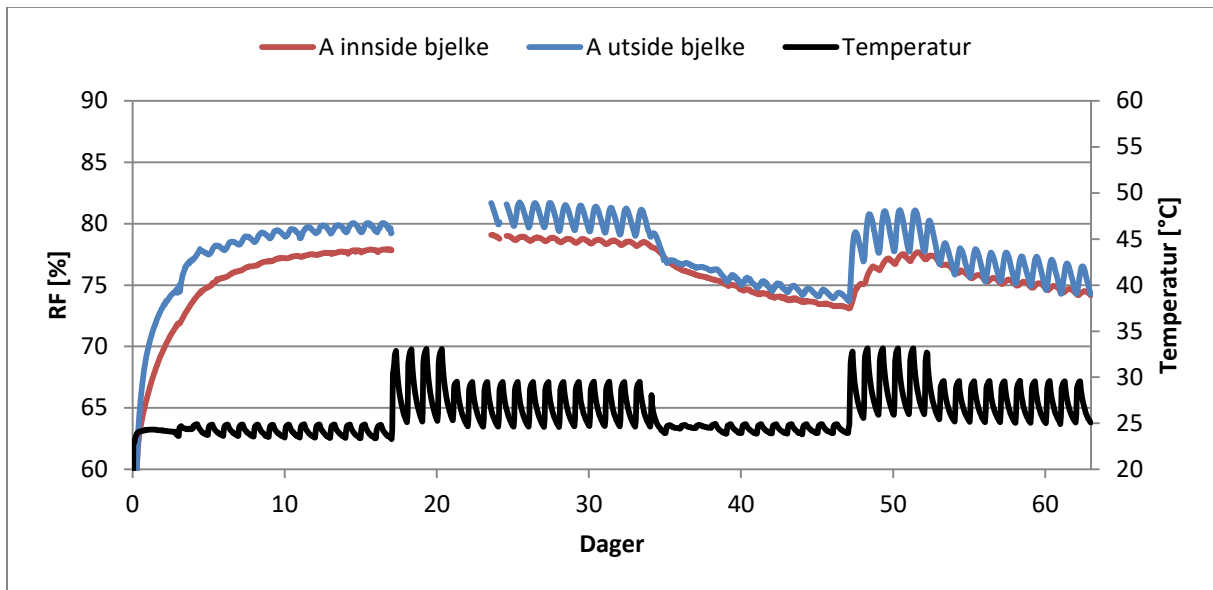
Likevekt ved RF [%]	-		50	
Vekt-%	40		-	
Prøve:	Utregnet vekt-%	Snitt målt vekt-%	Utregnet vekt-%	Snitt målt vekt-%
Prøve 1	39,34	68	9,74	14,3
Prøve 2	39,96	70,7	9,37	13
Prøve 3	39,75	64	9,41	13,7
Gjennomsnitt	39,68	67,57	9,51	13,67

75		94		100	
-		-		-	
Utregnet vekt-%	Snitt målt vekt-%	Utregnet vekt-%	Snitt målt vekt-%	Utregnet vekt-%	Snitt målt vekt-%
12,76	18,2	21,96	27,9	37,33	62,7
12,75	19	22,1	40,7	37,05	60,5
12,74	18	21,04	31,6	34,95	51
12,75	18,40	21,70	33,40	36,44	58,07

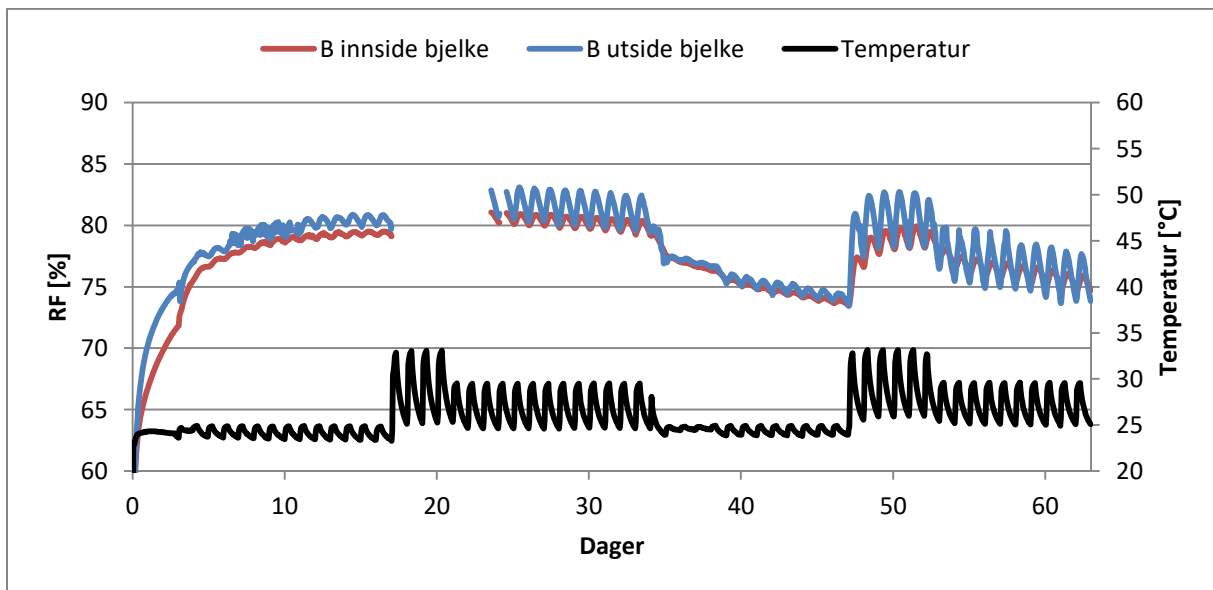
Tabell H. 5. Sammenligning av måleresultatene fra fuktmåler, skruer og ved veiing (reell).

Veid vekt-%	Måling med fuktmåler	Måling med skruer	Snitt måling	Avvik fra veid vekt-%
9,51	13,17	13,67	13,42	3,91
12,75	18,27	18,40	18,33	5,58
21,70	38,63	33,40	36,02	14,32
36,44	60,90	58,07	59,48	23,04
39,68	64,33	67,57	65,95	26,27

Vedlegg I – Grafer fra forsøk nr. 1 som ikke ble med i rapporten



Figur I. 1RF på inn- og utside av bjelken i Boks A.



Figur I. 2. RF på inn- og utside av bjelken i Boks B.