

Knut Storaas

Smart dampsperre i kompakte tretak

- vurdering av fuktsikkerhet

Parameterstudie og feltundersøkelser

Juni 2020



Kunnskap for en bedre verden

Smart dampsperre i kompakte tretak - vurdering av fuktsikkerhet

Parameterstudie og feltundersøkelser

Knut Storaas

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2020

Hovedveileder: Stig Geving

Medveileder: Lars Gullbrekken

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg - og miljøteknikk

Sammendrag

Global oppvarming øker sårbarheten til eksisterende bygningsmasse og krever at nye bygningskonstruksjoner må tåle større påkjenninger. Flere studier har konkludert med at kompakte trectak med smart dampsperre kan øke klimarobustheten samtidig som den reduserer takhøyden og materialbruken, og dermed kan konstruksjonstypen være økonomisk gunstig.

Denne studien undersøker fuktsikkerheten til kompakte trectak utført med smart dampsperre. Formålet med oppgaven er å undersøke om konstruksjonstypen kan utføres fuktsikkert i et norsk klima. En parameterstudie basert på tidligere arbeider er gjennomført med en eksplisitt strålingsmodell for å undersøke effekten av denne modellen. Samtidig undersøkes tre pilotprosjekter i samarbeid med SFI Klima 2050, og måledata fra prosjektene analyseres.

Simuleringsverktøyet WUFI 2D benyttes i hovedsak i denne studien for å gjøre beregninger på konstruksjonstypen. I tillegg til simuleringsverktøyene gjøres muggvekstberegninger ved hjelp av en VTT-modell. VTT-modellen gjennomfører analyse på fukt- og temperaturdata hentet fra både WUFI-modell og fra måledata.

Pilotprosjektene undersøkes for å få en forståelse for hvordan konstruksjonstypen fungerer i praksis. Pilotene er lokalisert i Lund Vest (Spydeberg kommune), Sveberg (Jessheim kommune) og Borgen Vest (Malvik kommune). I takkonstruksjonene til alle prosjektene er det plassert trefuktloggere som måler trefuktighet, relativ fuktighet og temperatur. En WUFI-modell er brukt for å undersøke sammenhengen mellom beregning og måledata.

Studien identifiserer at strålingsmodellen har stor effekt på hvorvidt konstruksjonstypen med ulike parametere kan klassifiseres som fuktsikre. For flere av beregningstilfellene vurderer modellen ugunstige fuktinnhold. Studien identifiserte samtidig at maksimale skyggeforhold og høyt fukttilskudd medfører størst reduksjon i uttørkingspotensiale og øker risiko for muggvekst mest.

Studien identifiserer at et Oslo-klima er mest gunstig, på grunn av størst uttørking. Kristiansund-klima vurderes som det mest kritiske, ved at det har lavest uttørking og svært høy muggindeks. Studien finner at en kombinasjon av fuktig klima og mildere temperaturer er mest kritisk.

Resultatene fra målingene viser at begge de prefabrikkerte takkonstruksjonene var tørre og hadde blitt bygget under tørre omgivelser. Det plassbyggede taket ved Borgen Vest viste et høyt fuktinnhold under byggeperioden og VTT-modellen vurderer at det var tilstrekkelige vekstvilkår for muggvekst i den perioden. Ved sammenligning av WUFI-modell med målinger viser studien at for prosjekter med tilstrekkelig informasjon om inneklimate, som prosjektet ved Lund Vest, har beregningen en god korrelasjon med måledata.

Abstract

Global warming increases the vulnerability of the existing building stock and new building structures must withstand greater stress. Several studies have concluded that compact timber framed roofs with a smart vapor barrier can increase the climate robustness while reducing the height of the roof, the use of materials and the type of construction can thus be economically beneficial.

This study investigates the moisture safety of compact timber framed roofs made with smart vapor barrier. The purpose of the assignment is to investigate whether the type of construction can be a robust construction in a Norwegian climate. A parameter study based on previous work has been carried out with an explicit radiation model to investigate the effect of this model on previous studies of the construction type. Also, three pilot projects are being investigated in collaboration with SFI Klima 2050, and measurement data from these projects are analyzed.

The simulation tool WUFI 2D is mainly used in this study to make calculations on the construction type. In addition to the simulation tools, mold growth calculations are done using the VTT-model. The VTT-model performs analysis based on moisture and temperature data obtained from both the WUFI-model and the measurement data.

The pilot projects are examined to gain an understanding of how the type of construction works in practice. The pilots are located in Lund Vest (Spydeberg municipality), Sveberg (Jessheim municipality) and Borgen Vest (Malvik municipality). Inside the structures for all the projects, moisture sensors are used. These sensors measure the moisture content, relative humidity, and temperature. A WUFI-model is used to investigate the relationship between calculation and measurement data.

The study identifies that the radiation model has a great effect on whether the type of construction with different parameters can be classified as moisture safe. In some cases, the model considers several cases as unfavorable. The study also identified that maximum shading conditions and high moisture loads lead to the greatest reduction in drying potential and increase the risk of mold growth the most.

The study identifies that Oslo climate is the most favorable, due to the greatest drying potential. Kristiansund's climate is the most critical, because it has the lowest drying and a very high mold index. The study finds that a combination of humid climate and milder temperatures is the most critical.

The results from the measurements show that both of the prefabricated roof structures were dry and had been built under dry conditions. The site-built roof at Borgen Vest showed a high moisture content during the construction period and the VTT-model estimates that there were sufficient growth conditions for mold growth during that period. When comparing the WUFI model with measurements, the study shows that for projects with sufficient information on indoor climate, such as the project at Lund Vest, the calculation has a good correlation with measurement data.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim, Norge. Masteroppgaven bygger videre på arbeider gjort av sivilingeniør Ellinor B. Slettfjerding i hennes masteroppgave våren 2019, samt arbeider gjort i forkant i form av fordypningsprosjekt.

Takk rettes til forsker ved SINTEF Klima2050, Lars Gullbrekken. Takk for god veiledning og gode diskusjoner i løpet av semesteret.

I tillegg ønsker jeg å rette en spesielt stor takk til veileder og professor Stig Geving ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU for stødig og god veiledning.

25.Juni 2020



Knut Storaas

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Tidligere arbeider	1
1.2	Formål	2
2	Bakgrunn	3
2.1	Fukt i bygninger	3
2.2	Fukttransport	5
2.3	Fuktmåling	5
2.4	Tradisjonell dampsperre	6
2.5	Smart dampsperre	7
2.6	Kompakte tretak	8
2.7	Muggvekst	9
2.8	HAM – modeller	11
3	Parameterstudie ved bruk av HAM-modeller	12
3.1	Generelt	12
3.2	Metode	13
3.2.1	VTT-modell	17
3.2.2	DELPHIN beregningsprogram	20
3.3	Resultater	21
3.3.1	Betydning av strålingsbalanse for parameterstudie	21
3.3.2	Sammenligning av WUFI og DELPHIN beregning	35
3.4	Diskusjon	36
4	Feltundersøkelser	44
4.1	Generelt	44
4.2	Metode	44
4.2.1	Håndtering av måledata	46
4.2.2	Prosjektdokumentasjon	48
4.2.3	WUFI modell	58
4.3	Resultater	63
4.3.1	Lund Vest	63
4.3.2	Sveberg	73
4.3.3	Borgen Vest	80

4.4	Diskusjon.....	89
5	Konklusjon.....	94
6	Videre arbeid	96
7	Referanser	97
	Vedlegg A: Korreksjonsmodell for LVL.....	99
	Vedlegg B: Temperaturkorrelasjon.....	102
	Vedlegg C: WUFI-resultater.....	104
	Vedlegg D: Pilotprosjekter	106

1 Innledning

Smarte dampsperrer (SDS) kan variere dampmotstanden etter hva som er nødvendig. SDS har den egenskapen at den varierer dampmotstanden etter hvilken relativ fuktighet (RF) den eksponeres for. Det vil si at den ved høy RF gir lav dampmotstand, og ved lav RF gir høy dampmotstand. Dette prinsippet gjør at konstruksjoner som vanligvis ikke har mulighet til å tørke, får muligheten til å tørke innover om sommeren.

Uttørking mot inneluft er spesielt interessant for konstruksjoner der uttørkingsevnen utover er liten samtidig som konstruksjonen inneholder fuktfølsomme material. Kompakt uluftet tretak er et slikt konstruksjonstilfelle.

Flere studier har konkludert med at et kompakt tretak med SDS kan øke klimarobustheten. I tillegg minkes høyden på takkonstruksjonen, bruken av materialer, byggetiden og kan dermed gi økonomisk gevinst.

Global oppvarming øker sårbarheten til eksisterende bygningsmasse og krever at nye bygningskonstruksjoner må tåle større påkjenning. Klimagassutslippene kommer til å påvirke klimaet i Norge bla. til økning i årstemperatur på ca. 4,5°C, 18 % mer årsnedbør og hyppigere og kraftigere styrtregn (Hanssen-Bauer *et al.*, 2017). En undersøkelse fra 1993- 2002 knytter 76% av alle byggskader til fuktpåvirkning (SINTEF byggforsk, 2010). Viktigheten av gode tekniske løsninger knyttet til lokalklima og spesielt fuktsikre løsninger er stor og et økt potensiale for uttørking er derfor meget interessant.

De siste årene har det i sammenheng med Sentrene for Forskningsdrevet Innovasjon (SFI) Klima 2050 blitt utført en rekke pilotprosjekter for å undersøke dette konstruksjonstilfelle i praksis, og det er gjort flere studier innenfor denne tematikken.

1.1 Tidligere arbeider

Ellinor Bratt Sletfjerding skrev våren 2019 masteroppgaven «*Smart vapour barriers in compact timber-framed roofs*». Masteroppgaven hadde til hensikt å undersøke parametere som påvirker uttørkingspotensialet til kompakte tretak med smart dampsperre. I tillegg ble fuktsikkerheten til to pilotprosjekt undersøkt basert på feltnmålinger.

I masteroppgaven til Sletfjerding ble parametere som lokasjon, fukttilskudd, takhøyde, toppisolasjon, bjelketype, himling, startfukt, lukketidspunkt, SDS-type og helning undersøkt. Parameterstudien viste at uttørkingspotensialet ved bruk av smart dampsperre var sterkt avhengig av innvendig fukttilskudd på grunn av effekten av fuktakkumulering om vinteren. Andre faktorer som lavere isolasjonshøyde, lav diffusjonsmotstand i himling samt en SDS med stor variasjon i dampmotstand var parametere som ga bedre uttørkingspotensiale.

Som et forprosjekt til denne studien ble det høsten 2019 gjennomført et fordypningsprosjekt for å videre undersøke effekten av parametere tidligere undersøkt av Sletfjerding samt flere andre. Det ble i tillegg gjennomført muggvekstberegninger på konstruksjonsdelen. Fordypningsprosjektet

viste at innvendig fukttilskudd, startfukt og klima var parameterne som hadde størst effekt på risiko for muggvekst. Det ble også observert en interessant korrelasjon mellom utvendig gjennomsnittstemperatur og beregnet muggvekst (Storaas, 2019).

I ettertid ble det vurdert at resultatene fra forprosjektet ikke var tilfredsstillende ettersom beregningene hadde blitt gjennomført uten å ta hensyn til eksplisitt strålingsbalanse for takoverflaten. Dette anses å ha medført en for stor forenkling, som kan ha ført til for liten nedkjøling av takoverflaten om kvelden og dermed også for høy uttørking.

1.2 Formål

Denne studien søker å få bedre forståelse for uttørkings- samt muggvekstpotensiale for kompakte trectak med SDS i ulike klima og vurdere hvordan reelle pilotprosjekter med denne konstruksjonstypen presterer. Tidligere arbeider viser at ved en forenklet muggmodell har nesten alle konstruksjonstyper i alle klima potensiale for muggvekst (Sletfjerding, 2019). Ved å endre en rekke ulike parametere kan fuktsikkerheten til konstruksjoner likevel sikres.

Studien søker å identifisere:

- Effekten av eksplisitt strålingsbalanse ved simuleringsberegninger
- Risiko for biologisk degradering i ulike klima for konstruksjonstypen
- Forskjeller mellom to ulike kommersielle simuleringsverktøy
- Fuktsikkerheten til tre pilotprosjekter utført med kompakt trectak med SDS
- Sammenhengen mellom simuleringsverktøy og virkeligheten

2 Bakgrunn

2.1 Fukt i bygninger

Forskjellige skandinaviske byggeundersøkelser har konkludert med at mellom 60-80% av skadene som opptrer skyldes fukt eller følgevirkninger av fukt (Thue, 2016). Kompakte tak er en utfordrende konstruksjon med tanke på tettedetaljer, samtidig som tre er et biologisk materiale som er kritisk i forhold til muggvekst.

Alle materialer i kontakt med fukt i damp eller væskeform vil oppta mer eller mindre fukt. Unntaket er materialer med helt lukkede poresystem som metaller eller glass. Fukttinnholdet i et materiale avhenger av materialtypen, poresystemets egenskaper, og den formen for fuktbinding som oppstår (Geving og Thue, 2002, s. 296).

Bygningskomponenter fuktet erfaringsmessig opp av flere årsaker, og det er nødvendig å forstå noen av disse for å gjøre fornuftige vurderinger i arbeidet med å sikre robusthet mot klimapåkjenninger. Noen av disse årsakene er listet nedenfor.

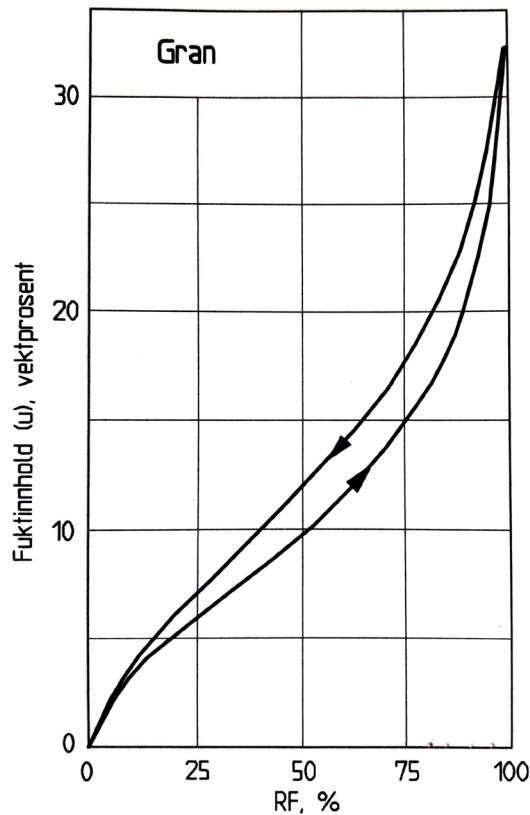
Årsak	Konsekvens
Luftlekkasje	Fuktig luft nedkjøles og kondenserer.
Skade eller dårlig tetting (for eksempel i membraner)	Regnvann penetrerer regnskjermen og fukter opp konstruksjonen.
Kapillærsug	Fuktutveksling mellom to porøse kapillæraktive materialer på grunn av forskjeller i porevannsundertrykk.
Fukttransport ved konveksjon	Transport av vanndamp med luftstrømmer fra høyere til lavere lufttrykk.
Dampdiffusjon	Vanndamp transporteres fra innside og ut i kaldere del av konstruksjonen.

Trevirke som material

Trevirke er et hygroskopisk materiale med hygroskopiske egenskaper som varierer avhengig av art og relativ fuktighet (RF). Når et hygroskopisk materiale plasseres i luft med konstant temperatur og fuktinnhold, vil fuktinnholdet i materialet gradvis tilpasses RF i lufta. Vektendringen skjer raskt i starten, men vil etter hvert være langsommere. Etter en tid innstiller det seg en balanse slik at damptrykket over de adsorberte væskesjiktene i materialet er like stort som romluftas damptrykk. Materialet har da nådd sin likevektsfuktighet. Prosessen frem til likevektsfuktighet kan ta lang tid. Ut ifra tilstrekkelig mange likevektspunkter kan det tegnes en sorpsjonskurve, eller sorpsjonsisoterm for det aktuelle materialet. Man regner med at

temperaturvirkning på absorbert fuktmenge er så liten over bygningsmaterialers temperaturspenn om lag fra -20°C til $+30^{\circ}\text{C}$, at det ofte neglisjeres (Geving og Thue, 2002, s. 296).

Ved svært høy RF stiger fuktinnholdet kraftig, og man velger derfor vanligvis kun å definere sorpsjonskurven opp til 98% RF. Figur 2-1 viser sorpsjonskurven til gran.



Figur 2-1, Sorpsjonskurve for gran (Geving og Thue, 2002, s. 406)

Sorpsjonskurven for gran vist ovenfor presenterer to kurver – som gir en retningsavhengighet. Dette kalles *hysteresis*. Dersom man undersøker likevektsfuktigheten i et materiale ved stigende RF, og deretter reverserer prosessen ved å senke RF vil ikke resultatene bli helt sammenfallende. Dette resulterer i at prøvestykkets forhistorie har betydning for hvilket fuktinnhold det stiller seg inn på.

For beregning av fuktvariasjoner ser man ofte bort fra hysteresen og anvender middelkurven av absorpsjon og desorpsjon som grunnlag. Sorpsjonskurver kan variere en god del innenfor samme materialgruppe, avhengig av densitet, porestruktur, produksjonsmetode etc. og man bør være forsiktig med å anvende slike kurver generelt. Det sikreste er å alltid ha målte kurver for det aktuelle produktet både absorpsjons og desorpsjonskurven (Geving og Thue, 2002, s. 303).

2.2 Fukttransport

For å kunne gjøre fornuftige fukttekniske vurderinger er det nyttig å vite hvilke transportmekanismer for fukt som er styrende og hvilke som det er mulig å behandle beregningsmessig. Transportmekanismene som er aktuelle og mulig å behandle er listet nedenfor.

- Dampdiffusjon
- Kapillærtransport
- Konveksjon (til en viss grad)

Vanndampdiffusjon og *effusjon* skyldes vanndampmolekylenes egenbevegelser. Forskjeller i vanndampens partialtrykk er her vanligvis dominerende som drivkraft. Plasseres et tørt porøst materiale i fuktig luft vil vanndampmolekyler diffundere inn i materialporene. Etter en tid blir vanndampkonsentrasjonen i poresystemet lik med konsentrasjonen i omgivelsene. Fuktinnholdet i materialet innstiller seg i likevekt med den omkringliggende lufta. Dersom forholdene er motsatt, vil diffusjonen skje ut av materialet. Når damp trenger inn i et porøst legeme vil diffusjonstallet reduseres fordi den frie luftmengden der blir større. Det er kun i relativt grove porer at diffusjonen skjer tilsvarende som i luft. I mindre porer vil molekylbevegelsene ikke bli bestemt av sammenstøt mellom nabomolekylene, men av sammenstøt med poreveggene (Geving og Thue, 2002, s. 296).

Den transporterte dampmengden blir bestemt av antall molekyler som treffer poreåpningen altså av dampens partialtrykk og en mildere molekylhastigheten. Denne formen for damptransport kalles effusjon.

Kapillærledning er vanntransport i vannfylte porer på grunn av forskjeller i porevannsundertrykk. Det er først ved fuktinnhold som gir et kontinuerlig nett av vannfylte porer at kapillærledning blir dominerende.

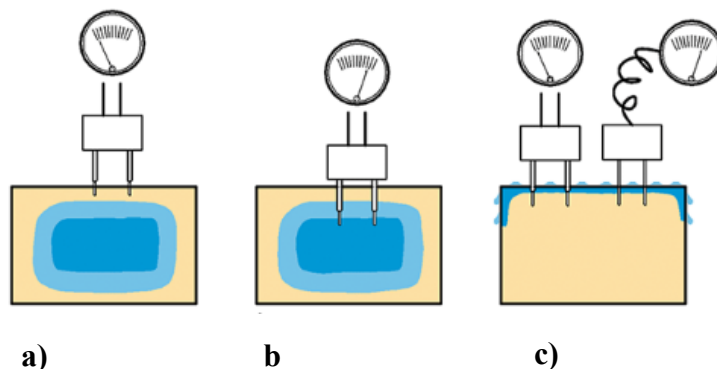
Ved luftstrømming gjennom et materiale eller en konstruksjon vil luftas vanndampinnhold gi opphav til en fukttransport som kalles fuktkonveksjon (Geving og Thue, 2002, s. 296).

2.3 Fuktmåling

Fuktmåling er en viktig metode for å avdekke konstruksjonsfeil og fare for biologisk degradering i et materiale. For avdekking av fare for råte måles fukt i vektprosent, mens for muggsopp er relativ fuktighet viktigste indikator. Ved sammenligning av fuktmålinger er det hensiktsmessig å måle i samme enhet, ettersom sorpsjonskurver for omregning kan variere svært mye med bare små endringer i materialsammensetninger (Geving og Thue, 2002, s. 273).

Den mest nøyaktige målemetoden for fuktinnhold i et materiale er ved veie-tørke metoden. Denne metoden brukes ofte som utgangspunkt for kalibrering av elektriske målere. Ved fuktmåling på reelle prosjekter kan det være nødvendig å ta ut kjerneprøver av et materiale, som analyseres ved tørke-veie metoden. Uttak av materialprøve kan være en nyttig måte å få et mer nøyaktig bilde på fuktinnholdet i et kritisk område og samtidig påse at fuktsikkerheten til konstruksjonen er opprettholdt.

Prinsippet for fuktmåling ved elektrisk motstandsmåling baserer seg på at den elektriske motstanden i et materiale avhenger av dets fuktinnhold. Korrekt fuktlogging er avhengig av en kalibreringskurve for det bestemte materiale, ettersom ulike materialer har ulik elektrisk motstand avhengig av fuktinnhold. Isolerte elektroder brukes for å kunne bestemme dybden til målingen, som illustrert i Figur 2-2. Avhengig av fukthistorikken kan det være store forskjeller på fuktinnhold i ulike dybder (SINTEF byggforsk, 2015).



Figur 2-2, Fuktmåling ved elektrisk motstandsmetode for ulike dybder (SINTEF byggforsk, 2015)

- a) Motstandsmåling med isolerte elektroder ved overflaten**
- b) Motstandsmåling med isolerte elektroder i midten av materialet**
- c) Motstandsmåling med isolert (til høyre) og uisolerte elektroder (til venstre) ved**

Vanligvis er senteravstanden til elektrodene 25mm og de fleste instrumenter har automatisk kalibrering for temperatur.

Det knyttes en rekke usikkerheter til fuktmåling ved motstandsmåling. Noen av de viktigste årsakene til usikkerhet i målinger er listet nedenfor.

- Mangelfull kalibrering
- Feil og mangler ved utstyr
- Påvirkning på utstyr fra omgivelser
- Målepunkter dekker ikke kritiske områder

2.4 Tradisjonell dampsperre

Fra byggeteknisk forskrift er det krav til at bygningsdeler og konstruksjoner skal være utformet slik at nedbør, overflatevann, grunnvann og luftfuktighet ikke kan trenge inn og gi fuktskader som mugg- eller soppvekst, eller andre hygieniske problemer. For å tilfredsstille disse kravene anbefales det alltid å bygge isolerte yttervegger med dampsperre på innvendig side og med dampåpen vindsperre på utvendig side (SINTEF byggforsk, 2007).

Tradisjonell dampspærre er ofte av materialet polyetylen (PE-folie) og har en tykkelse på 0,15-0,20mm. Det gir en diffusjonsmotstand på 70-90m. Fra byggeteknisk forskrift anbefales det at yttervegger skal ha en Sd-verdi > 10m, samtidig som vindspærresjiktet skal ha en Sd-verdi <0.5m. Generelt er det anbefalt at forholdet mellom vanndampmotstand på varm og kald side, skal være mer enn 10 ganger større (SINTEF byggforsk, 2003).

2.5 Smart dampspærre

Smart dampspærre er en dampspærre som kan variere diffusjonsmotstanden avhengig av relativ fuktighet. Det finnes en rekke ulike typer SDS, med ulike egenskaper og spekter av diffusjonsmotstand. De fysiske egenskapene til denne type produkt er i hovedsak at når materialet utsettes for høy fuktighet øker volumet, og dermed også avstanden mellom molekylene. Dette resulterer i at bindingene blir svakere og tillater mer fukt i å passere gjennom porene. Denne prosessen er reversibel, og ved tørrere eksponering vil porene trekke seg sammen igjen og dermed øke vanndampdiffusjonsmotstanden.

Diffusjonsmotstanden til et material oppgis ofte som faktoren μ . μ - er vanndampmotstandsfaktor, og beskriver materialets evne til å motsette seg at vanndamp passerer gjennom. Sd-verdi er oppgitt i meter og beskriver ekvivalent luftlagstykkelse. Denne er avhengig av tykkelsen til materialet, gitt i Formel 2-1.

$$S_d = \mu * d$$

(2-1)

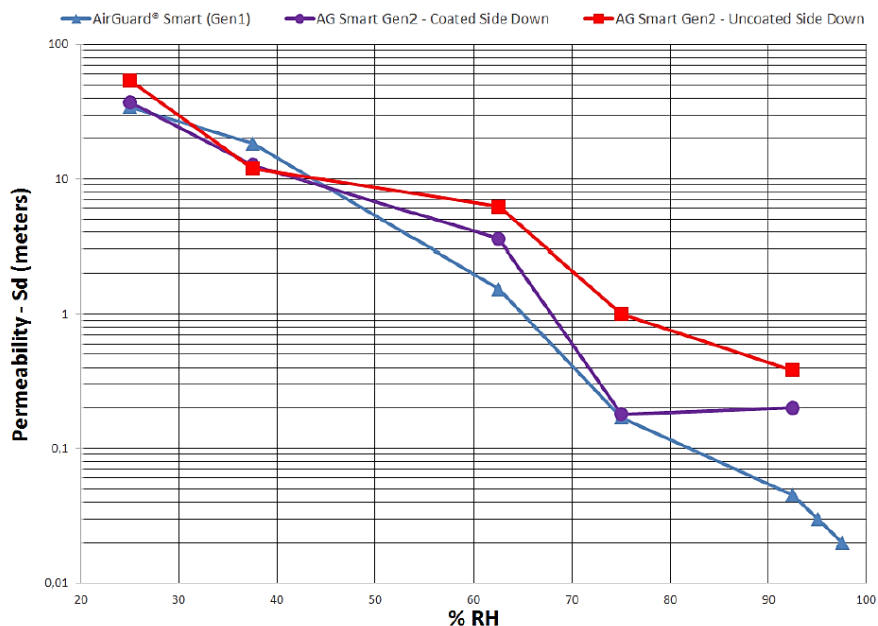
Diffusjonsstrøm drives av gradient i partialtrykk på hver side av et material. Diffundert dampmengde er funksjon av temperatur og gradient i vanndampens partialtrykk. Økende temperatur og konsentrasjon gir økt damptrykk (Thue, 2016). Dampstrømmens retning er mot lavere konsentrasjon/partialtrykk. I praksis vil det som omtales som ren diffusjon nesten alltid gå fra høyere til lavere temperatur ettersom det i praksis vil være høyest damptrykk ved høyest temperatur.

Ved bruk i kompakte tak om sommeren vil stålingen fra sola på takmembran føre til en høy temperatur og en innover-rettet diffusjonsgradient. Kombinert med høy RF rundt SDS, som medfører redusert dampmotstand, tillater dette en uttørring av konstruksjonen mot innelufta.

I realiteten er de fleste smarte dampsperrere retningsavhengige. Det vil si at diffusjonsmotstanden til SDS avhenger av retningen til diffusjonsstrømmen. Det finnes en rekke SDS på markedet, og noen av dem er listet nedenfor.

- AirGuard® Smart (Gen 1)
- AirGuard® Smart (Gen 2)
- SIGA Majrex

Figur 2-3 viser diffusjonsmotstand for AirGuard Smart Gen1 og Gen2. Gen2 er produsert med et belagt lag av PVOH/EVOH blanding som fungerer som adhesjonsfremmer, og fører til en retningsavhengig diffusjonsmotstand som vist i figuren.

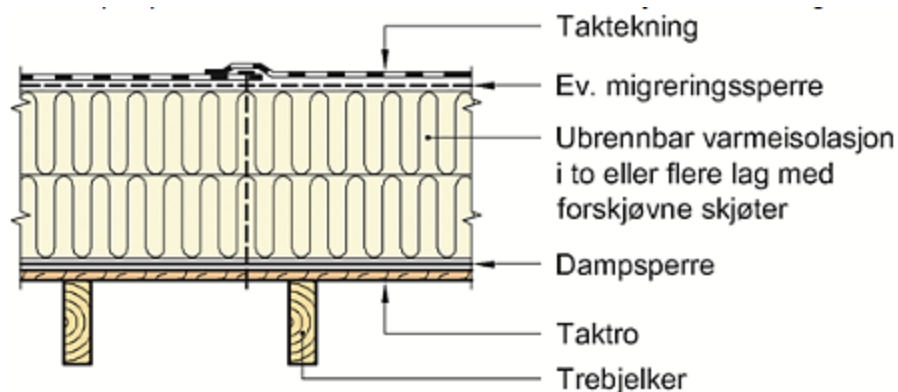


Figur 2-3, Diffusjonsmotstand for AirGuard Smart Gen1 samt Gen2
 - montert med belagt side opp og ned (Olsen, 2017)

2.6 Kompakte tretak

Kompakte tak bygges tradisjonelt opp uten planlagt naturlig lufting eller selvuttørkingsevne. Det vil si at byggfukt og annen fukt som kommer inn i taket kan bli værende der i lengre perioder. Det er derfor vanlig å bygge kompakte tak i materialer som normalt tåler fukt og ikke er utsatt for råtesopp (Uvsløkk, 2008).

Tradisjonelt ved bygging av kompakte tretak er de biologiske materialene lagt utenfor sperresjiktene som vist i Figur 2-4. Dette er for å hindre at materialet blir eksponert for innesperret fukt i lengre perioder.



Figur 2-4, Rettvendt tak med bærekonstruksjon av tre (SINTEF byggforsk, 2018)

Taktekningen er ofte av et svært fuktbestandig materiale. Tekningen skal hindre at vann trenger inn i takkonstruksjonen, og kan ha en S_d -verdi på opptil 600m. Dampsperren er plassert under isolasjonen og danner et damptett sjikt, som skal hindre at vandamp diffunderer ut i takkonstruksjonen (Uvsløkk, 2008).

Ved å flytte bærekonstruksjonen mellom de damptette sjiktene kan man redusere takhøyden, og dermed også materialbruken til konstruksjonen, se Figur 3-2. Dette krever imidlertid at konstruksjonen har selvuttørkingsevne.

2.7 Muggvekst

Muggsopp er en av de første tegnene på biologisk vekst i bygninger. Byggeteknisk forskrift setter krav til at bygningsdeler og konstruksjoner skal være utført slik at nedbør, overflatevann, grunnvann og luftfuktighet ikke kan trenge inn og gi fuktskader, mugg- og soppvekst eller andre hygieniske problemer. Nasjonalt folkehelseinstitutt har generelle retningslinjer som sier at synlig mugg og mugglukt ikke skal forekomme på grunn av sammenhengen mellom muggsopp og helseplager (SINTEF byggforsk, 2005).

Muggsopp er hurtigvoksende sopper som kan produsere store mengder sopp sporer, samt ulike organiske forbindelser og giftstoffer. For å kunne utvikle seg krever soppen tilgang til vann (fukt), næring (biologisk materiale), gunstig temperatur og tid. Gunstig veksttemperatur for de fleste artene er rundt 25-30°C. Samtidig som flere av artene kan ha god vekst ved lavere temperaturer, stopper aktiviteten dersom det blir for kaldt (ned mot 0°C). Ved svært høye temperaturer vil veksthastigheten reduseres, og dersom temperaturen overstiger 40-50°C vil de fleste muggsoppene dø (SINTEF byggforsk, 2005).

Fuktighet er som nevnt en viktig faktor for muggsoppvekst. De vanligste muggsoppene ved innendørs vekst krever 80-85% relativ fuktighet. Samtidig regner man med at jo høyere opp mot 100% RF, desto flere arter får gode vekstbetingelser. Ved uttørking stanser veksten, men sporene overlever og kan starte ny vekst ved ny fuktbelastning.

Det finnes en rekke ulike problemer som kan oppstå som følge av stor fuktpåkjenning. I tillegg til muggsopp kan det være råte, bakterier, alger osv. Disse skadene kan forårsake utfordringer knyttet til det visuelle, lukt, helse og bæreevne. Organismer involvert i skader og defekte bygningskomponenter er presentert i Tabell 2–1.

Tabell 2–1, Organismer involvert i skader og defekte bygningskomponenter (Viitanen *et al.*, 2010)

Type organisme	Skade/problem	Fuktighet	Temperatur (°C)
Bakterie	Biokorrosjon av flere ulike materialer, lukt- og helseproblemer.	Våte materialer. RF > 97%.	Ca. -5 til +60
Muggsopp	Overflatevekst på ulike materialer, lukt- og helseproblemer.	RF > 75%	Ca. 0 til +50
Blåvedsopp sopp	Overflatevekst, kosmetisk skade	RH > 75%	Ca. 0 til +50
Råtesopp	Ulike typer råte i trevirke, nedbryting og svekket bæreevne.	Omgivende RF > 95%.	Ca. 0 til +45
Alge og lav	Overflatevekst på flere ulike materialer på utsiden eller forvitret materiale.	Våte materialer med nitrogen og lav PH.	Ca. 0 til 45
Insekter	Ulike typer skader i organiske materialer, overflateskader eller svekket bæreevne.	RF > 65% - avhenger av tid, temperatur, art og miljø.	Ca. 5 til +50

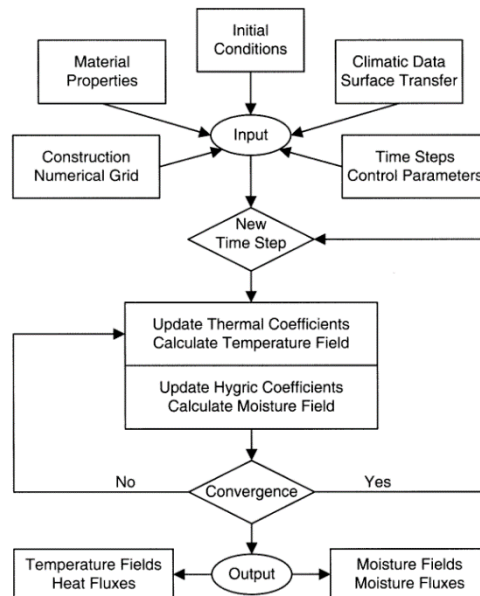
I denne studien er det hovedfokus på hurtigvoksende muggsopp. Samtidig er det viktig å være klar over at andre forvitningsprosesser også kan forekomme som følge av fuktproblematikk.

2.8 HAM – modeller

Det finnes en rekke kommersielle beregningsprogrammer for beregning av kombinert varme- og fukttransport i bygningskonstruksjoner. Slike modeller kalles gjerne HAM-modeller (HAM: av Heat, Air, Moisture) (Geving og Thue, 2002, s. 375). HAM-modeller kan være nyttige verktøy i en rekke situasjoner, og noen eksempler kan være for prosjektering av nye bygninger, analyse av materialer og vurdering av risiko for fuktskader etc.

I denne studien brukes HAM-modeller til å vurdere et konstruksjonsprinsipp med analyse av spesifikke materialer. I tillegg brukes beregningsprogrammene som grunnlag for å vurdere risiko for fuktskader.

HAM-modeller løser typisk fukt- og varmelikninger beskrevet ved differensiallikninger numerisk, ved bruk av små tidssteg. Figur 2-5 viser et flytdiagram for de viktigste stegene ved løsning av kombinert varme- og fuktighetslikninger for HAM-modellen WUFI 2D.



Figur 2-5, Flytdiagram for beregningsteknikken som WUFI-modellen er basert på (Künzel, 1995)

3 Parameterstudie ved bruk av HAM-modeller

3.1 Generelt

En rekke parametere har tidligere vist seg å ha en stor effekt på fuktinnhold og dermed også muggvekstpotensialet til en konstruksjon som nevnt i kapittel 1.1. Beregningsvariantene som ble undersøkt i forprosjektet, og som i denne studien skal undersøkes videre med bruk av eksplisitt strålingsbalanse er gitt i Tabell 3–1 .

Tabell 3–1, Beregningsvarianter fra forprosjekt (Storaas, 2019)

Parameter		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Lokasjon	Trondheim											X	
	Bergen											X	
	Oslo											X	
	Kristiansund											X	
	Mo I Rana											X	
	Tromsø	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Røros												X
Karasjok												X	
Fukttilskudd	Medium	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Høy		X										
Takhøyde	350mm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Bjelketype	K	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Isolasjonstype	Mineralull	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
	Trefiber			X									
Toppisolasjon	0mm	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
	100mm				X								
Himling	Sd=0.2m	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Sd=1m					X							
Fuktinnhold bjelke	12%							X					
	15%								X				
	18%	X	X	X	X	X				X	X	X	
	20%						X						
Fuktinnhold taktro	12%							X					
	15%								X				
	18%	X	X	X	X	X				X	X	X	
	20%						X						
Lukketidspunkt	1.Oktober	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
SDS	Airguard Smart	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	
	SIGA Majrex									X			
Takhelning	0°	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
	90°										X		
Orientering	Nord	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Solabsorbsjons faktorer	0.7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

3.2 Metode

WUFI 2D

WUFI er et numerisk simuleringsverktøy som kalkulerer varme- og fukttransport basert på vanddampdiffusjon og væsketransport for bygningskomponenter. WUFI 2D brukes i denne studien, og kan simulere fukttransport i to dimensjoner. Transportmekanismene som inkluderes i programvaren er vist i Tabell 3–2.

Tabell 3–2, Transportmekanismer i WUFI (Künzel, 1995)

Transportmekanisme	Inkludert	Ikke inkludert
Varmeoverføring	Varmeledning Varmestråling Entalpistrøm ved fuktvandring	Luftstrømning
Vanndampoverføring	Vanndampdiffusjon Løsningsdiffusjon	Fukt på grunn av konveksjon
Væskeoverføring	Kappelærledning Overflatediffusjon	Hydraulisk strømning Innsig strømning Elektrokinesis og osmose

For simuleringer i WUFI kreves en rekke materialparametere samt nødvendige geometrier og antakelser. WUFI har en innebygget database som inneholder informasjon om egenskapene til ulike materialer, delt i basis- og fuktavhengige parametere.

Smart dampsperrer har fuktavhengig vanndampmotstand. For å simulere ulike typer dampsperrer er det nødvendig å tabellføre materialdata fra produsent. Dette gjøres ved å angi vanndampmotstand ved ulike relative fuktigheter.

SDS som blir benyttet i simuleringene er i realiteten retningsavhengig, noe som betyr at vanndampmotstanden avhenger av hvilken side diffusjonen skjer. WUFI programvaren tillater ikke å beregne med denne differansen, og den er for denne studien forenklet ved et gjennomsnitt over RF.

Eksplisitt strålingsmodell

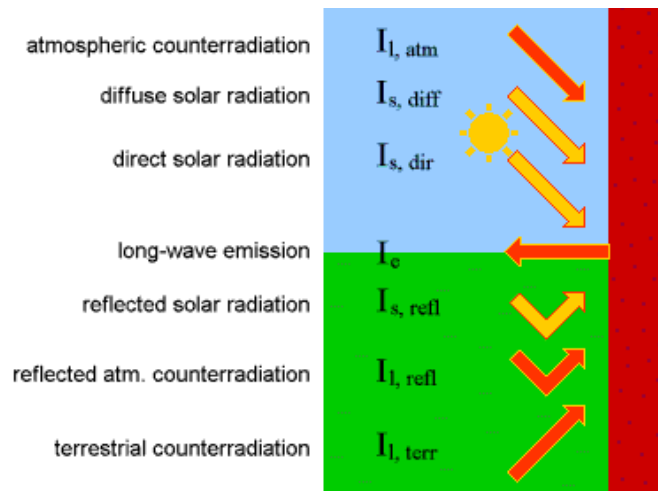
Enhver overflate på en bygningskomponent utveksler kontinuerlig langbølget termisk stråling med omgivelsene. På grunn av sin temperatur sender bygningsoverflaten termisk stråling til omgivelsene. Samtidig mottar også overflaten termisk stråling fra omgivelsene. Dette gjelder for mark og omgivende flater i tillegg til himmelen.

I praktisk bygningsfysikk tas det vanligvis ikke hensyn til denne strålingsutvekslingen separat, men den tas med i beregningen som et bidrag til den konvektive varmeoverføringskoeffisienten. Dette vil i de fleste tilfeller være en tilstrekkelig tilnærming, men for flate tak vil strålingsutvekslingen med himmelhvelvingen være av mye større betydning.

For å beregne temperatur på overflaten til et flatt tak er det derfor nødvendig å ta hensyn til ulike former for stråling. Strålingskomponentene som inngår i beregninger er listet nedenfor.

- Direkte solstråling
- Diffus solstråling
- Reflektert solstråling
- Atmosfærisk stråling
- Reflektert atmosfærisk stråling
- Diffus, reflektert stråling fra mark og omgivende flater
- Langbølgeutstråling

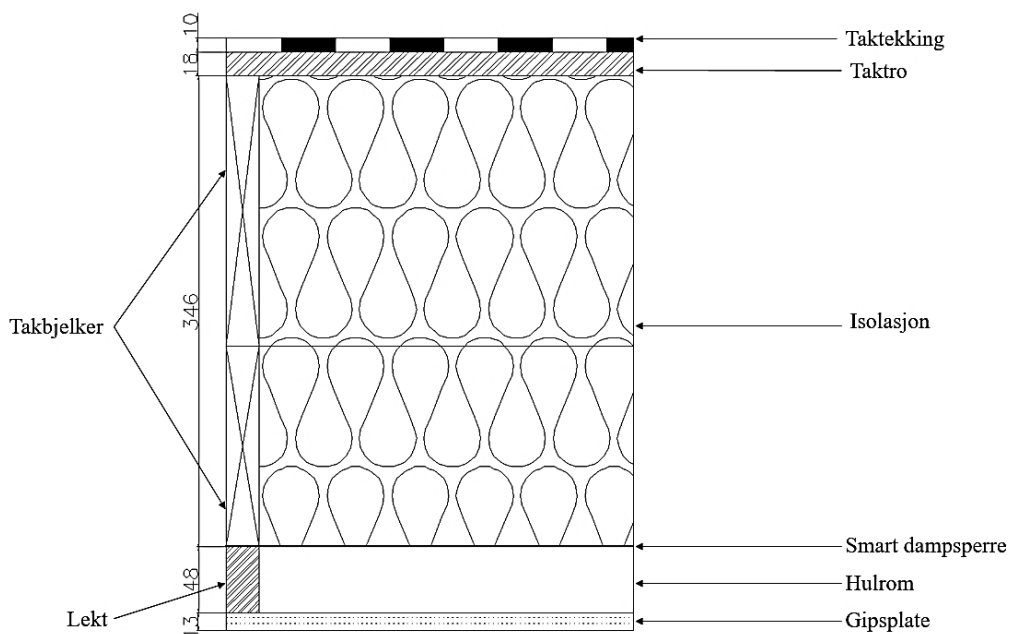
Den langbølgede strålingsbalansen er bestemt av strålingslikevekt mellom bygning, himmel og grunn. Figur 3-1 viser hvilke strålingskomponenter som tas med i WUFI-beregning ved eksplisitt strålingsbalanse (WUFI (2008a)).



Figur 3-1, Oppsummering av kort- og langbølgede strålingsflukser brukt i WUFI-beregning (WUFI (2008a))

Takkonstruksjon

Figur 3-2 viser takkonstruksjonsoppbyggingen for beregningstilfellene fra forprosjektet (Storaas, 2019).



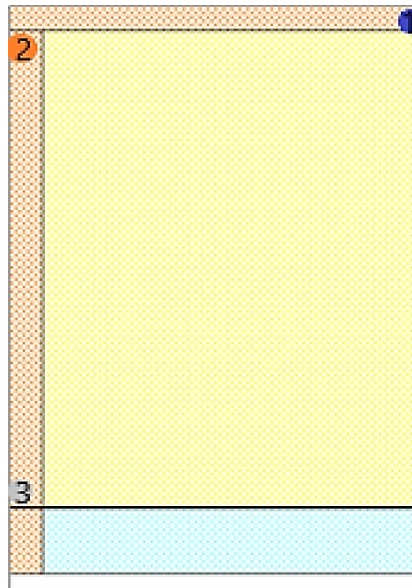
Figur 3-2, Takkonstruksjonsoppbygging for beregningsoppsettet (Storaas, 2019)

Start-, material- og klimabetingelser

For beregning i WUFI er det nødvendig å definere materialer, beregningsoppsett og startbetingelser. For detaljert informasjon om materialdata, startbetingelser, klima for beregningsoppsettet refereres det til tidligere utført forprosjekt (Storaas, 2019).

Monitorpunkter

Monitorpunktene som er undersøkt i denne parameterstudien er illustrert i Figur 3-3. Punktene er valgt med bakgrunn i tidligere arbeider, samt interessante punkter for kontroll opp mot reelle målinger for videre arbeid. Monitorpunkt 1 er lokalisert ved overgang mellom taktro og isolasjon midt mellom bjelkene, og er fra tidligere arbeider identifisert som kritisk punkt (Storaas, 2019). Punkt 2 er lokalisert 1cm under taktro midt i bjelken, og er et typisk målepunkt for fuktloggere. Punkt 3 er tilsvarende et punkt for kontroll mot måleverdier og er plassert midt i bjelken 1cm fra SDS. For noen av beregningsvariantene er også interessante tilleggspunkter vurdert.



Figur 3-3, Monitorpunkter fra forprosjekt (Storaas, 2019)

3.2.1 VTT-modell

For å analysere muggvekst i en bygningskomponent er relativ fuktighet, temperatur, eksponeringstid og sensitivitet for muggvekst essensielle faktorer. VTT-modellen er en empirisk modell basert på visuelle observasjoner av muggvekst på materialoverflater. Denne modellen bruker en matematisk modell for å simulere muggvekst som tar hensyn til varigheten til passende vekstforhold som er nødvendig for at mikrobiologisk vekst vil starte eller gi skade på materialet (Hukka og Viitanen, 1999).

I modellen blir informasjon som tid, relativ fuktighet (%) og temperatur vurdert for et materiale med spesifikke egenskaper. Egenskapene til materialet som blir vurdert er delt inn i sensitivitetsklasse, materialklasse, type overflate og trevirke.

Sensitivitetsklassen deles den inn i fire klasser, som vist i Tabell 3–3.

Tabell 3–3, Sensitivitetsklasser VTT-modell (Ojanen *et al.*, 2010).

Sensitivitetsklasse	Materiale
Veldig sensitiv	Ubehandlet trevirke, inkluderer mye næringsstoffer for biologisk vekst.
Sensitiv	Glatt trevirke, papirbelagte produkter, trebaserte plater.
Medium motstand	Sement eller plastikkbaserte materialer, mineralfiber.
Motstandsdyktig	Glass og metallprodukter, materialer med effektiv beskyttende behandling.

Materialklassen deles den inn i fire klasser, som vist i Tabell 3–4.

Tabell 3–4, Reduksjonsfaktor VTT-modell (Viitanen og Ojanen, 2007)

Beskrivelse	Reduksjonsfaktor C_{mat}
Signifikant reduksjon	1.0
Relevant reduksjon	0.5
Relativt lav reduksjon	0.25
Nesten ingen reduksjon	0.1

Reduksjon i muggindeks ved reduksjonsfaktorene inneholder signifikant usikkerhet. Derfor anbefales det å alltid anta en relativt lav reduksjon, for å være på den sikre siden. Lav reduksjonsfaktor vil i noen tilfeller føre til årlig akkumulering av muggindeks, og for disse tilfellene kreves ekspertise for å vurdere de mulige risikoene.

Type overflate deles inn i:

- Glatt
- Ru

Glatt overflate er antatt for trevirke benyttet i konstruksjonen for denne studien.

Muggindeksen deles inn i syv ulike muggvekst observasjonstilfeller, se Tabell 3–5.

Tabell 3–5, Muggindeksering VTT-modell

Muggindeks	Kommentar
0	Ingen vekst.
1	Noe vekst - kun oppdaget ved mikroskop.
2	Moderat vekst - oppdaget ved mikroskop (mer enn 10% dekning).
3	Noe vekst oppdaget visuelt.
4	Visuelt oppdaget mer enn 10%.
5	Visuelt oppdaget mer enn 50%.
6	Visuelt oppdaget 100%.

Trafikklys klassifisering for VTT-modell

Trafikklys klassifisering for risiko er en klassifisering som har til hensikt å visuelt indikere risiko for muggvekst. Basert på muggvekstindeksen kan risiko deles inn i rødt, gult og grønt lys. Trafikklysklassifiseringen er basert på hvilken overflate som betraktes. For denne studien gjelder akseptkriteriet for innvendig konstruksjon (uten direkte kontakt med innvendig luft). Se Tabell 3–6 og Tabell 3–7.

Tabell 3–6, Trafikklysklassifisering VTT-modell (Hukka og Viitanen, 1999)

Lys indikator	Innendørs overflate Muggindeks [-]	Innvendig konstruksjon Muggindeks [-]	Ingen forventet innvirkning Muggindeks [-]	ASHRAE 160 Muggindeks [-]
Grønt lys	≤ 1	≤ 2	≤ 3	≤ 1
Gult lys	≤ 2	≤ 3	>3	1-3
Rødt lys	>2	>3	-	>3

Tabell 3–7, Lysindikator (Viitanen *et al.*, 2015)

Lys indikator	Kommentar
Grønt lys	Vanligvis akseptert.
Gult lys	Tilleggsinformasjon er nødvendig for å undersøke hvorvidt det aksepteres.
Rødt lys	Vanligvis ikke akseptert.

Trafikklys klassifiseringen er kun en veiledning og representerer nåværende teknologigrunnlag (Viitanen *et al.*, 2015).

3.2.2 DELPHIN beregningsprogram

Det finnes en rekke HAM-modeller (Heat Air and Moisture) for modellering av varme fukt og lufttransport i bygningskomponenter som beskrevet i 2.8. En av disse er DELPHIN og den er nærmere undersøkt her. Sammenlignet med WUFI har DELPHIN noen andre funksjonaliteter og programvaren er derfor svært interessant å undersøke.

En av funksjonalitetene som er inkludert i DELPHIN programvaren er muligheten til å simulere retningsavhengig diffusjonsmotstand. Som beskrevet i 2.5, har flere SDS i realiteten en diffusjonsmotstand som er avhengig av retningen til diffusjonsgradienten. Denne funksjonaliteten undersøkes i denne studien.

DELPHIN er til felles med WUFI en kommersiell tilgjengelig programvare. Programvaren kan brukes til å simulere en-, to- og asymmetrisk tredimensjonal transport av varme, luft, fukt, forurensning og salttransport i porøse bygningsmaterialer, bygningskomponenter med slike materialer og bygningskonvolutter generelt.

For å sammenligne de to beregningene er det nødvendig å tilknytte modellene helt like material-egenskaper, klimatiske grensebetingelser og startbetingelser. Egenskapene og betingelsene som er brukt for DELPHIN beregningen er de samme som er gitt for WUFI-beregning av parameterstudie for Oslo klima.

Klima

For å definere Oslo klima i DELPHIN 5 er en DRY-klimafil fra WUFI importert. Fra denne klimafilen er temperatur, RF, direkte solstråling, diffus solstråling, skydekke, regn, og vindhastighet med retning importert i DELPHIN.

Basert på klimadata defineres grensebetingelsene for beregningen. Langbølget strålingsmodell beregnes som en Boltzmann beregning som tar hensyn til himmeltemperatur, lufttemperatur, relativ fuktighet, skydekke og marktemperatur.

Innendørs defineres en standardisert inneklimatemodell med «Medium Moisture Load +5%» basert på europeisk standard EN15026.

3.3 Resultater

Resultatene fra simuleringene er presentert grafisk, med utgangspunkt i datasett fra de ulike monitorpunktene, samt fra datasett hentet fra VTT-modell. Trendene for de ulike monitorpunktene er like og det anses kun som nødvendig å presentere de mest kritiske punktene. I tilfeller hvor kritiske punkter er forskjellig er dette kommentert og illustrert.

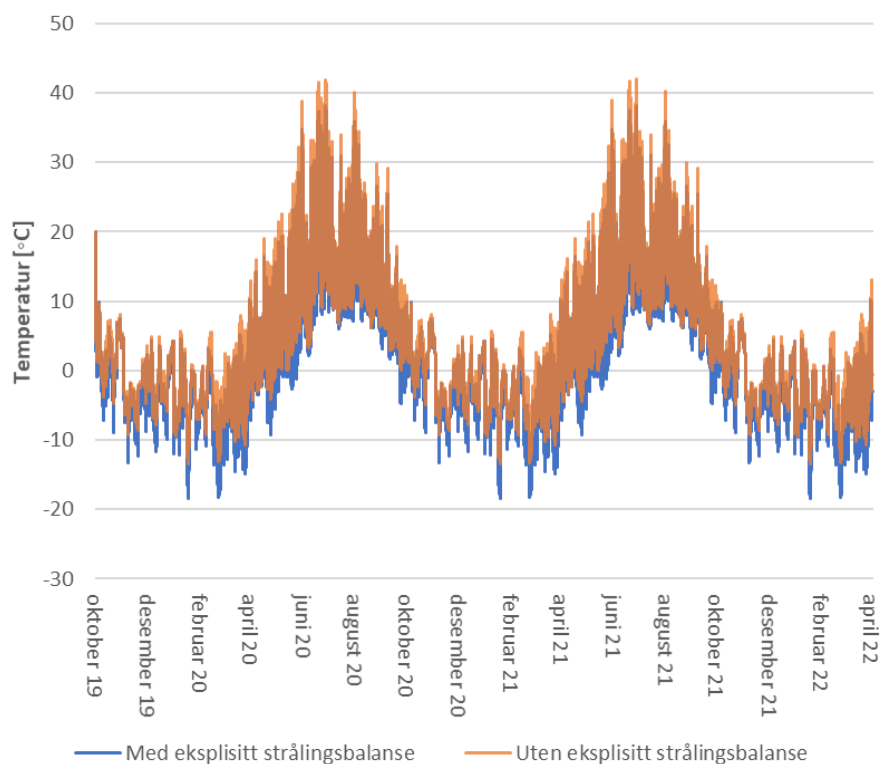
3.3.1 Betydning av strålingsbalanse for parameterstudie

Tabell 3–8 angir parametermatrisen for referansetilfellet, og er grunnlaget for vurdering av strålingsbalanse for parameterstudien.

Tabell 3–8, Parametermatrise for referansetilfellet (Storaas, 2019)

Parameter		Referanse (1)
Lokasjon	Trondheim Bergen Oslo Kristiansund Mo I Rana Tromsø Røros Karasjøk	X
Fukttilskudd	Medium Høy	X
Takhøyde	350mm	X
Bjelketype	K	X
Isolasjonstype	Mineralull Trefiber	X
Toppisolasjon	0mm 100mm	X
Himling	Sd=0.2m Sd=1m	X
Fuktinnhold bjelke	12% 15% 18% 20%	X
Fuktinnhold taktro	12% 15% 18% 20%	X
Lukketidspunkt	1.Oktober	X
SDS	Airguard Smart SIGA Majrex	X
Takhelning	0° 90°	X
Orientering	Nord	X
Solabsorpsjonsfaktorer	0.7	X

Figur 3-4 viser temperatur målt i taktro for referansetilfellet beregnet med og uten strålingsbalansen og en kan se at temperatur for tilfellet uten strålingsbalanse ligger høyere for hele beregningsperioden. Tabell 3–9 viser gjennomsnittverdier for begge tilfellene.

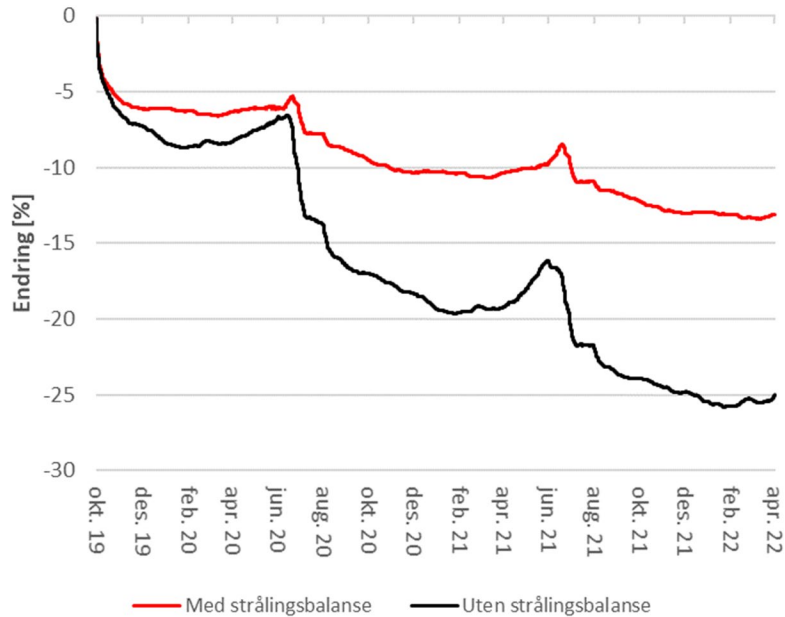


**Figur 3-4, Temperatur i taktro for referansetilfellet
- sammenligning av beregningstilfelle med og uten eksplisitt strålingsbalanse**

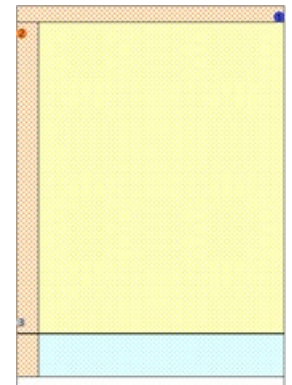
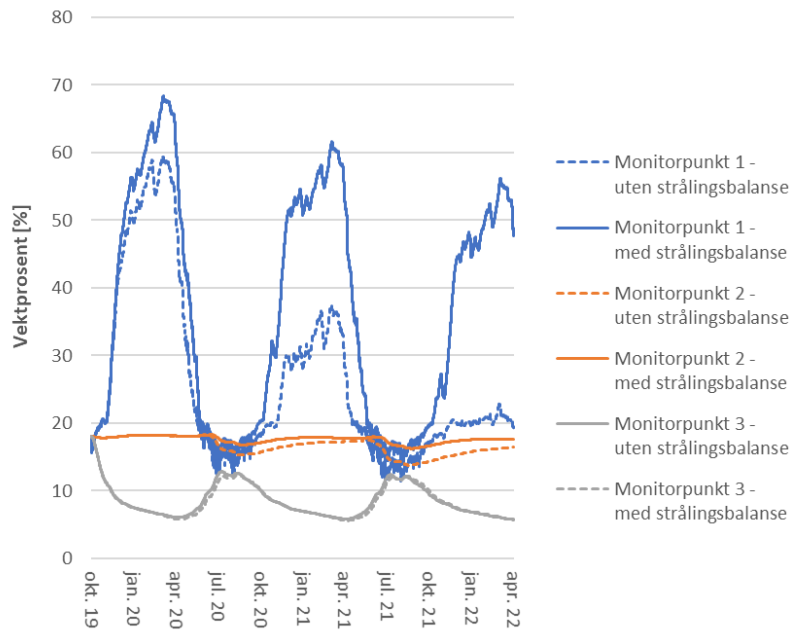
Tabell 3–9, Gjennomsnittstemperatur for beregningstilfelle med og uten eksplisitt strålingsbalanse

Beregningstilfelle	Gjennomsnittlig temperatur [°C]
Med eksplisitt strålingsbalanse	2,0
Uten eksplisitt strålingsbalanse	3,7

Figur 3-5 viser prosentvis endring av fuktinnhold i takkonstruksjonen for beregning med og uten eksplisitt strålingsmodell. Tilhørende lokalt fuktinnhold for monitorpunktene 1-3 er vist i Figur 3-6.

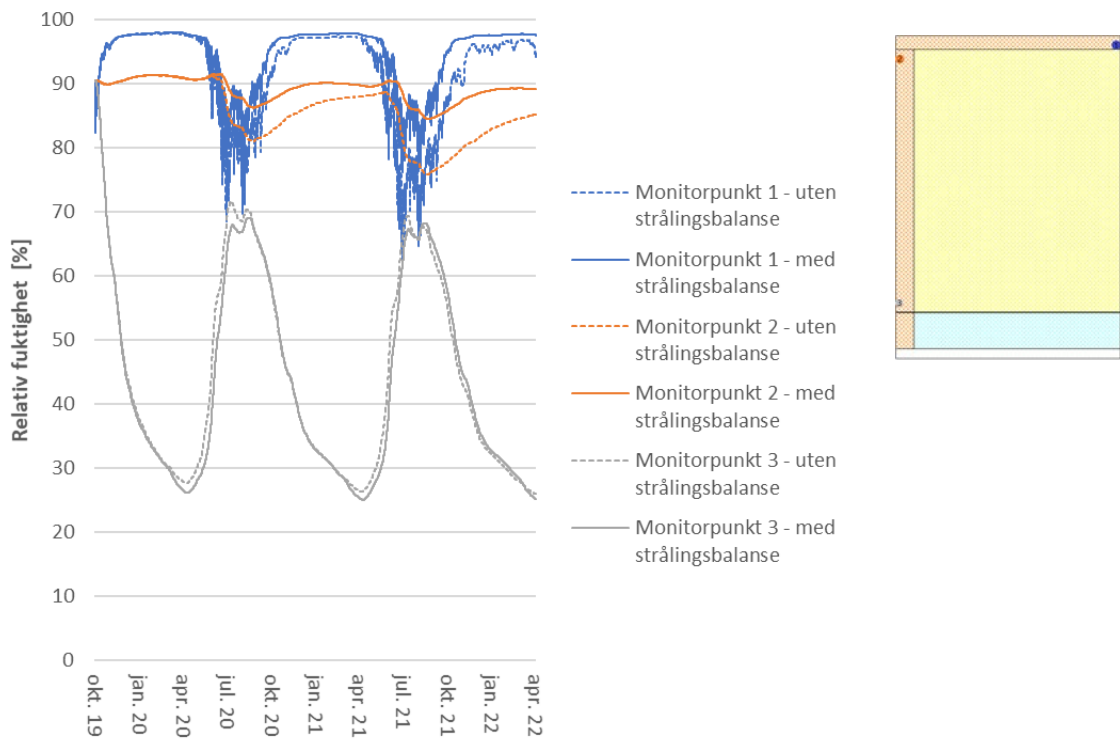


Figur 3-5, Prosentvis endring i totalt fuktinnhold i takkonstruksjonen - sammenligning av beregningstilfelle med og uten eksplisitt strålingsbalanse.

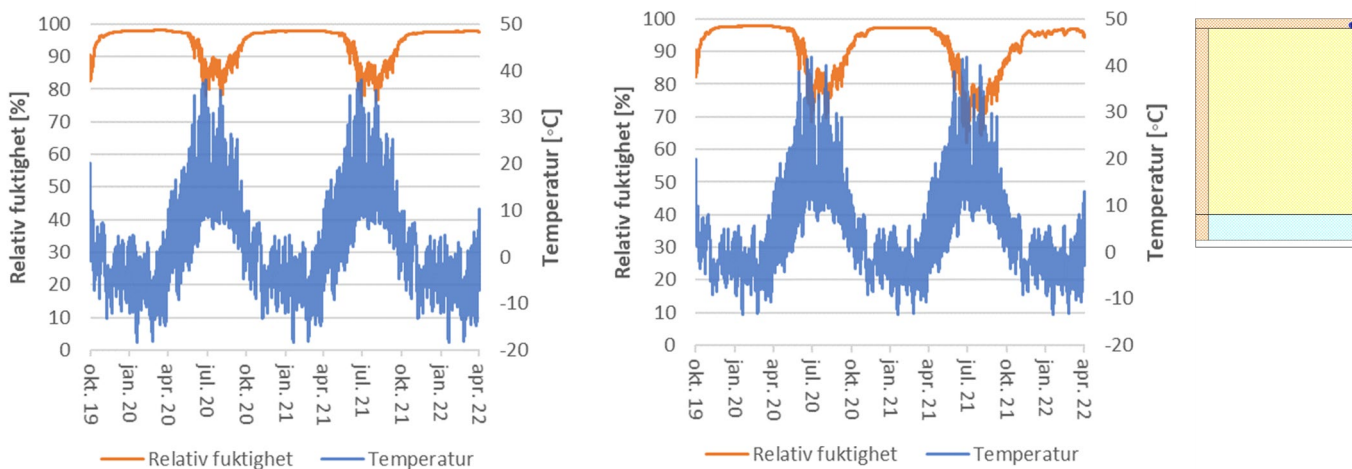


Figur 3-6, Fuktinnhold i vektprosent for monitorpunktene til referansetilfellet - sammenligning av beregningstilfelle med og uten eksplisitt strålingsbalanse

Figur 3-7 viser sammenligning av RF for monitorpunktene 1-3 for beregning med og uten strålingsmodellen. Monitorpunkt 1 har av figuren høyest RF, og RF-T kurver for dette punktet for begge beregningemetodene er presentert i Figur 3-8. Figur 3-9 viser muggindeks for punktene.



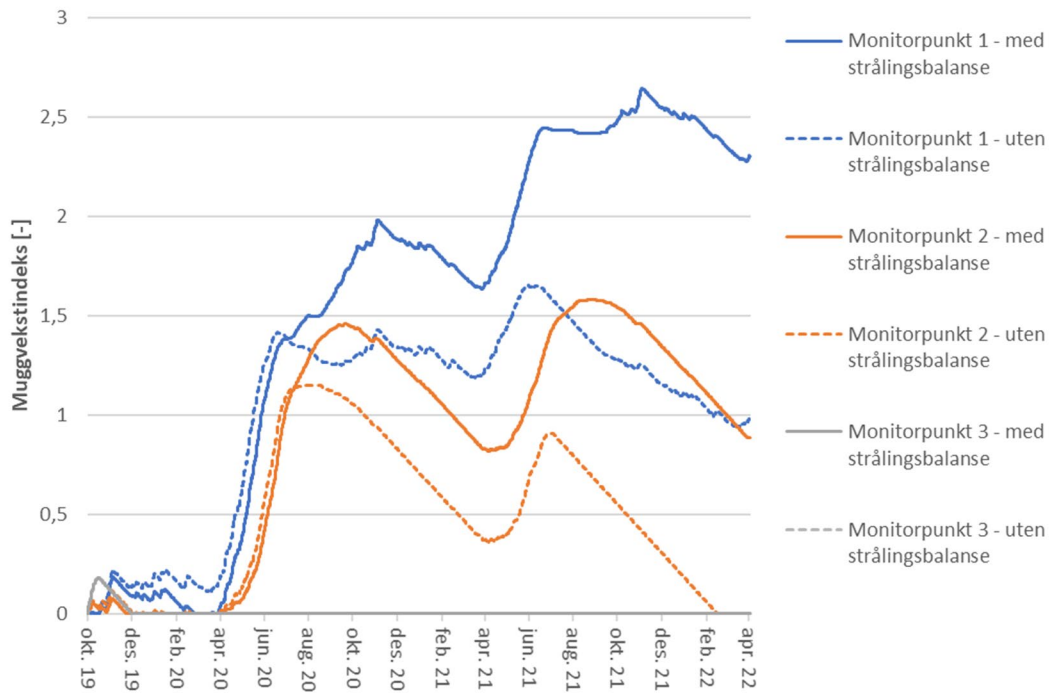
Figur 3-7, Relativ fuktighet for monitorpunktene - med strålingsbalanse sammenlignet med uten



a) Med strålingsbalanse

b) Uten strålingsbalanse

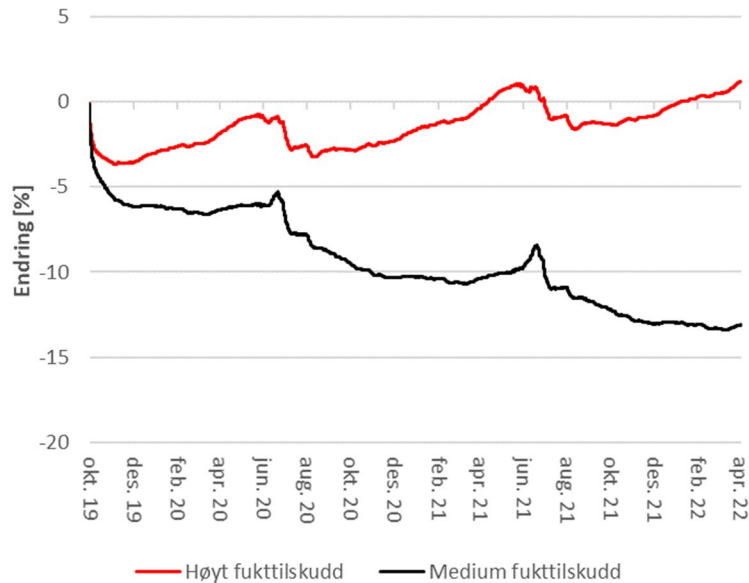
Figur 3-8, Temperatur og RF utvikling for illustrert monitorpunkt 1 for referansetilfellet - sammenligning av beregningstilfelle med og uten eksplisitt strålingsbalanse



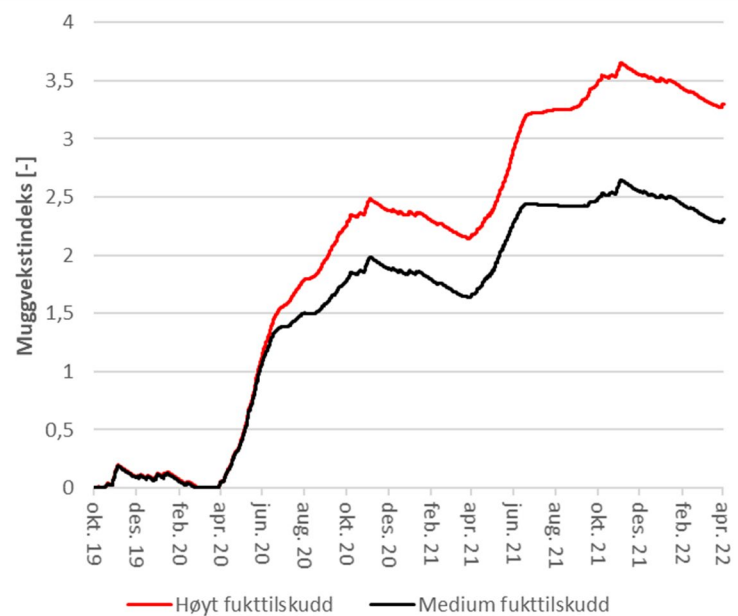
Figur 3-9, Muggindeks for de ulike monitorpunktene for referansetilfellet - sammenligning av beregningstilfelle med og uten eksplisitt strålingsbalanse

Effekt av fukttilskudd

Effekten av fukttilskudd er undersøkt ved beregningsvariant 2, gitt i Tabell 3–1. Figur 3-10 viser prosentvis endring i fuktinnhold for høyt fukttilskudd sammenlignet med medium fukttilskudd. Muggvekstindeksen til monitorpunkt 1 er presentert i Figur 3-11.



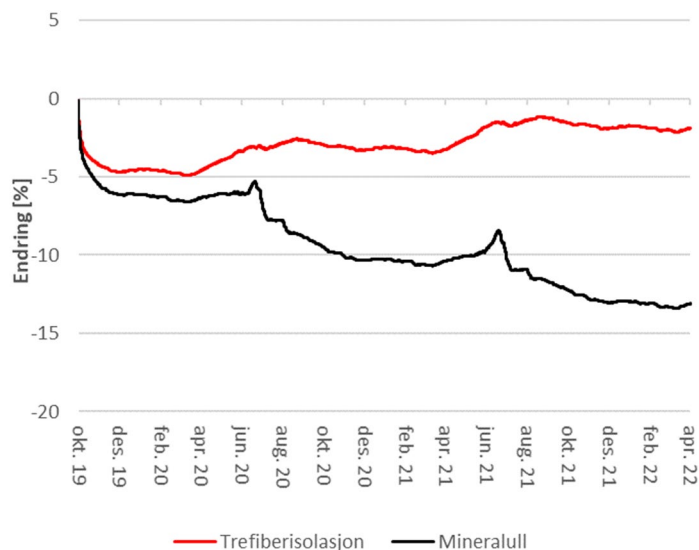
Figur 3-10, Prosentvis endring i total fuktinnhold i takkonstruksjonen - for høyt fukttilskudd sammenlignet med medium fukttilskudd



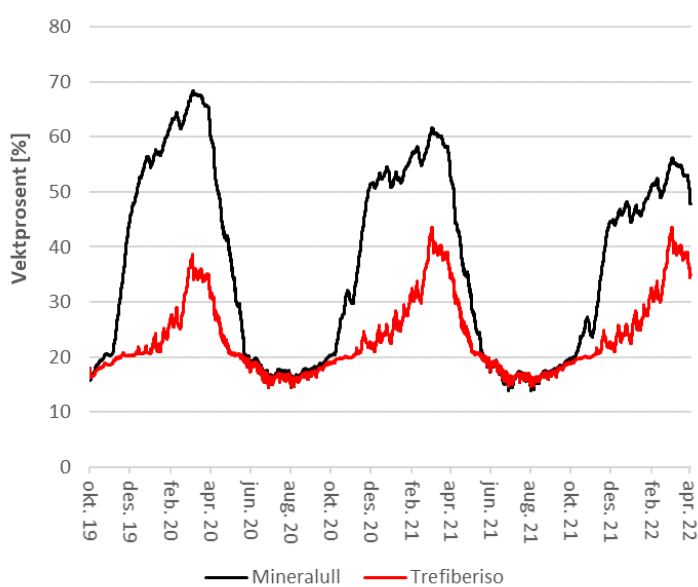
Figur 3-11, Muggindeks for høyt fukttilskudd sammenlignet med medium fukttilskudd - med strålingsbalanse for monitorpunkt 1

Effekt av isolasjonstype

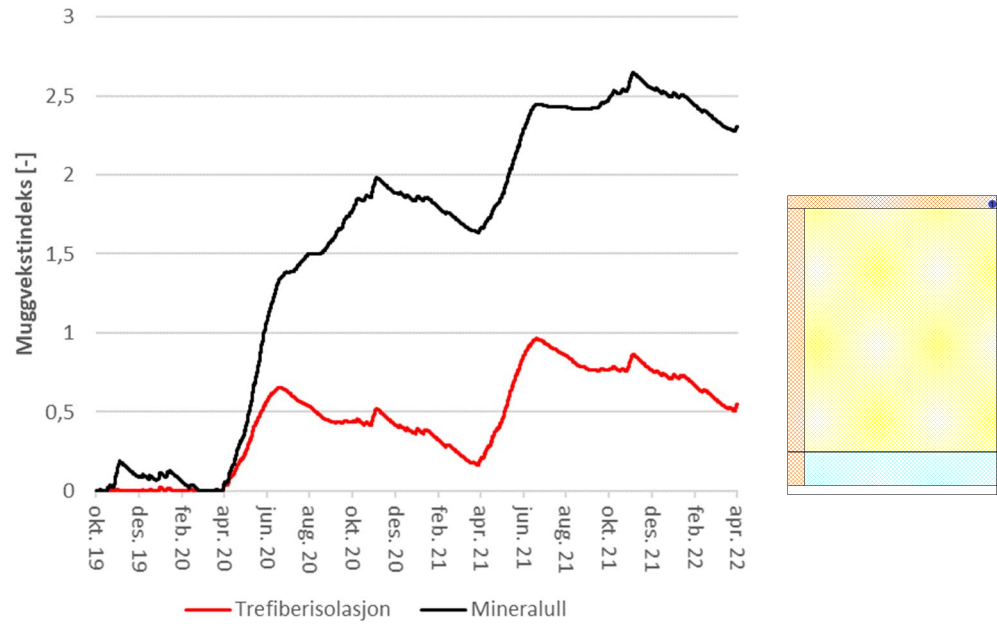
Effekten av isolasjonstype er undersøkt ved beregningsvariant 3, gitt i Tabell 3–1. Figur 3-12 viser prosentvis endring i fuktinnhold i takkonstruksjonen. Figur 3-13 viser fuktinnhold i taktro for trefiberisolasjon sammenlignet med mineralull. Figur 3-14 viser muggvekstindeksen for monitorpunkt 1 for beregningstilfellet.



**Figur 3-12, Prosentvis endring i totalt fuktinnhold i takkonstruksjonen
- for trefiberisolasjon sammenlignet med mineralull**



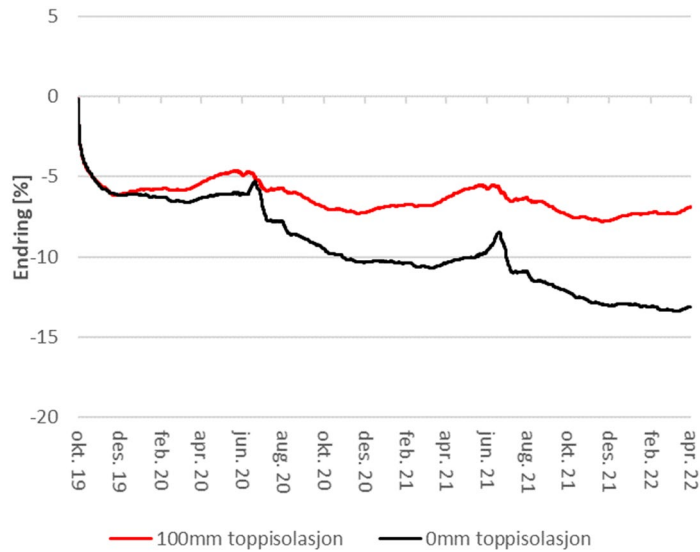
**Figur 3-13, Fuktinnhold i vektprosent for monitorpunkt 1
- for trefiberisolasjon sammenlignet med mineralull**



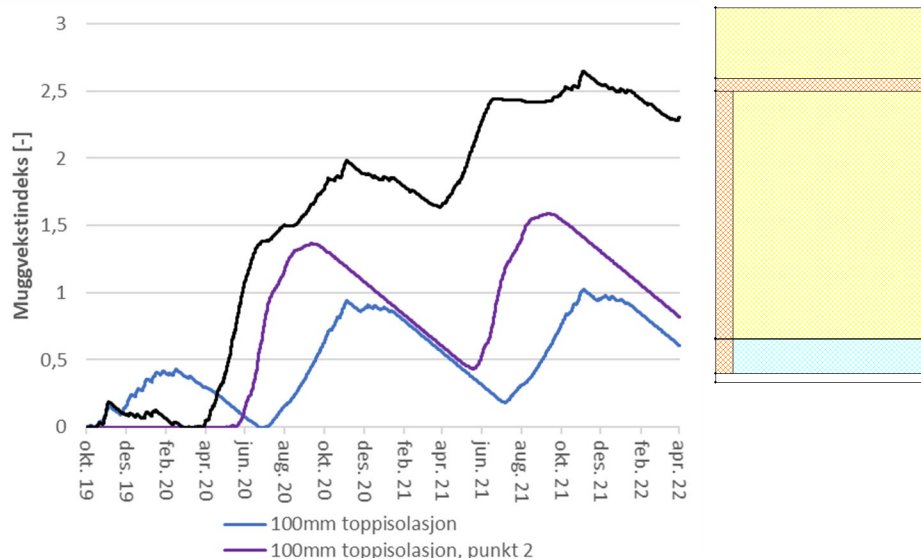
Figur 3-14, Muggindeks for monitorpunkt 1 med trefiberisolasjon sammenlignet med mineralull

Effekt av toppisolasjon

Effekten av isolasjon på overside av taktro er undersøkt ved beregningsvariant 4, gitt i Tabell 3–1. Figur 3-15 viser prosentvis endring i fuktinnhold i takkonstruksjonen med 100mm isolasjon sammenlignet med ingen toppisolasjon. For dette beregningstilfellet er det lagt til et monitorpunkt som er på overside av taktro mot toppisolasjon. Figur 3-16 viser muggvekstindeksen for monitorpunkt 1 og 2 utført med 100mm toppisolasjon sammenlignet med referansetilfellet.



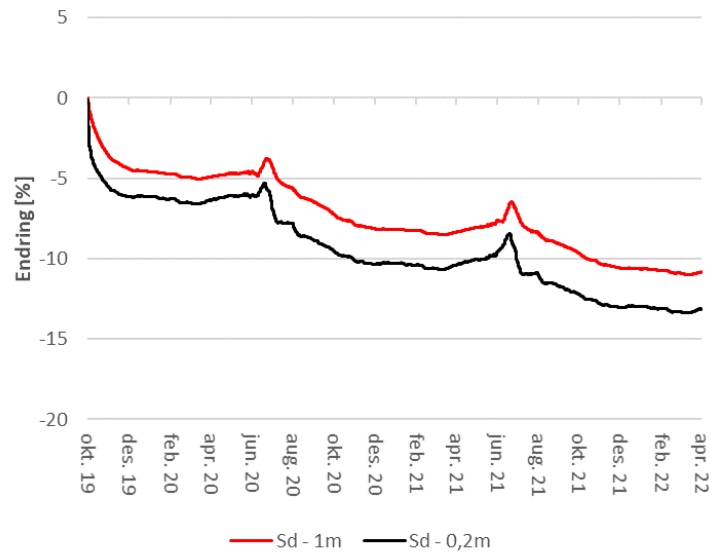
Figur 3-15, Prosentvis endring i fuktinnhold for 100mm toppisolasjon sammenlignet med ingen toppisolasjon



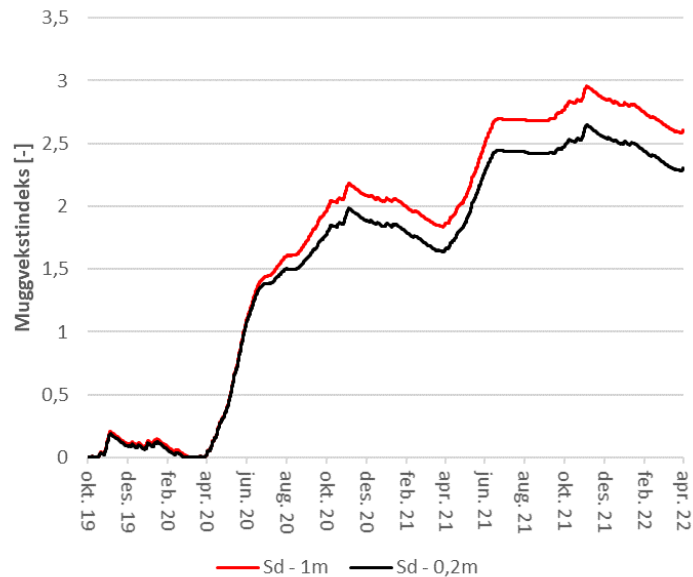
Figur 3-16, Muggindeks for to ulike monitorpunkter i taktro med 100mm sammenlignet med ingen toppisolasjon

Effekt av diffusjonsmotstand til himling

Effekten av diffusjonsmotstand til himling er undersøkt ved beregningsvariant 5, gitt i Tabell 3-1. Figur 3-17 viser prosentvis endring i fuktinnhold for himling med Sd-verdi 1m sammenlignet med 0,2m. Figur 3-18 viser muggvekstindeks for beregningstilfellet.



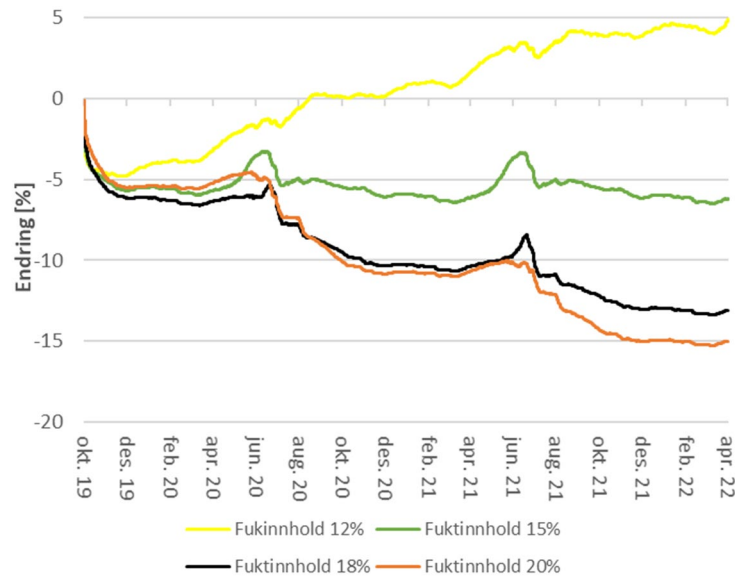
Figur 3-17, Prosentvis endring i fuktinnhold for himling med Sd-verdi 1m sammenlignet med 0,2m



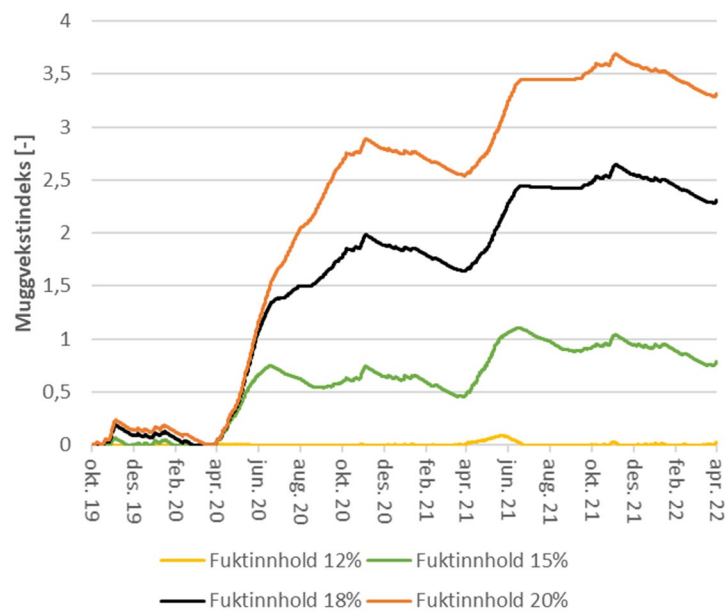
Figur 3-18, Muggvekstindeks for himling med Sd-verdi 1m sammenlignet med 0,2m

Effekt av innebygget byggfukt

Effekten av innebygget byggfukt er undersøkt ved beregningsvariant 6 til 8, gitt i Tabell 3-1. Figur 3-19 viser prosentvis endring i totalt fuktinnhold i takkonstruksjonen for fire ulike fuktinnhold. Figur 3-20 viser muggvekstindeksen for de samme beregningsvariantene.



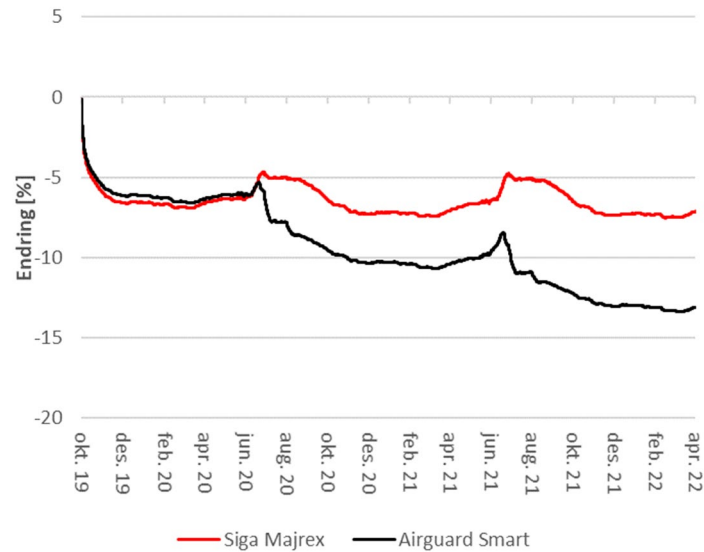
Figur 3-19, Prosentvis endring i totalt fuktinnhold i takkonstruksjonen



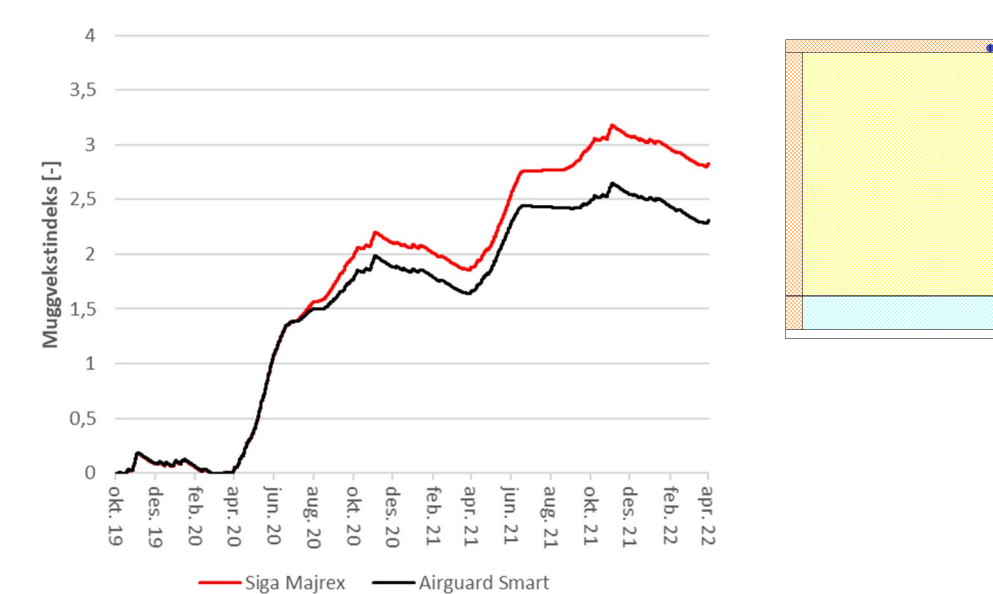
Figur 3-20, Muggindeks for 12-20% fuktinnhold for monitorpunkt 1

Effekt av type smart dampsperre

Effekten av type smart dampsperre er undersøkt ved beregningsvariant 9, gitt i Tabell 3-1. Figur 3-21 viser prosentvis endring i totalt fuktinnhold for takkonstruksjon utført med Siga Majrex, sammenlignet med AirGuard Smart. Figur 3-22 viser muggvekstindeksen for monitorpunkt 1 sammenlignet med AirGuard Smart.



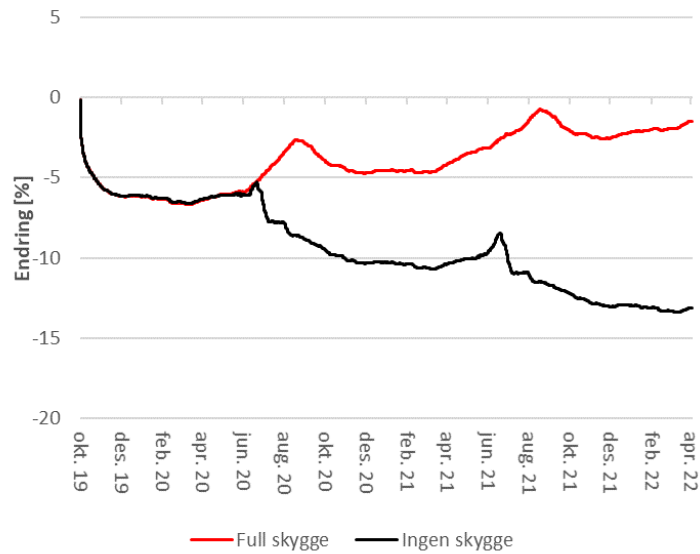
Figur 3-21, Prosentvis endring i totalt fuktinnhold i takkonstruksjonen for Siga Majrex sammenlignet med Airguard Smart



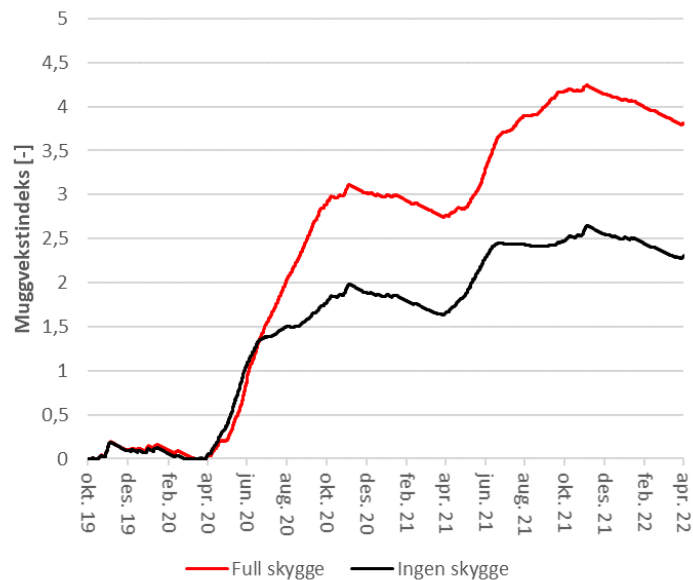
Figur 3-22, Muggindeks for monitorpunkt 1 utført med Siga Majrex sammenlignet med Airguard Smart

Effekt av skyggeforshold

Effekten av skyggeforshold er undersøkt ved beregningsvariant 10, gitt i Tabell 3–1. Figur 3-23 viser prosentvis endring i totalt fuktinnhold for takkonstruksjon ved 100% skyggeforshold, som tilsvarer 90 grader helning mot nord. Figur 3-24 viser muggvekstindeksen for beregningstilfellet.



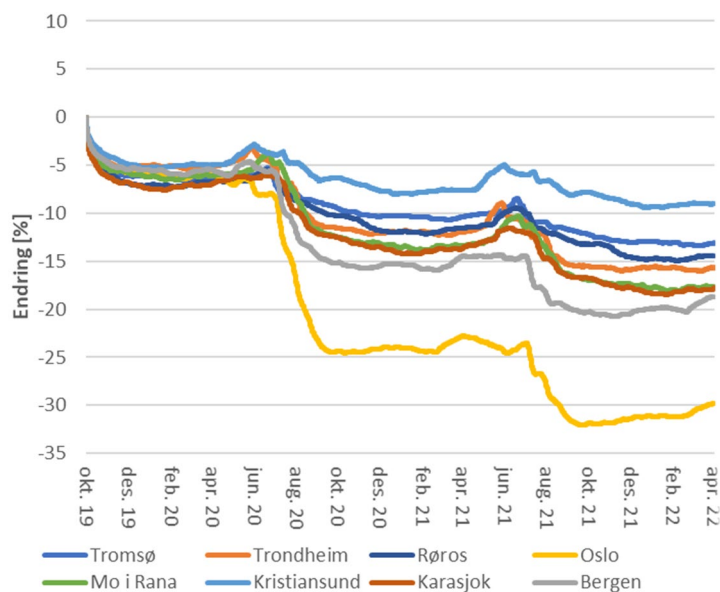
Figur 3-23, Prosentvis endring i totalt fuktinnhold i takkonstruksjonen for full skygge sammenlignet med ingen skygge



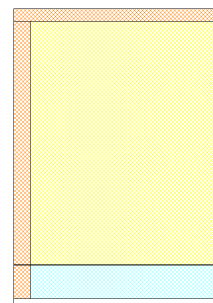
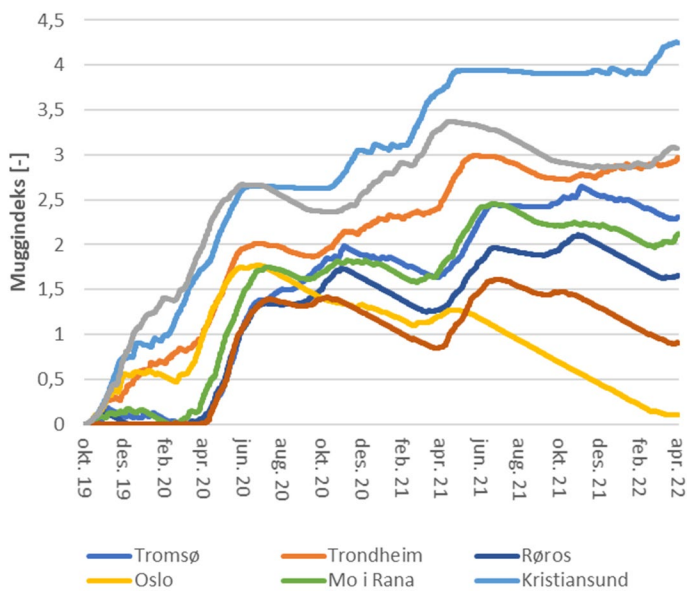
Figur 3-24, Muggindeks for monitorpunkt 1 for full skygge sammenlignet med ingen skygge

Effekt av klima

Effekten av klima er undersøkt ved beregningsvariant 11, gitt i Tabell 3–1. Figur 3-25 viser prosentvis endring i totalt fuktinnhold i takkonstruksjonen for åtte ulike uteklima. Figur 3-26 viser muggvekstindeksen for de åtte ulike klimaene.



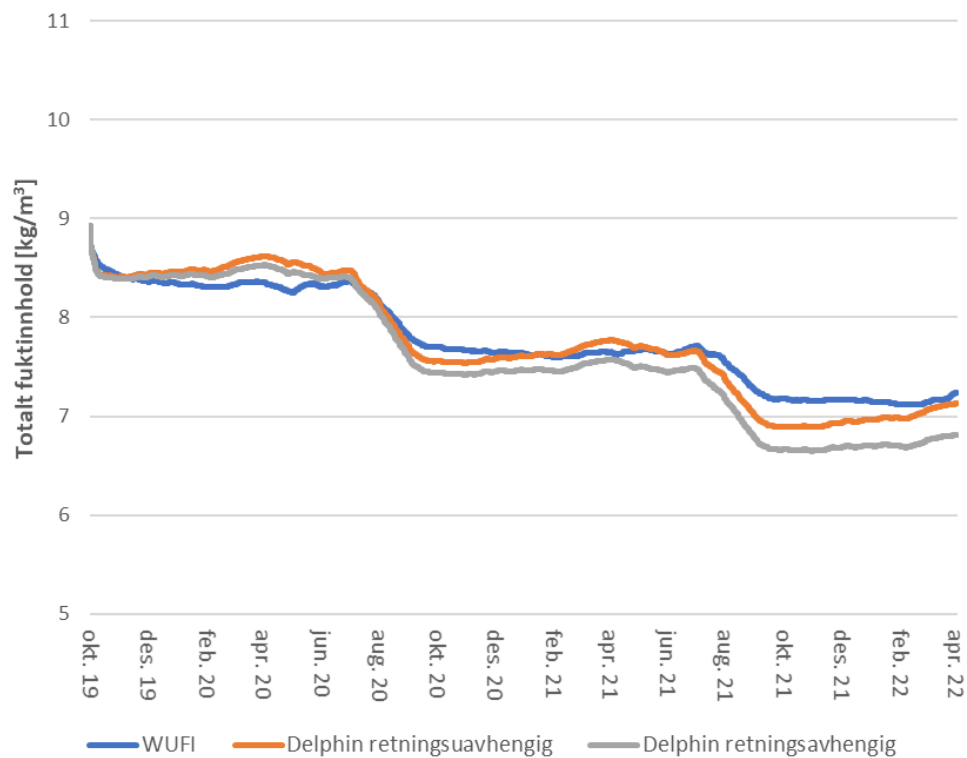
Figur 3-25, Prosentvis endring i totalt fuktinnhold i takkonstruksjonen for åtte ulike



Figur 3-26, Muggindeks for monitorpunkt 1 for åtte ulike uteklima

3.3.2 Sammenligning av WUFI og DELPHIN beregning

Figur 3-27 viser totalt fuktinnhold for WUFI-beregning av Oslo klima, sammenlignet med DELPHIN beregning for både retningsavhengig og retningsuavhengig diffusjonsmotstand.



Figur 3-27, Sammenligning av WUFI og DELPHIN simulering for Oslo klima med retningsavhengig og retningsuavhengig diffusjonsmotstand

3.4 Diskusjon

Figur 3-4 viser at temperatur i taktro for beregning uten eksplisitt strålingsbalanse ligger en del høyere enn beregningstilfellet som tar hensyn til denne strålingsbalansen. Tabell 3-9 viser at gjennomsnittstemperatur på taktroverflaten reduseres fra 3.7°C til 2.0°C som følge strålingsbalansen. Som tidligere nevnt i 3.2 beregner strålingsbalansen en strålingslikevekt mellom bygningen, himmelen og omgivende elementer som grunn. Ettersom temperatur på taktroverflaten antas å være den drivende faktor for uttørking av konstruksjonen om sommeren, forventes det at uttørkingspotensialet for alle beregninger ved bruk av denne balansen reduseres. Ved redusert uttørking forventes det samtidig et større potensiale for muggvekst for flere av beregningstilfellene.

I fordypningsprosjektet som er grunnlaget for denne videre studien, viste beregninger at sammenhengen mellom uttørkingspotensiale og potensialet for muggvekst ikke var entydig. Begrunnelsen for dette var at for tilfeller med lav uttørking på grunn av lave temperaturer, samtidig hadde lengre perioder med ugunstige vekstbetingelser for muggvekst (Storaas, 2019). En totalvurdering og sammenligning med tidligere resultater vurderes derfor som nødvendig for alle klima og beregningstilfeller.

Vurdering av referansetilfellet

Figur 3-5 viser prosentvis endring i totalt fuktinnhold for referansetilfellet beskrevet av fordypningsprosjektet, sammenlignet med samme tilfelle beregnet med strålingsbalanse. Figuren viser at den totale uttørkingen for konstruksjonen reduseres kraftig. Total uttørking ble endret fra om lag 25% til 13% som et resultat av strålingsbalansen. Figur 3-6 viser fuktinnhold i vektprosent for tre monitorpunkter med og uten strålingsbalansen. Figuren viser tydelig at lokalt fuktinnhold i taktro for simulering med strålingsbalanse gir mye tregere uttørking, samtidig som forskjellen for monitorpunkt 2 og 3 er mye mindre. Figur 3-7 viser relativ fuktighet for de to beregningstilfellene og viser at RF ved beregning uten strålingsbalanse er betydelig lavere ved sommerperiodene. Samtidig gjør uttørkingen av taktroen seg gjeldene i RF-diagrammet i løpet av beregningsperioden ved lavere maksimumsverdi. På grunn av sorpsjonskurvens form beskrevet nærmere i 2.1, kan kun små endringer i RF gi svært store utslag i fuktinnhold. Dette vurderes som årsaken til at kurvene visuelt ser noenlunde like ut. Figur 3-8 viser RF og temperatur for kritisk punkt, og viser at temperatur ved sommerforhold for beregning uten strålingsbalanse er betydelig høyere med samtidig lavere RF.

Muggvekstindeks for beregningstilfelle illustrert ved Figur 3-9, viser at muggvekst for monitorpunkt 1 øker betydelig ved simulering med strålingsbalanse. Samtidig viser kurven at differansen for punkt 2 er mindre og for punkt 1 er de helt like. For punkt 1 endres muggindeksen fra 1,6 til 2,7. Differansen gjør at VTT-modellen vurderer at fuktsikkerheten da går fra «vanligvis akseptert tilfelle» til «ytterligere undersøkelser er nødvendig».

Effekt av fukttilskudd

Figur 3-10 viser at konstruksjonen ved høyt fukttilskudd har en betydelig akkumulering av fukt ved vinterforhold, samtidig som uttørking ved sommerforhold er moderat. Dette fører til at totalfukt for konstruksjonen tydelig øker. Ved høyt fukttilskudd i WUFI varierer RF i innelufta mellom 66% og 37% over året. Ved medium fukttilskudd som varierer RF mellom 62% og 25%, og denne økningen i RF reduserer diffusjonsmotstanden til SDS fra Sd-verdi 35m til 13m. Denne endringen sammen med økt innendørs damptrykk vurderes som årsaken til betydelig økt fuktakkumulering ved vinterforhold. Fra Figur 3-11 observerer vi at denne økningen har en stor innvirkning på muggvekst for tilfellet, og beregningstilfellet får en maksimal muggindeks på om lag 3.5.

Effekt av isolasjonstype

Figur 3-12 viser at beregningstilfellet med trefiberisolasjon nesten ikke har uttørkingspotensiale. Trefiberisolasjon har en åpen porestruktur og er et utpreget hygroskopisk materiale med en relativt høy likevektsfuktighet. Det gjør at den har evnen til å absorbere og lagre fukt ved oppfukting for så å gi det fra seg når forholdene er tørrere. Denne egenskapen ser ut til å føre til at uttørkingspotensialet til takkonstruksjonen reduseres. Figur 3-13 viser at fuktinnholdet i taktro med trefiberisolasjon er betydelig lavere enn tilfellet for mineralull. Samtidig kan det observeres at fuktinnholdet over beregningsperioden øker på grunn av oppfukting. Figur 3-14 viser at muggvekstindeksen blir betydelig lavere på grunn av lavere fuktinnhold.

Effekt av toppisolasjon

Figur 3-15 viser at beregningstilfellet med 100mm toppisolasjon får et redusert uttørkingspotensiale sammenlignet med ingen isolasjon over taktro. Figur 3-16 viser muggvekstindeksen for konstruksjonstilfellet og viser at muggindeksen reduseres ved bruk av fallisolasjon over taktro. Av figuren fremgår det at kritisk punkt for muggvekst for dette tilfellet er på oversiden av taktroen. Forskjellen sees i sammenheng med diffusjonsretning om sommeren hvor fukt samles på overflaten av taktro, hvor den distribueres sakte.

Effekt av diffusjonsmotstand til himling

Figur 3-17 viser at beregningstilfellet for himling med Sd-verdi 1m reduserer uttørkingen sammenlignet med Sd-verdi 0,2m. Dette tenkes som et resultat av en høyere diffusjonsmotstand ved himling hindrer uttørking ved innoverrettet diffusjonsgradient. Samtidig kan det fra Figur 3-18 observeres at muggindeksen på bakgrunn av lavere uttørking fører til noe høyere muggvekst.

Effekt av byggfukt

Figur 3-19 viser at konstruksjonen med 12% innebygget byggfukt vil øke fuktinnholdet, mens ved 15% vil ha stabile forhold. Begge tilfeller for byggfukt over 15% vil ha et uttørkingspotensiale. Figur 3-20 viser muggvekstindeksen for beregningstilfellene og viser at konstruksjon med 20% fuktinnhold vil ha svært høy muggindeks ettersom konstruksjonen lenge har gode vekstbetingelser som høy fuktighet. For fuktinnholdene 18-15-12% er vekstvilkårene lavere, og kun en

konstruksjon med fuktinnhold lavere enn 18% blir av VTT-modellen angitt som «vanligvis akseptert tilfelle».

Effekt av type smart dampsperre

Figur 3-21 viser at beregningstilfellet med SIGA Majrex sammenlignet med AirGuard Smart nesten ikke har uttørkingspotensiale. Samtidig viser Figur 3-22 at muggvekstindeks for dette tilfellet av den grunn også er høyere. Redusert uttørking og høyere muggvekst kan sees i sammenheng med at SIGA Majrex har høyere diffusjonsmotstand ved høy RF enn AirGuard Smart. Denne effekten vil føre til mindre uttørking ved sommerforhold. Samtidig vil den få økt oppfukning ved vinterforhold ettersom diffusjonsmotstanden da er lavere enn for AirGuard Smart.

Effekt av skyggeforhold

Figur 3-23 viser at beregningstilfelle med full skygge ikke har uttørkingspotensialet og i løpet av beregningsperioden er fuktendringen på om lag 0%. Vi observerer fra Figur 3-24 at denne reduserte uttørkingen medfører en svært stor økning i vurdert muggvekstpotensiale. Figuren viser at muggvekstpotensialet er nær 4.5 som er veldig nær maksimalverdien til muggindeksen på 5. Dette viser at solstråling på takoverflaten er den drivende faktoren for uttørking.

Effekt av klima

Figur 3-25 viser at Oslo har klart høyest uttørking sammenlignet med de andre sju analyserte klimaene og har i løpet av beregningsperioden reduksjon på om lag 30%. Kristiansund har i motsetning minst uttørking og reduserer fuktinnholdet med mindre enn 10%.

Figur 3-26 viser at muggvekstindeksen for beregningstilfellene og viser at Kristiansund har høyest muggvekstindeks med en maksimalverdi på 4.25, etterfulgt av Bergen med 3.37. Lavest har Karasjok etterfulgt av Røros. Beregningsvariantene for klimaene Kristiansund, Bergen og Trondheim havner alle over 3.0, som VTT-modellen vurderer som tilfeller som «vanligvis ikke aksepteres». Bergen får nest høyest vurdert muggvekst, samtidig som den har nest høyest uttørking.

Totalvurdering av fuktsikkerhet

Den oppdaterte parameterstudien viser at utvendig klima, og solstråling fortsatt er drivende faktorer for uttørkingspotensialet til konstruksjonen. Studien viser at maksimale skyggeforhold og høyt fukttilskudd medfører størst reduksjon i uttørkingspotensiale og samtidig mye høyere potensial for muggvekst.

For flere av beregningsvariantene ga muggvekstindeksen en indikasjon på at det enten kreves mer informasjon for å vurdere fuktsikkerheten, eller at tilfellet vanligvis ikke aksepteres. Tabell 3–10 viser en totaloversikt over total uttørking og muggindeks for beregningstilfellene 1-10. Fra tabellen er det fire beregningstilfeller som VTT-modellen vurderer som tilfredsstillende. Fire tilfeller vurderes til «vanligvis ikke akseptert» og to «krever flere undersøkelser». Tabell 3–11 viser oversikt over beregningstilfellene uten strålingsmodell. Vi observerer at uttørkingen for samtlige tilfeller reduseres ved bruk av stålingsmodellen. Samtidig vil flere av tilfellene ikke lenger vurderes som tilfredsstillende.

Tabell 3–10, Total uttørking og muggindeks for beregningstilfellene
 - beregnet med eksplisitt strålingsmodell

	Beregningsvariant									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Total uttørking [%]	-13%	+1,2%	-1.9%	-6,8%	-11%	-15%	+5%	-7%	-7%	-1.5%
Muggvekstindeks [-]	2.65	3.65	0.97	1.59	2.95	3.69	0.1	1.1	3.2	4.24

Tabell 3–11, Total uttørking og muggindeks for beregningstilfellene
 - beregnet uten eksplisitt strålingsmodell (Storaas, 2019)

	Beregningsvariant									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Total uttørking [%]	-25%	-17%	-10%	-18%	-22%	-28%	-7%	-17%	-16%	-10%
Muggvekstindeks [-]	1.65	2.33	0.59	1.20	2.11	2,73	0	0.59	2.5	3.82

Forstudien viste at det var en god korrelasjon mellom gjennomsnittstemperatur og muggvekst, og det forklartes med at ved mildere klima er det lengre perioder med gunstige temperaturer for muggvekst (Storaas, 2019). Tabell 3–12 viser muggvekstindeks for beregningsstedene sortert for synkende gjennomsnittstemperatur for beregning med strålingsmodell. Tabellen viser at for de to klimaene med høyest gjennomsnittstemperatur (Bergen og Kristiansund) har de to høyeste verdiene for muggvekst. Samtidig observeres det at de to med lavest temperatur (Karasjok og Røros) har noen av de laveste. Vi observerer også at Kristiansund har klart lavest uttørking av alle beregningstilfellene.

Tabell 3–13 viser oversikt over utendørs og innendørs verdier for RF ved beregningsklimaene og vi observerer at Kristiansund har den betydelig høyeste minimumsverdi for RF. Dette vil sannsynligvis føre til at SDS ved vinterforhold vil ha en mye lavere diffusjonsmotstand og derfor føre til en mye større oppfukting. En RF på om lag 47% vil føre til en Sd-verdi for SDS i underkant av 10m. Karasjok som har en minimums RF på om lag 26% har tilsvarende diffusjonsmotstand i overkant av 30m. En kombinasjon av fuktig vinterklima og mildere temperaturer anses som sannsynlig forklaring på at et Kristiansund-klima er kritisk.

Tabell 3–12, Muggindeks for beregningsstedene sortert etter synkende gjennomsnittstemperatur

Lokasjon	Total uttørking [%]	Muggvekstindeks [-]	Gjennomsnittstemperatur [°C]
Bergen	-18.7%	3.37	8.1
Kristiansund	-9.0%	4.25	7.7
Oslo	-29.8%	1.78	6.8
Trondheim	-15.7%	2.99	5.4
Mo I Rana	-17.6%	2.46	3.3
Tromsø	-13,1%	2.65	2.1
Røros	-14.4%	2.11	-0.9
Karasjok	-17.8%	1.61	-3.1

Tabell 3–13, Oversikt over relativ fuktighet for beregningsstedene
- fra WUFI-modellen

Lokasjon	Gjennomsnitt RF [%]	Maksimum RF [%]	Minimum RF [%]
	utendørs	innendørs	innendørs
Bergen	79	74.7	42.5
Kristiansund	86	72.2	46.6
Oslo	73	72.9	37.7
Trondheim	88	72.3	41.2
Mo I Rana	84	70.7	35.0
Tromsø	82	65.2	35.8
Røros	86	65.9	28.7
Karasjok	87	61.9	25.6

Sammenligning av HAM-modeller

Figur 3-27 viser total fuktinnhold for WUFI-beregning sammenlignet med DELPHIN-beregning for Oslo-klima. Av figuren fremgår det tydelig at modellene vurderer fukttransport for konstruksjonstilfellet noe ulikt. Vi observerer at DELPHIN-beregning for retningsuavhengig diffusjonsmotstand ligger nærmest WUFI-beregningen. Dette anses som fornuftig ettersom WUFI også beregner tilfellet med retningsuavhengig SDS. I løpet av beregningsperioden ser vi at DELPHIN for dette beregningstilfellet vurderer høyere uttørking ved sommerperiodene samtidig med høyere oppfukning i vinterperiodene. Dette kan være forårsaket av flere faktorer, som for eksempel vurdering av ute- og inneklime.

Dersom vi ser på DELPHIN – beregningen isolert sett ser vi at modellen vurderer at beregningen for retningsavhengig diffusjonsmotstand vurderer noe høyere uttørking. Av figuren fremgår det tydelig at både oppfukningen er lavere og uttørkingen høyere. Dette kan forklares av at diffusjonsmotstanden for RF mellom 15-85% ligger noe høyere ved diffusjonsretning utover i konstruksjonen sammenlignet med innover.

Prosessen med å sammenligne beregningsprogramvarene har svært tidkrevende og krevet en iterativ fremgangsmåte. Definisjon av materialdata og grensebetingelser i DELPHIN 5 har betydelige forskjeller sammenlignet med WUFI. På grunn av tidsmessige begrensninger mangler dette studiet fullverdige resultater. Ettersom sammenligningen ikke vurderes som fullstendig er det nødvendig flere undersøkelser og feilsøking for å bedre vurdere forskjellene til HAM-modellene.

Det antas at mindre forskjeller i materialdata (spesielt sorpsjonskurver) og klimatiske forhold kan utgjøre store utslag for en lengre beregningsperiode.

Usikkerhet

Det er knyttet en rekke usikkerheter til simuleringer i WUFI 2D. Ved dataauthenting fra modellen velges punkter ut ifra et definert rutenett. Ved ulik rutenettstørrelse vil plasseringen kunne variere fra modell til modell. Det er derfor viktig med kontinuitet i valg av analyseområde.

I simuleringer kan konvergensfeil oppstå, noe som kan føre til høye sprang i fuktinnhold. Mineralull i WUFI er basert på en standardmodell og gir en urealistisk sorpsjonskurve. Dette fører til at ved for høye verdier av RF vil modellen tillate kapillærkondensasjon i materialet. Dette er ikke realistisk for mineralull, men er nødvendig for å unngå numeriske problemer (Sletfjerding, 2019). Sorpsjonskurven fører da til at det totale fuktinnholdet i modellen vil være noe høyere. Sletfjerding kalkulerte at 4% av totalfukt i standardmodellen er fra mineralull, og den øker til 5.5% for 18% fuktinnhold i taktro og dette kan føre til økt muggvekstpotensial. For tilfeller med toppisolasjon vil standardisert sorpsjonskurve også føre til fukttransport fra taktro til isolasjonen på oversiden (Sletfjerding, 2019).

I modellen er det antatt at ved forsegling av konstruksjonen er bygget allerede innflyttet og påvirkes varme og fukttilskudd. I realiteten forsegles konstruksjonen med fuktbestandig

takmembran for å hindre vann i å lekke inn i konstruksjonen samtidig som man legger til rette for uttørking før installasjon av isolasjon og dampsperre.

Materialeegenskaper varierer fra produsent til produsent og kan variere for eksempel basert på fukthistorikk (Sletfjerding, 2019). Det er viktig å understreke at simuleringsresultatene kan variere på grunn av feil i antatt materialeegenskaper, og det er nødvendig å undersøke materialene hver for seg. I praksis er flere av årsakene til fuktproblematikk i bygninger at utførelsen har vært utilstrekkelig, og det er ikke vurdert i denne studien.

4 Feltundersøkelser

4.1 Generelt

Tre pilotprosjekter ledet av SFI Klima 2050 utstyrt med smart dampspærre er undersøkt. Pilotprosjektene har ulike klima, konstruksjonsoppbygging og materialer. Et pilotprosjekt er ofte en unik måte å øke kunnskap om nyutviklede løsninger og materialer.

4.2 Metode

Prosjektene er utstyrt med måleutstyr for å kontinuerlig måle fuktinnhold i konstruksjonene. Måleutstyret består av ulike sensorer levert av OmniSense, som måler fuktinnhold og temperatur på ulike måter. Utstyret som er brukt i prosjektene er gitt i Tabell 4–1.

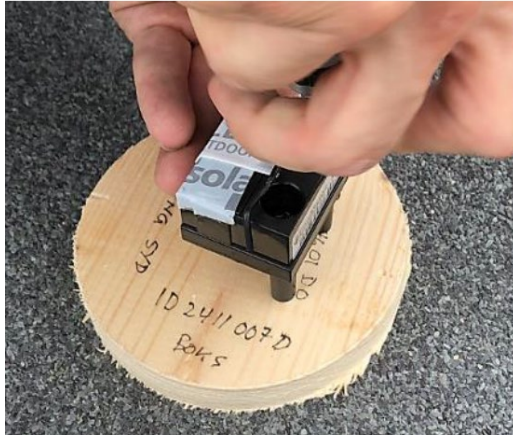
Instrumentene er trådløse og kommuniserer med en gateway i bygningen som registrerer og samler måledataene. Sensorene måler temperatur, relativ fuktighet og trefukt-ekvivalenter (Wood Moisture Equivalent, %WME). %WME er fuktinnholdet i vektprosent for et spesifikt tremateriale som sensorene er kalibrert etter. OmniSense sensorene er originalt kalibrert etter materialet Douglasgran (Omnisense, 2020).

Den vanligste formen for fuktregistrering er måling av elektrisk motstand i materialer. Elektrisk motstandsmetode gjennomføres ved at to elektroder blir plassert inn i et materiale og den elektriske motstanden blir målt. Temperatur i materialet spiller en viktig rolle for måling av elektrisk motstand, ved at elektrisk motstand i et materiale avtar ved økt temperatur. Flere sensorer har innebygget temperaturmåler som tar hensyn til denne effekten ved direkte kalibrering. Omnisense sine sensorer har denne funksjonen. Sensorene brukt i denne studien er alle isolerte og muliggjør målinger ved forskjellige dybder som beskrevet i 2.3.

Tabell 4–1, Sensorer benyttet i prosjektene, levert av Omnisense (Omnisense, 2020)

Utstyr	Beskrivelse
G-3 Trådløs dataloggings-Gateway	Et modem som kommuniserer med ulike sensorer og logger sensordata fra ulike sensorer. Dataene blir videresendt via internett til en server utenfor bygningen.
S-16 sensor	Trådløs fuktsensor som logger omgivende temperatur, relativ fuktighet og fuktinnhold (oppgitt i %WME). Målenøyaktighet: $\pm 0.3^{\circ}\text{C} / \pm 2.0\% \text{RF}$.
S-2 sensor	Trådløs dataloggingssensor med mulighet for logging av fuktinnhold (%WME) samt temperatur og RF.
A-1 HumiSense Temperature and Humidity probe	RF og temperaturmåler for S-2 sensor. Målenøyaktighet: $\pm 0.3^{\circ}\text{C} / \pm 2.0\% \text{RF}$.
A-2 Sensorkabel	Kabel med to elektroder for montering i trevirke. Kobles til S-2 sensor for måling av fuktinnhold (%WME).

S-16 sensoren er den mest benyttede sensoren i pilotprosjektene. Dette er fordi den gir god informasjon om både fuktinnhold i trevirket samt informasjon om temperatur og RF rundt målområdet. Den er trådløs og har god batteritid, noe som gjør at den kan logge og videresende informasjon til gateway kontinuerlig. Figur 4-1 viser sensoren og måten den monteres.



a) Montert i taktropørve
(Gullbrekken og Kvande, 2018)



b) (OmniSense, 2020)

Figur 4-1, S – 16 sensor som er installert i pilotprosjektene

4.2.1 Håndtering av måledata

Måleinstrumentene er avhengig av kalibrering til riktig tresort for å gi gjeldende fuktighet i vektprosent direkte. OmniSense sensorenes måleområde er begrenset til fuktighetsintervallet 8 til 28 vektprosent for materialet douglasgran. Utenfor dette gitte intervallet er usikkerheten rundt målingene betydelige. Ved sammenligning med kritisk fuktnivå skal det ikke tas hensyn til måleusikkerhet, og avlest verdi skal sammenlignes direkte med kravet (Standard Norge, 2014).

For omgjøring av fuktinnhold fra douglasgran til norsk gran er det utviklet en korreksjonsformel, gitt i ligning (4-1).

$$\begin{aligned} \%fuktinnhold_{gran} &= -0.504256 + 1.1386808 * \%fuktinnhold_{furu} + 0.0111586 \\ &* (\%fuktinnhold_{furu} - 16.5)^2 - 0.0010783 * (\%fuktinnhold_{furu} - 16.5)^3 \end{aligned}$$

(4-1)

For omgjøring av fuktinnhold fra douglasgran til LVL (Laminated Veneer Lumber) er det utviklet en korreksjonsmodell gitt i ligning (4-2) og (4-3). Utarbeidelse av denne korreksjonsformelen er beskrevet i Vedlegg A: *Korreksjonsmodell for LVL*. Formel (4-2) er gyldig for målt fuktinnhold mindre enn 27 vektprosent, mens formel (4-3) gyldig for motstandsmålinger større enn 27 vektprosent.

$$\begin{aligned} \%fuktinnhold_{LVL} = & -0,000331936413090 * \%fuktinnhold_{furu}^4 + \\ & 0,024357114004970 * \%fuktinnhold_{furu}^3 - 0,629437544345025 * \\ & \%fuktinnhold_{furu}^2 + 7,417515405146700 * \%fuktinnhold_{furu} - 21,456826896834200 \end{aligned}$$

(4-2)

$$\%fuktinnhold_{LVL} = 0.8609 * \%fuktinnhold_{furu} - 0.2781$$

(4-3)

Usikkerhet for måling med fuktloggerne varierer avhengig av fuktinnholdet er gitt av (4-4). Formelen viser at usikkerheten øker med økende fuktinnhold.

$$\pm usikkerhet = 0.1 * \%fuktinnhold$$

(4-4)

Produsenten av måleinstrumentene har definert en nedre grense på 7 vektprosent for motstandsmåling. For norsk gran tilsvarer denne verdien 9,4%, og alle målinger under 9,4% vil registreres som 9,4%. I denne studien vil denne nedre grensen omtales som «Cut-off»-linjen.

4.2.2 Prosjektdokumentasjon

De tre pilotprosjektene som undersøkes er listet nedenfor, samt illustrert geografisk i Figur 4-2.

- Sveberg (Malvik kommune)
- Borgen Vest (Ullensaker kommune)
- Lund Vest (Spydeberg kommune)



Figur 4-2, Geografisk oversikt over pilotprosjektene (Norgeskart)

Prosjektene har til felles at taket er bygget som et kompakt tretak med smart dampsperre. Ulike klima, oppbygging og materialer er forskjeller som er interessante å undersøke effekten av. Tabell 4-2 gir en bedre oversikt over de ulike karakteristikene til pilotene.

Tabell 4–2: Karakteristikk for tre pilotprosjekt

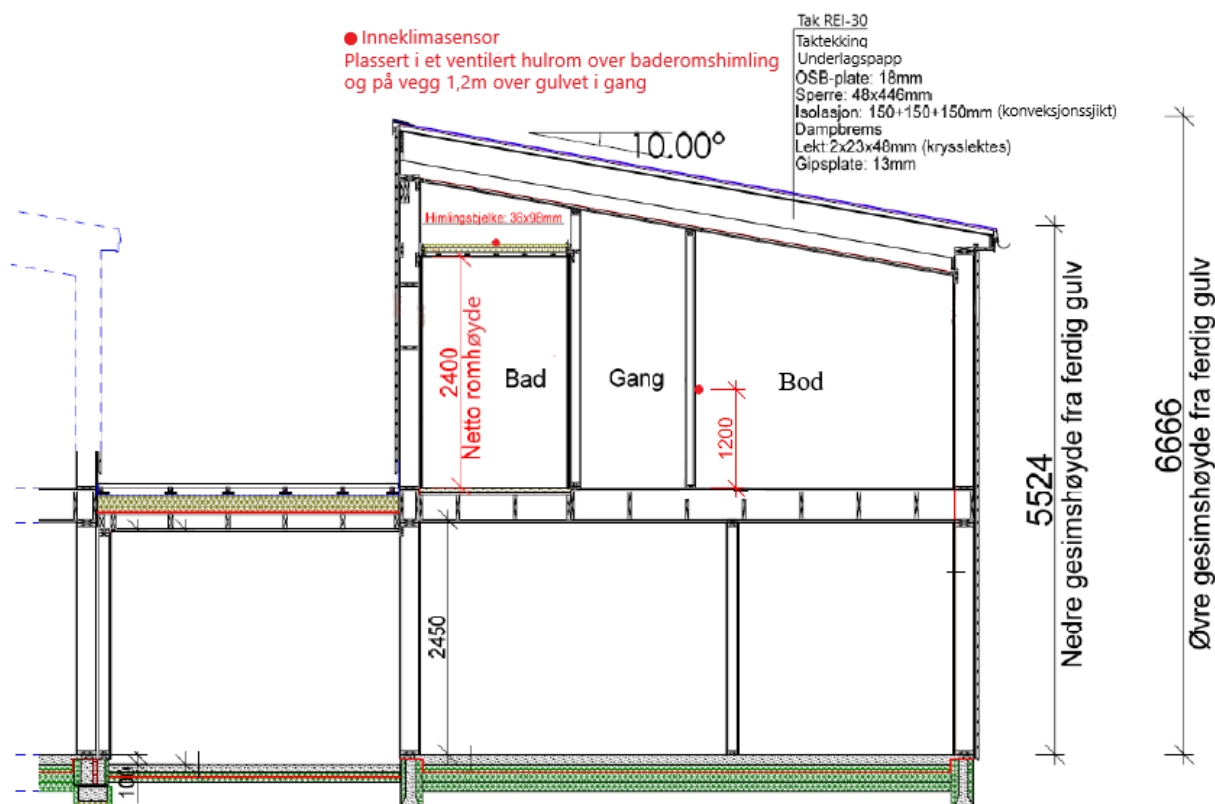
Karakteristikk	Lund Vest	Sveberg	Borgen Vest
Klima	I skillet mellom maritimt temperert og kontinentalt	I skillet mellom maritimt temperert og kontinentalt	Kontinentalt klima
Breddegrad	59° nord	63° nord	60° nord
Hustype	Kjedet enebolig	Kjedet enebolig	Frittstående enebolig
Antall etasjer	3	3	2
Trebjelkelag	Solid trebjelke 48x446mm med mineralull-isolasjon	Hunton I-bjelke med 350mm mineralull-isolasjon	Gitterdrager av tre, med Hunton® innblåst trefiberisolasjon. 600mm (maks) ved parapet og 405 ved nedløp (min)
Bjelkelagsretning	Bjelkelag montert med takfallet	Flatt trebjelkelag	Flatt trebjelkelag.
Taktro	18mm OSB plate	18mm OSB plate	18mm Kryssfiner
Takfall	Ingen takfallisolasjon. Bjelkelag installert med 10° helning	Takfallisolasjon på taktro	Ingen takfallisolasjon. Takfall prefabrikkert i takkonstruksjon ved gitterdrager
Taktekning	Svart tolags asfalttekning	Svart tolags asfalttekning	Midlertidig tekking fra produksjon i form av asfaltbasert diffusjonstett underlagsbelegg (Iso-D Xtra), deretter ett-lags takbelegg (Isola Mestertrekk) etter montering
Takhelning	Bjelker installert med 10° helning	Flatt trebjelkelag	Trebjelkelag med takfall ved gitterdrager
Dampsperre i himling	AirGuard® Smart2	AirGuard® Smart2	AirGuard® Smart Gen.1 og Gen.2
Himling	2x23mm luftlag og 13mm gipsplate	48mm luftlag og 12mm himlingsplate	48mm luftlag med 13mm gips og dampåpen maling

Karakteristikk	Lund Vest	Sveberg	Borgen Vest
Taknedløp	Utvendig nedløp	Innvendig nedløp med takfall til sluk	Innvendig nedløp med takfall til sluk
Utforming av randsone	Uttørkingsmulighet via parapet	En viss uttørring via parapet mulig, men begrenset av kryssfiner kantbjelke	Begrenset uttørring via parapet på grunn av kryssfiner kantbjelke og utvendig dampåpen vindsperre
Ventilasjon	Balansert ventilasjon	Balansert ventilasjon	Balansert ventilasjon
Byggemetode for tak	Prefabrikkert	Plassbygget	Prefabrikkert

Lund Vest

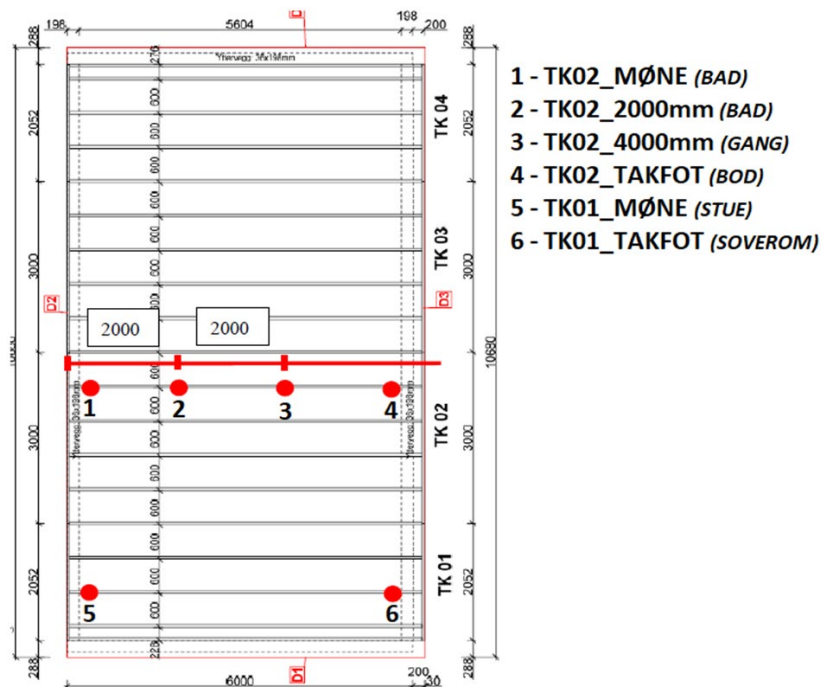
Pilotprosjektet er lokalisert i Lund Vest i Spydeberg kommune i Norge og er bygget av Bakke bygg. Piloten består av prefabrikkerte elementer for vegger, gulv og tak. Bygget er en toetasjes kjedet enebolig med skrått tak med 10° helning mot sør-øst.

Før transport til byggeplass er elementene beskyttet mot nedbør. Figur 4-3 viser tverrsnittet til Lund Vest, og markert i rødt er plassering av inneklimasensorer. Det er montert to inneklimatemperaturmålere på prosjektet. En er lokalisert i et ventilert hulrom over baderommet og en på vegg 1,2m over gulvet i bod, som vist i Figur 4-3.



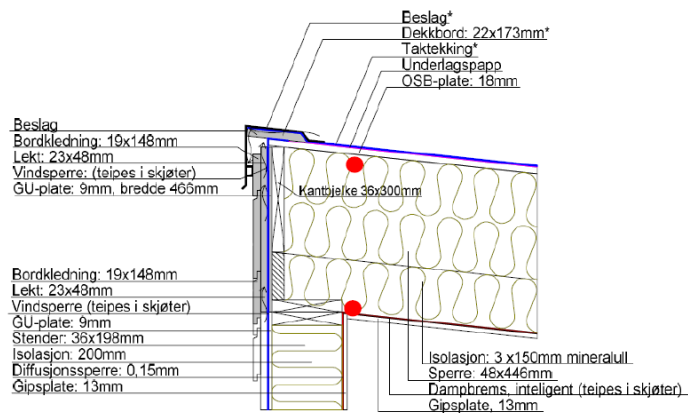
Figur 4-3, Tverrsnitt av Lund Vest (Gullbrekken og Elvebakk, 2018)

I prosjektet er det installert totalt 15 sensorer hvorav 12 er fuktloggere i takkonstruksjonen og 3 er klimaloggere. Av klimaloggerne er to innendørs og en for utvendig klima. Plassering av klimaloggerne i takkonstruksjonen er angitt i Figur 4-4.

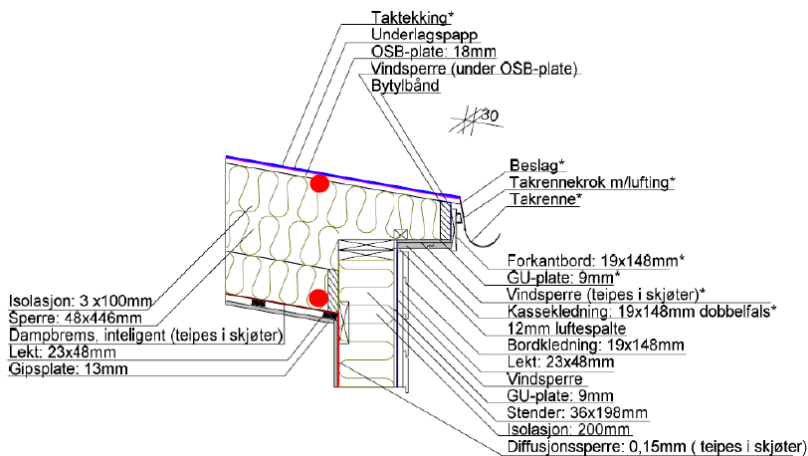


**Figur 4-4, Oversikt over plassering av fuktloggere for takkonstruksjonen ved Lund Vest
(Gullbrekken og Elvebakk, 2018)**

Figur 4-5 og Figur 4-6 angir plassering av trefuktloggere ved tilslutning mot yttervegg for henholdsvis møne og takfot.



Figur 4-5, Tverrsnitt av tak - tilslutning yttervegg/møne
Røde punkter angir plassering av trefuktløggere
(Gullbrekken og Elvebakk, 2018)

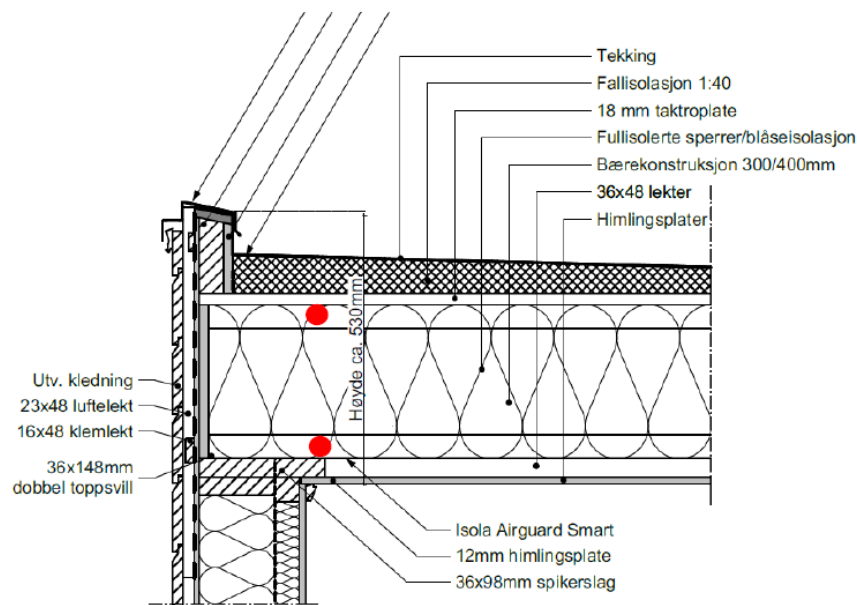


Figur 4-6, Tverrsnitt av tak - tilslutning yttervegg/takfot
Røde punkter angir plassering av trefuktløggere
(Gullbrekken og Elvebakk, 2018)

Første måledata fra prosjektet er fra 12. Juni 2018. Bygget ble ferdigstilt og var klar for innflytting 18. Desember 2018.

Sveberg

Pilotprosjektet er lokalisert i Sveabakken 13 i Malvik kommune. Bygget er utført som en treetasjes kjedet enebolig med kompakt flatt tretak. Takfall mot innvendig nedløp bygges opp ved bruk av fallisolasjon over taktroplaten som vist i Figur 4-7.



Figur 4-7, Oppbygging av takkonstruksjon ved Sveberg (Gullbrekken og Kvande, 2018)

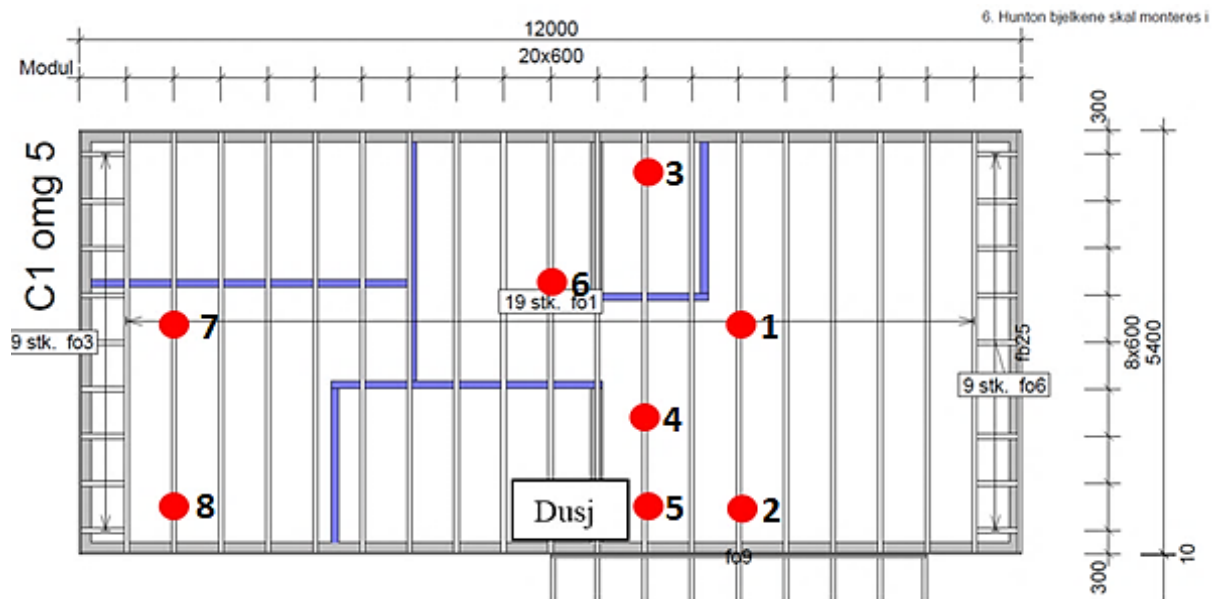
Takkonstruksjonen er bygget opp av I-bjelkeprofiler levert av Hunton, som illustrert i Figur 4-8. Hunton I-Bjelken™ anbefales installert med moderat fuktinnhold. Bjelkene bør installeres med et fuktinnhold nær det som oppnås ved driftsituasjon (British Board of Agrément., 2017). I-bjelker anses som gunstig på grunn av redusert andel trevirke og dermed mindre byggfukt sammenlignet med konstruksjonsvirke.

Bjelkelaget har en høyde på 350mm med isolasjon mellom bjelkene. Skråskjæret isolasjon har en maksimumtykkelse på 100mm ved takfot.

Prosjektet skiller seg fra de andre, ved at det er plassbygget.

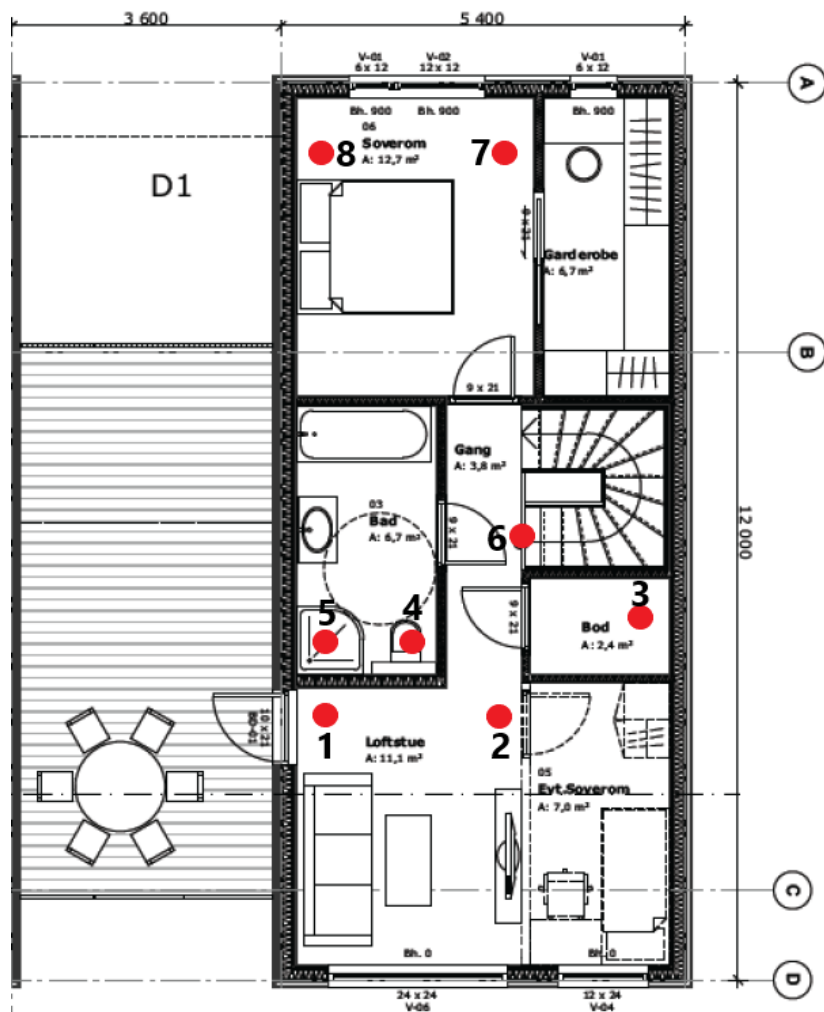


Figur 4-8, Hunton I-profil bjelke (Hunton)



Figur 4-9, Oversikt over plassering av trefuktloggere ved Sveberg (Gullbrekken og Kvande, 2018)

Piloten har totalt 16 sensorer, hvorav 14 er fuktloggere i takkonstruksjonen. To sensorer er tilknyttet åpning av taket i juli 2019. Planløsning og omtrentlig plassering av fuktloggere i takkonstruksjonen er vist i Figur 4-10.



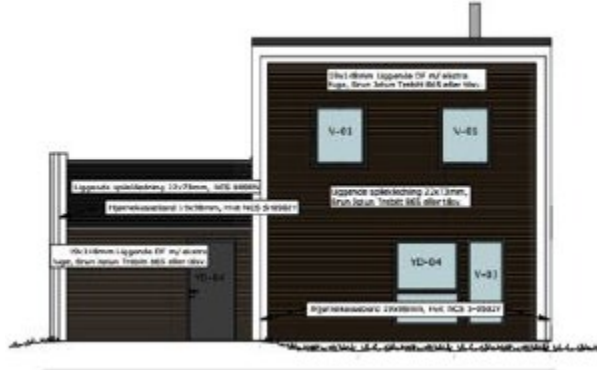
**Figur 4-10, Planløsning for prosjektet ved Sveberg
- omtrentlig fuktloggerplassering er markert i rødt
(Gullbrekken og Kvande, 2018)**

Åpning av taket

11. Juni 2019 ble det tatt ut to prøver av taktro i kritiske områder. Deretter ble det satt inn to prøver av gran med tilkoblet fuktlogger. Taktroprøvene av OSB som ble tatt ut ble oversendt SINTEF for analyse.

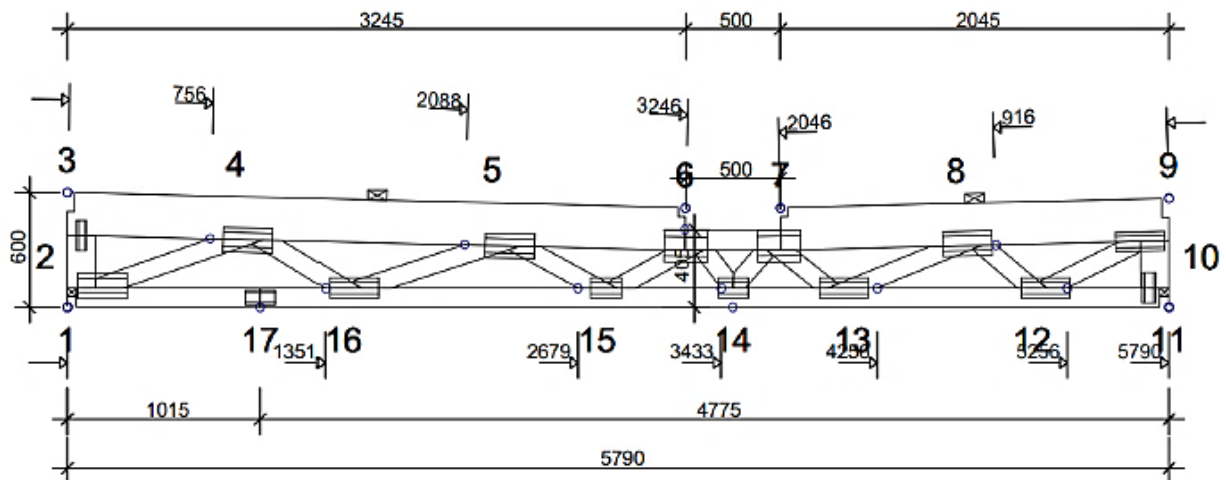
Borgen Vest

Pilotprosjektet er lokalisert ved Borgen Vest i Ullensaker kommune. Prosjektet er utført som en toetasjes frittstående enebolig, som illustrert i Figur 4-11.



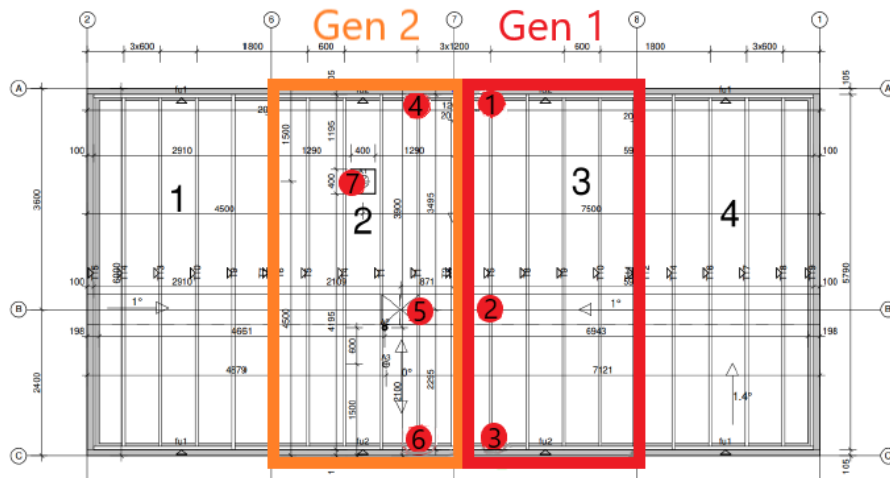
Figur 4-11, Fasade nr.1 for prosjektet ved Borgen Vest (Clementz og Young, 2019)

Takkonstruksjonen er utført med bjelkelag med gitterdragere. Takfall mot innvendig nedløp er konstruert ved gitterdragerbjelkene som illustrert i Figur 4-12. Ved tilslutning med yttervegg har bjelkehøyden sitt maksimum med høyde 600mm. Ved innvendig nedløp har konstruksjonen tilsvarende sitt minimum med høyde 405mm.



Figur 4-12, Takkonstruksjon med bjelker utført med gitterdrager (Clementz og Young, 2019)

Takkonstruksjonen er prefabrikkert ved fire takelementer. Hunton innblåst trefiberisolasjon er brukt i prosjektet og det er benyttet to forskjellige SDS. For to av elementene er det benyttet AirGuard Smart generasjon 1 og tilsvarende to med generasjon 2. Det er installert totalt 17 sensorer i prosjektet, hvorav 13 er fuktloggere i takkonstruksjonen som vist i Figur 4-13. Resterende 4 sensorer er tilknyttet åpning av taket 7. Juni 2019.



Figur 4-13, Oversikt over plassering av trefuktloggere og takelementer (Clementz og Young, 2019)

Åpning av taket

7. Juni 2019 ble det tatt ut to prøver av taktro hvorav en var på sørside og en på nordside av taket som vist i Figur 4-14. Som for Sveberg-prosjektet ble det også her erstattet taktro av gran med påmontert fuktlogger. Mellom tekking og kryssfiner ble det også installert en RF og temperaturmåler. I tillegg ble det skrudd inn to skruer på underside av taktro for måling av fuktinnhold i taktro.



Figur 4-14, Uttak av taktroprøve ved sør- og nordside (Clementz og Young, 2019)

4.2.3 WUFI modell

Materialeegenskaper i WUFI modellen er basert på materialdata fra pilotprosjektene og er gitt i Tabell 4–3. Tilleggsdata for modellen er gitt av Tabell 4–4. Pilotprosjektene er alle bygget på forskjellige tidspunkter og beregningsperioden som er valgt er perioden fra bygningen er klar til innflytting til siste registrerte måledata.

Startbetingelsene er bestemt av måledata for pilotprosjektene ved beregningsstart og er gitt av Tabell 4–5. Starttemperatur for konstruksjonene er satt til 20°C. Temperaturen antas å justere seg raskt i forhold til klimafilen ved beregningsstart.

Tabell 4–3, Materialdata

Material	Materialnavn i WUFI	Vanndampdiffusjonsmotstandstall [-]
Taktro		
Kryssfinér	Plywood high ¹	383-42 (20-70%RF)
OSB-plate	Oriented Strand Board ² (densitet 595kg/m ²)	61-95-814 (30-80-100%RF)
Bjelke		
Konstruksjonsvirke	Scandinavian Spruce transverse direction ³	108-27 (30-70%RF)
Kerto I-flens (LVL)	Laminated Veneer Lumber ²	156
Kerto I-steg (trefiberplate)	Woodfibre board, hard ³	48
Isolasjon		
Mineralull	Mineral wool ²	1.3
Trefiberisolasjon	Pavaflex ²	1.35-1.58 (0-100%RF)
Smart dampsperre		
Isola Du Pont™ AirGuard Smart	Intello ⁴	100000-200 (0-100%RF)
Himling		
Gipsplate	Gypsum board ⁵	8.3

¹ North America Database

² Fraunhofer - IBP – Holzkirchen, Tyskland

³ NTNU – Norwegian University og Science and Technology

⁴ Fraunhofer – IBP – Holzkirchen, Tyskland, med brukerdefinert diffusjonsmotstand ifølge SINTEF sertifisering (SINTEF Certification, 2019)

⁵ Lund, Sverige

Tabell 4–4, Tilleggsdata for WUFI modell

	Koeffisienter	Enhet	Verdi	Kommentar
Utvendig	Varmeovergangskoeffisient	$[W/m^2K]$	25	Tak
	S_d - verdi	[m]	300	Bituminøs filt med PVC
	Kortbølget strålingsabsorpsjon	[-]	0.7	Brukerdefinert
	Langbølget strålingsabsorpsjon	[-]	0.9	Standard
	Vedvarende andel av regn	[-]	-	Ingen adsorpsjon - ettersom oppbyggingen til takkonstruksjonen ikke inkluderer tekking.
Innvendig	Varmeovergangskoeffisient	$[W/m^2K]$	8	Innvendig overflate
	S_d – verdi	[m]	1	Gipsplate og dampåpen maling

Tabell 4–5, Startbetingelser

Materialer i WUFI	RF [%]	Vanninnhold [kg/m^3]	T[°C]
Lund Vest			
Taktro	63	79 (13 vektprosent)	20
Bjelke (topp)	62	43 (11 vektprosent)	20
Bjelke (bunn)	57	39 (10 vektprosent)	20
Mineralull	50	0.5	20
Gipsplate	50	4	20
Sveberg			
LVL flens – topp	93	103 (22 vektprosent)	20
LVL flens – bunn	61	61 (13 vektprosent)	20
Trefibersteg – topp	80	91 (11 vektprosent)	20
Trefibersteg – bunn	70	79 (10 vektprosent)	20
Mineralull skråskjært	90	4	20
Mineralull flenstopp	90	4	20
Mineralull flensbunn	60	1	20
Mineralull midt	80	2	20
Gipsplate	70	5	20
Borgen Vest			
Taktro	80	82 (14 vektprosent)	20
Bjelke (topp)	70	49 (13 vektprosent)	20
Bjelke (midt)	63	43 (11 vektprosent)	20
Bjelke (bunn)	61	43 (11 vektprosent)	20
Trefiberisolasjon	70	6 (11 vektprosent)	20
Gipsplate	8	5	20

Klima

For å kunne simulere reelle forhold i WUFI vil reelle klimadata fra prosjektene være viktig å ta hensyn til. Lund Vest har som nevnt i 4.2.2, sensor for måling av utendørs klima, men denne kan ikke benyttes direkte i WUFI ettersom den ikke tar hensyn til stråling. Av den grunn er en KLI-fil basert på reelle målinger utviklet. Dette gjøres ved å finne en korrelasjon for temperatur 1cm under taktro og temperatur på overflaten. Fra denne korrelasjonen kan en estimere overflatetemperaturen for det aktuelle prosjektet.

Utledning av temperaturkorrelasjon er beskrevet nærmere i Vedlegg B: *Temperaturkorrelasjon*. KLI-filen som importeres i WUFI henter inn sju ulike parametere som beskrevet i Tabell 4–6 (WUFI, 2008b).

Inneklima er en viktig parameter for å undersøke konstruksjoner utstyrt med SDS ettersom vanddamppermeabiliteten er sterkt avhengig av relativ fuktighet som tidligere nevnt i 2.5. For pilotprosjektene er det kun Lund Vest som har tilstrekkelig måling av inneklima.

Tabell 4–6, KLI-parametere for prosjektene

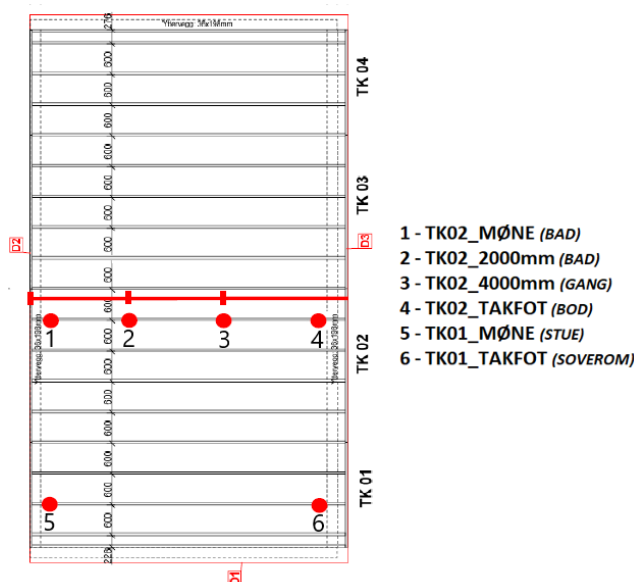
Parameter	Lund Vest	Sveberg	Borgen Vest
Tid [t]	1 år - 8760 timer	6 mnd – 4533 timer	4 mnd - 2788 timer
Regn [Ltr/m^2t]	Inkluderes ikke – WUFI-modellen antar null adsorbent regn.	Inkluderes ikke – WUFI-modellen antar null adsorbent regn.	Inkluderes ikke – WUFI-modellen antar null adsorbent regn.
Stråling [W/m^2]	Inkluderes i utendørs temperatur.	Inkluderes i utendørs temperatur.	Inkluderes i utendørs temperatur.
Utendørs temperatur [°C]	Korrigert temperatur fra måledata nær taktro inkluderes.	Korrigert temperatur fra måledata nær taktro inkluderes.	Korrigert temperatur fra måledata nær taktro inkluderes.
Utendørs RF [-] (0...1)	Hentes direkte fra reelle målinger ved.	Hentes fra klimafil fra Værnes.	Hentes fra klimafil fra Oslo.
Innendørs temperatur [°C]	Hentes direkte fra måledata.	Simuleres ved hjelp av standard inneklimamodeller (ISO13788).	Simuleres ved hjelp av standard inneklimamodeller (ISO13788).
Innendørs RF [-] (0...1)	Hentes direkte fra måledata.	Simuleres ved hjelp av standard inneklimamodeller (ISO13788).	Simuleres ved hjelp av standard inneklimamodeller (ISO13788).

4.3 Resultater

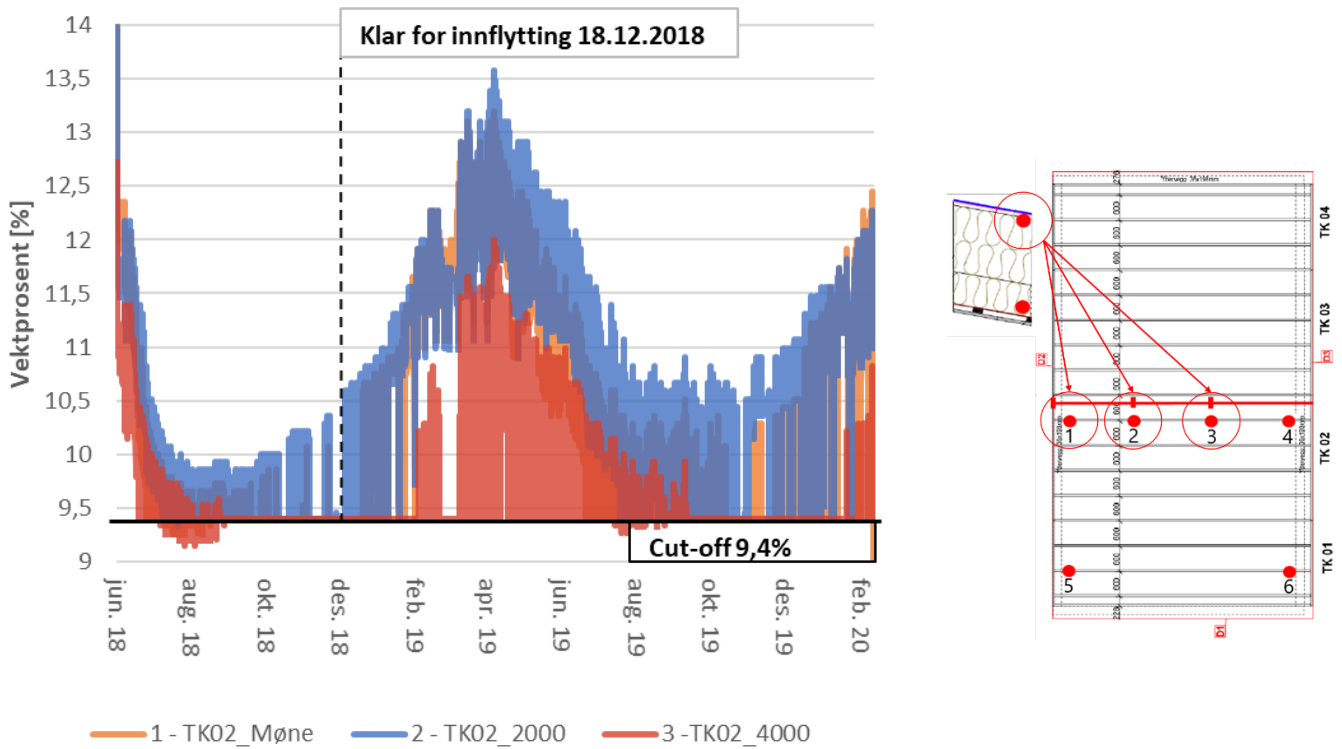
Resultatene fra pilotprosjektene er presentert grafisk, med utgangspunkt i datasett fra Omnisense™ - serveren, WUFI programvaren samt datasett generert fra VTT-modell. For flere av sensorene er forskjellene på måledataene svært små. Av den grunn er kun de mest interessante og kritiske dataene er presentert her og resterende data er presentert i Vedlegg D: *Pilotprosjekter*.

4.3.1 Lund Vest

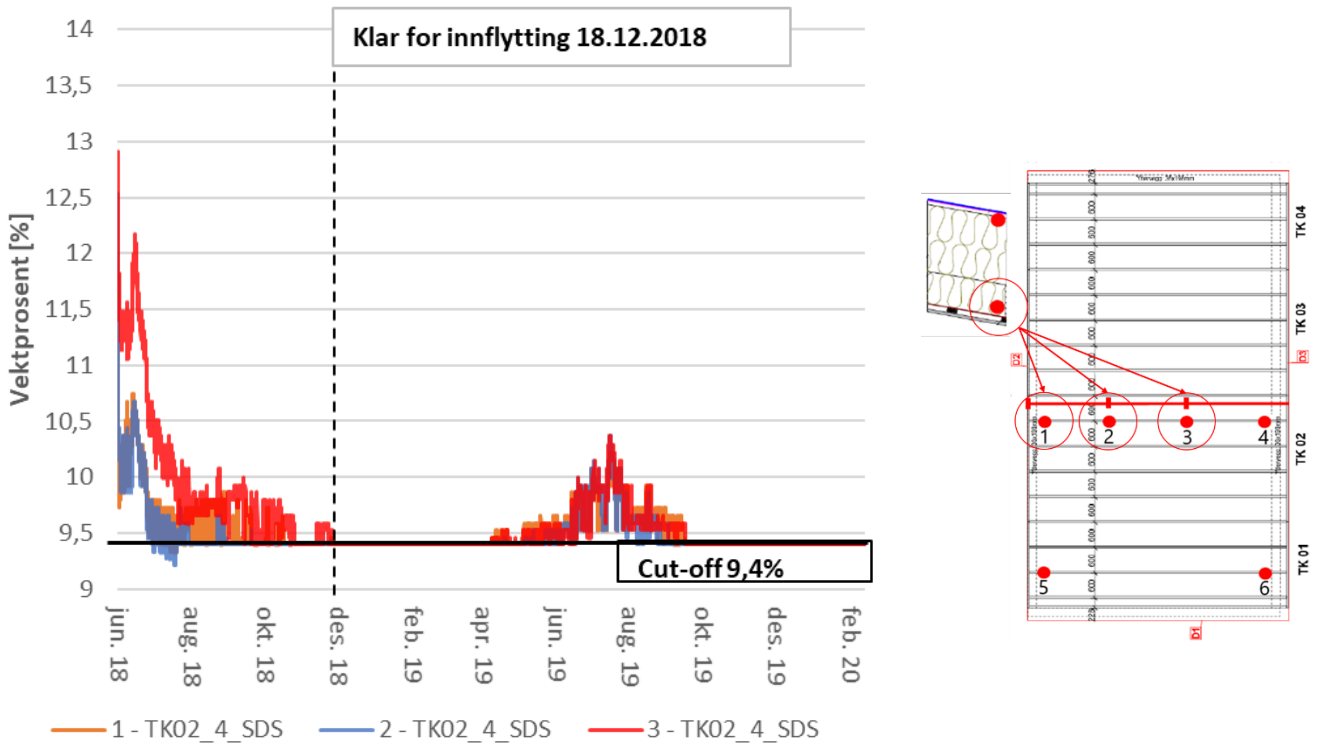
Måledata fra Lund Vest piloten er presentert ved de mest interessante og kritiske dataene fra prosjektet. Piloten var klar for innflytting 18. Desember 2018, og dette punktet er markert i relevante diagrammer. Figur 4-15 viser sensorplasseringene for Lund Vest. Figur 4-16 og Figur 4-17 viser henholdsvis fuktinnhold i målepunktene 1-3, målt 1cm under taktro og 1cm over SDS. Merk at innendørsklima for badet er målt i luftrommet over himlingsplate, og for bod på veggen 1,2m over gulvet. Måleintervallet til sensorene er begrenset til minimum 9,4 vektprosent, og denne nedre grensen er markert i relevante diagrammer og betegnes som «cut-off»-linjen for måledataene. Figur 4-18 viser fuktinnhold fra sensor 4-6 målt 1cm fra taktro og SDS. Figur 4-19 viser temperatur og relativ fuktighet for sensor 2, målt 1cm fra taktro og er presentert som det høyeste fuktbelastede målepunktet for T-RF ved prosjektet. Merk at alle RF-T målinger angir relativ fuktighet og temperatur målt i sensorboksen. Det medfører at denne verdien i praksis er målt rett utenfor trevirket som er lokalisert i isolasjonen. Tabell 4-7 og Tabell 4-8 presenterer gjennomsnittsverdier for temperatur og RF målt 1cm fra taktro for henholdsvis sensor 1-3 og 4-6.



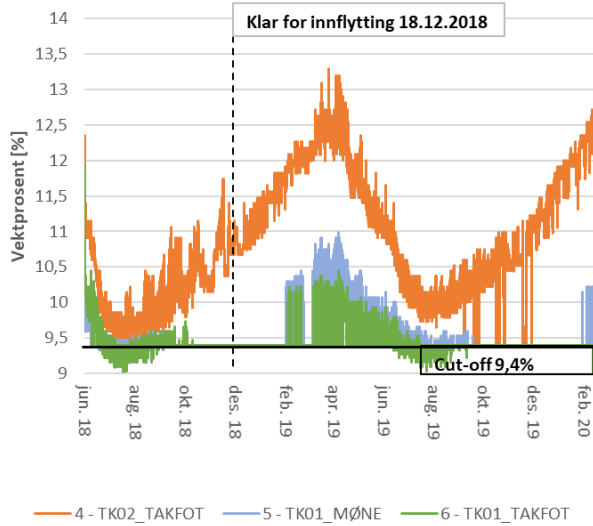
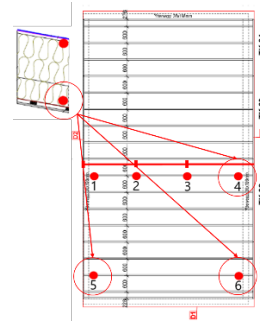
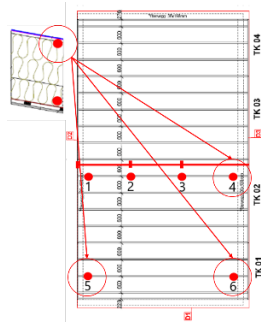
Figur 4-15, Sensorplassering for Lund Vest



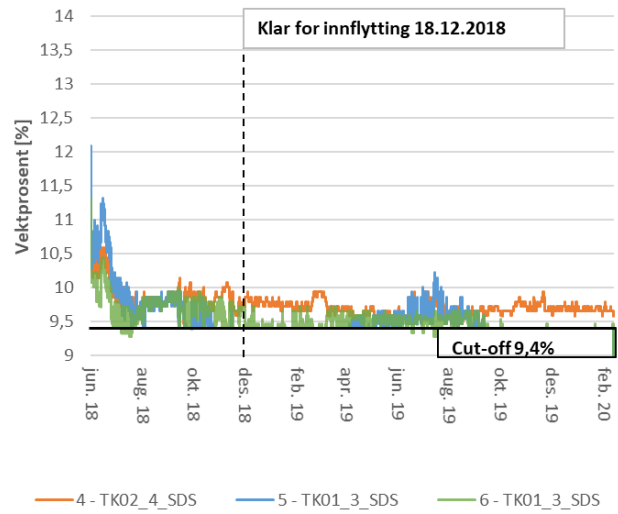
Figur 4-16, Måledata for sensor 1-3 i bjelke, målt 1cm fra taktro



Figur 4-17, Måledata for sensor 1-3 i bjelke, 1cm fra SDS

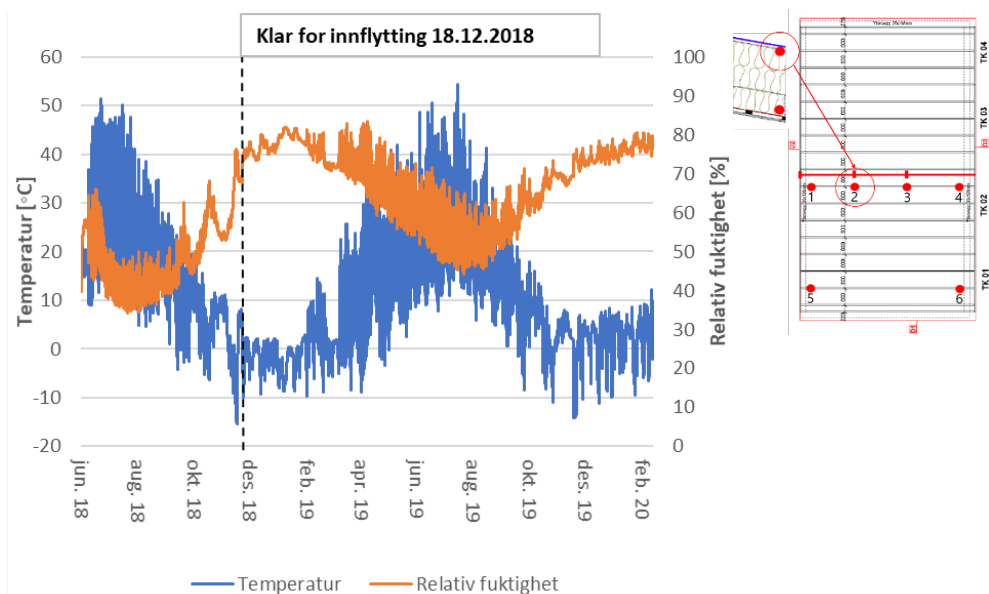


a) Målt 1 cm fra taktro



b) Målt 1 cm fra SDS

Figur 4-18, Måledata for sensor 4-6 i bjelke



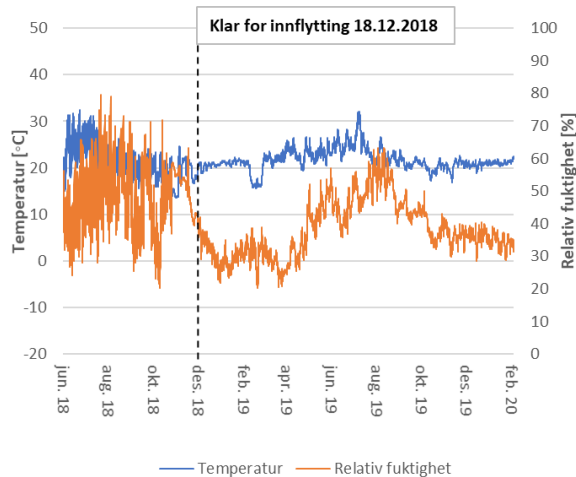
Figur 4-19, Temperatur og RF for sensor 2, 1cm fra taktro

Tabell 4-7, Gjennomsnittlig temperatur og RF for sensor 1-3
- målt i isolasjon 1cm under taktro

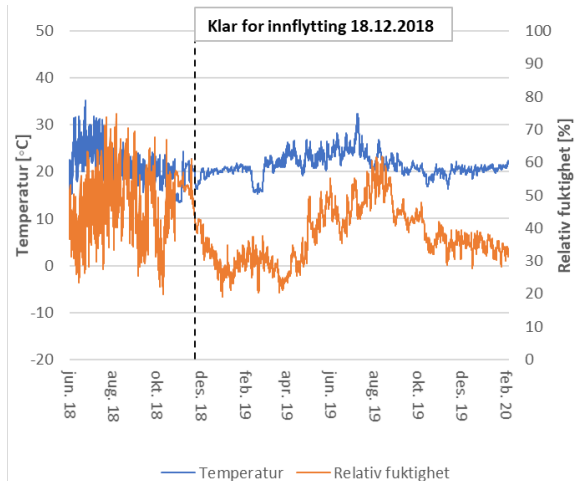
	1 - TK02_MØNE	2 - TK02_2000mm	3 - TK02_4000mm
Gjennomsnittlig temperatur [°C]	10,2	10,8	10,7
Gjennomsnittlig RF [%]	65,3	63,2	60,6

Tabell 4-8, Gjennomsnittlig temperatur og RF for sensor 4-6
- målt i isolasjon 1cm under taktro

	4 - T02_TAKFOT	5 - T01_MØNE	6 - T01_TAKFOT
Gjennomsnittlig temperatur [°C]	9,99	10,3	10,2
Gjennomsnittlig RF [%]	66,1	60,1	55,5

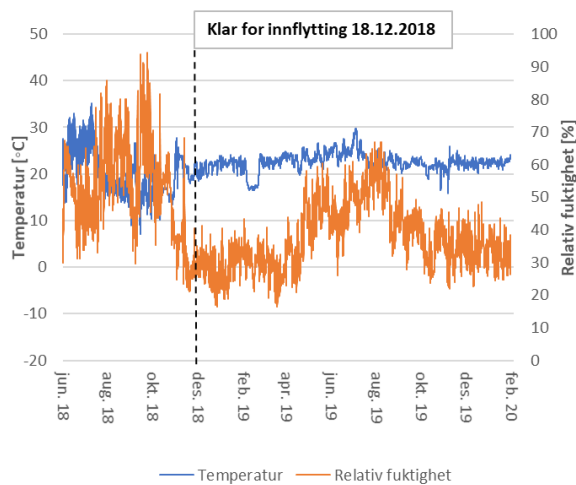


a) Måledata sensor 1

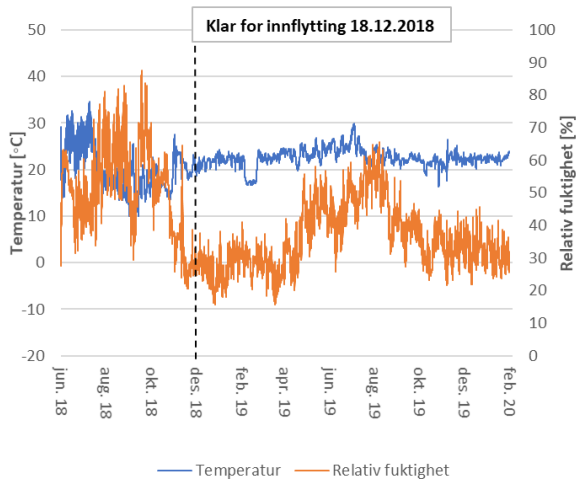


b) Måledata sensor 2

Figur 4-20, Målt innendørsklima for baderom



a) Måledata sensor 1



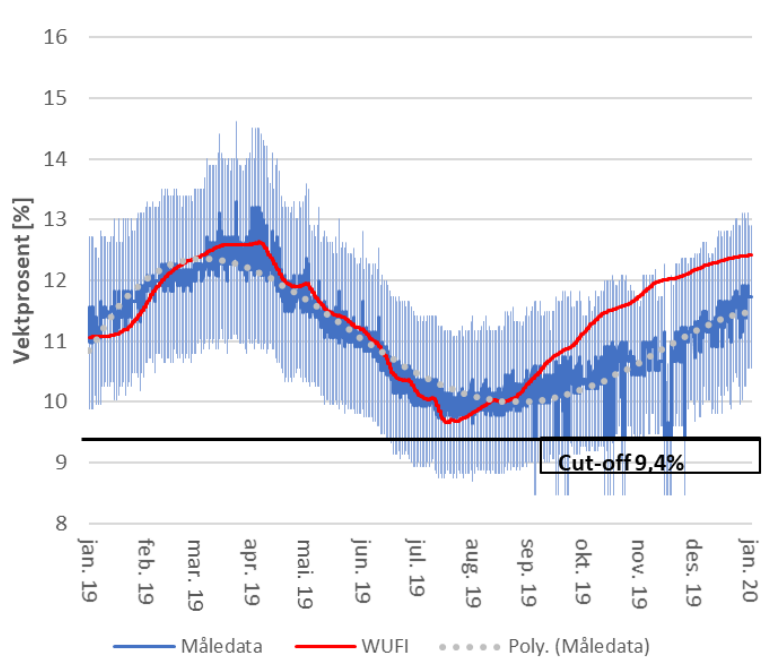
b) Måledata sensor 2

Figur 4-21, Målt innendørsklima for bod

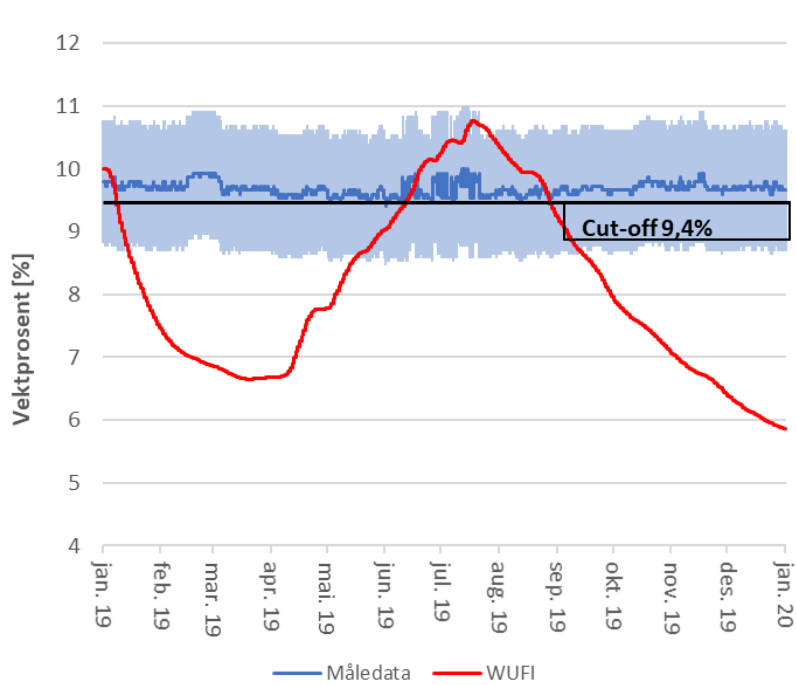
WUFI – beregning

Figur 4-22 og Figur 4-23 viser sammenligning av måledata med WUFI-beregning for sensor 4 over bod, 1cm fra henholdsvis taktro og SDS. Merk at uteklima for WUFI-beregningen er funnet ved temperaturkorrelasjon presentert i Vedlegg B: *Temperaturkorrelasjon*, og inneklima er hentet direkte fra innendørs klimamåling fra måledata.

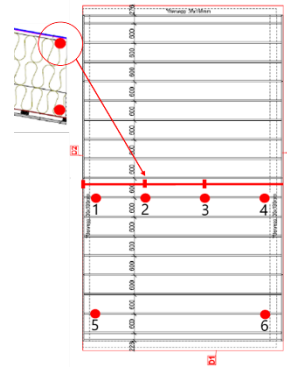
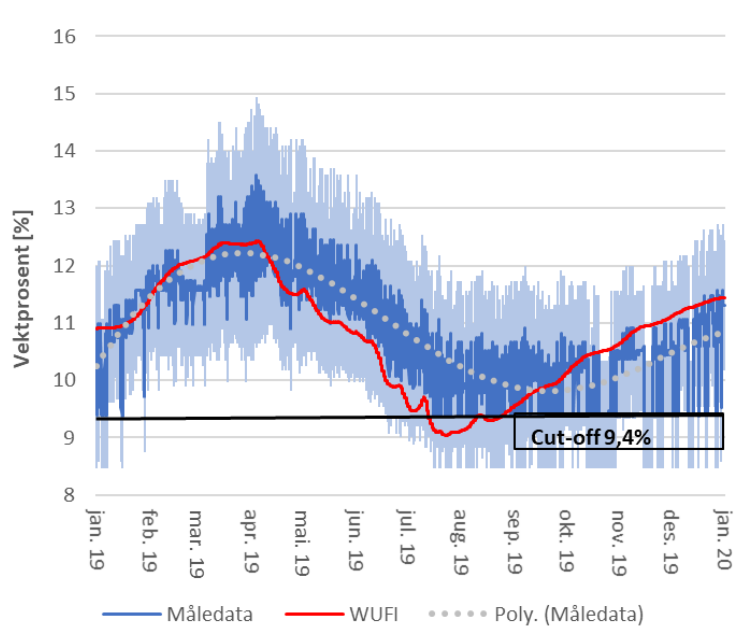
Figur 4-24 og Figur 4-25 viser sammenligning av måledata med WUFI-beregning for sensor 2 over baderom, 1cm fra henholdsvis taktro og SDS. Videre presenterer Figur 4-26 fuktinnholdet i tre monitorpunkter hentet fra WUFI-simuleringen for bod med tilhørende RF-T kurve for fuktigste punkt vist ved Figur 4-27.



Figur 4-22, Sammenligning av måledata og beregning (WUFI)
Fuktinnhold i bjelke – 1 cm fra taktro for bod

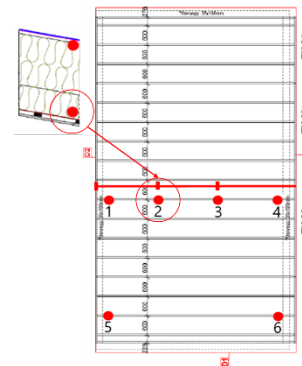
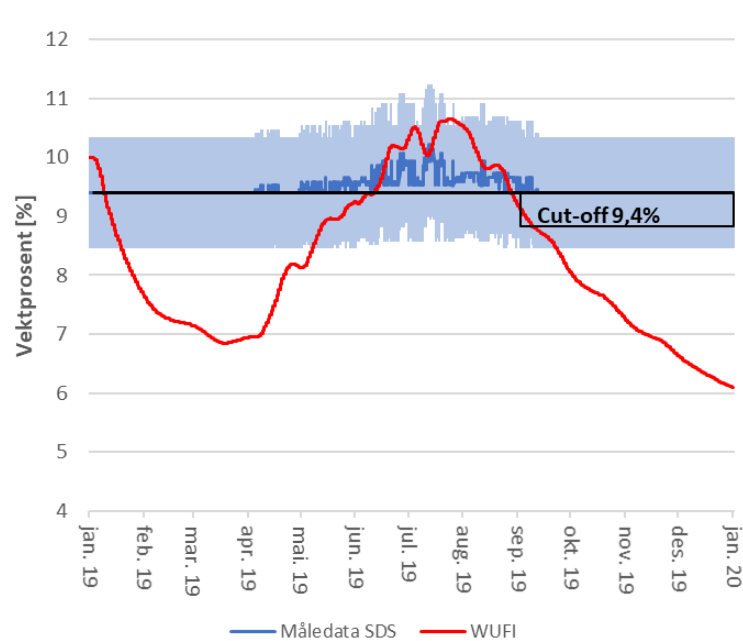


Figur 4-23, Sammenligning av måledata og beregning (WUFI)
Fuktinnhold i bjelke – 1cm fra SDS for bod



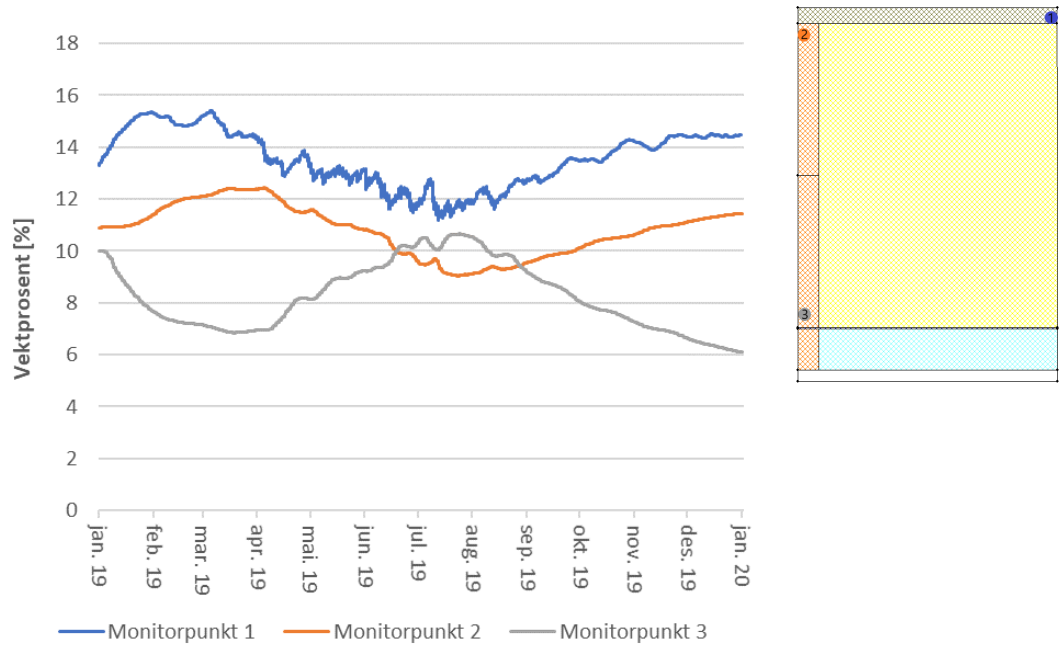
Figur 4-24, Sammenligning av måledata og beregning (WUFI)

Fuktinnhold i bjelke - 1cm fra taktro for baderom

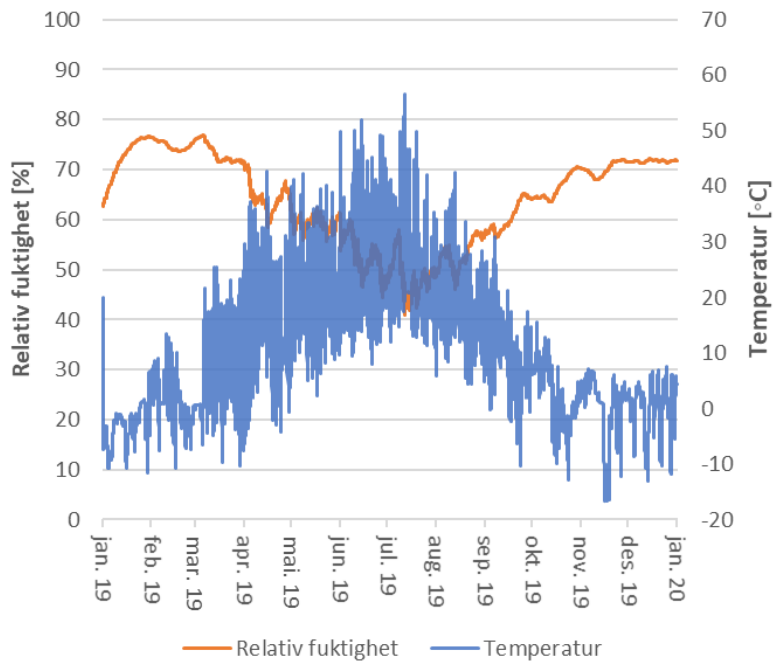


Figur 4-25, Sammenligning av måledata og beregning (WUFI)

Fuktinnhold i bjelke – 1cm fra SDS for baderom



Figur 4-26, Fuktinnhold for monitorpunktene 1-3 over bod
WUFI – beregning basert på KLI



Figur 4-27, Relativ fuktighet og temperatur for monitorpunkt 1 (tattro) over bod
WUFI – beregning basert på KLI

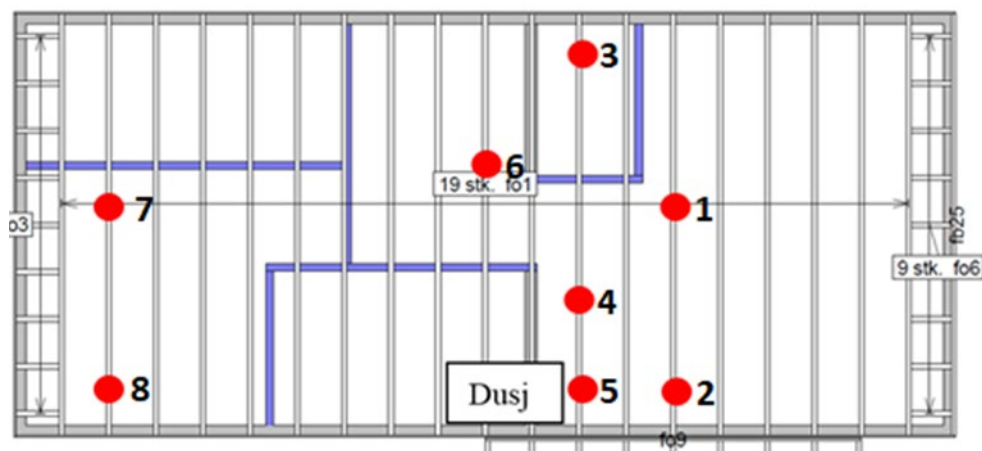
Muggvekst

Basert på måledata og WUFI-simulering av Lund Vest piloten ble alle kritiske RF-T kurver analysert ved VTT-modell for muggvekst. VTT-modellen vurderte at ingen punkter ved noe tidspunkt hadde gunstige vekstvilkår for muggvekst.

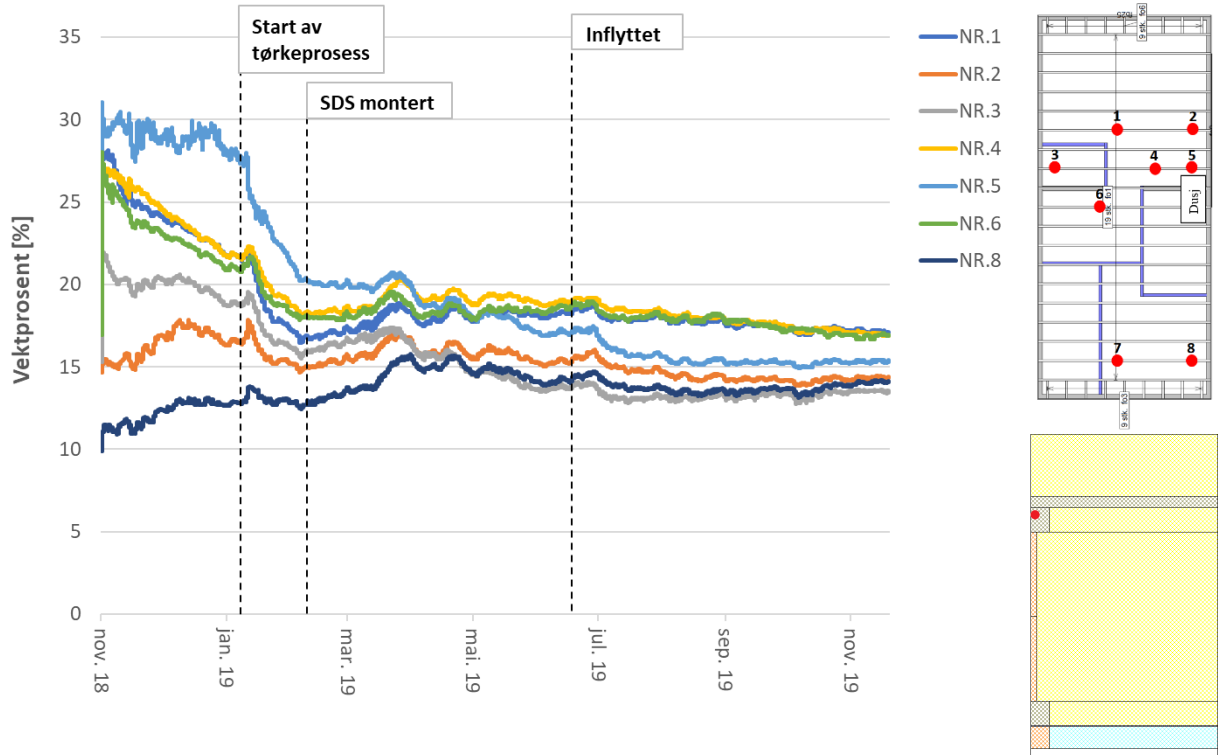
4.3.2 Sveberg

Måledata fra Sveberg piloten er presentert ved de mest interessante og kritiske dataene fra prosjektet. Piloten ble innflyttet i midten av juni 2019, og dette punktet er markert i relevante diagrammer. Tørkeprosessen og montering av SDS er også markert i relevante diagrammer. Figur 4-28 viser alle sensorplasseringene for Sveberg. Sensoroversikten er videre presentert ved flere av kurvene for lettere tolkning av resultater.

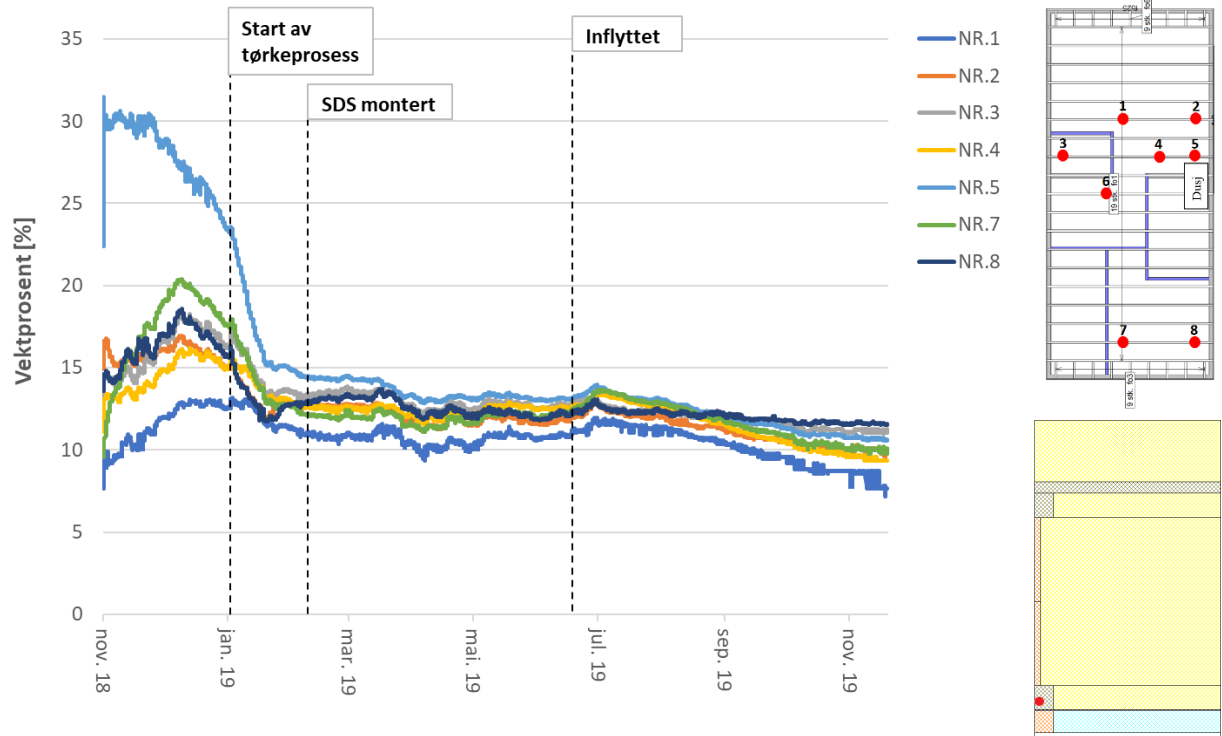
Figur 4-29 og Figur 4-30 viser fuktinnhold fra sensor 1-8, målt 1cm fra henholdsvis taktro og SDS. Figur 4-32 og Figur 4-33 viser henholdsvis RF-T kurver og fuktinnhold for sensorer plassert under lokk av gran, etter uttak av taktroprøver beskrevet i 4.2.2. RF-T kurve for sensor 5 er presentert i Figur 4-31, og uthevet er perioden for uttørking av taket.



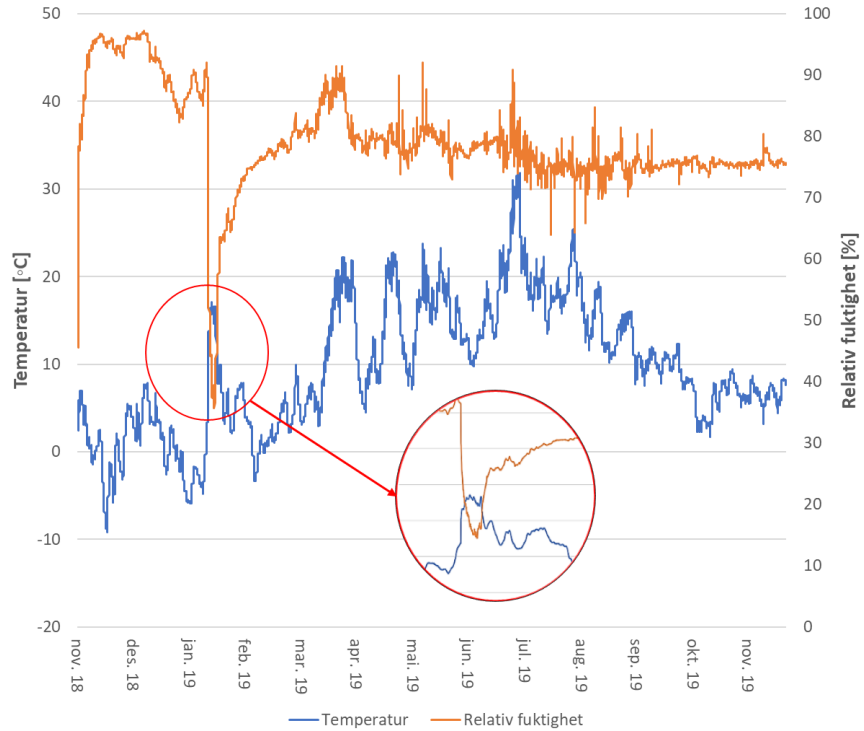
Figur 4-28, Sensorplassering for Sveberg (Gullbrekken og Kvande, 2018)



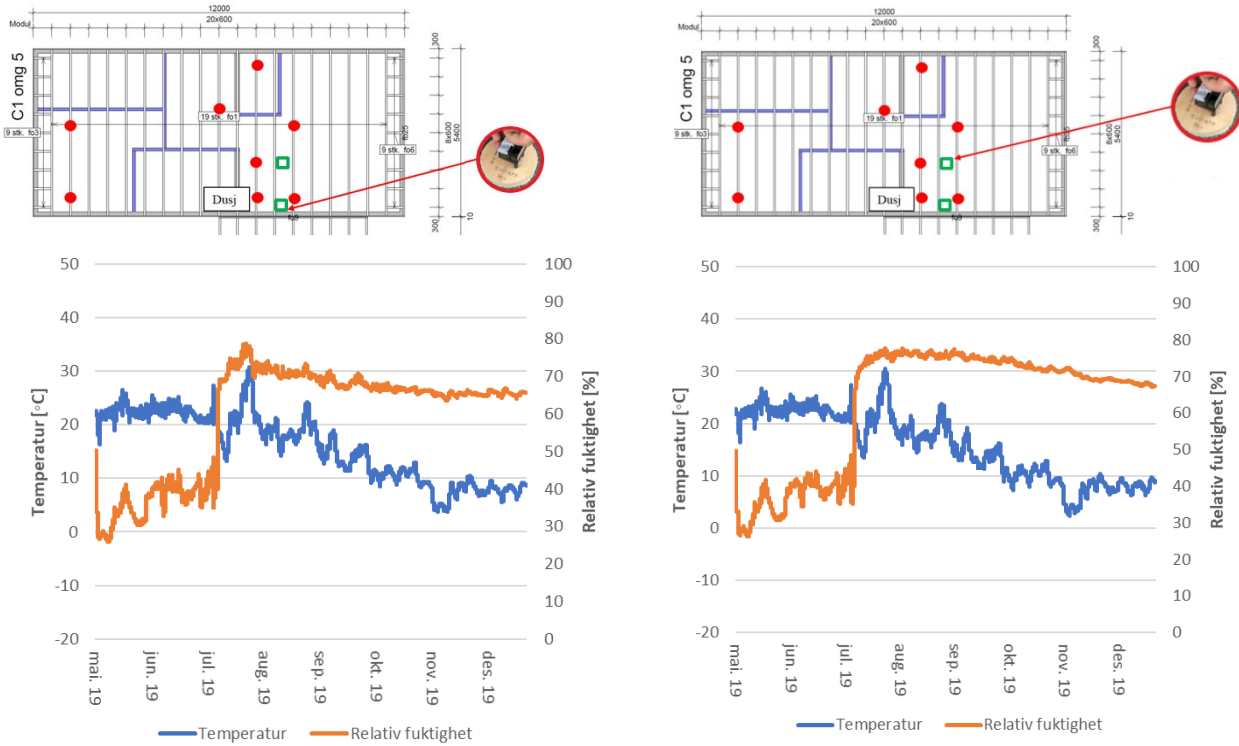
Figur 4-29, Fuktinnhold i bjelkeflens, målt 1cm under taktro for sensor 1-8



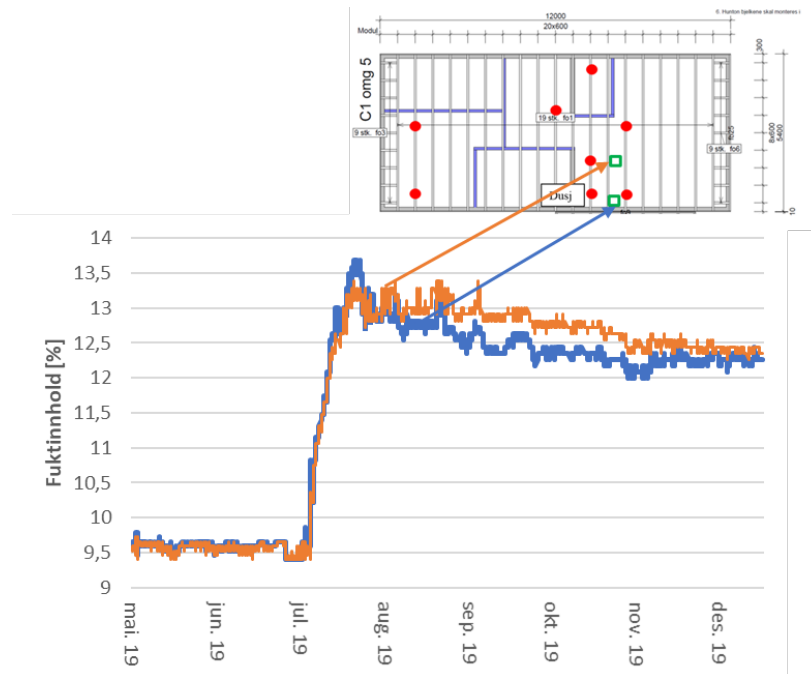
Figur 4-30, Fuktinnhold i bjelkeflens, målt 1cm over SDS for sensor 1-8



**Figur 4-32, Temperatur og RF for sensor 5
- målt 1cm under taktro**



**Figur 4-31, Temperatur og relativ fuktighet for sensorer under lokk av gran
- installert 7.juni etter uttak av taktroprøver**

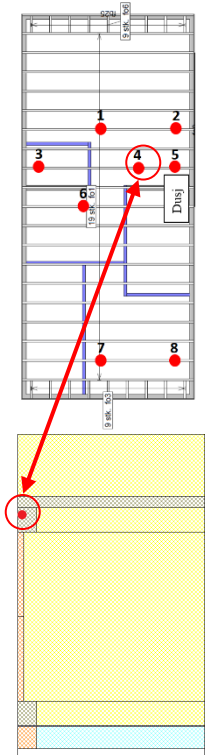
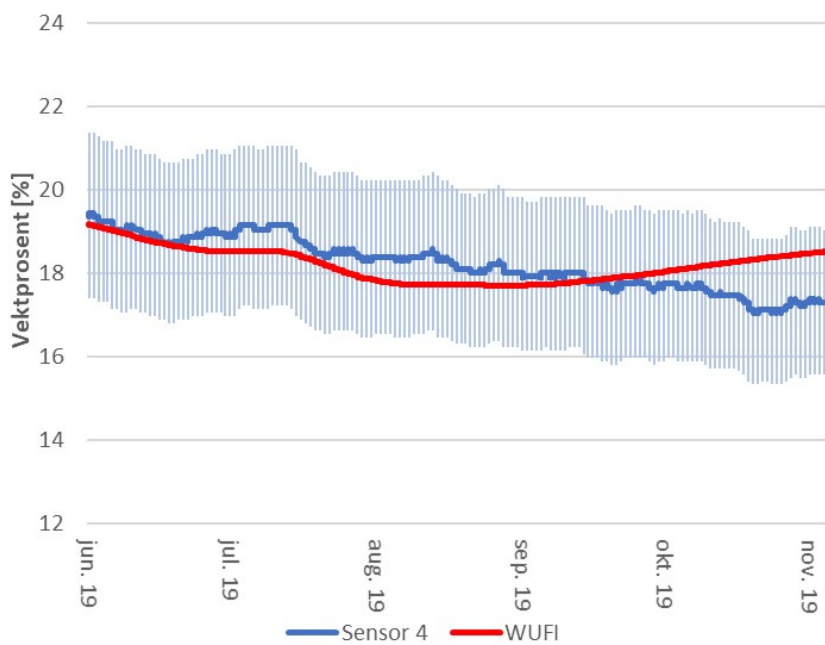


**Figur 4-33, Fuktinnhold for sensorer under lokk av gran
- installert 7.juni etter uttak av taktprøver**

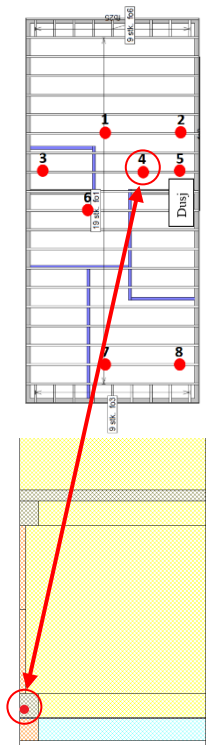
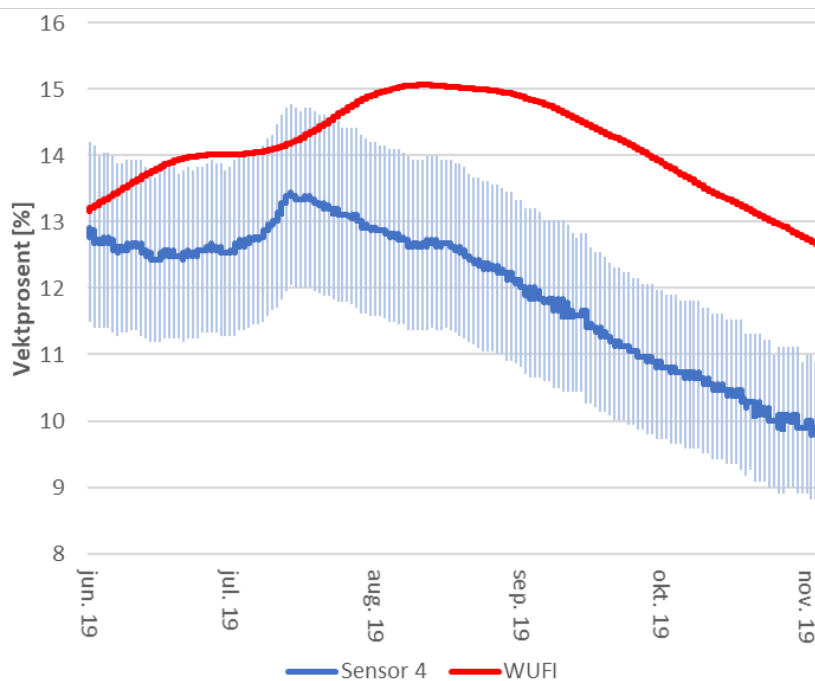
WUFI – beregning

Figur 4-34 og Figur 4-35 viser sammenligning av måledata med WUFI-beregning for sensor 4 1cm fra henholdsvis taktro og SDS. Uteklima for WUFI-beregningen er funnet ved temperaturkorrelasjon presentert i Vedlegg B: *Temperaturkorrelasjon*, og inneklima simulert ved en standard inneklimatemodell.

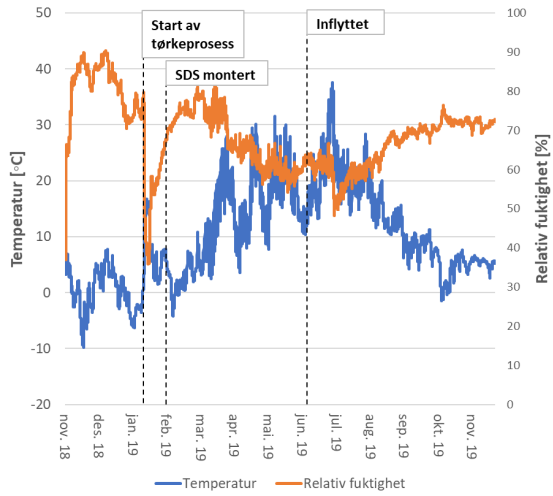
Figur 4-36 viser sammenligning mellom målt RF-T kurve og beregnet kurve. Merk at beregningsperioden er fra innflyttet bygning mens måledata er presentert for hele måleperioden.



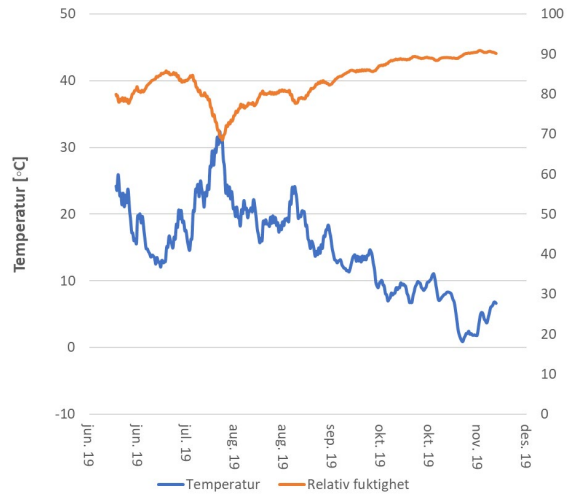
**Figur 4-34, Fuktinnhold for sensor 4, 1cm under taktro
- måledata med usikkerhet sammenlignet med WUFI-beregning**



**Figur 4-35, Fuktinnhold for sensor 4, 1cm over SDS
- måledata med usikkerhet sammenlignet med WUFI-beregning**



a) Måledata sensor 3

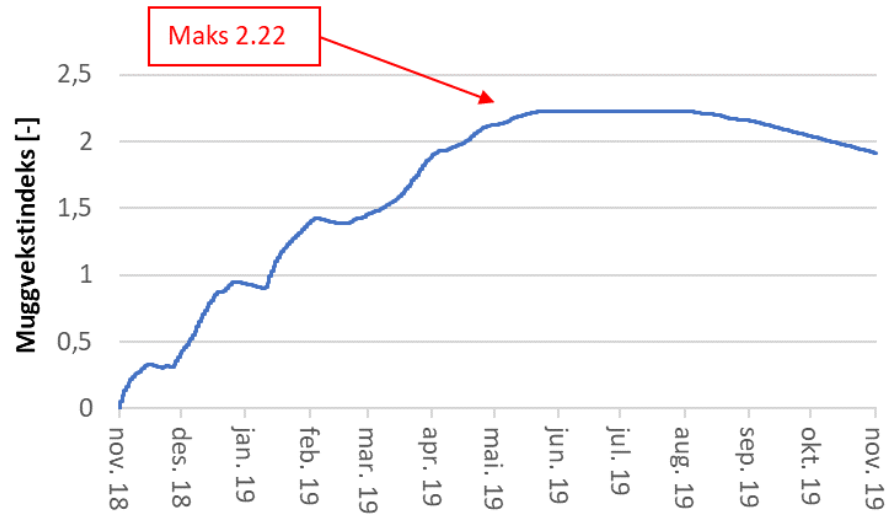


b) WUFI-beregning sensor 3

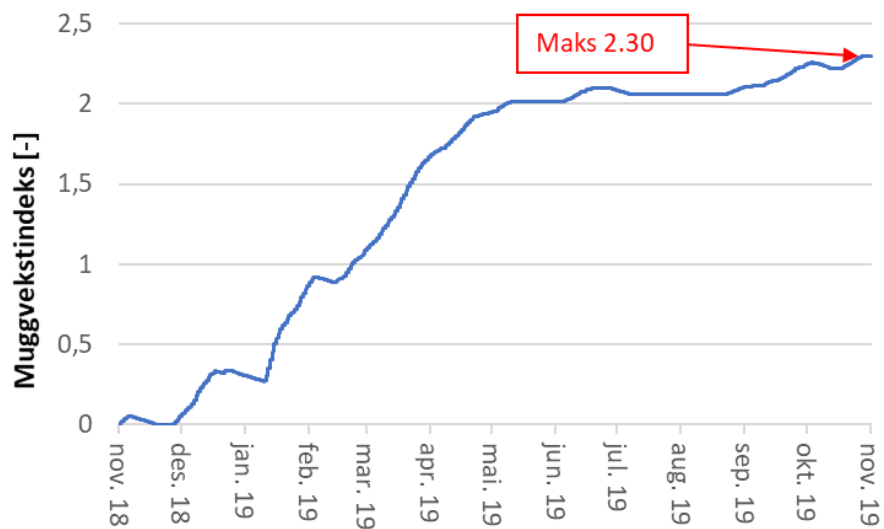
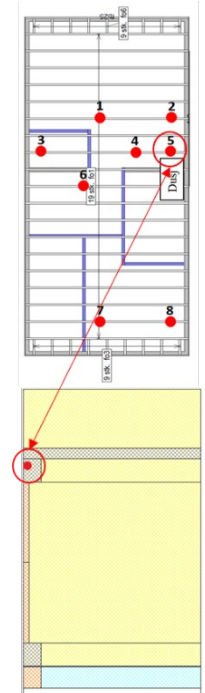
Figur 4-36, Måledata og WUFI-beregning for temperatur og relativ fuktighet for sensor 3

Muggvekst

Figur 4-37 viser muggvekstindeks vurdert av VTT-modell for sensor 5, basert på sorpsjonskurven til LVL. Figur 4-38 viser tilsvarende muggvekstsvurdering basert på WUFI-beregning.



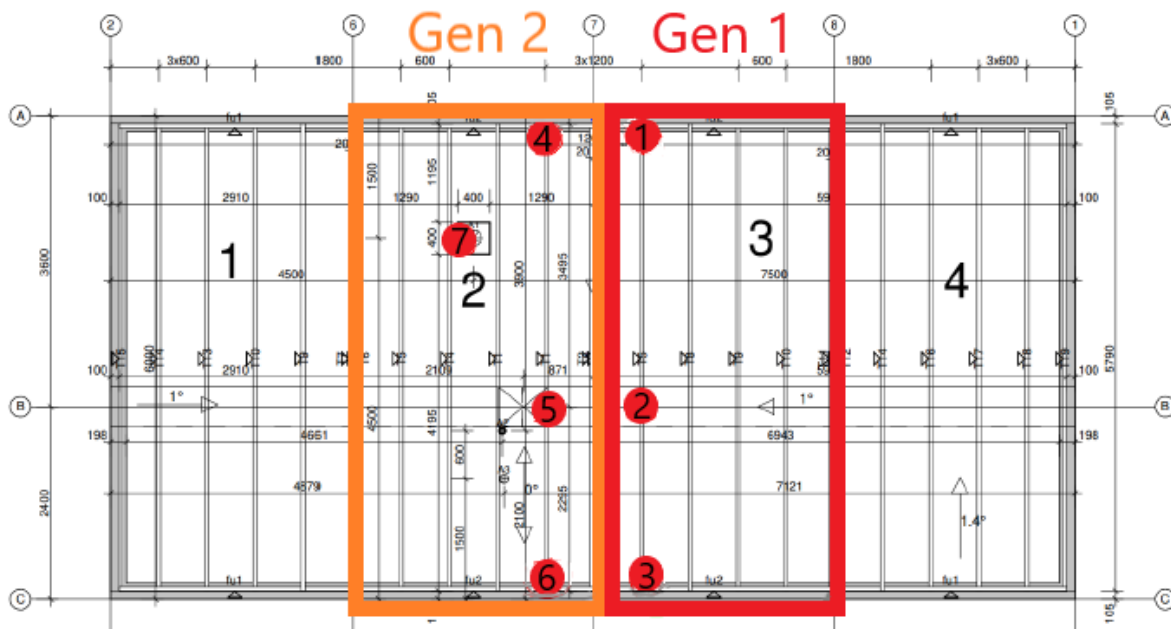
Figur 4-37, Muggvekstindeks basert på sorpsjonskurve
- med fuktinnhold fra sensor 5



Figur 4-38, Muggvekstindeks fra WUFI-beregning

4.3.3 Borgen Vest

Måledata fra Borgen Vest piloten er presentert ved de mest interessante og kritiske dataene fra prosjektet. Piloten ble innflyttet i midten av juni 2019, og dette punktet er markert i relevante diagrammer. Figur 4-39 viser alle sensorplasseringene for Sveberg. Sensoroversikten er videre presentert ved flere av kurvene for lettere tolkning av resultater.

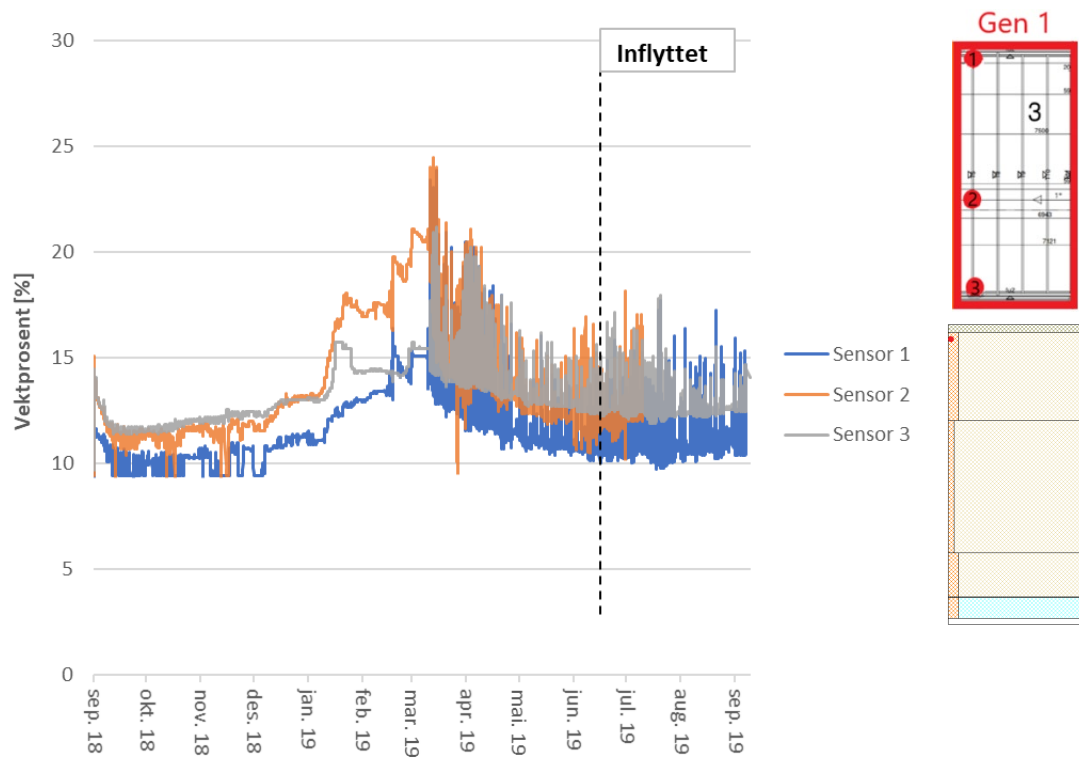


Figur 4-39, Sensorplassering til Borgen Vest

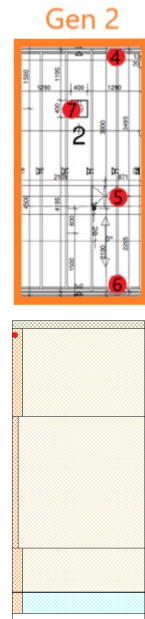
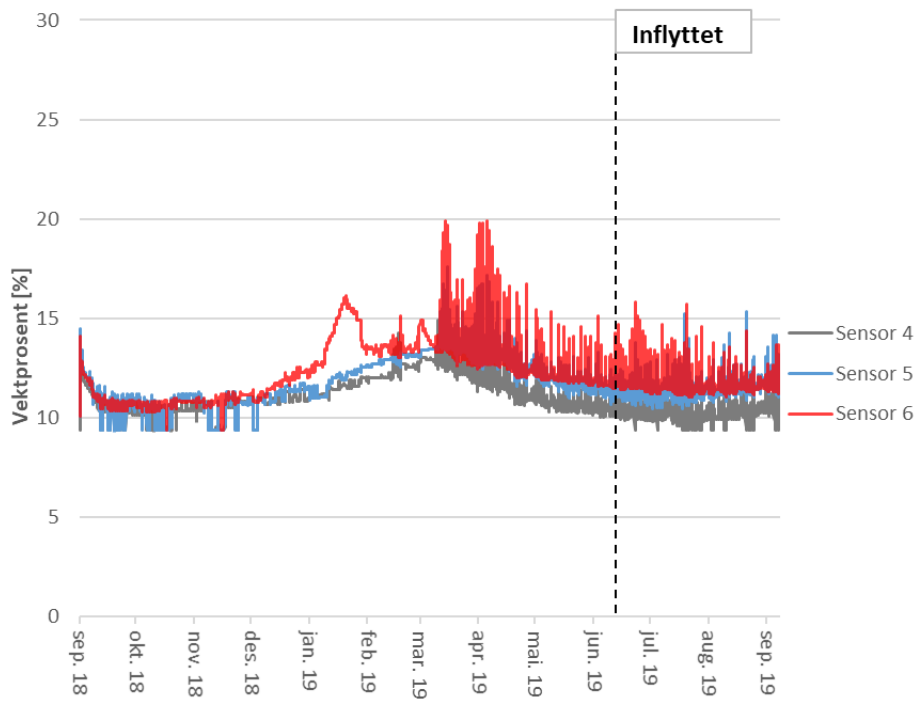
Som beskrevet i 4.2.2 er Borgen Vest utstyrt med to forskjellige SDS og presenterte måledata fra sensorene er derfor presentert for begge takelementene. Figur 4-40 og Figur 4-41 viser målt fuktinnhold 1cm under taktro for henholdsvis sensor 1-3 og sensor 4-6. Figur 4-42 viser tilsvarende for sensorene målt 1cm over SDS. RF-T kurver for sensorene med høyest fuktinnhold er presentert ved Figur 4-43 og Figur 4-44.

Åpning av taket

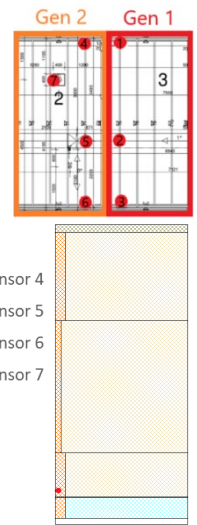
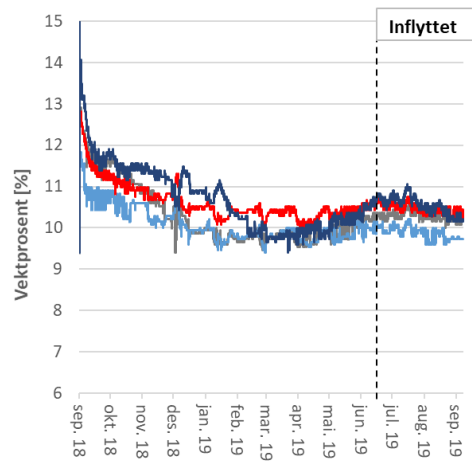
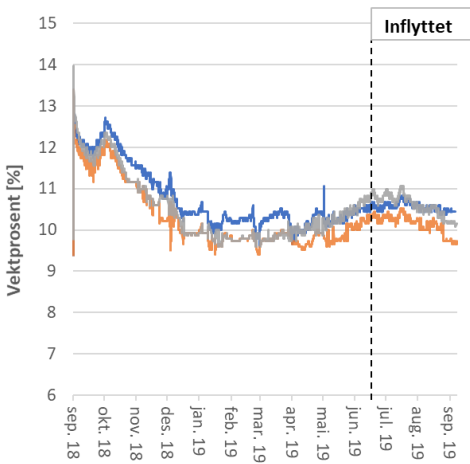
Måledata fra sensorene montert på logg av gran etter åpning av taket beskrevet i 4.2.2 er presentert av Figur 4-45 og Figur 4-46. Figur 4-47 og Figur 4-48 viser temperatur og relativ fuktighet for sensorkablene plassert mellom taktro og tekking. Videre er gjennomsnittverdier for målingene oppgitt i Tabell 4-9.



Figur 4-40, Fuktinnhold i sensor 1-3, 1cm under taktro



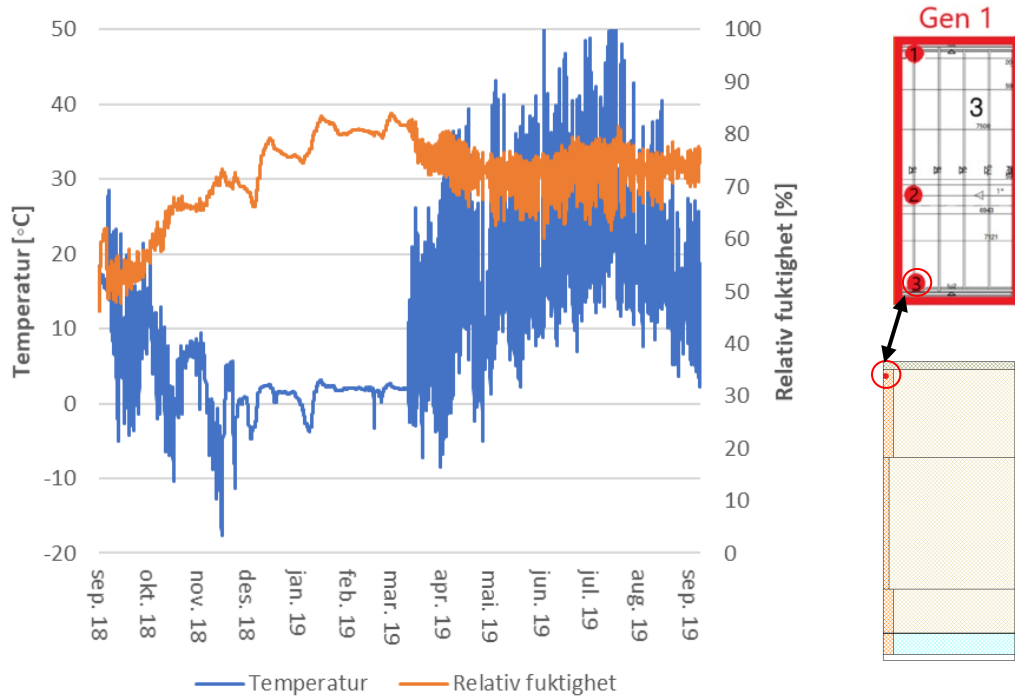
Figur 4-41, Fuktinnhold i sensor 4-6, 1cm under taktro



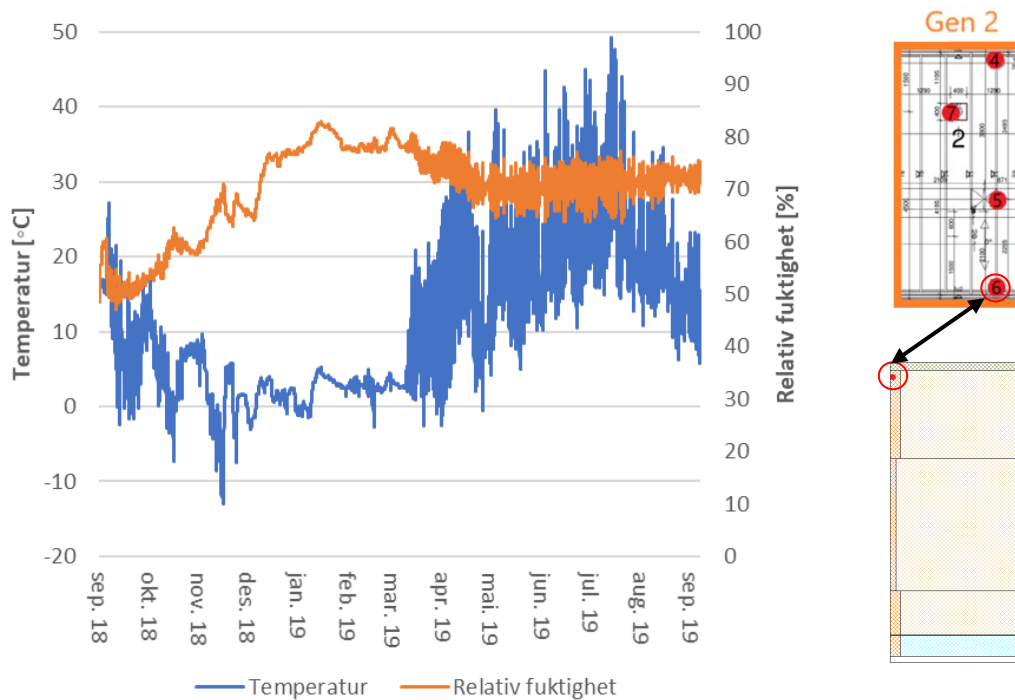
a) Sensor 1-3

b) Sensor 4-7

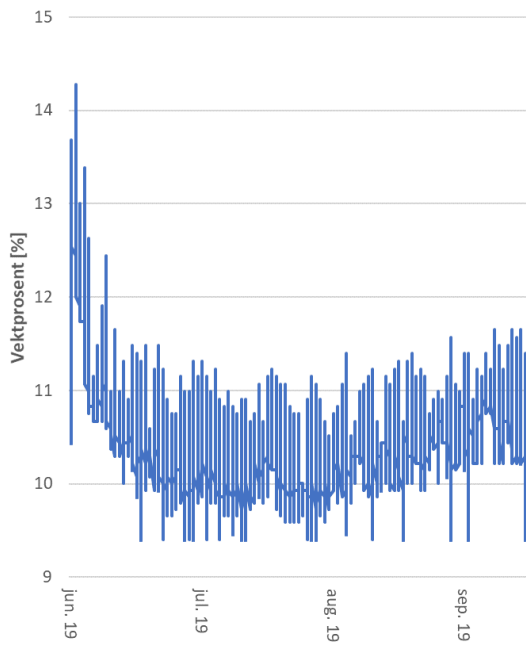
Figur 4-42, Fuktinnhold i bjelke, 1cm fra SDS



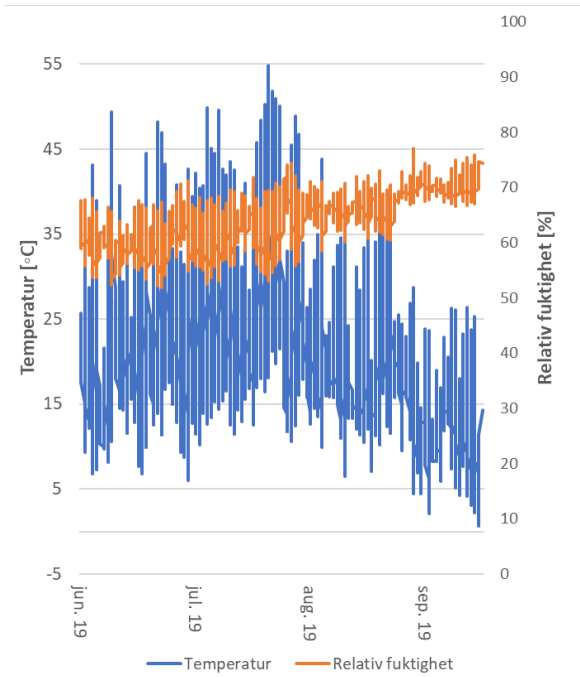
Figur 4-43, Temperatur og RF for sensor 3, målt 1cm under taktro



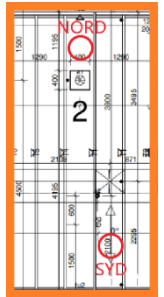
Figur 4-44, Temperatur og RF for sensor 6, målt 1cm under taktro



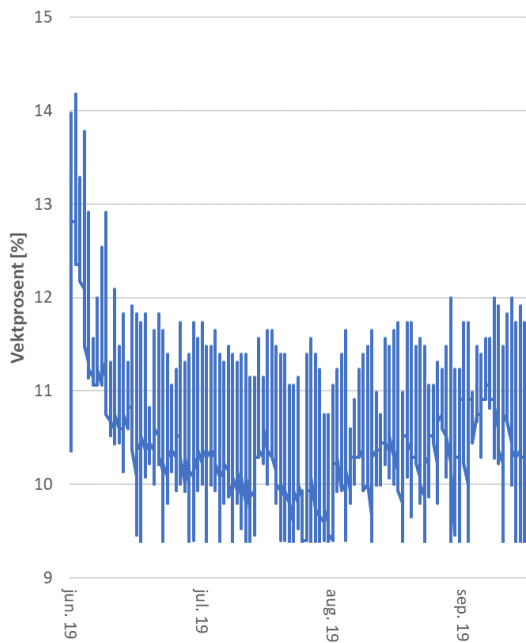
a) Fuktinnhold fra sensor



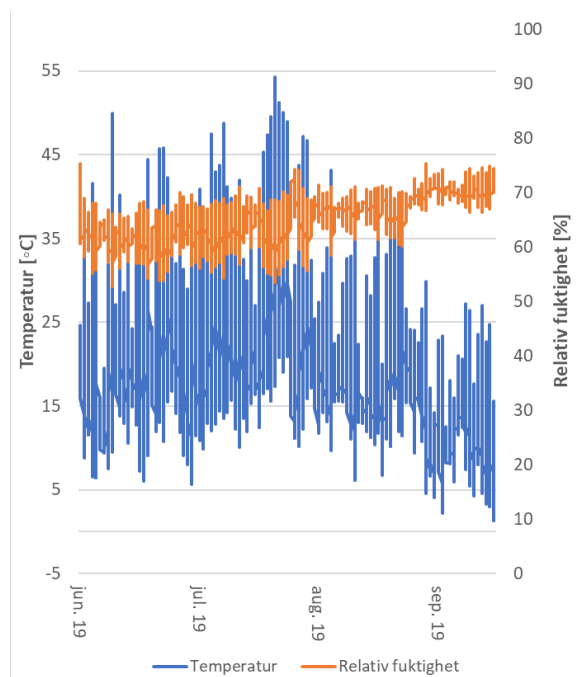
b) Temperatur og relativ fuktighet fra sensor



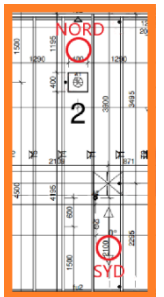
Figur 4-45, Måledata fra sensor under lokk, syd ved Borgen vest



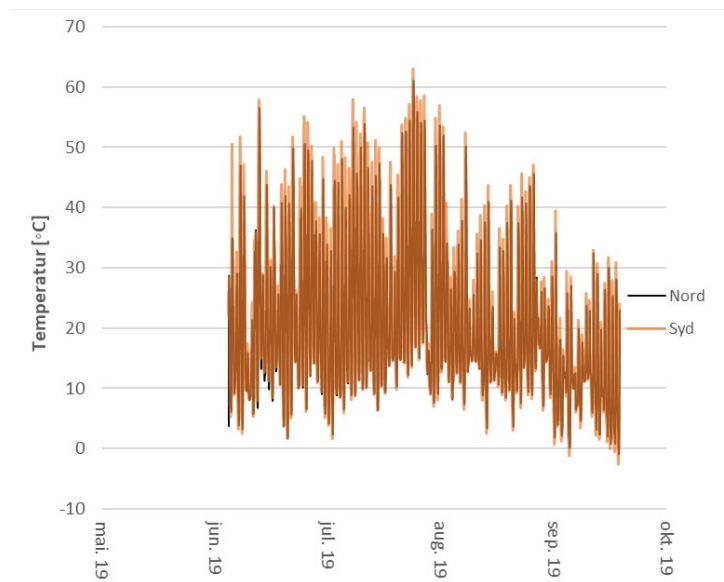
a) Fuktinnhold fra sensor



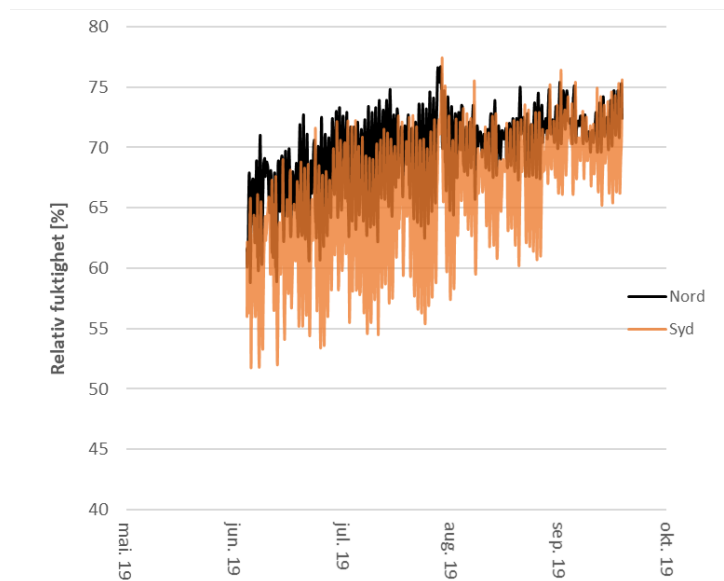
b) Temperatur og relativ fuktighet fra sensor



Figur 4-46, Måledata fra boks under lokk, Nord ved Borgen Vest



Figur 4-47, Temperaturmåling fra sensorkabel mellom taktro og tekking for syd og nord



Figur 4-48, RF-måling fra sensorkabel mellom taktro og tekking for syd og nord

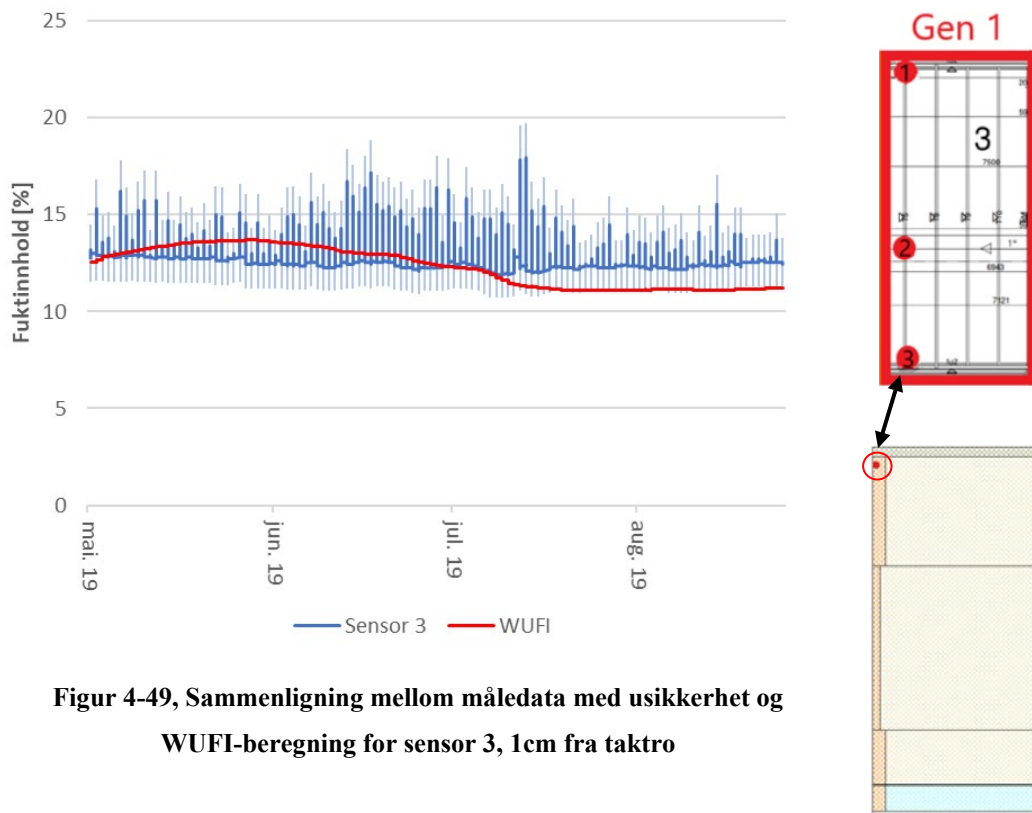
Tabell 4-9: Gjennomsnittsverdier for temperatur og relativ fuktighet for sensorer mellom tekking og taktro

Plassering på taket	Gjennomsnittstemperatur [°C]	Gjennomsnitts RF [%]
Syd	21,6	65,7
Nord	20,5	69,4

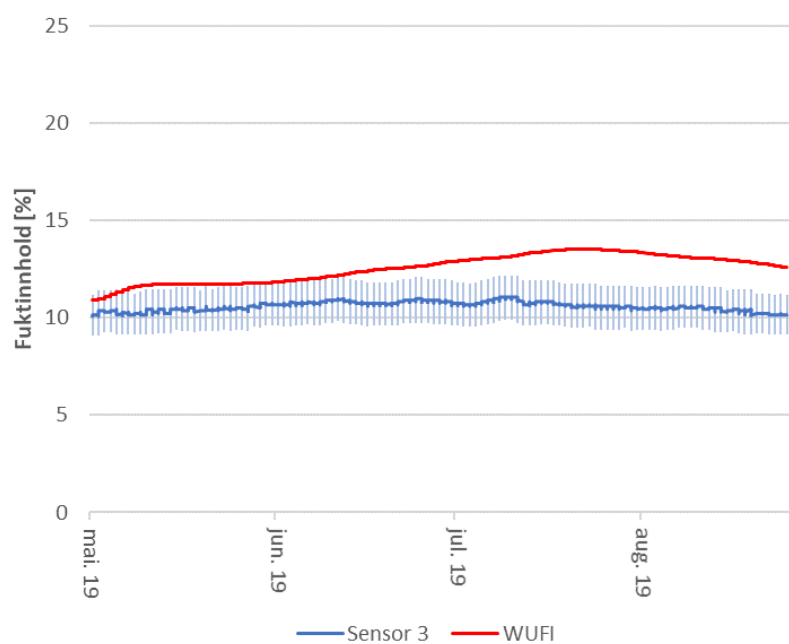
WUFI-beregning

Figur 4-49 og Figur 4-50 viser sammenligning av måledata med WUFI-beregning for sensor 3 over bod, 1cm fra henholdsvis taktro og SDS. Merk at uteklima for WUFI-beregningen er funnet ved temperaturkorrelasjon presentert i Vedlegg B: *Temperaturkorrelasjon*, og inneklima er beregnet ved standard inneklimatemodell.

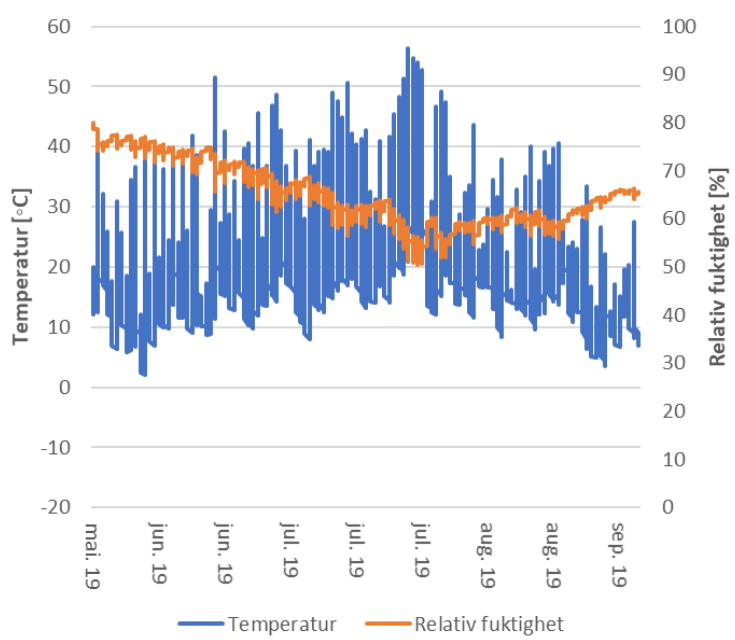
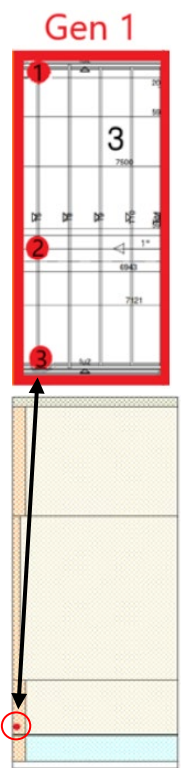
Figur 4-51 viser RF-T kurve beregnet med WUFI-beregning for sensor 3, 1cm fra taktro.



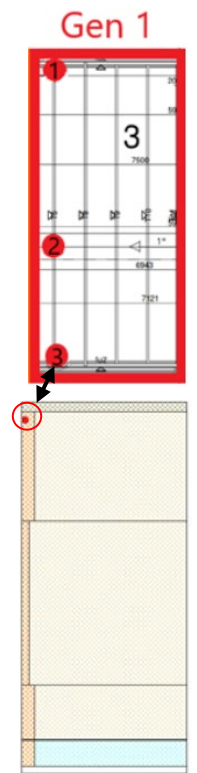
Figur 4-49, Sammenligning mellom måledata med usikkerhet og WUFI-beregning for sensor 3, 1cm fra taktro



Figur 4-50, Sammenligning mellom måledata med usikkerhet og WUFI-beregning for sensor 3, 1cm fra SDS



Figur 4-51, Temperatur og relativ fuktighet for taktro ved sensor 3 - fra WUFI-beregning



Muggvekst

Basert på måledata og WUFI-simulering av Borgen Vest piloten ble alle kritiske RF-T kurver analysert ved VTT-modell for muggvekst. VTT-modellen vurderte at ingen punkter ved noe tidspunkt hadde gunstige vekstvilkår for muggvekst.

4.4 Diskusjon

Lund Vest

Figur 4-16 viser at fuktinnhold for sensor 1-3 målt 1cm fra taktro målt før bygget var «klar for innflytting» har lave verdier. Dette indikerer at det ved bygging av den prefabrikkerte modulen og ved montasje har vært sørget for en tørr byggeprosess. Figuren viser at fuktinnholdet i bjelkene nær taktro øker fra om lag 10.5% i løpet av vinterperioden og tidlig vår, til det når sitt maksimum med fuktinnhold i underkant av 14% ved månedsskifte april – mai. Dette sees i sammenheng med retningen til diffusjonsstrømmen i vinterperioden, hvor fukt beveger seg mot taktro på grunn av oppadrettet damptrykk gradient. Tilsvarende viser Figur 4-18 at for sensor 4-6 samme trend. Fuktinnholdet for sensor 4-6 rapporterer en tilsvarende tørr byggeprosess, og fuktinnholdet øker fra om lag 11% til i underkant av 13.5% i løpet av vinterperioden. Fra figurene kan det observeres at sensorene lokalisert i taket over badrom og bod (sensor 1,2,4) rapporterer høyeste verdier for fukt.

Tabell 4–7 og Tabell 4–8 presenterer gjennomsnittlig målt temperatur og RF for sensorene 1-6, og viser at sensor 4 over bod rapporterer høyest gjennomsnittlig RF. Målingen er i isolasjonen 1cm under taktro og har verdi 66%. Dette forklares delvis på grunn av høyere fuktinnhold, men også på grunn av lavere temperatur. Gjennomsnittlig temperatur for denne sensoren er lavest av alle, og det kan kanskje tenkes at denne delen av takkonstruksjonen er delvis skyggelagt av omgivende bygninger eller vegetasjon.

Figur 4-19 viser RF-T kurve for det antatt mest kritiske punktet målt i isolasjonen 1cm under taktro. Basert på vekstbetingelser for muggvekst beskrevet i 2.7, ser vi at RF er over 80% kun i korte perioder ved vinterforhold og det forventes derfor ikke gode nok vekstvilkår for muggvekst. Merk at sensor for måling av RF er plassert i isolasjonen og kan derfor ikke brukes direkte som forhold i bjelken. For å gjøre en mer nøyaktig muggvekstanalyse bør derfor verdier for målt fuktinnhold, gjøres om til RF ved bruk av materialets egen sorpsjonskurve.

Figur 4-20 og Figur 4-21 viser målt innendørsklima for henholdsvis badrom og bod. Det kan observeres av figurene at inneklimate for bod er noe mer turbulent sammenlignet med badrommet. Dette kan muligens forklares av at sensor for inneklimate for badrom er plassert i et hulrom over taket og fungerer derfor som en buffer for sprang i RF og temperatur. Samtidig kan det synes at bygget er godt ventilert ettersom RF varierer mellom 20 – 60%, noe som ligger lavere enn det standard inneklimatemodell ved lavt fukttilskudd vurderer for Oslo klima.

WUFI-beregning

Figur 4-22 viser sammenligning av måledata for sensor 4 (bod), 1cm under taktro med WUFI-beregning. Figuren viser at en god korrelasjon mellom måledata og beregning. Beregningen ligger innenfor usikkerhetsintervallet til måledataene over hele beregningsperioden og vurderes som en god tilnærming. For sammenligning for målepunkt nær SDS for sensor 4, observerer vi at beregningen vurderer lavere fuktinnhold for begge vinterperiodene. Grunnen til dette er at målesensorene som tidligere nevnt har en «Cut-off» verdi på 9,4%, hvor alle verdier lavere enn

dette blir rapportert som 9,4%. WUFI beregningen for målesensorene over bod vurderes derfor til å ha god korrelasjon.

På samme måte viser Figur 4-24 og Figur 4-25 sammenligning mellom måledata og WUFI – modell basert på inneklimate rapportert av bad for sensor 2, målt henholdsvis 1cm under taktro og 1cm over SDS. Som for beregning av sensorer over bod, viser beregningene svært god korrelasjon med måledata og er innenfor usikkerhetsområdet for hele beregningsperioden.

Ved sammenligning av beregningene og måledata kan det se ut som beregning for baderomsklima gir en enda bedre korrelasjon, ved at fuktinnholdet for sensor 2, 1cm under taktro ved beregningsslutt er veldig nær målt verdi. Dette kan være et resultat av de ulike plasseringene til inneklimatemålerne. Samtidig er begge beregningene innenfor usikkerhetsområdet og vurderes som gode korrelasjoner.

Muggvekst

Figur 4-26 viser fuktinnhold for monitorpunktene 1-3 for WUFI-beregning for bod og viser at punkt 1 har høyest fuktinnhold. Dette samsvarer med tidligere parameterstudier på konstruksjonstypen. Figur 4-27 viser RF-T kurve for dette punktet og viser som observert fra måledata at vekstvilkårene for mugg er dårlige. Alle kritiske RF-T kurver fra både måledata og WUFI-beregning ble importert i VTT-modell for muggvekst. Modellen vurderte at det ikke for noen punkter var gode nok vekstbetingelser for mugg.

Sveberg

Sveberg-prosjektet skiller seg fra de andre prosjektene ved at det er plassbygget. Figur 4-29 viser fuktinnholdet i bjelkeflens 1cm under taktro målt for sensor 1-8 fra bygget var under oppføring. Figuren viser at fuktinnholdet for flere av bjelkene er målt til godt over 20%, og sensor 5 har en maksimalverdi på om lag 31% ved starten av måleperioden. 31 vektprosent tilsvarer basert på sorpsjonskurven for LVL en RF på om lag 98%. Dette høye fuktinnholdet kan forklares som et resultat av en fuktig byggeprosess. Samtidig observeres det mye lavere fuktinnhold for flere av de andre bjelkene.

Figur 4-30 viser at fuktinnholdet i bjelkeflens nær SDS er betydelig lavere for de fleste bjelkene sammenlignet med 1cm under taktro. Sensor 5 målt 1cm over SDS viser imidlertid et veldig høyt fuktinnhold. Denne differansen kan muligens forklares av en lokal fuktbelastning, for eksempel forårsaket av en lokal lekkasje.

Ved høye fuktmålinger følger det med stor usikkerhet som beskrevet i 4.2.1. For fuktmålinger over 28% er usikkerheten til målingene betydelig og kan ikke ignoreres. Samtidig er det knyttet en del usikkerhet til korreksjonsmodellen for LVL som beskrevet i Vedlegg A: *Korreksjonsmodell for LVL*. Summen av usikkerhetene gjør at målingene i mindre grad kan vurderes analytisk. Ved sammenligning med kritiske forhold for muggvekst skal likevel ikke denne usikkerheten vurderes, som beskrevet i 4.2.1.

Tørkeprosess

Før montering av SDS ble det i januar 2019 startet en tørkeprosess ved økt temperatur og bruk av avfukter. Denne prosessen kan tydelig sees i Figur 4-29 og Figur 4-30 karakterisert av en hurtig reduksjon i fuktinnhold. Figur 4-32 viser RF-T kurven for sensor 5, målt 1cm under taktro, og viser et kraftig utslag av tørkeprosessen. Det kan observeres at temperaturen i denne perioden økes betydelig og at RF reduseres. Trendene for alle sensorene er like og RF-T kurver for resterende sensorer er presentert i Vedlegg D: *Pilotprosjekter*.

Uttak av prøver

11.juni 2019 ble det tatt ut to prøver av taktro av OSB i kritiske områder. Deretter ble det satt inn to prøver av gran med tilkoblet fuktlogger. Figur 4-31 viser RF-T kurver for de to fuktloggerne montert i lokk av gran og viser at prøvene har vært oppbevart tørre frem til de ble montert. Figur 4-33 viser fuktinnhold for prøvene og viser at de ved månedsskifte juli-august oppnår likevekt med omgivelsene, og ender med et fuktinnhold på om lag 13,5%. Videre kan det observeres at de tørker noe ut i løpet av høsten og siste måleverdi ved slutten av desember er på om lag 12%. For norsk gran tilsvarer dette ifølge sorpsjonskurven beskrevet i 2.1, en RF i underkant av 70%.

Taktroprøvene som ble tatt ut ble sendt til Sintef for analyse og viste ingen tegn til muggvekst.

WUFI-beregning

Figur 4-49 viser sammenligning mellom målt fuktinnhold for sensor 4, 1cm under taktro og WUFI-beregning. Beregningsperioden er fra innflyttet bygg til slutten av måleperioden og viser en at beregningen viser en nokså god korrelasjon til måledata. Beregningen ligger innenfor usikkerhetsområde til fuktloggerne. Sammenligner vi korrelasjonen for Sveberg med Lund Vest, er differansen derimot betydelig høyere. Ved slutten av beregningsperioden vurderer WUFI om lag 1,5% høyere fuktinnhold enn måledata. Denne differansen kan kanskje forklares av at WUFI-beregningen for dette beregningstilfelle bruker en standardisert inneklimatemodell i motsetning til Lund Vest. Etersom differansen mellom måledata og beregning spesielt gjør seg gjeldene ved høst-/vinterforhold når damptrykkgradienten peker utover, kan det tenkes at denne standardiserte modellen har et noe våtere klima. Et våtere klima vil både gi utslag i høyere gradient samtidig som en høyere RF medfører en lavere dampmotstand for SDS.

Figur 4-35 viser at korrelasjonen mellom måledata for sensor 4, 1cm over SDS er betydelig lavere. Beregningen beveger seg utenfor usikkerhetsområdet til fuktloggerne over beregningsperioden og anses derfor som en utilstrekkelig modell. Vi observerer at trenden til kurvene er noenlunde like, men at størrelsesorden for opptukning av bjelke nær SDS ved innoverrettet gradient ved sommerforhold beregningsmessig vurderes mye høyere enn det fuktloggerne måler.

Muggvekst

Figur 4-37 viser beregnet muggvekstindeks fra VTT-modell basert på måledata for fuktinnhold fra sensor 5 og er i overkant av 2. Dette betyr at modellen vurderer at det høye fuktinnholdet fra byggeprosessen har gitt gode vekstforhold for muggvekst og for dette tilfellet bør konstruksjonen undersøkes nærmere. Modellen tar temperatur direkte fra sensormålingen, mens RF er basert på

sorpsjonskurven til LVL. Denne sorpsjonskurven er beregnet ved hjelp av korreksjonsmodell for LVL presentert i Vedlegg A: *Korreksjonsmodell for LVL*.

Figur 4-38 viser at beregnet muggindeks fra WUFI-beregning for hele måleperioden har en maksimalverdi på 2,3 og er tilsvarende som den basert på sorpsjonskurven.

Selv om VTT-modellen beregnet at tilfellene hadde potensial for muggvekst viste taktroprøver analysert ved SINTEF at dette ikke var tilfelle. Det kan det være flere årsaker til. En årsak kan være valg av for konservative materialeegenskaper i modellen, som vurderer at materialet er mer sensitivt enn i virkeligheten. I modellen er det også regnet med relativt lav reduksjonsfaktor for å være på den sikre siden som beskrevet i 2.7. En annen årsak kan være usikkerheten til fuktloggerne ved høye fuktinnhold. Samtidig vil det være knyttet betydelig usikkerhet til korreksjonsmodellen for omgjøring av fuktinnhold til RF.

Borgen Vest

Figur 4-40 viser fuktinnholdet til sensor 1-3 målt 1cm under taktro for takmodul installert med AirGuard Smart generasjon 1. Takmodulene benyttet i dette prosjektet er prefabrikkert og vi observerer av figuren at det har vært en tørr byggeprosess. Maksimalt fuktinnhold observeres ved sensor 2 med verdi 24% en kort periode i mars 2019.

Figur 4-41 viser tilsvarende målinger for sensor 4-6, 1 cm under taktro for takmodul installert med AirGuard Smart generasjon 2. Høyest fuktinnhold finner vi for sensor 6, med en maksimalverdi rund 20%. På samme måte observeres maksimalt fuktinnhold i mars-april 2019. Det tenkes at det er i denne perioden temperatur på taktro gjør seg gjeldende og damptrykkgradienten endrer retning til innover i konstruksjonen.

Figur 4-42 viser fuktinnhold for sensor 1-7, 1cm over SDS og viser at fuktinnholdet reduseres inntil mars-april, hvor en innoverrettet diffusjonsstrøm fører til økt fuktinnhold i bjelke nær SDS.

Ved sammenligning av takmodulene er det noe utfordrende å vurdere forskjeller mellom SDS-typene ettersom inneklimate er ukjent. En tidligere studie har konkludert med at AirGuard Smart Gen 2 har noe dårligere uttørring enn Gen 1 på grunn av høyere dampmotstand for $RF < 45\%$ som beskrevet nærmere i 2.5 (Olsen, 2017).

Uttak av prøver

7.juni 2019 ble det tatt ut to prøver av taktro, en på sørside og en på nordside av taket. Som for Sveberg-prosjektet ble det også her erstattet taktro av gran med påmontert fuktlogger. Det ble også installert en RF og temperaturmåler mellom tekking og kryssfiner. I tillegg ble det skrudd inn to skruer på underside av taktro for måling av fuktinnhold. Figur 4-45 og Figur 4-46 viser at fuktinnhold og RF-T kurver for begge fuktloggerne installert i løkk av gran. De viser begge at fuktinnholdet raskt etter installering tørker ut til et fuktinnhold på om lag 11%. Figur 4-47 og Figur 4-48 viser tydelig at temperatur for sensor mellom taktro og tekking ved syd ligger høyere enn for sensor ved nord. Samtidig er RF betydelig høyere, og dette forklares av den lavere temperaturen og samtidig lokalt høyere fuktinnhold som vist i Figur 4-46. Differansen for målingene er

gjennomsnittlig 1,1°C og rett over 4% RF. Lavere temperatur for sensor i tekkingen ved nord er kan være som et resultat av at punktet ligger rett nord for skorstein og det tenkes sannsynlig at punktet skyggelegges i større grad.

WUFI-beregning

Figur 4-49 viser sammenligning mellom målt fuktinnhold for sensor 3, 1cm under taktro og WUFI-beregning. Beregningsperioden er fra innflyttet bygg til slutten av måleperioden og viser en at beregningen viser en nokså god korrelasjon til måledata. Vi observerer at WUFI-beregningen vurderer noe høyere uttørring og ved slutten av beregningsperioden er beregningen rett utenfor definert usikkerhetsområde. Som for Sveberg-prosjektet er også Borgen Vest beregnet med standard inneklimatemodell.

Beregningsperioden for WUFI-modellen er fra innflyttet bygg til siste registrerte måledata og er for Borgen Vest kun om lag 4 måneder. Det tenkes at en beregning over en lengre periode i større grad vil indikere kunne vurdere korrelasjon med måledata.

Usikkerhet

Manglende måledata

For flere av fuktloggerne i prosjektene mangler det tidvis måledata. Det kan virke som de trådløse sensorene noen ganger får problemer med å sende over måledata til gateway. Likevel er målingene nesten fullstendige for de fleste sensorene.

Beregning av uteklimate

Ved beregning av overflatetemperatur for estimering av uteklimate antas en linjær korrelasjon mellom måledata på taktekking og 1cm under taktro som beskrevet i Vedlegg B: *Temperaturkorrelasjon*. Denne modellen er veldig forenklet og inneholder derfor en del usikkerhet.

WUFI sammenlignet med måledata

Som nevnt tidligere er det knyttet noe usikkerhet til valgt monitorpunkt i WUFI-modellen på grunn av grensesnittet og punktet kan derfor være noe ulikt reelt målepunkt. Det tenkes også at ettersom boksen som tilhører fuktloggerne er plassert i isolasjonen og tar opp noe plass, kan det påvirke målingene noe. Ettersom dette ikke er tatt hensyn til i beregningen, kan derfor resultatene fravike noe.

Ved WUFI simulering er det også knyttet usikkerhet til materialdata. Materialdata i WUFI er i all hovedsak definert av ulike institusjoner og er basert på laboratoriestudier. Mineralull i WUFI er som tidligere nevnt basert på en standardmodell og gir en urealistisk sorpsjonskurve. Diffusjonsmotstand for SDS er i WUFI brukerdefinert og er retningsuavhengig. Vi vet at dette i virkeligheten ikke er reelt, og medfører derfor en usikkerhet.

For prosjektene Sveberg og Borgen Vest er beregningsperiodene korte, og det vurderes at en lengre beregningsperiode kan medføre større forskjeller.

5 Konklusjon

Formålet til denne studien var å få bedre forståelse for uttørkings- samt muggvekstpotensiale til kompakte tretak med SDS i ulike klima, og å vurdere hvordan reelle pilotprosjekter med denne konstruksjonstypen presterer. En rekke parametere har blitt undersøkt i WUFI 2D med eksplisitt strålingsmodell og tre pilotprosjekter er analysert.

Fuktberegninger ved simuleringsverktøy

Parameterstudien viste at utvendig klima, og solstråling er drivende faktorer for uttørkingspotensialet til konstruksjonstypen. Studien identifiserte at simulering med strålingsmodell hadde betydelig innvirkning på fuktinnhold og at alle beregningstilfellene fikk redusert uttørkingen ved bruk av denne modellen.

Studien identifiserte samtidig at maksimale skyggeforhold og høyt fukttilskudd medførte størst reduksjon i uttørkingspotensiale og økte risiko for muggvekst mest.

Muggvekst

Muggvekst er vurdert for alle beregningsvariantene og viste at de to klimaene med høyest gjennomsnittstemperatur (Bergen og Kristiansund) har de to høyeste verdiene for muggvekst, samtidig som de to med lavest temperatur (Karasjok og Røros) har de noen av de laveste. Oslo klima ble vurdert som det aller mest fordelaktige på grunn av svært rask uttørking.

Det ble identifisert at en kombinasjon av fuktig klima og mildere temperaturer er sannsynlig årsak til at Kristiansund og Bergen klima er de mest kritiske i forhold til risiko for muggvekst for konstruksjonstypen.

Andre HAM-modeller

Sammenligning av fuktsimulering i DELPHIN programvare og WUFI viste at modellene vurderte fukttransport noe ulikt. Resultatene ble vurdert som ufullstendige på grunn av tidsmessige begrensninger og det ble vurdert at det er nødvendig med en iterativ feilsøkeprosess for å finne årsak og å kunne begrunne avvikene.

Fuktsikkerhet til pilotprosjekter

Analyse av pilotprosjektene viste at Lund Vest hadde laveste fuktinnhold og var langt under kritisk fuktinnhold for hele måleperioden. Borgen Vest viste at tilsvarende trend med kun en kort periode med høyt fuktinnhold før bygget ble innflyttet.

Pilotprosjektet ved Sveberg er det eneste prosjektet hvor taket ble plassbygget, og måledata fra byggeperioden viste at en fuktig byggeprosess hadde medført at fuktinnholdet målt av flere sensorer var over kritisk fuktinnhold. VTT-modell for muggvekst vurderte at det høye fuktinnholdet fra byggeprosessen har gitt gode vekstforhold for muggvekst og at konstruksjonen burde undersøkes nærmere.

Sammenhengen mellom simuleringsverktøy og virkeligheten

WUFI simuleringene for Lund Vest, med reelle målinger fra inneklima hadde god korrelasjon for både sensorer nær taktro og SDS. Dette viser at de klimatiske betingelsene og materialeegenskapene definert i WUFI er tilstrekkelige for dette beregningstilfellet.

For prosjektene Sveberg og Borgen Vest hvor standard inneklimatemodeller ble brukt for å simulere inneklima, viser beregningene større forskjeller, spesielt nær SDS. WUFI-beregning for begge beregningene var utenfor usikkerhetsområdet til måledataene og ble vurdert om utilstrekkelige.

6 Videre arbeid

Parameterstudie

Det ble i denne studien identifisert klima med høy uttørring, med samtidig høy muggvekstindeks. Det kan tenkes at ved lavere startfukt vil muggvekstindeksen se annerledes ut for de ulike klimaene og er interessant å undersøke videre effekten av dette.

Fukttransport på grunn av konveksjon ikke inkludert i WUFI-analysen og det kan være interessant å undersøke effekten av dette.

Denne studien har beregnet muggvekstindeks med konservative verdier for reduksjonsfaktor. Endring i reduksjonsfaktor for muggvekst antas å gi andre anbefalinger i forhold til fuktsikkerhet og bør undersøkes videre.

Ulike materialer i takkonstruksjonen kan påvirke uttørkingspotensialet og fuktsikkerheten til konstruksjonen og det er interessant å undersøke i større grad andre materialer med ulike sorpsjonskurver for å forstå viktigheten av valgt materiale.

Basert på resultatet fra sammenligning av WUFI og DELPHIN beregningen er det tydelig behov for å videre undersøke sammenhengen mellom de to HAM-verktøyene. Sammenligningen ble vurdert som utilstrekkelig og på grunn av tidsbegrensninger er den ikke nøye nok undersøkt. En mer detaljert studie på forskjeller mellom modellene er derfor svært interessant å videre undersøke.

Feltundersøkelser

For å bedre evaluere fuktsikkerheten for prosjektene Sveberg og Borgen Vest, burde måledata fra hele vinterperioden etter innflyttet bygg analyseres. Borgen Vest som er lokalisert nær Trondheim forventer vi fra parameterstudien å ha en større usikkerhet med tanke på fuktsikkerhet og det er interessant å videre undersøke denne klimapåkjenningen. Samtidig er det interessant å undersøke videre effekten av ulik SDS for takelementene.

7 Referanser

- Birkeland, I. M. (2019) *Fuktmåling i LVL med trådløse sensorer*. Masteroppgave, NTNU Trondheim.
- British Board of Agrément. (2017) European Technical Assessment *ETA 06/0238*: European Organisation for Technical Assessments.
- Clementz, C. og Young, J. (2019) *Prosjekt: Enebolig Borgen Vest*. Prosjektnotat, Optimera byggesystemer og Isola AS.
- Geving, S. og Thue, J. V. (2002) *Fukt i bygninger*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Gullbrekken, L. og Elvebakk, K. (2018) *Smart dampsperre Lund Vest, Bakke Bygg. Premisser og trefuktmålinger*. Prosjektnotat, SINTEF.
- Gullbrekken, L. og Kvande, T. (2018) *Pilotprosjekt. Smart dampsperre Sveabakken, Norgeshus. Premisser og trefuktmåling*. SINTEF Academic Press: Klima 2050 Note.
- Hanssen-Bauer, I. et al. (2017) *Climate in Norway 2100 - a knowledge base for adaptation*. (2387-3027): Miljødirektoratet.
- Hukka, A. og Viitanen, H. A. (1999) A mathematical model of mould growth on wooden material, *Journal of the International Academy of Wood Science*, 33(6), s. 475-485. doi: 10.1007/s002260050131.
- Hunton *Hunton I-bjelken*. Tilgjengelig fra: <https://www.hunton.no/produkter/vegg/hunton-i-bjelken/> (Hentet: 4. april 2020).
- Künzel, H. M. (1995) *Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Norgeskart. Tilgjengelig fra: <https://norgeskart.no/#!?project=norgeskart&layers=1005&zoom=3.5299999999999967&lat=7277903.52&lon=180826.65> (Hentet: 12. mai 2020).
- Ojanen, T. et al. (2010) *Mold growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials*. (Proceedings Buildings XI). Florida, USA.
- Olsen, T.-A. (2017) *Uttørring av kompakte tretak med smarte dampsperrer*. Masteroppgave, NTNU Trondheim.
- Omnisense (2020) *Product information*. Tilgjengelig fra: https://www.omnisense.com/help/sensor1_brief.asp?fbclid=IwAR1Rp2uaBT6seUUSd4tY2LCByLhyWQPuQLS-2sg-9kRhHeNTNTrnJMcamjg (Hentet: 20. mars 2020).
- SINTEF byggforsk (2003) Materialer til luft- og dampetting. *Byggetaljer 573.121*: Norges byggforskningsinstitutt.
- SINTEF byggforsk (2005) Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for inneklimaet. *Byggetaljer 701.401*: Norges byggforskningsinstitutt.
- SINTEF byggforsk (2007) Bindingsverk av tre. Varmeisolering og tetting. *Byggetaljer 523.255*: Norges byggforskningsinstitutt.
- SINTEF byggforsk (2010) Byggskader. Oversikt. *Byggetaljer 700.110*: Norges byggforskningsinstitutt.
- SINTEF byggforsk (2015) Fuktmåling i bygninger. Instrumenter og metoder. *Byggetaljer 474.531*: Norges byggforskningsinstitutt.
- SINTEF byggforsk (2018) Kompakte tak. *Byggetaljer 525.207*: Norges byggforskningsinstitutt.
- Sletfjerding, E. B. (2019) *Smart vapour barriers in compact timber-framed roofs - Parameter analysis and field measurements*. Masteroppgave, NTNU Trondheim.

- Standard Norge (2014) *NS 3512:2014 Måling av fukt i trekonstruksjoner*.
- Storaas, K. (2019) *Smart dampspærre i kompakte tretak - vurdering av fuktsikkerhet. En parameterstudie*. Prosjektoppgave, NTNU Trondheim.
- Thue, J. V. (2016) *Bygningsfysikk - grunnlag*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Uvsløkk, S. (2008) *Selvuttørkingsmekanismer for kompakte tak*. Oslo: SINTEF byggforsk.
- Viitanen, H. og Ojanen, T. (2007) *Improved model to predict mold growth in building materials*. (Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Building X). Florida, USA.
- Viitanen, H. et al. (2010) *Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures*. (Journal of Building Physics 1744-2591). London, England: SAGE Publications.
- Viitanen, H. et al. (2015) *Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models*. (1876-6102): Elsevier Ltd.
- WUFI (2008a) *Details:LongWaveExchange*. Tilgjengelig fra: <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:LongWaveExchange> (Hentet: 14.mai 2020).
- WUFI (2008b) *The *KLI Format for Climate Data*. Tilgjengelig fra: https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:KLI-File?fbclid=IwAR0s_LT71GELCb6_Y9-N5krjgS9Ln9l1tTagf2UtjM5Le86sn-b4K0Bsf7s (Hentet: 2. mai 2020).

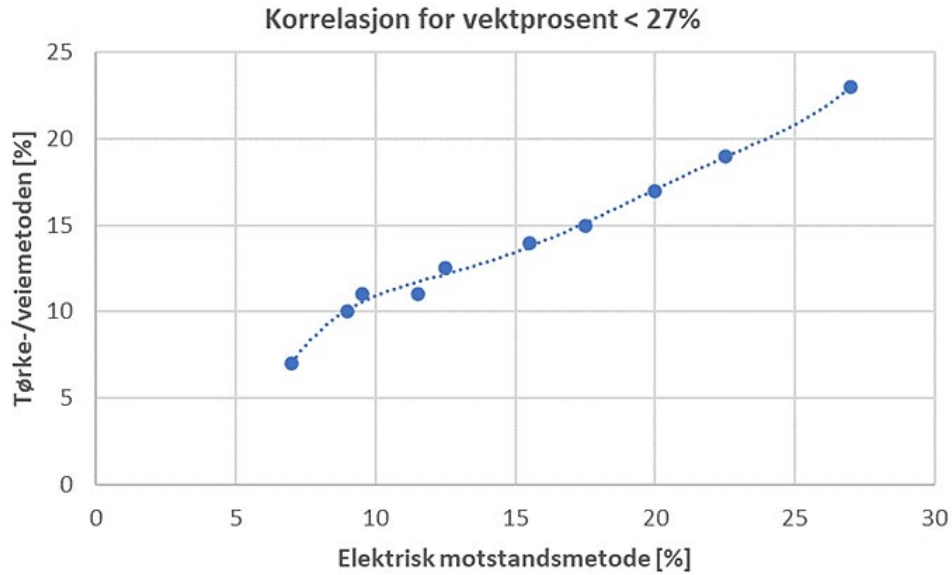
Vedlegg A: Korreksjonsmodell for LVL

Inger Merete Birkeland skrev våren 2019 en masteroppgave som undersøkte fuktopptak i LVL (Laminated Veneer Lumber) og forskjellige målemetoder for å finne fuktinnholdet i treverk. I masteroppgaven fant Birkeland en sammenheng mellom fuktinnhold i LVL ved tørke-/veie metoden og ved elektrisk motstandsmetode (Birkeland, 2019). Resultatet av sammenhengen er gitt i Tabell A - 1.

Tabell A - 1

Relativ fuktighet [%]	Elektrisk motstandsmetode [%]	Tørke-/veie metoden [%]
23%	7,0%	7,0%
43%	9,0%	10,0%
50%	9,5%	11,0%
60%	11,5%	11,0%
65%	12,5%	12,5%
75%	15,5%	14,0%
70%	17,5%	15,0%
85%	20,0%	17,0%
90%	22,5%	19,0%
98%	27,0%	23,0%

For å finne en korreksjonsmodell for sammenhengen mellom målt trefuktighet med reell trefuktighet for LVL er verdiene fra Tabell A - 1 brukt til å finne et interpolerende polynom gitt ved Figur A - 1.



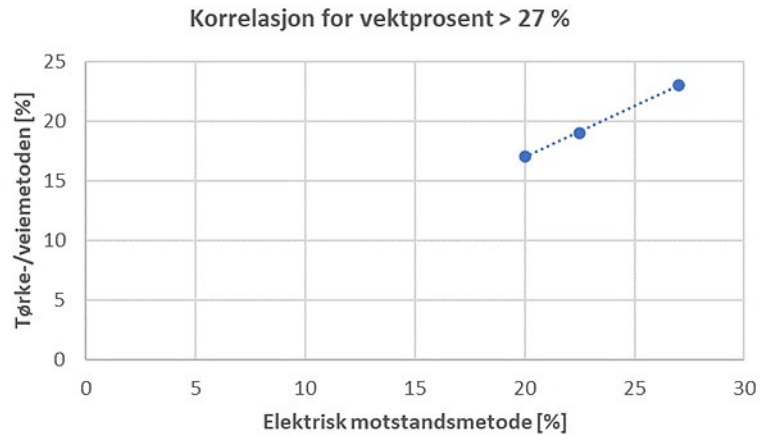
Figur A - 1

Polynomet gitt av Figur A - 1 gir et polynom av grad 4 ved Formel A-1.

$$\begin{aligned}
 \%fuktinnhold_{LVL} &= -0,000331936413090 * \%fuktinnhold_{furu}^4 + 0,024357114004970 \\
 &* \%fuktinnhold_{furu}^3 - 0,629437544345025 * \%fuktinnhold_{furu}^2 \\
 &+ 7,417515405146700 * \%fuktinnhold_{furu} - 21,456826896834200
 \end{aligned}$$

A-1

Ettersom definisjonsområdet for korrelasjonen er begrenset til 27 vektprosent, defineres en linjær tilnærming basert på de tre siste datapunkter gitt av Figur A - 2, for verdier utenfor dette området. Formel er gitt i Formel A - 2.



Figur A - 2

For $\%fuktinnhold_{furu} > 27\%$

$$\%fuktinnhold_{LVL} = 0.8609 * \%fuktinnhold_{furu} - 0.2781$$

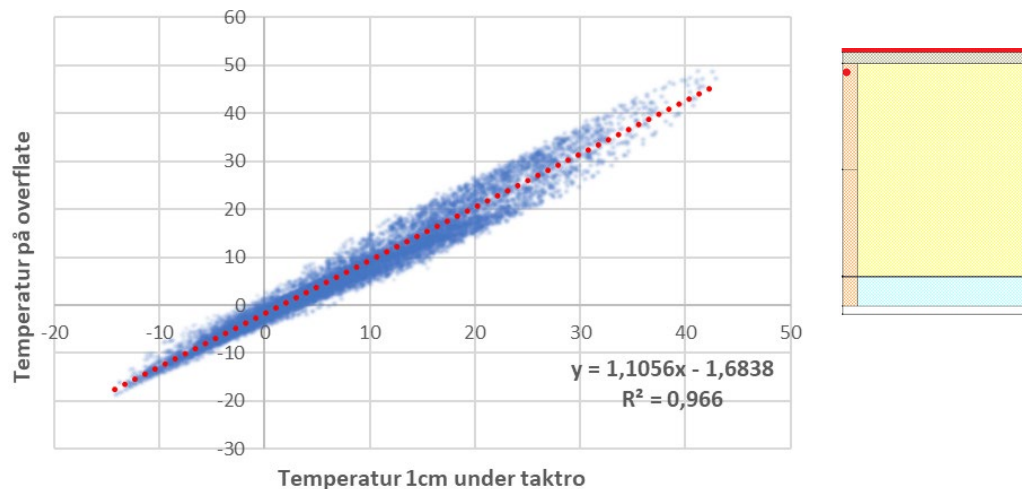
A-2

Vedlegg B: Temperaturkorrelasjon

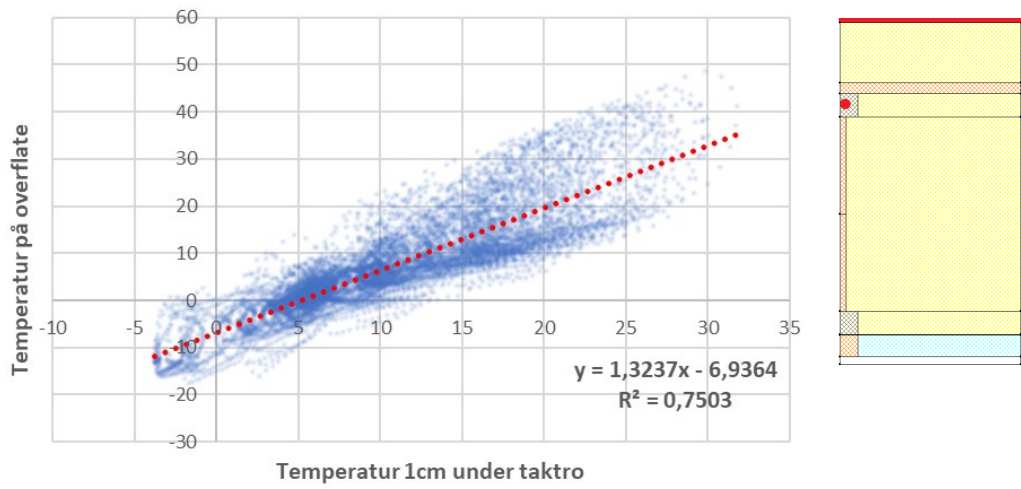
En temperaturkorrelasjon er beregnet ved hjelp av WUFI, ved bruk av utendørsklima fra et område nær prosjektene. Temperaturer er hentet fra 1cm under taktro og ved takoverflaten i WUFI. Oversikt over prosjektene med utendørsklima er gitt i Tabell B-1. Figur B-1, Figur B-2 og Figur B-3 viser temperaturkorrelasjon for prosjektene henholdsvis Lund Vest, Sveberg og Borgen Vest. Vi observerer at Lund Vest har minst spredning av punkter mens Sveberg har tydelig størst. Dette indikerer at korrelasjonskurven for Sveberg inneholder signifikant usikkerhet. Dette er forklart av fallisolasjonen på oversiden av taktroen fungerer som en buffer og reduserer døgnvariasjonene.

Tabell B-1, Oversikt over simulert klima for temperaturkorrelasjon

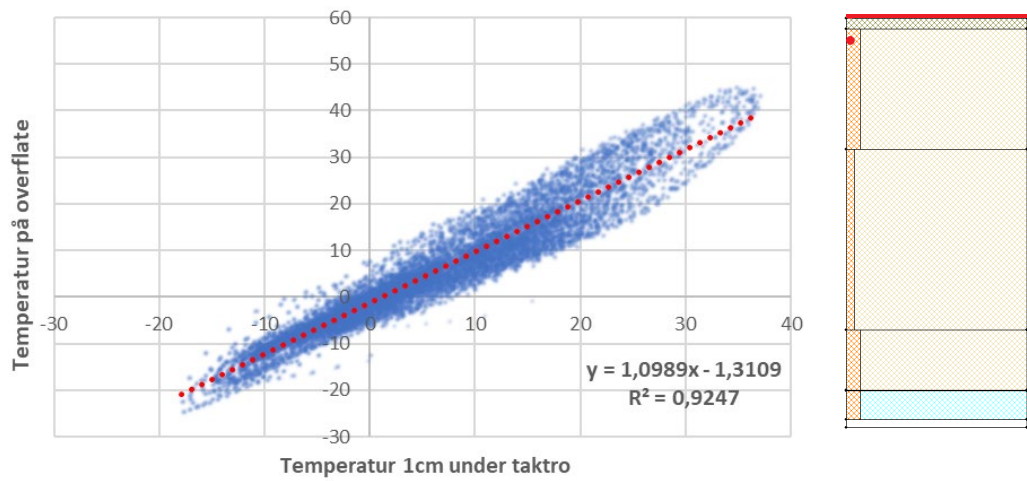
Prosjekt	Simulert klimafil i WUFI
Lund Vest	Oslo
Sveberg	Trondheim
Borgen Vest	Gardermoen



Figur B-1, Temperaturkorrelasjon for Lund Vest



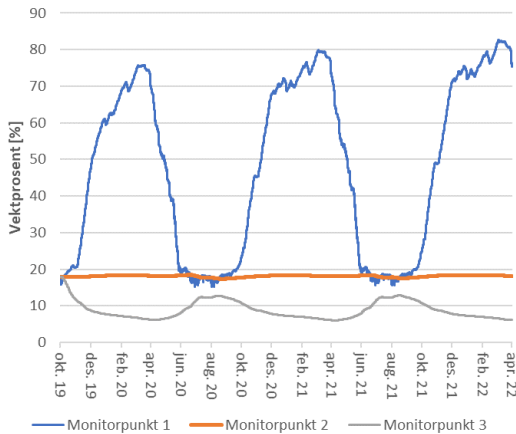
Figur B-2, Temperaturkorrelasjon for Sveberg



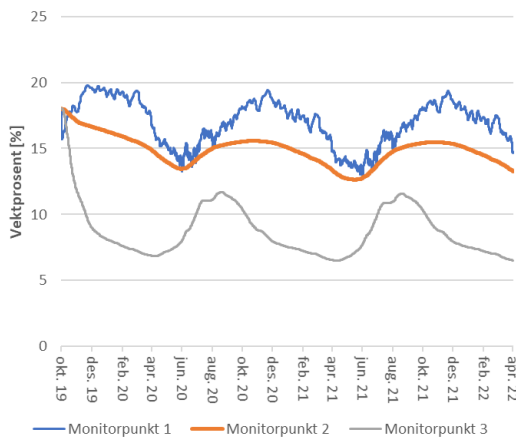
Figur B-3, Temperaturkorrelasjon for Borgen Vest

Vedlegg C: WUFI-resultater

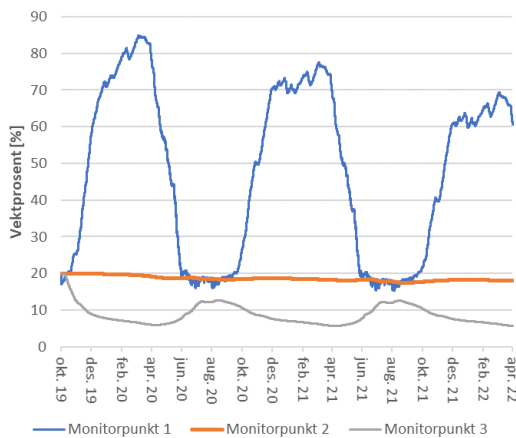
Fuktinnhold i taktro for beregningstilfelle (BT) 1-10.



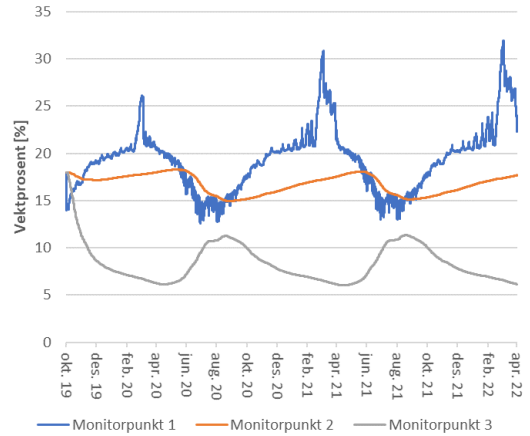
a) BT2. Høyt fukttilskudd



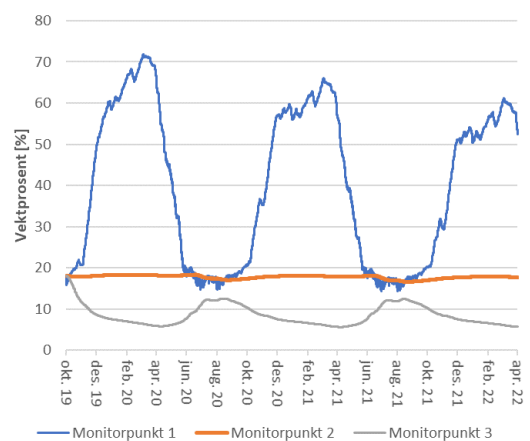
c) BT4. 100mm toppisolasjon



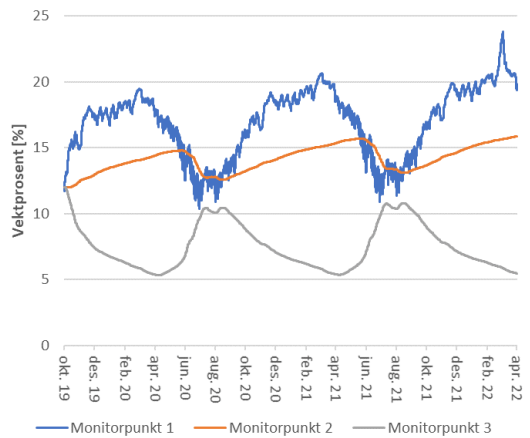
e) BT6. 20% fuktinnhold



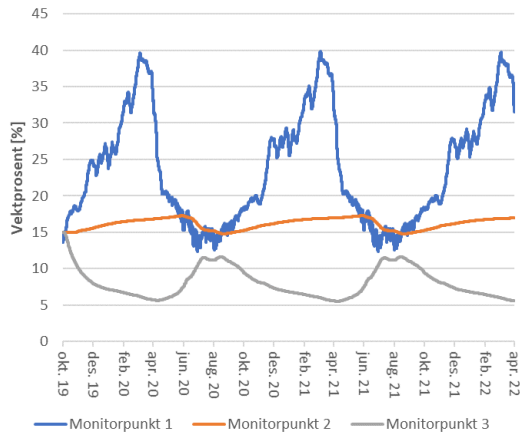
b) BT3. Trefiberisolasjon



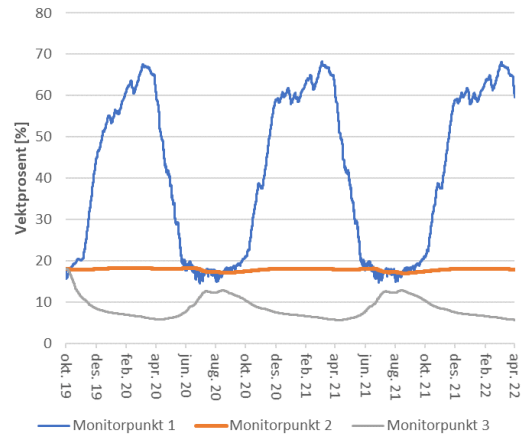
d) BT5. Sd-1m himling



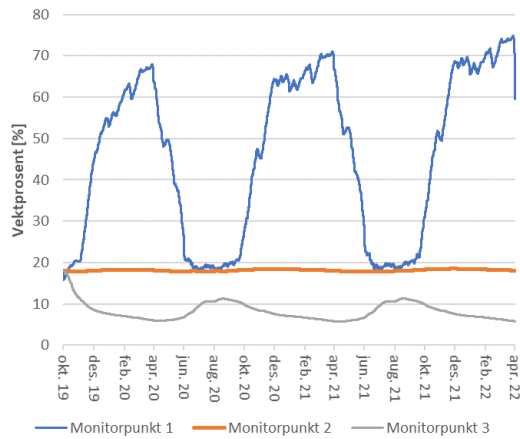
f) BT7. 12% fuktinnhold



g) BT8. 15% fuktinnhold



h) BT9. SIGA Majrex

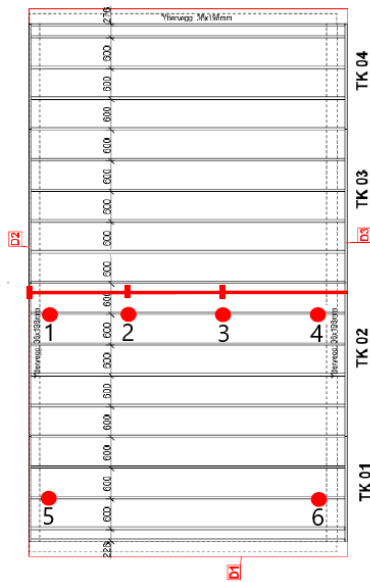


i) BT10. Full skygge

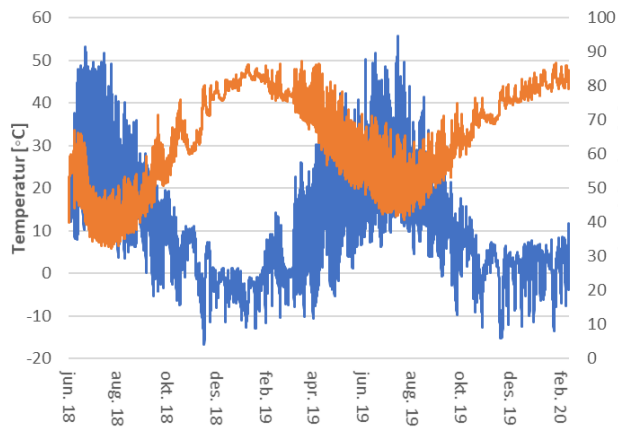
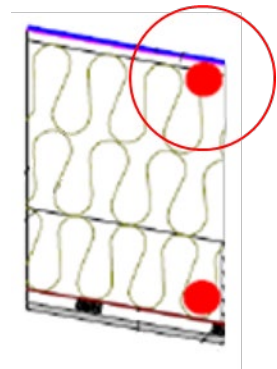
Figur C-1, Fuktinnhold ved WUFI-beregning for beregningstilfellene 1-10

Vedlegg D: Pilotprosjekter

Lund Vest

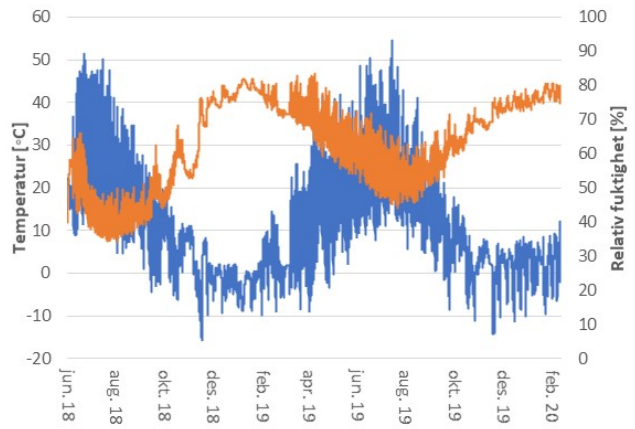


- 1 - TK02_MØNE (BAD)
- 2 - TK02_2000mm (BAD)
- 3 - TK02_4000mm (GANG)
- 4 - TK02_TAKFOT (BOD)
- 5 - TK01_MØNE (STUE)
- 6 - TK01_TAKFOT (SOVEROM)



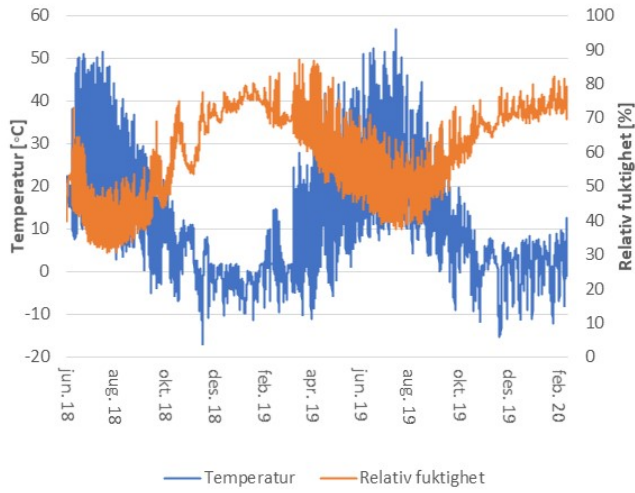
— Temperatur — Relativ fuktighet

a) Sensor 1

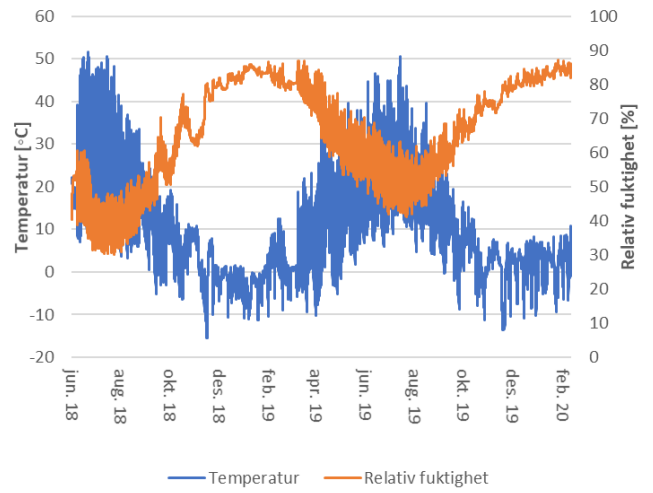


— Temperatur — Relativ fuktighet

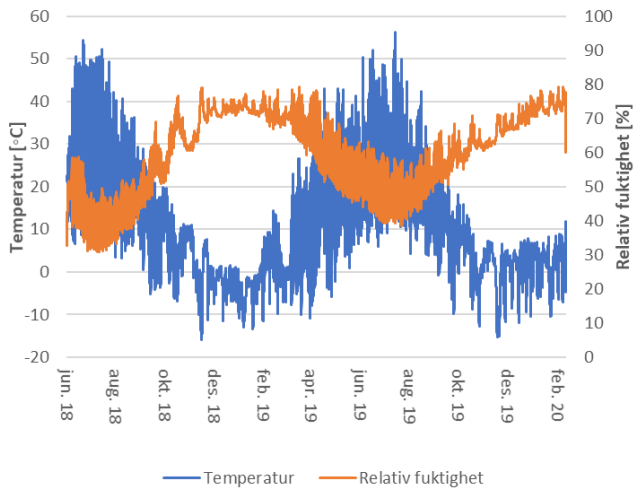
b) Sensor 2



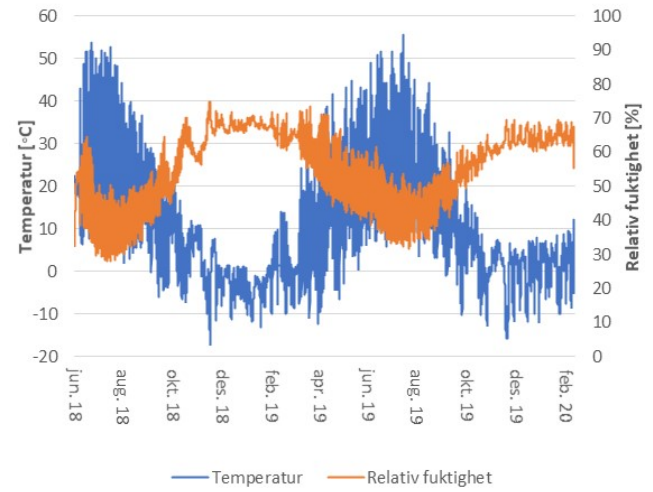
c) Sensor 3



d) Sensor 4



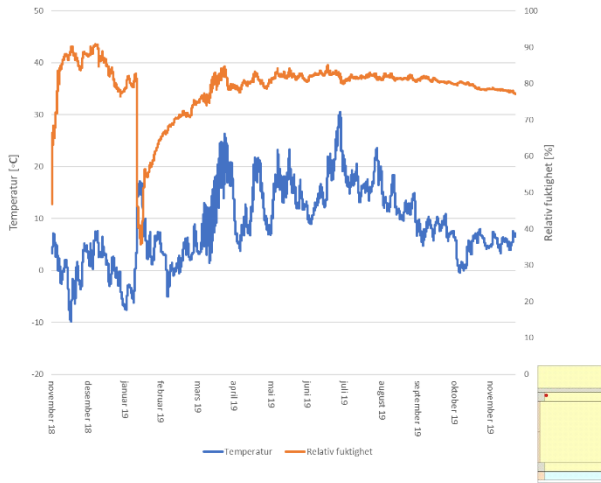
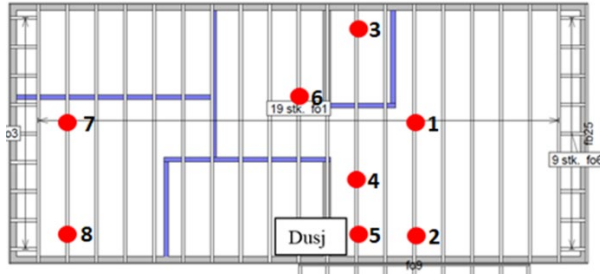
e) Sensor 5



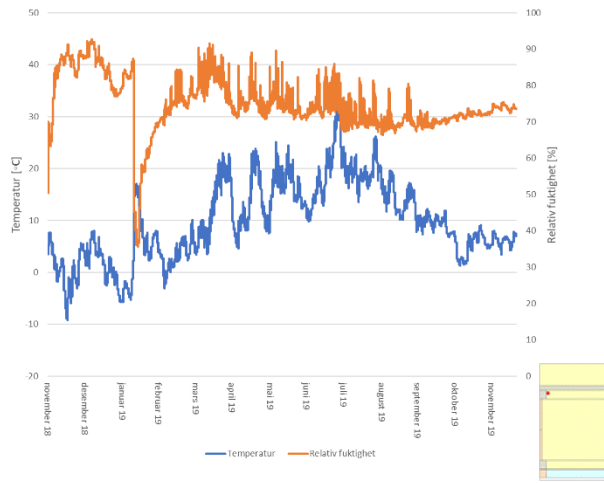
f) Sensor 6

**Figur D-1, Temperatur og relativ fuktighet for hver sensor i Lund Vest prosjektet, målt 1cm under taktro.
- merk at sensormålingene er i isolasjonen.**

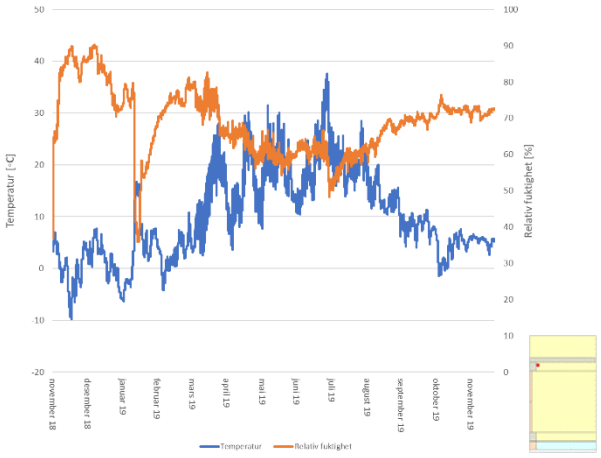
Sveberg



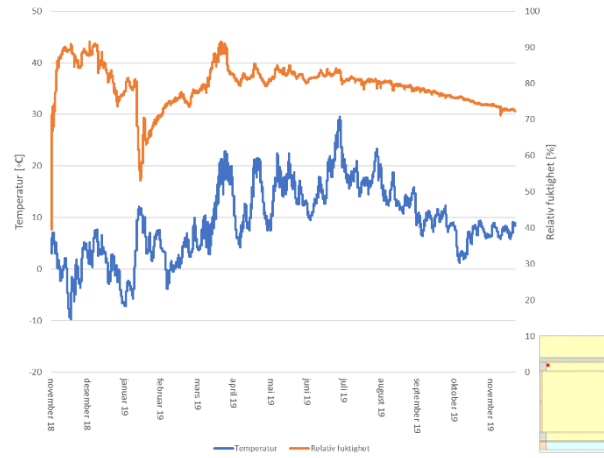
a) Sensor 1



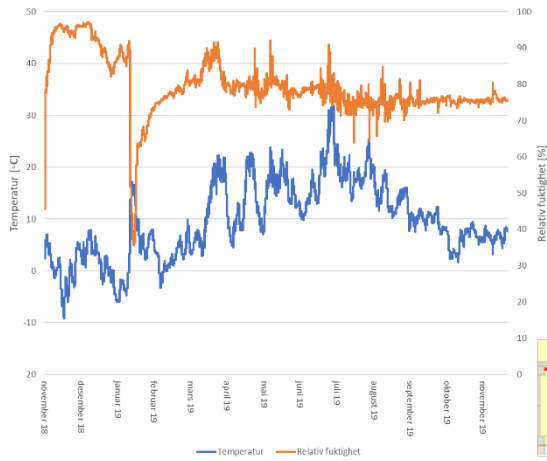
b) Sensor 2



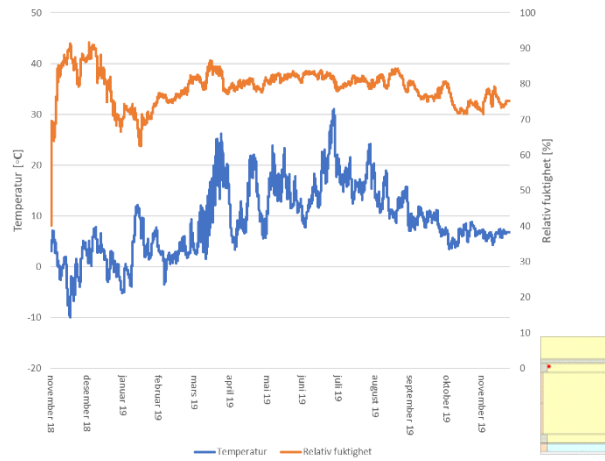
c) Sensor 3



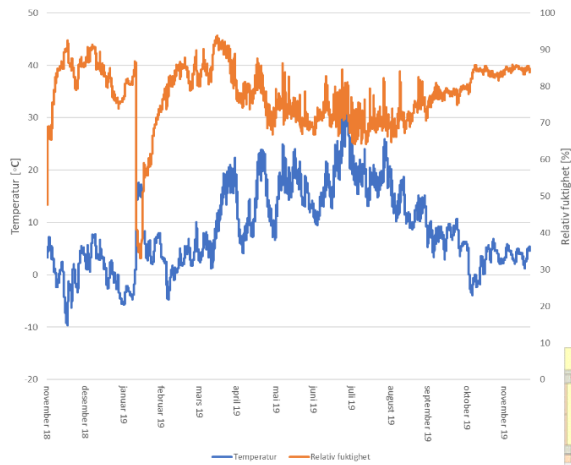
d) Sensor 4



e) Sensor 5



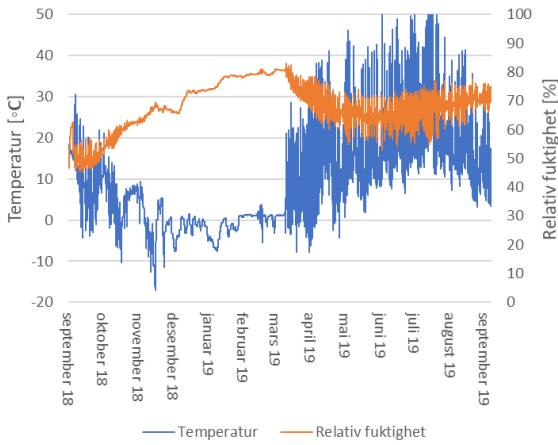
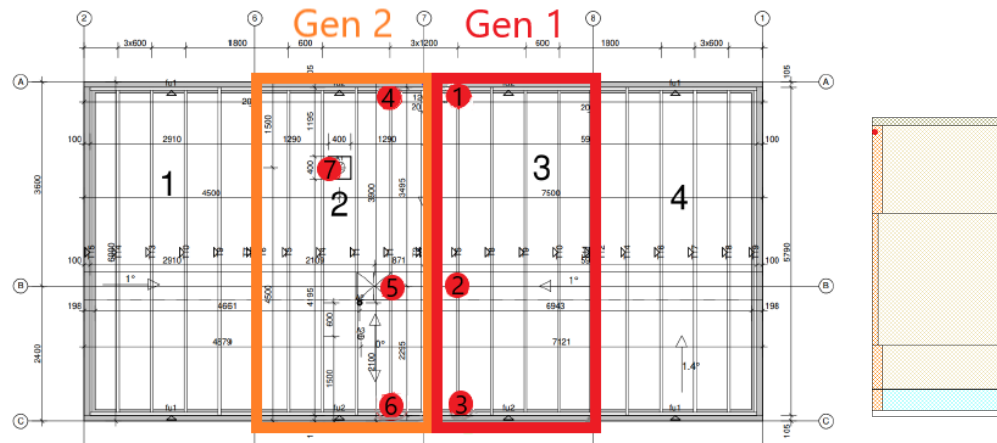
f) Sensor 6



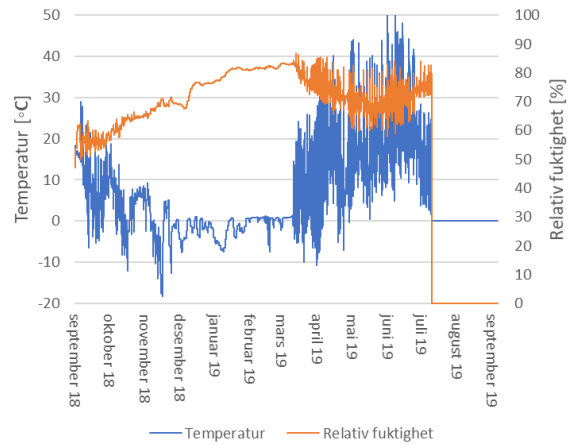
g) Sensor 8

**Figur D-2, Temperatur og relativ fuktighet for hver sensor i Sveberg prosjektet, målt 1cm under taktro.
- merk at sensormålingene er i isolasjonen.**

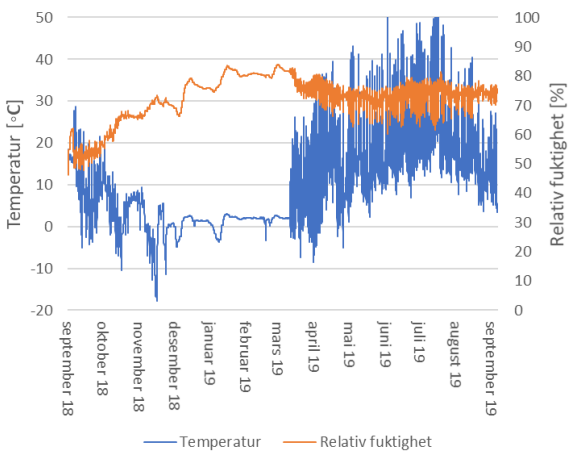
Borgen Vest



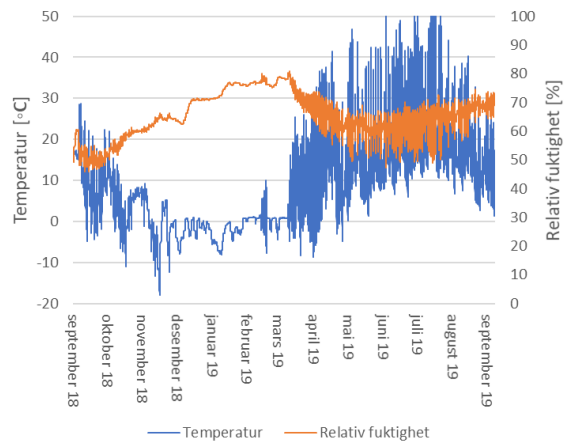
a) Sensor 1



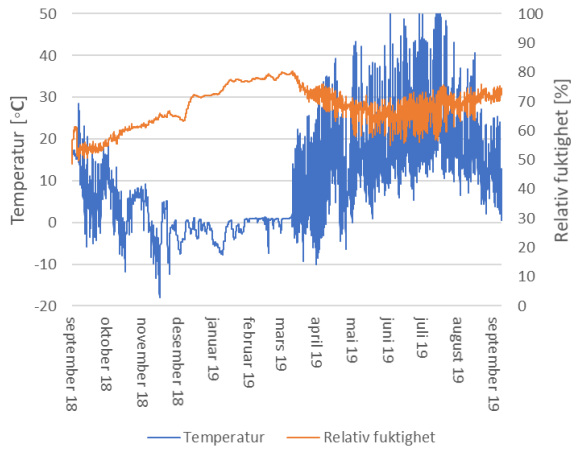
b) Sensor 2



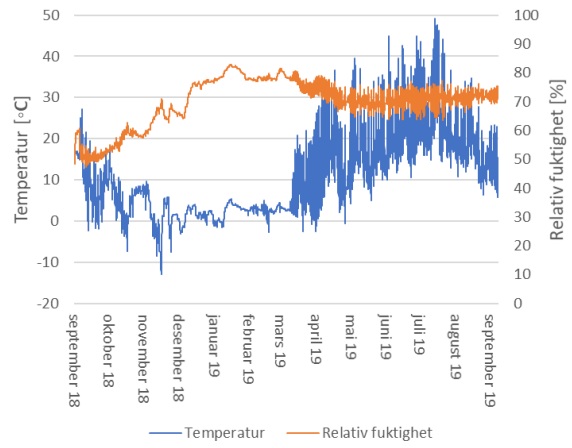
c) Sensor 3



d) Sensor 4



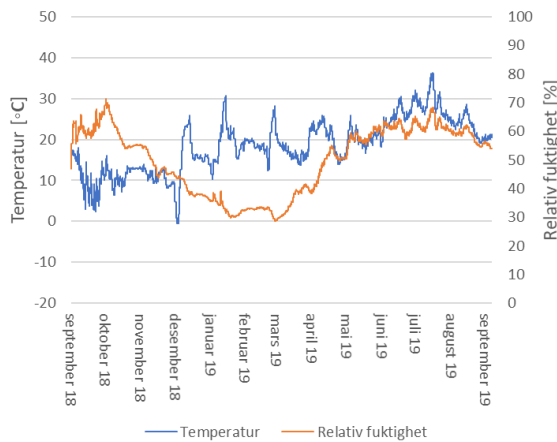
e) Sensor 5



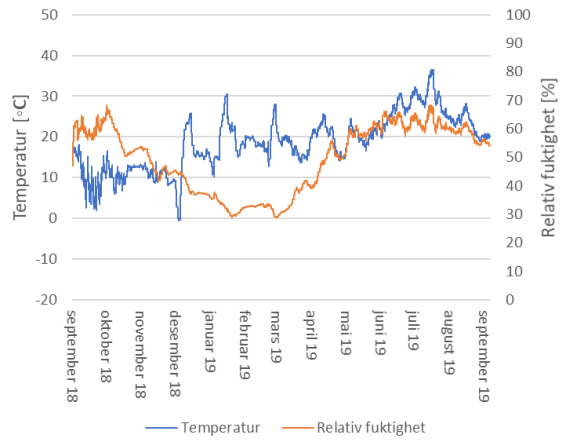
f) Sensor 6

Figur D-3, Temperatur og relativ fuktighet for hver sensor i Borgen Vest prosjektet, målt 1cm under taktro.

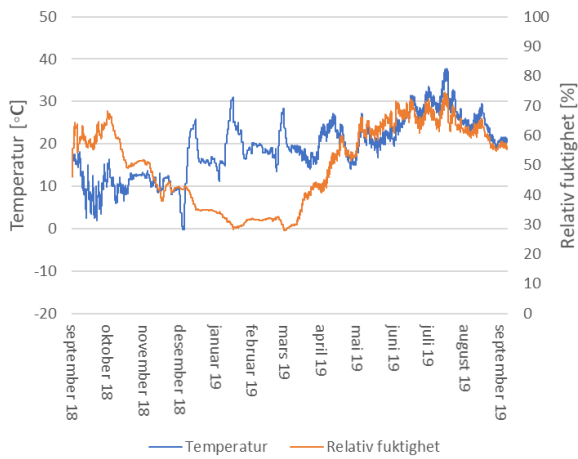
Merk at sensormålingene er i isolasjonen.



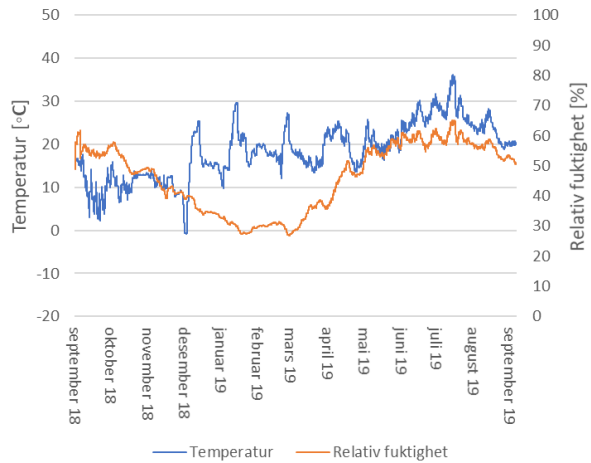
a) Sensor 1



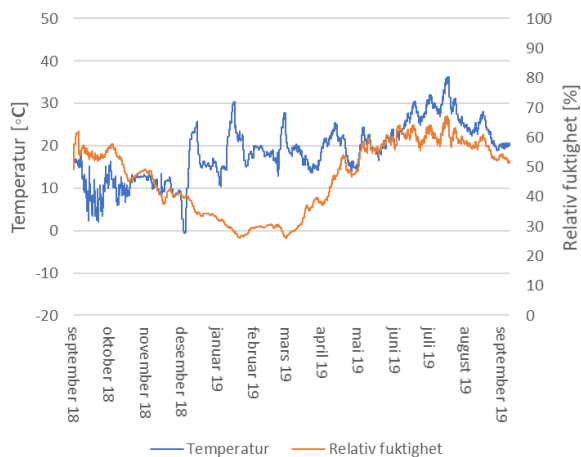
b) Sensor 2



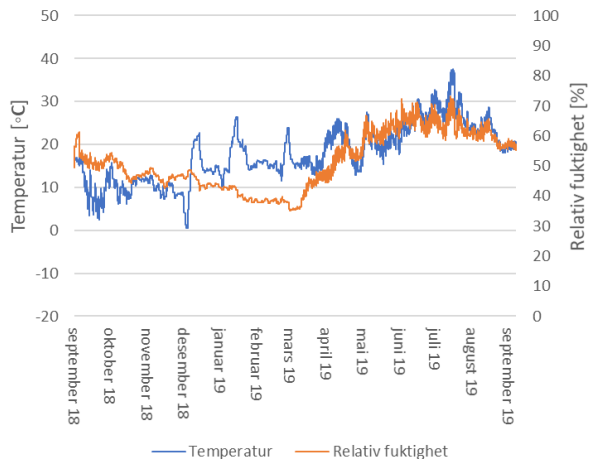
c) Sensor 3



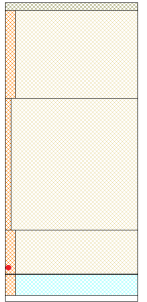
d) Sensor 4



e) Sensor 5



f) Sensor 6



Figur D-4 Temperatur og relativ fuktighet for hver sensor i Borgen Vest prosjektet, målt 1cm over SDS.

