

Anders Ugland Engen

**NTNU**  
Norges teknisk-naturvitenskapelige  
universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg - og miljøteknikk

Anders Ugland Engen

# Lufttetthet i klemte vindsperreskjøter og fuktteknisk analyse av trebjelkelagets kantbjelke

Juni 2020





Kunnskap for en bedre verden

# Lufttetthet i klemte vindsperreskjøter og fuktteknisk analyse av trebjelkelagets kantbjelke

**Anders Ugland Engen**

Bygg- og Miljøteknikk, 5-årig

Innlevert: Juni 2020

Hovedveileder: Stig Geving, IBM

Medveileder: Lars Gullbrekken, SINTEF Community

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg - og miljøteknikk



# Forord

Denne oppgaven er en avsluttende masteroppgave skrevet våren 2020. Oppgaven inngår i faget *TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, masteroppgave* og tilsvarer 30 studiepoeng.

Grunnet Korona-pandemien ble denne masteroppgaven svært annerledes enn planlagt. Oppgaven omhandlet egentlig et laboratorieforsøk hvor klemte skjøter i vindspærreplater skulle trykktestes for å undersøke størrelsen på luftlekkasjene som oppstår og hvordan disse utvikler seg over tid. Forsøket skulle opprinnelig begynne på samme tid som SINTEF sine laboratorier ble stengt for studenter grunnet smittevern hensyn. Laboratoriene ble åpnet igjen i slutten av april, men fuktskyklusene i forsøket gjør at det er behov for to måneder med tid for å fullføre forsøket. Omstendighetene har ført til at dette har blitt en to-delt oppgave. Det bes om at leseren er oppmerksom på omstendighetene under lesingen av oppgaven.

Den første delen av masteroppgaven er slik den opprinnelige oppgaven var tenkt til å være. Unntaket er diskusjon og konklusjon som er skrevet annerledes på grunn av omstendighetene denne våren. Kap. 1 – Kap. 4 er skrevet som om det foreligger resultater i oppgaven. Mangel på tilgang til laboratoriet har ført til begrenset med bilder av forsøksoppsettet og utstyret som forsøket benytter seg av. Dette er spesielt tydelig i kapitelet om laboratorieforsøkets oppsett. Det finnes ingen resultater til denne delen av oppgaven og jeg håper at en ny masterstudent vil fullføre denne oppgaven og laboratorieforsøket senere.

Oppgavens andre del omhandler en annen problemstilling. Del 2 handler om problemer knyttet til muggvekst i trebjelkelagets kantbjelke mellom oppvarmede rom. Denne problemstillingen ble kommet frem til under drøfting av hvordan oppgaven skulle fortsettes da laboratoriet ble stengt ned.

Jeg ønsker å takke hovedveileder Stig Geving og medveileder Lars Gullbrekken for god hjelp i løpet av semesteret. I tillegg rettes en takk til Ole Aunrønning for svært god hjelp i laboratoriet.

Til slutt vil jeg takke min kjære samboer Stine. Hjemmekontoret hadde ikke vært det samme uten deg.

Trondheim,  
11. juni 2020



---

Anders Ugland Engen



# Sammendrag

På grunn av Korona-pandemien er denne masteroppgaven delt i to separate deler.

## Del 1:

Vindsperren er det første lufttette sjiktet som skal hindre luft utenfra å trenge innover i konstruksjonen i en bindingsverksvegg. I vindsperren er skjøten et naturlig svakt punkt. Denne skjøten utføres vanligvis som en klemte skjøt hvor skjøten er klemt mellom en stender og en lekt. For at lufttettheten til dette sjiktet skal opprettholdes er det svært viktig at de klemte skjøtene er så lufttett som mulig, samtidig som lufttettheten opprettholdes over tid. Dette gjelder spesielt skjøter der hvor det er benyttet vindsperre av platemateriale. I en konstruksjon med vindsperre av plateprodukt vil antallet skjøter være større enn ved bruk av et rullprodukt. Treverket i den klemte skjøten vil oppleve krymping og svelling grunnet varierende fuktighet i omkringliggende luft, noe som kan føre til en forringelse av skjøtens lufttetthet. Den klemte skjøten kan utføres på flere ulike måter med ulike kombinasjoner av parametere. Det synes å være liten kunnskap om hvilken kombinasjon av parametere som gir den beste lufttettheten for den klemte skjøten.

I denne oppgaven er det utført laboratorieforsøk med den hensikt å teste lufttettheten av klemte plateskjøter i vindsperresjiktet. I forsøket undersøkes effekten av ulik senteravstand mellom festemidlene på klemlekten, samt effekten som oppnås ved bruk av teip. I forsøket trykktestes 18 ulike prøvestykker trykktestes for å måle luftlekkasjene som oppstår gjennom skjøten. Prøvestykkene vil gjennomgå en oppfukting og tørking for å simulere en aldring av den klemte skjøten. Dette gjøres for å undersøke hvordan luftlekkasjene i skjøtene vil utvikle seg over tid. Det gjennomføres tre fukt-/tørkesykluser. Prøvestykkenes fuktinnhold varierer mellom 9 vekt-% og 15 vekt-%. Dette intervallet er funnet ved hjelp av simuleringer på en klemte plateskjøt i vindsperren i programmet WUFI-2D.

På grunn av at SINTEF sine laboratorier ble stengt grunnet Korona-pandemien, var det ikke muligheter til å få gjennomført laboratorieforsøket som var tenkt i denne oppgaven. Derfor er denne oppgaven å anse som en metode-oppgave, hvor tematikken og forsøket kan fortsettes av andre.

## Del 2:

Ved oppbygningen av et trebjelkelag utføres himlingen med et lufttett sjikt mellom oppvarmede rom. Dette lufttette sjiktet skal blant annet hindre at det oppstår luftlekkasjer som kan føre med seg fuktig luft lenger ut i konstruksjonen og deretter kondensere. Det er ønskelig at det lufttette sjiktet skal være dampåpent. Gulvkonstruksjonen i etasjen over er ofte dampnett. Derfor må det lufttette sjiktet være dampåpent slik at byggfukt ikke blir innesperret mellom to dampnette sjikt. Når det lufttette sjiktet er dampåpent, kan vanndamp fra den fuktige inneluften diffundere utover i konstruksjonen ved overgangen mellom trebjelkelaget og ytterveggen. Dette gjelder kun i konstruksjoner hvor det ikke er ført en kontinuerlig dampspærre forbi etasjeskillerene. Når vanndampen treffer på større vanndampmotstand i form av kantbjelken, så er det muligheter for at det oppstår kondensasjon. Dette kan videre føre til problemer med muggvekst på kantbjelken.

Det er utført simuleringer i WUFI2D og WUFI Mould Index VTT for å undersøke hvor mye fuktighet som kan forventes i kantbjelken ved bruk av ulike parametere i overgangen mellom trebjelkelag og ytterveggen. Videre er risikoen for muggvekst undersøkt. Denne parameterstudien viser at kantbjelken, uavhengig av hvilke parametere som benyttes, vil oppleve svært høye nivåer av relativ fuktighet, opp mot 97 %. Dette fører videre til at

risikoen for muggvekst er svært høy. Parametere som tilfører fuktighet til konstruksjonen, slik som fuktigere klima og fuktig inneluft, burde begrenses for å holde risikoen for muggvekst nede. Parameter som reduserer risikoen for muggvekst i kantbjelken er bruk av smart dampsperre som lufttett sjikt i himling, bruk av trefiberisolasjon som kantisolasjon og økt veggykkelse.

I tillegg er det gjort undersøkelser om to ulike tiltak kan ha en effekt for å redusere fuktigheten og risikoen for muggvekst i kantbjelken. Disse tiltakene er bruk av et vertikalt sperresjikt mellom kantisolasjonen og bjelkelagsisolasjonen (både dampbrems og smart dampsperre) og å flytte kantbjelken lenger inn i konstruksjonen. Resultatene viser at begge tiltakene har en svært god effekt for å redusere risikoen for muggvekst i kantbjelken. Tiltakene må allikevel undersøkes med tanke på hvilken praktisk anvendbarhet disse har.



# Abstract

Due to the Corona pandemic, this master's thesis is separated into two different parts.

## Part 1:

The wind barrier is the first airtight layer to prevent outside air from penetrating the structure of a wood-frame wall. In the wind barrier, the joint is a naturally weak point. This joint is usually performed as a clamped joint where the joint is clamped between a wooden batten and a stud. To maintain the airtightness of this layer, it is very important that the clamped joints are as airtight as possible, while maintaining the airtightness over time. This is especially true for the joints where the wind barrier is made of a board material. In a board material, the number of joints will be greater than when using a roll product. The wood in the clamped joint will experience shrinkage and swelling due to varying humidity in the surrounding air, which may cause a deterioration of the joint's airtightness. The clamped joints can be used in different ways with a different combination of parameters. There seems to be little knowledge of which combinations of parameters provides the best airtightness for the clamped joints.

In this thesis, laboratory experiments have been carried out with the intention of testing airtightness of clamped joints in the wind barrier layer. The study examines the effect of different center spacing between the fasteners on the stud, as well as the effect obtained by using adhesive tape. In the experiment, 18 different test samples were pressure tested to measure the air leaks that occur through the joints. The test samples will undergo humidifying and drying to simulate the aging of the clamped joints. This is done to investigate how the air leakages in the joints will develop over time. Three humidifying/drying cycles are performed. The moisture content of the test samples varies between 9 % and 15 % by weight. This interval was found using simulations on a clamped board joint in the WUFI-2D program.

The closure of SINTEF's laboratories due to the Corona pandemic, made it impossible to carry out the laboratory experiment that was envisioned for this thesis. Therefore, this task is to be looked at as a methodology thesis, where the experiment can be continued by others later.

## Part 2:

When constructing structural floors in wood-frame houses, the ceiling is constructed with an airtight layer between heated rooms. This airtight layer is, among other things, intended to prevent air leakages that can carry damp air further into the structure, and then condensate. It is desirable that the airtight layer has a low vapour resistance. The floor-construction in the upper floor is usually vapour tight. Because of this, the airtight layer needs to have a low vapour resistance so that the built-in moisture in the materials are not trapped between two vapour tight layers. When the airtight layer has a low vapour resistance, damp air from the internal rooms can diffuse into the structure at the transition between the structural floor and the outer wall. This only applies to constructions where there is not used a continuous vapour barrier passed the structural flooring. When the damp air meets greater vapour resistance, in the form of the edge beam, condensation may occur. This can further lead to problems with mould growth on the edge beam.

Simulations have been performed in WUFI-2D and WUFI Mould Index VTT to investigate how high moisture content that can be expected in the edge beam by using different parameters in the transition between the structural floor and the outer wall. Furthermore, the risk of mould growth has been investigated. The parameter study shows that, regardless of parameters used, the edge beam will experience high levels of relative humidity, up to 97 %. This further leads to a very high risk of mould growth. Parameters that add moisture to the structure, such as climate and moisture from the internal air, should be limited to keep the risk of mould growth at low levels. Parameters that reduce the risk of mould growth in the edge beam are the use of a smart vapour barrier as airtight layer in the ceiling, use of wood fiber insulation as edge beam insulation and increased wall thickness.

In addition, a study of two separate measures for reducing the risk of mould growth in the edge beam have been investigated. The measures are the use of a vertical vapour resistance layer between the edge beam insulation and the flooring insulation (both a vapour retarder and smart vapour barrier) and to move the edge beam further into the structure. The results shows that both measures have a very good effect on reducing the risk of mould growth in the edge beam. The measures must be further investigated regarding their practical applicability.

Del 1

Lufttetthet i klemte vindsperreskjøter



# Innhold

1	Innledning .....	1
2	Litteratur .....	3
2.1	Teori.....	3
2.1.1	Oppbygningen av en bindingsverksvegg .....	3
2.1.2	Vindspærren.....	4
2.1.3	Lufttetthet.....	6
2.1.4	Klemte skjøter .....	8
2.1.5	Byggeteip.....	9
2.1.6	Trefuktighet .....	10
2.2	Tidligere forskning ved NTNU .....	13
2.2.1	Sagen (2003) .....	13
2.2.2	Bergby (2011) .....	15
2.2.3	Selmer (2013) .....	17
2.2.4	Norvik (2018).....	19
3	Fuktsimuleringer.....	21
3.1	Metode benyttet i WUFI-2D .....	21
3.2	Resultat og diskusjon av simuleringene.....	26
3.3	Valg av fuktintervall .....	29
4	Laboratorieforsøkets oppsett .....	31
4.1	Parametere i forsøket .....	31
4.1.1	Parameterstudien.....	31
4.1.2	Paramtere som undersøkes i laboratorieforsøket .....	34
4.1.3	Øvrige parametere i laboratorieforsøket .....	35
4.2	Utstyr som benyttes i laboratorieforsøket .....	36
4.2.1	Test- og oppfuktingsboks .....	36
4.2.2	Prøvestykkene .....	38
4.2.3	Lufttrykkstilførsel .....	42
4.2.4	Utstyr for fuktmåling .....	44
4.3	Forsøksprosedyre .....	44
4.3.1	Egenlekkasje .....	44
4.3.2	Trykktesting av prøvestykkene .....	45
4.3.3	Logging av resultater.....	45
4.3.4	Oppfukting og tørking .....	47
4.3.5	Demontering og absolutt tørking .....	48
5	Diskusjon.....	49

5.1	Hypoteser .....	49
5.2	Faktisk påvirkning for total lufttetthet .....	50
5.3	Kost/nytte-evaluering .....	50
5.4	Feilkilder .....	51
5.4.1	Likheten med en virkelig skjød .....	51
5.4.2	Aldringsprosessen .....	51
5.4.3	Test- og oppfuktingsboksen.....	51
6	Konklusjon og videre arbeid .....	53
	Referanser.....	55

# 1 Innledning

En bygning sin lufttetthet spiller en avgjørende rolle for hvor energieffektiv den er. Dersom en konstruksjon ikke er tilstrekkelig lufttett, vil det kunne føre til et ekstra energiforbruk. I tillegg til dette kan manglende lufttetthet være en årsak til fuktproblematikk, samt føre til et forverret inneklima. Varmetap grunnet utilstrekkelig lufttetthet er også blitt svært viktig de seneste årene. Grunnen til dette er at bygningers isolasjonsevne stadig øker, samtidig som teknologien innenfor varmegjenvinning har blitt bedre. Dette gjør at lufttetthetens bidrag i varmetapsbudsjettet har blitt større. I en bindingsverksvegg er vindspærren det første lufttette sjiktet som skal hindre uteluft fra å trenge inn i konstruksjonen. Dersom dette sjiktet ikke er tilstrekkelig lufttett, vil det kunne føre til en nedsatt isolerende evne for varmeisolasjonen. Luften kan videre trenge helt inn til inneluften dersom dampspærren heller ikke innehar den tilstrekkelige lufttettheten. Vindspærren har et naturlig svakt punkt i skjøten mellom vindspærrematerialene. For å sørge for at lufttettheten er tilstrekkelig, samtidig som den opprettholdes over lengre tid, er det viktig at denne utføres på en måte som gjør at dette er mulig. I de fleste tilfeller benyttes klemløker for å tette slike skjøter, men dette kan gjøres på flere ulike måter. Blant annet kan det benyttes teip i et forsøk på å øke tettheten ytterligere. Det er på bakgrunn av dette interessant å undersøke hvilken utførelse av vindspærreskjøten som viser seg å være mest lufttett over tid.

I denne masteroppgaven skal det gjennomføres forsøk i laboratoriet. Hensikten med dette forsøket er å undersøke luftlekkasjen i klemte skjøter i vindspærresjiktet. Slike skjøter inneholder flere ulike parametere og kan utføres med forskjellige kombinasjoner av disse. Ved å endre på disse parameterne ved bruk av forskjellige prøvestykker, gir det mulighet for å se hvilke som gir den minste luftlekkasjen, og hvor stor påvirkning de ulike parameterne har på denne. For å undersøke hvordan lekkasjen utvikler seg over tid vil forsøket også gjennomføres med akselerert aldring i form av fukt- og tørkesykluser av prøvestykkene. Disse syklusene er simulert i programmet WUFI-2D for å undersøke hva som er reelle fuktintervaller i de klemte skjøtene. Parameterne som benyttes for prøvestykkene i dette forsøket ble bestemt i prosjektoppgaven som ble gjennomført høsten 2019 (Engen, 2019a). Det ble der bestemt at laboratorieforsøket skal innebære å teste vindspærreskjøter i vindspærreplater, med og uten teip, samt ulike avstander mellom klemløstens festemidler. I prosjektoppgaven ble laboratorieforsøket som finner sted i denne masteroppgaven nøye planlagt.

Resultatene fra laboratorieforsøket vil kunne bidra til å øke forståelsen av hvilken effekt bruken av teip i klemte skjøter har for lufttettheten til en bygning. Å kvantifisere denne effekten vil være et viktig tilskudd til videre forskning på bruk av teip. Erfaringer viser at byggebransjen benytter teip ukritisk, gjerne uten å ha fullstendig oversikt over hvilken effekt som kan oppnås ved bruken (Engen, 2019b). Dette gjelder spesielt etter at teipen har blitt aldring. Forskning tyder på at teipen mister sin evne til å opprettholde lufttettheten lenge før bygningens levetid er nådd (Fufa et al., 2018). Informasjon om senteravstander vil også være viktig da det ikke finnes tydelige råd for hvilke senteravstander som viser seg å være mest lufttett over tid, spesielt sett i sammenheng med bruk av teip. Oppgaven begrenser seg til å kun omhandle klemte skjøter i vindspærreplater, og med de

parameterne som laboratorieforsøket utføres på. Videre er det i denne oppgaven begrenset med tid slik at det kun er et fåtall av parametere, senteravstand og teip, som blir nøye undersøkt. På grunn av begrensninger på tid er forsøket begrenset til tre fuktskykluser.

I oppgavens første del vil det bli presentert teori som er nødvendig for å forstå laboratorieforsøket og metoden som benyttes. Det vil også bli presentert tidligere forskning på temaet klemte skjøter og hvilke resultater som er kommet frem til. En viktig del av laboratorieforsøket er fukt- og tørkesyklusene som utføres, derfor vil metoden for simuleringene knyttet til dette presenteres. Videre vil metoden og oppsettet for laboratorieforsøket presenteres, etterfulgt av forsøkets resultater. Til slutt kommer en diskusjon av de resultatene som er oppnådd.

Oppsummert er det følgende problemstillinger som besvares i denne oppgaven:

- *Hvordan påvirkes luftlekkasjen i en klemt plateskjøt i vindspærresjiktet av bruken av teip?*
- *Hvordan påvirkes luftlekkasjen i en klemt plateskjøt i vindspærresjiktet av ulik senteravstand mellom klemløst festemidler?*
- *Hvordan utvikler luftlekkasjen i en klemt plateskjøt i vindspærren seg over tid?*



## 2 Litteratur

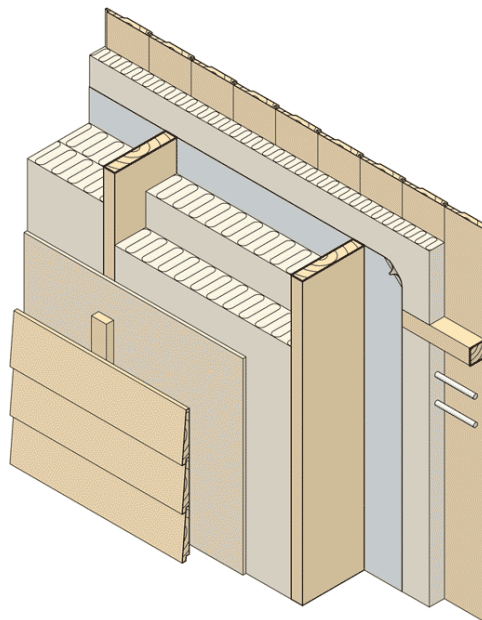
### 2.1 Teori

I denne delen vil det presentert teori det er nødvendig å ha kunnskaper om for å kunne forstå oppgavens problemstillinger og laboratorieforsøket som utføres. Deler av teorien er hentet fra litteraturstudien som ble gjennomført i prosjektoppgaven (Engen, 2019a). For litteraturstudiens metode henvises til denne.

#### 2.1.1 Oppbygningen av en bindingsverksvegg

Ytterveggenes viktigste funksjon er å skjerme det innvendige rommet for klimaet utenfor. Samtidig skal veggen bidra til å opprettholde et komfortabelt inneklima. Dette betyr at ytterveggen må tilfredsstillere krav til nødvendig varmeisolering, samt luft- og regntetthet. I tillegg til dette skal ytterveggen (avhengig av type bruk) oppfylle krav med tanke på isolering av lyd og motstand mot brann. I de fleste tilfeller (spesielt i småhus) er det også ytterveggen som skal bære de nødvendige lastene for at konstruksjonen skal stå.

Det finnes flere forskjellige metoder for å konstruere en yttervegg. En av de vanligste metodene å benytte seg av i Norge er yttervegger konstruert av bindingsverk. Denne metoden er den mest dominerende når det gjelder konstruksjon av småhus. Det har også blitt vanlig å kombinere bruken av bindingsverk med andre materialer i større bygninger, som for eksempel betong (Edvardsen og Ramstad, 2010). Figur 1 viser den typiske oppbygningen av en bindingsverksvegg.



**Figur 1: Oppbygningen av en bindingsverksvegg (SINTEF, 2007)**

I en bindingsverksvegg er det stenderne som er den mest sentrale delen. Stenderne er som oftest av konstruksjonsvirke, men i andre spesialtilfeller kan stenderne være av et annet produkt, for eksempel limtre eller I-profiler (SINTEF, 2014). I småhus er det som

regel stenderne som er lastbærende. Stenderne plasseres som hovedregel med en senteravstand på 600 mm. Stenderens dimensjoner avhenger i de fleste tilfeller av hvor mye varmesolasjon som er nødvendig for å tilfredsstille kravene som stilles til energieffektivitet i TEK17 (DiBK, 2019). Imellom stenderne plasseres varmesolasjonen. Varmesolasjonen skal sørge for at ytterveggen har en tilstrekkelig isolerende evne.

Ifølge Edvardsen og Ramstad (2010) skal isolasjonen plasseres mellom to lufttette sjikt. Dette er for å hindre luftbevegelser inne i isolasjonen, da dette vil kunne føre til en mindre god evne til å isolere. Mot inneluften kalles det lufttette sjiktet en dampsperre. Dampsperrens hensikt er å sørge for at den fuktige inneluften ikke skal kunne diffundere utover i konstruksjonen. Dersom dette skjer er det en risiko for at det kan oppstå fuktskader som dannelse av råte, samt sopp- og muggvekster. Innenfor dampsperran er det vanlig å lage en utforing fylt med ekstra isolasjon. Hensikten med denne er å sørge for at det kan trekkes elektriske føringer i veggen uten at det må lages hull i dampsperrsjiktet som vil svekke dens funksjon. Mot uteluften kalles det lufttette sjiktet for vindsperran. Denne skal sørge for at luft utenfra ikke kan trenge inn i konstruksjonen, samtidig som den skal være vannavstøtende. Sammen med ytterveggenes kledning utgjør vindsperran de to delene av det som kalles totrinnstetting. I totrinnstetting er kledningen en regnskjerm som skal sørge for at minst mulig nedbør kommer inn til vindsperran (SINTEF, 2013a). Vindsperran fungerer som en ekstra sikring mot vann som eventuelt måtte trenge inn gjennom kledningen. Mellom vindsperran og kledningen skal det være en luft- og dreneringsspalte som sørger for å drenere vekk vann som trenger inn gjennom kledningen. Samtidig muliggjør den uttørring av fuktighet fra baksiden av regnskjermen. Vindsperran skal i tillegg være dampåpen slik at eventuell fuktighet som finnes i konstruksjonen har mulighet til å tørke ut.

### 2.1.2 Vindsperran

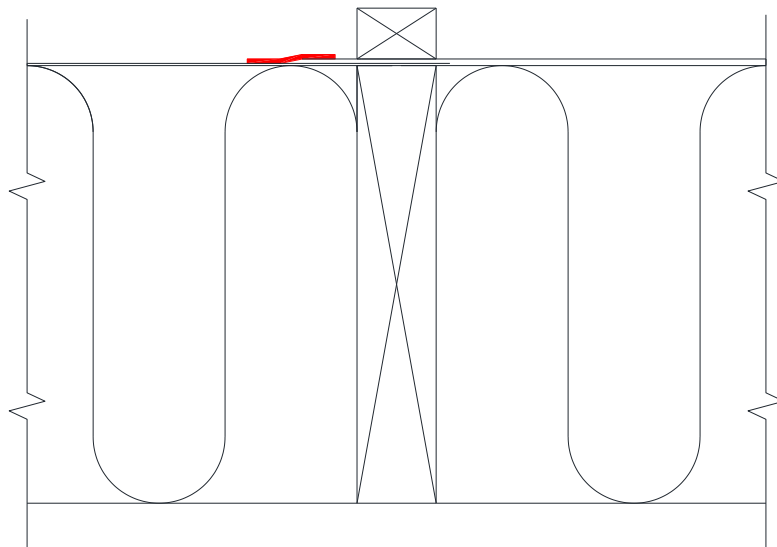
Som nevnt har vindsperran flere funksjonskrav som den skal oppfylle. Vindsperran skal sammen med kledningen sørge for at ytterveggen er både luft- og regntett. Dette innebærer at vindsperran, inkludert dens skjøter, skal ha en så lav luftlekkasje som mulig. Vindsperran må også være vannavvisende slik at vann som trenger inn gjennom kledningen ikke kommer lenger inn i konstruksjonen. Vannet skal bli værende på vindsperran og bli tørket ut av luften i luftespalten. Vindsperran skal også gi eventuell fukt i konstruksjonen mulighet til å tørke ut. På grunn av dette skal vindsperran ha en så lav vanndampmotstand som mulig. SINTEF (2013) anbefaler at vindsperrans vanndampmotstand ikke er større enn  $2,5 \cdot 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ . Dette tilsvarer en  $s_d$ -verdi på 0,5 m. I løpet av byggeperioden beskytter også vindsperran råbygget og rommene innenfor mot regn og vind. I småhus er det vanlig at vindsperrereplatene fungerer som avstivning for bindingsverket. Dersom det benyttes vindsperre av rullprodukt, må avstivningen gjøres ved bruk av skråstag.

Det finnes to hovedkategorier av vindsperrmaterialer; plateprodukter og rullprodukter. Innenfor denne kategoriseringen er det ytterligere inndelinger etter hva slags materiale vindsperran er laget av. Ifølge SINTEF (2003) finnes følgende grupper av vindsperrer:

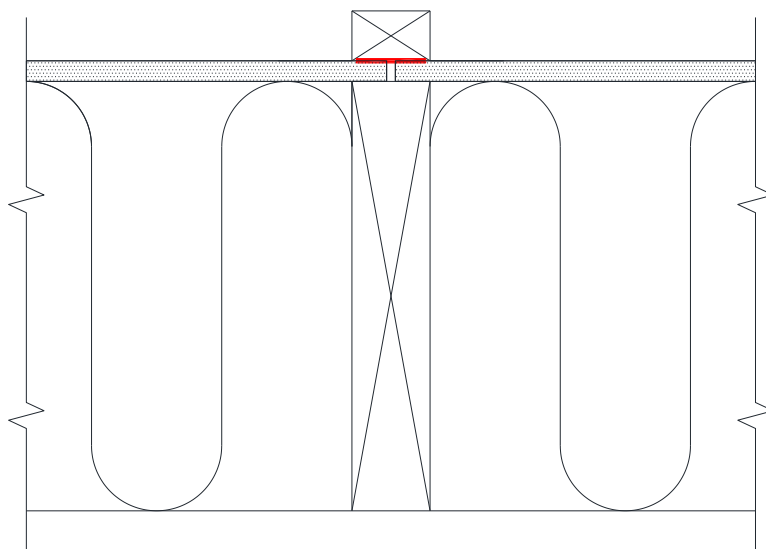
- Forhudningspapp
- Trefiberplater
- Kartongplater
- Gipsplater

- Plastfiberduk

Hovedforskjellen mellom rull- og plateproduktene er metoden som benyttes for å montere dem. Platene kommer som hovedregel i bredder på 1,2 m og må monteres kant i kant utenpå stenderne. Rullproduktene fås i lengder opp til 100 m og legges kontinuerlig langs vegg. På bakgrunn av dette gir rullprodukter færre skjøter enn ved bruk av plateprodukter. Det kan derfor være en fordel å benytte rullprodukt dersom det er strenge krav til lufttetthet (SINTEF, 2003). Skjøtene blir også utført noe annerledes på de to ulike produktene. Dette kan sees i Figur 2 og Figur 3. Figur 2 viser at skjøtene ved bruk av et rullprodukt vil være en overlapp mellom vindsperrermaterialene. På Figur 3 kan det sees at skjøten ved bruk av plateprodukt vil ligge kant i kant. I figurene er det benyttet teip i skjøtene. Denne er markert med rødt.



**Figur 2: Vindsperreskjøt ved bruk av rullprodukt**



**Figur 3: Vindsperreskjøt ved bruk av plateprodukt**

Engen (2019a) sine resultater viste at det av verdiene som er oppgitt om lufttettheten til de ulike vindsperrere typene av SINTEF Community i Byggforsksbladet «*Materialer til luft- og dampetting*», er det generelt tettere skjøter hos rullprodukter enn hos plateprodukter (SINTEF, 2003). Årsakene til dette er med stor sannsynlighet måten skjøtene er bygget opp på. Skjøtene ved bruk av plateprodukter er mer sensitive for fuktbevegelser i stender og lekt. Dersom det benyttes teip til tetting av skjøtene vil disse også bli gjennomhullet i dette tilfellet. Fuktbevegelsene i treverket vil ikke gjøre et like stort utslag i en skjøt mellom rullprodukter. Grunnen til dette er at sprekker som måtte oppstå mellom klemlukt og stender i dette tilfellet fortsatt vil være tett grunnet teipen. Den eneste måten for luften å lekke ut er da gjennom hullene som er kommet i rullen på grunn av festemidlene til klemlukten. Dette gjelder kun dersom teipen er bestandig nok og om detaljen er utført på en god måte.

Ifølge SINTEF (2003) er det i praksis vindsperrerskjøten som avgjør hvor tett vindsperrersjiktet er. Dersom skjøtene ikke er utført på en god måte kan både luft og fuktighet komme inn i konstruksjonen. I de senere årene har det blitt svært vanlig å benytte teip for tetting av skjøter i vindsperrersjiktet. Disse skjøtene og bruken av teip er nærmere beskrevet i henholdsvis Kap. 2.1.4 og 2.1.5.

### 2.1.3 Lufttetthet

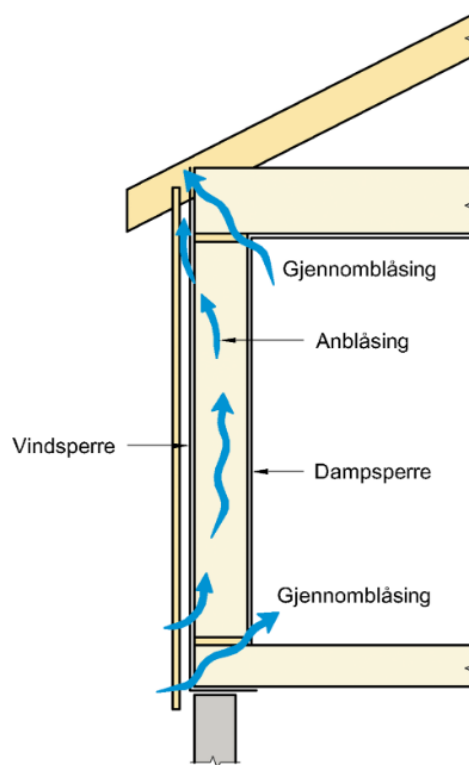
Lufttettheten til en bygning er svært viktig for dens endelige energiforbruk. Ifølge SINTEF (2013) kan luftlekkasjer gjennom bygningskroppen stå for en stor andel av bygningens totale varmetap. En reduksjon i en bygnings luftlekkasjetall fra  $1,5 \text{ h}^{-1}$  til  $0,6 \text{ h}^{-1}$  kan gi en reduksjon på netto energibehov på opptil 5 %. Til sammenligning gir en økning av isolasjonstykkelse fra 250 mm til 350 mm kun en reduksjon på 3 %. Det ekstra varmetapet som oppstår i en utett konstruksjon, kommer av oppvarming/nedkjøling av ekstra luftmengder som går utenom ventilasjonsanlegget. Denne lufta går også forbi en eventuell varmegjenvinner. Lufttetthetens innvirkning på det totale energiforbruket har blitt mer viktig de siste årene (Bankvall, 2013). Årsaken til dette er at veggtykkelsene på konstruksjonene øker, samtidig som teknologien innenfor varmegjenvinning har blitt svært mye bedre de siste årene. Dette vil bety at luftlekkasjene gjennom bygningens utettheter vil være en større del av det totale varmetapsbudsjettet.

Luftlekkasjene i klimaskjermen oppstår i de fleste tilfeller i tilslutningen mellom de ulike bygningsdetaljene, gjerne i skjøter og fuger. Utettheter kan også oppstå på grunn av skader på bygningsmaterialene, enten i form av mekaniske skader eller på grunn av deformasjoner eller svinn i materialene (Thue, 2016). Mengden luft som vil strømme gjennom disse utetthetene er avhengig av flere ulike faktorer. Disse faktorene er blant annet trykk- og temperaturforskjeller mellom inne- og uteklime (skorsteinseffekten), vindforhold og bygningens ventilasjon. Disse tre effektene vil til sammen gi en trykkforskjell over bygningskroppen som vil føre til at luft enten blir presset ut eller inn gjennom klimaskallets utettheter.

En utett bygningskropp kan få flere uheldige konsekvenser. I tillegg til det økte energiforbruket vil en utett bygning kunne oppleve fuktproblematikk. Dersom det er dampsperrersjiktet som er utett, vil det kunne føre til at vanddamp i inneluften diffunderer utover i konstruksjonen. Utover i isolasjonssjiktet synker temperaturen (gitt vinterforhold) og vanddampen i den fuktige luften vil kunne kondensere. Dette kondensasjonsvannet kan videre føre til problemer med sopp- og muggvekster. Dersom vindsperreren er utett, kan dette føre til en lekkasje av vann innover i konstruksjonen, samt føre til en luftstrøm inn i isolasjonen. Utettheter kan også føre til et mindre komfortabelt inneklima. Luftstrømmene

gjennom bygningskroppen kan føre til kalde overflater innvendig, samt trekk. Luften som kommer inn gjennom utetthetene går også utenom filteret i ventilasjonsanlegget, noe som kan føre til redusert luftkvalitet (SINTEF, 2013b).

Lufttettheten til en bygning sørges for ved at både vind- og dampsperrsjiktet er så tett som mulig. Dette gjøres ved å tette overgangene mellom materialene i begge sjikt (med teip, klelekt, fugemasse eller lignende), samt tette alle gjennomføringer. Tiltak for å sikre god lufttetthet er blant annet å sørge for at kompliserte detaljer blir prosjektert på en god måte og sørge for at det er prosjektert et kontinuerlig sperrsjikt på hele bygningskroppen. Samtidig må prosjekterende eller andre på byggeplassen sørge for at detaljene blir konstruert på rett måte med tanke på lufttetthet. Generelt burde det være en person på byggeplassen som er ansvarlig for å følge opp lufttetthetsproblematikk. Det bør også kun benyttes materialer med teknisk godkjenning fra SINTEF. Disse produktene tilfredstiller krav til lufttetthet og nødvendig bestandighet.



**Figur 4: To ulike former for luftlekkasjer (Edvardsen og Ramstad, 2010)**

Det skilles mellom to ulike former for luftlekkasjer (SINTEF, 2003). Disse er illustrert i Figur 4. Gjennomblåsning er luftlekkasjer som går gjennom både vind- og dampsperrsjikt. Disse lekkasjene vil sørge for en uønsket ventilasjon av inneluften. Denne typen lekkasje kan være at uteluften strømmer inn (infiltrasjon) eller at inneluften strømmer ut (eksfiltrasjon). Anblåsning er når uteluften kommer inn gjennom vindsperrsjiktet, og kommer ut igjen et annet sted i vindsperrsjiktet. Luften strømmer derfor kun gjennom isolasjonen og gjør at det oppstår en påtvungen konveksjon i isolasjonsmaterialet. Dette fører til en lokal avkjøling av isolasjonen, som vil øke varmetapet gjennom isolasjonen (Thue, 2016). Flere studier forteller om hvilken effekt det kan ha dersom vindsperrsjiktet ikke er tilstrekkelig lufttett. Ifølge Uvsløkk (1996) kan varmetapet gjennom isolasjonen som følge av vinddrevet konveksjon være fra tre til ti ganger så stor som ved et tett vindsperrsjikt. Samme studie forteller at vindsperrskjøten er et naturlig svakt punkt i

vindspærren. En annen studie fant at ytterveggens totale isolasjonsevne kan reduseres med hele 85 % dersom vindspærresjiktet er tilstrekkelig utett (Kosiński et al., 2019).

#### 2.1.4 Klemte skjøter

Hensikten med de klemte skjøtene er å sørge for at overgangen mellom skjøter i sperrematerialene blir så lufttett som mulig. De klemte skjøtene er i de fleste tilfeller bygget opp av en stender og en lekt, hvor sperrematerialet er klemt mellom disse. Det finnes klemte skjøter i både damp- og vindspærresjiktet. Oppbygningen til den klemte skjøten i vindspærresjiktet er avhengig av om skjøten er i et rull- eller plateprodukt. De to ulike oppbygningene av en klemt skjøt kan sees i Figur 2 og Figur 3.

En klemt skjøt er bygget opp av flere ulike deler som kan settes sammen på flere ulike måter. Oppsummert består en klemt skjøt i vindspærresjiktet av følgende parametere:

- Type stenderverk
- Dimensjon stenderverk
- Dimensjon klemlekt
- Type vindspærreprodukt
- Tykkelse på vindspærreprodukt
- Type festemiddel
- Dimensjon festemiddel
- Festemiddel med eller uten tilleggsfunksjoner (lim, kammer)
- Senteravstand mellom festemidlene
- Bruk av teip eller ikke

Engen (2019a) fant ut at det ikke synes å være enighet om hvilken kombinasjon av disse parametere som gir den beste lufttettheten over tid. Videre gjøres det funn av at det synes å være lite forskning som er utført på dette området. Det finnes mye forskning om lufttettheten av bygninger, men ingen forskning tar for seg lufttettheten i klemte skjøter i vindspærresjiktet. Det er tidligere gjennomført forskning ved NTNU i form av prosjekt- og masteroppgaver som omhandler klemte skjøter (presenteres i Kap. 2.2), men disse omhandler i stor grad om klemte skjøter i dampspærresjiktet. Det kan diskuteres om dette er overførbart til vindspærresjiktet. SINTEF (2007) gir i et byggforsksblad anbefaling om at vindspærren, både plate- og rullprodukt, blir klemt med lekter av tykkelse 18-23 mm med 2,5-65 spiker. I et annet byggforsksblad blir det gitt anbefaling om at klemlektene i vindspærreskjøten bør være 11-36 mm og at lektene enten skal spikres eller skrus med en senteravstand på 200-300 mm avhengig av lektens stivhet. Det gjøres også funn om at kun enkelte vindspærreprodusenter oppgir anbefalinger til utforming av skjøten i sine monteringsanvisninger. Disse anbefalingene er de samme som de som gis av SINTEF. En oppsummering av anbefalinger gis i Kap. 4.1.1.

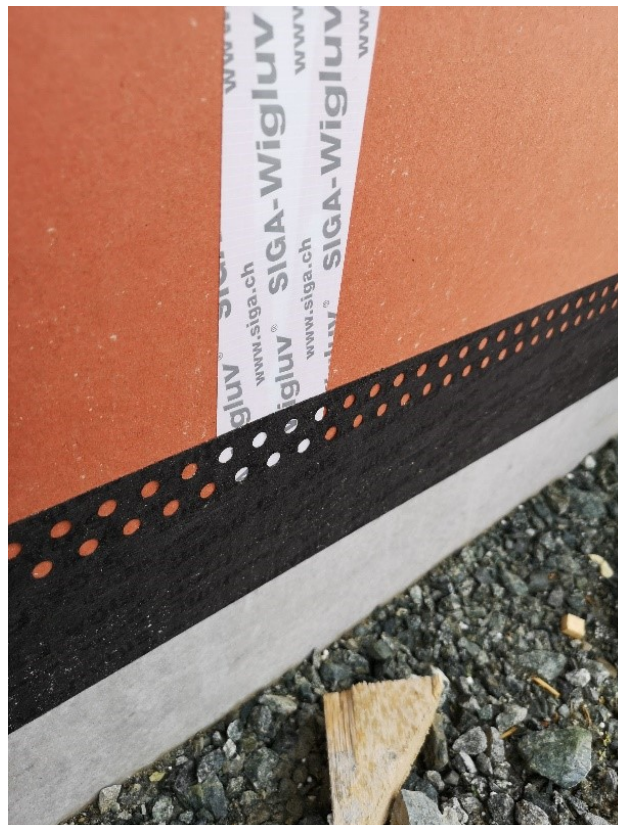
I løpet av et år vil treverket i en klemt skjøt fuktes opp og tørkes ut i sykluser grunnet variasjoner i fuktigheten i luften rundt den klemte skjøten. Dette gjelder uavhengig om den klemte skjøten er i damp- eller vindspærresjiktet. Denne fuktvariasjonen fører til bevegelser i treverket grunnet krymping og svelling. Når treverket krymper vil det dannes sprekker mellom de ulike delene i den klemte skjøten som kan føre til at luftlekkasjene

øker. Når treverket sveller oppnås den motsatte effekten. Disse bevegelsene fører også til at festemidlene beveger seg. Disse effektene er nærmere beskrevet i den tidligere forskningen i Kap. 2.2.

### 2.1.5 Byggeteip

Byggeteip er et klebeprodukt som benyttes til tetting av skjøter og overganger på bygningskroppen. Hensikten med å benytte dette er å øke luft- og regntettheten til konstruksjonen den påføres på. Teip benyttes både i damp- og vindsperresjiktet til å tette overgangen mellom sperrematerialene. Ifølge Fufa et al. (2018) er bruken av teip nødvendig for å tilfredsstille dagens krav til lufttetthet. Teiplignende produkter kalt mansjetter brukes også til å tette rundt gjennomføringer i begge disse sjiktene. Byggeteip kan også benyttes til å tette igjen mekaniske skader som kan oppstå på vind- og dampsperreren under byggeperioden. I forhold til andre tetteløsninger, som for eksempel fugemasse, er byggeteip svært enkel og rask i bruk.

Det finnes flere forskjellige typer byggeteip fra ulike produsenter. De fås i flere ulike lengder og bredder tilpasset ulike formål. De to hovedgruppene av teip er teip til innendørs bruk og teip til utendørs bruk. Det som skiller disse fra hverandre er i hovedsak hvor dampåpne de er, samt hvilken type underlag de er ment å hefte til. Figur 5 viser en teip for utendørs bruk benyttet i en vindsperreskjøt, samt en teip til bruk på overgangen mellom grunnmursplate og vindsperre.



**Figur 5: To typer byggeteip benyttet utendørs på et byggeprosjekt**

Et funksjonskrav til teipen er at den skal hefte godt til det underlaget den festes på. Samtidig burde teipen være motstandsdyktig mot temperatursvingninger og fuktpåkjenninger (Fufa et al., 2018). En viktig årsak til dette er at teipen bygges inn i veggen, og derfor er lite tilgjengelig for vedlikehold og eventuell utskiftning. Derfor er det viktig at teipen opprettholder sin funksjonsevne gjennom hele bygningens levetid. Dersom teipens funksjonsevne svekkes med årene vil det kunne føre til et økt varmetap, samt større risiko for fuktskader.

Ifølge SINTEF (2019) finnes det lite kunnskap om teipproduktenes holdbarhet, spesielt i nordisk klima. Det er for lite kunnskap om hvordan de kjemiske og mekaniske nedbrytningsmekanismene i teipen fungerer. Samtidig er det lite kunnskap om hvilke klimatiske påkjenninger som vil opptre hos teipen. Forskningsprosjektet TightEN ved SINTEF Community, som denne masteroppgaven er en del av, har som hensikt å utvikle nye testmetoder for teip og sikre at teipløsningene som benyttes har tilstrekkelig bestandighet over tid. Testmetodene som benyttes for teip (NS-EN 1296) er for generelle og er ikke nøyaktig nok med tanke på hvilke påkjenninger teipen faktisk gjennomgår når den er plassert på bygningskroppen (Fufa et al., 2018).

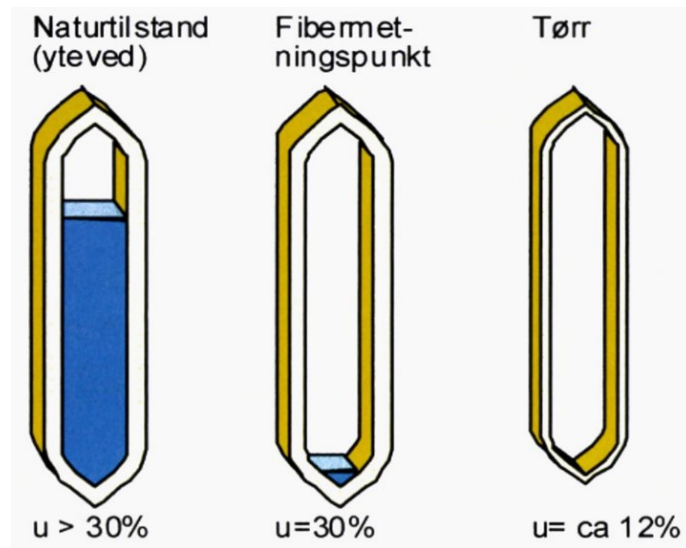
Forskning har vist at teip er en svært lovende løsning med tanke på å oppnå lavere lekkasjetall i bygninger. Kalamees (2016) har undersøkt luftlekkasjene i åtte ulike bygningsdetaljer, både med og uten teip. Samtlige av bygningsdetaljene viste seg å være mer lufttett ved bruk av teip. Forfatterne konkluderer med at denne metoden for tetting av lekkasjer er den som er mest lovende og at det er nødvendig med en bedre standard for test av teipens holdbarhet.

### 2.1.6 Trefuktighet

Egenskapene til treverk er sterkt avhengig av hvilket fuktinnhold treverket har. På grunn av dette er det svært viktig å ha et forhold til hvilket fuktnivå det er i treverket som benyttes. Hvilket fuktnivå som er det mest korrekte avhenger av hvilket produktet som lages av treverket. Fuktigheten burde tilpasses klimaet på stedet der treverket skal benyttes. Treverkets fuktinnhold angis som forholdet mellom vekten av vann i treverket og vekten av treverket i tørket tilstand. Denne uttrykkes i prosent (Tronstad, 2006).

Fuktigheten i treverket finnes både som fritt og bundet vann (Tronstad, 2006). Treverket består hovedsakelig av lange, rørformede celler som strekker seg langs treets vekstretning. Disse cellene kan være helt eller delvis fylt med vann, som utgjør det frie vannet. Vannet som er bundet finnes inne i celleveggene. Ved fuktbevegelser over treverkets fibermetningspunkt er det kun det frie vannet i cellene som blir påvirket. Når fuktinnholdet blir lavere enn fibermetningspunktet vil det bundede vannet i celleveggene tørke. Konsekvensen av dette er at det kun er ved fuktbevegelser under fibermetningspunktet hvor det vil forekomme en endring av treverkets dimensjoner og egenskaper. En illustrasjon av fibermetningspunktet er vist i Figur 6. Fibermetningspunktet er avhengig av typen tresort. For gran ligger denne på 28 vekt-%.





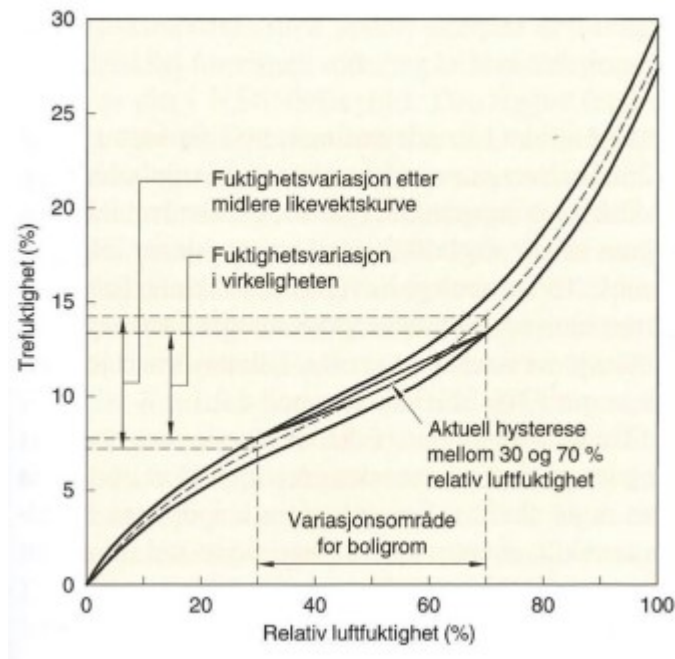
**Figur 6: Forskjellen mellom fritt og bundet vann i treverket (Tronstad, 2006)**

Ved fuktbevegelser under fibernetningspunktet vil treverket oppleve en endring i volum. Ved synkende fuktinnhold vil treverket krympe lineært, helt til den når 0 vekt-%. Ved oppfukting, opp til fibernetningspunktet, vil treverket svulle, også lineært. Treverket opplever en ulik krymping/svelling i de ulike retningene. Den største volumendringen skjer tangentielt, langs med årringene. På tvers av årringene, radielt, er krympingen/svellingen cirka halvparten av dette. Krympingen/svellingen i fiberretningen er svært liten, og blir som oftest neglisjert. Denne forskjellen i radiell og tangentiell krymping/svelling gir ofte et forvridt tverrsnitt når treverket tørker. Ved beregning av krymp og svelling er det ifølge Edvardsen og Ramstad (2010) vanlig å benytte følgende verdier for beregning av krymp/svelling per prosent endring i fuktinnholdet:

- Tangentielt: 0,25 %
- Radielt: 0,15 %
- Aksielt: 0,01 %

I tillegg til at treverket vil oppleve en endring i volum vil også andre egenskaper være avhengig av treverkets fuktinnhold. Slike egenskaper er blant annet bestandighet mot sopp/muggvekst, styrkeegenskaper og varmeledningsevne (Tronstad, 2006).

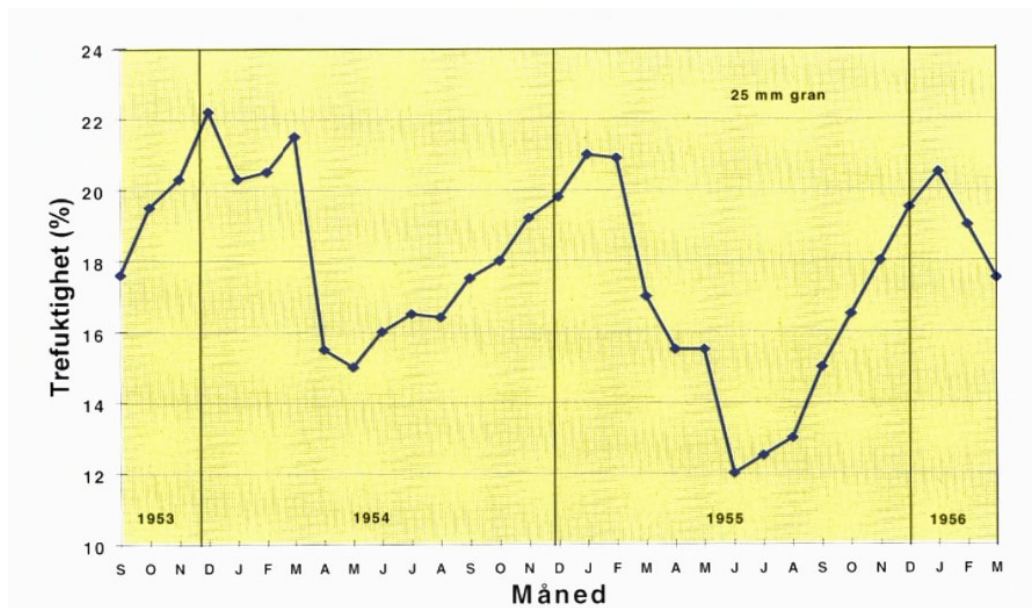
Treverk er et hygroskopisk materiale. Dette betyr at treverket tar opp og avgir fuktighet fra den omkringliggende luften. Ved en gitt temperatur og relativ fuktighet i den omkringliggende luften, vil treverket stille seg inn på en gitt trefuktighet, kalt likevektsfuktigheten. En hysteresekurve viser hvordan treverkets likevektsfuktighet henger sammen med relativ fuktighet i omkringliggende luft (Geving og Thue, 2002). En hysteresekurve for furu ved 20 °C er vist i Figur 7.



**Figur 7: Hysteresekurve for furu ved 20 °C  
(Edvardsen og Ramstad, 2010)**

Treverket vil oppføre seg noe annerledes ved opptak av fuktighet enn når den avgir fuktighet. Når treverket avgir fuktighet (desorpsjon) til omgivelsene, vil treverkets fuktinnhold være noe høyere enn når treverket tar til seg fuktighet (absorpsjon). Denne effekten kalles hysteresse og kan sees i Figur 7 ved at det er to ulike kurver i diagrammet. Ifølge Edvardsen og Ramstad (2010) er dette en effekt som vanligvis sees bort i fra ved normale fuktregninger.

Treverkets fuktinnhold henger nøye sammen med luftens relative fuktighet. Dette betyr at en endring i den relative fuktigheten også vil føre til en endring i fuktinnholdet. Den relative fuktigheten i uteluften varierer sterkt, avhengig av geografisk plassering, tid på året og tid på døgnet (Tronstad, 2006). Dette fører også til at fuktinnholdet i treverket vil variere. Hvor raskt treverket vil tilpasse seg en endring i den relative fuktigheten avhenger av treverkets tverrsnitt. En tynn lekt vil tilpasse seg likevektsfuktigheten raskere enn en tykk planke. I planken vil det kun være overflaten som blir raskt påvirket, mens det kun vil opptre små endringer i den totale fuktigheten. Forskjellen i relativ fuktighet mellom sommer og vinter tilsier at treverket opplever et høyt fuktinnhold om vinteren, da den relative fuktigheten i luften er høy. Når det er sommer vil treverket ha et lavere fuktinnhold, da den relative fuktigheten som regel er lavere. Figur 8 viser hvordan fuktigheten i treverk vanligvis varierer i løpet av et år.



**Figur 8: Variasjon i trefuktighet over året i et bord av gran med tykkelse 25 mm (Tronstad, 2006)**

## 2.2 Tidligere forskning ved NTNU

I denne delen av oppgaven vil den tidligere forskningen som er utført på temaet klemte skjøter bli gjennomgått. Den tidligere forskningen består av tre tidligere masteroppgaver, samt en prosjektoppgave. All tidligere forskning er utført ved NTNU.

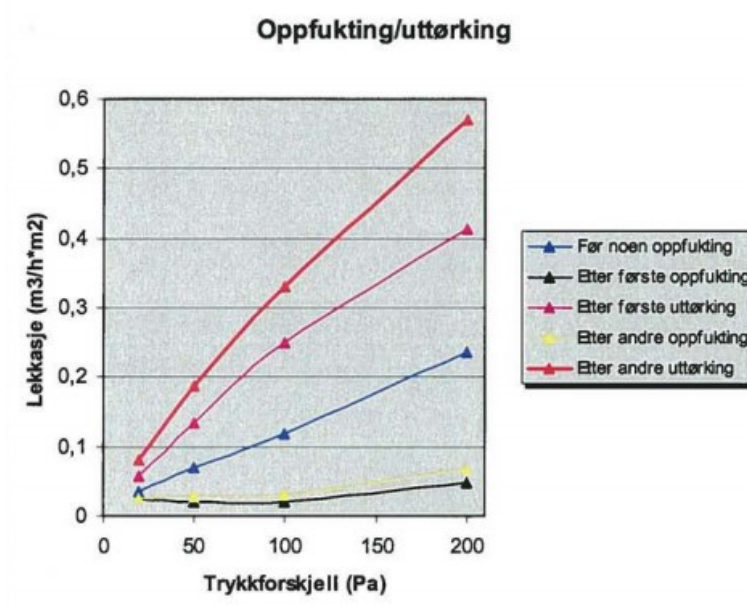
Engen (2019a) gjennomførte en litteraturstudie med den hensikt å finne tidligere forskning utført på klemte skjøter. Resultatet fra denne studien er at det synes å være svært lite forskning om temaet i publiserte forskningsartikler og andre lignende kilder. Det ble funnet to forskningsartikler (Gullbrekken et al., 2019; Norvik, Geving og Gullbrekken, 2019), men disse omhandler forskningen til den ene masteroppgaven presentert i Kap. 2.2.4. Det finnes svært mye forskning om temaet lufttetthet, men ikke noe av forskningen som ble funnet viste seg å være nøyaktig nok for problemstillingene i denne oppgaven.

### 2.2.1 Sagen (2003)

Sagen sin prosjektoppgave fra 2003 var den første som studerte problematikk rundt lufttetthet i vindsperresjiktet. I Sagen sitt forsøk ble det gjennomført to ulike laboratorieforsøk med ulik oppbygning. Det første forsøket gikk ut på å studere hvordan luftlekkasjene utviklet seg gjennom en klemt skjøt. Det ble her testet vindsperreskjøter som hadde vært gjennom to oppfuktings- og tørkesykluser. Det andre forsøket testet forskjellen på luftlekkasjen i en klemt skjøt der hvor det var benyttet spiker og skruer.

I det første forsøket ble det bygget opp en prøvevegg bestående av vindsperre av kartongmateriale. Det ble benyttet en klelekt over alle vindsperreskjøter, og disse ble spikret med en senteravstand på 270 mm. Det ble benyttet skruer med dimensjon 5x90 mm. Oppfuktingen av denne veggen ble utført i et slagregnskap. Veggen ble utsatt for fuktighet i slagregnskapet i 16 timer, før den fikk en time til avrenning. Den første gangen ble veggen tørket i seks timer. De to resterende gangene ble veggen tørket i tre timer.

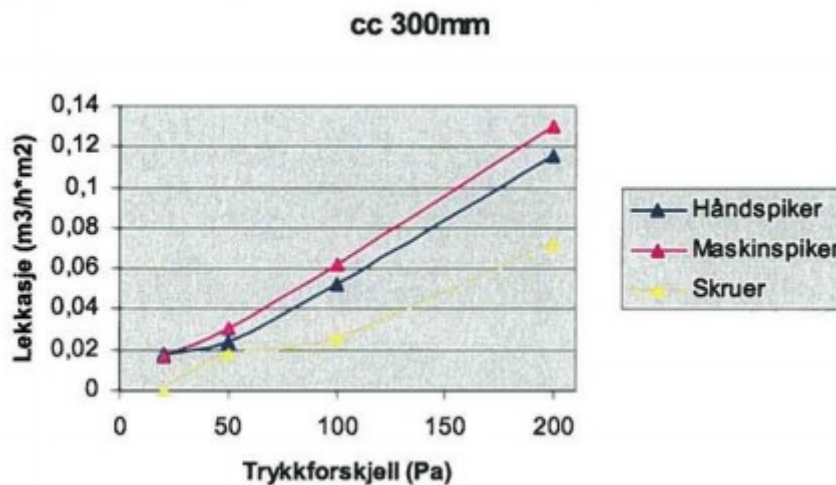
Resultatene fra dette forsøket viser at luftlekkasjen er svært avhengig av kleklektenes fuktinnhold. Figur 9 viser Sagen sine resultater. Lekkasjen gjennom skjøten avtar når prøven bli fuktet opp, men stiger igjen etter uttørking. Som det også kan sees av figuren, så øker luftlekkasjen ved hver ny syklus. Sagen konkluderer med at denne variasjonen i lufttettheten skyldes krymping og svelling av treverket.



**Figur 9: Resultater fra Sagen sitt første laboratorieforsøk (Sagen, 2003)**

Det andre laboratorieforsøket benyttet en lik prøvevegg som det første forsøket, men med en annen type vindsperre. Denne gangen ble festemiddelet og senteravstand mellom festemidlene variert. Det ble testet med både håndspikring, maskinspikring og skruer. Senteravstandene det ble variert mellom var 150 mm, 300 mm og 600 mm.

Dette forsøkets resultater viser at skruer generelt er mer lufttett enn både maskinspiker og håndspiker. Dette gjelder for alle senteravstandene som er testet i forsøket. Håndspiker gir større luftlekkasjer enn bruk av maskinspiker. Resultater fra prøvene med senteravstand 300 mm er vist i Figur 10.



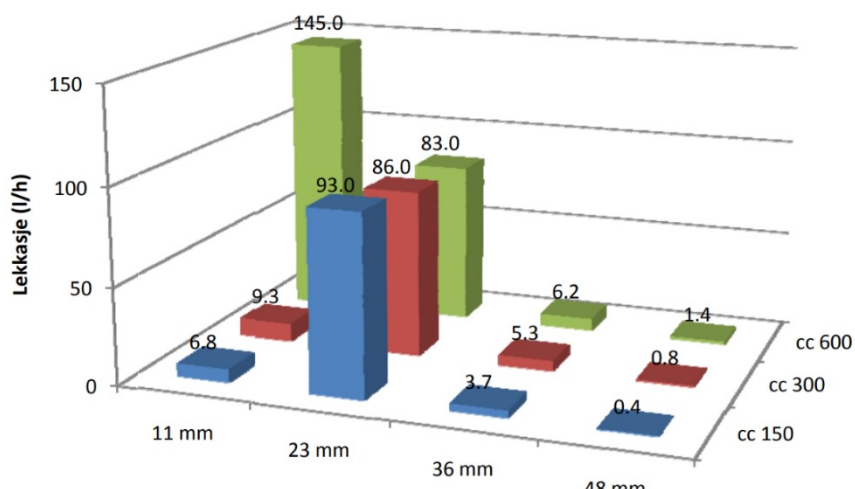
**Figur 10: Resultater fra Sagen sitt andre laboratorieforsøk (Sagen, 2003)**

### 2.2.2 Bergby (2011)

Bergby studerte hvilke faktorer som påvirker luftlekkasjen i klemte skjøter i vind- og dampsperrsjiktet i sin prosjektoppgave (Bergby, 2011a) og i sin masteroppgave (Bergby, 2011b).

I Bergby sin prosjektoppgave ble det gjennomført laboratorieforsøk. Her testet Bergby luftlekkasjen i omleggsskjøter i en dampsperrskjøt hvor det var blitt benyttet skruer som festemiddel for klemlekten. I forsøket ble klemlektens tykkelse variert mellom 11 mm og 48 mm mens senteravstanden mellom skruene ble endret mellom 150 mm, 300 mm og 600 mm. Prøvene ble testet rett etter at de var montert i testtrigen som ble benyttet, og derfor er det ingen aldring involvert i forsøket. Det ble heller ikke gjort noen uttørking av byggfukt.

Prosjektoppgavens resultater viser at det er kombinasjonen mellom lav senteravstand og stor lektetykkelse som gir den mest lufttette skjøten. Resultatene fra dette forsøket er vist i Figur 11. Prøvestykket hvor det ble benyttet klemlekt med tykkelse på 23 mm ble utsatt for tørking i et døgn før testing. Dette er grunnen til at denne viser store lekkasjer.



**Figur 11: Resultater fra Bergby sin prosjektoppgave (Bergby, 2011a)**

I Bergby sin masteroppgave ble det gjennomført ytterligere to laboratorieforsøk. I det første forsøket ble igjen luftlekkasjen i klemte dampsperreskjøter undersøkt. Denne gangen ble også festemiddelet variert, i tillegg til lektetykkelse og senteravstand. Festemidlene som ble benyttet var spiker og skuer. Lektetykkelsen varierte mellom 18 mm, 30 mm og 48 mm. Senteravstanden mellom festemidlene er den samme (150 mm, 300 mm og 450 mm). I dette forsøket ble prøvene testet både ved montasje og etter én uttørking.

Resultatene i dette forsøket viser at det ble en betydelig økning av luftlekkasjen i skjøten etter uttørkingen. Bruken av skruer som festemiddel ga lavere lekkasjer enn når spiker ble benyttet. Den største senteravstanden ga også større lekkasjer enn de to minste senteravstandene. Det var ingen tydelige forskjeller mellom senteravstand på 150 mm og 300 mm. Lektetykkelsen på 48 mm ga den største luftlekkasjen, noe som strider imot funnene fra prosjektoppgaven.

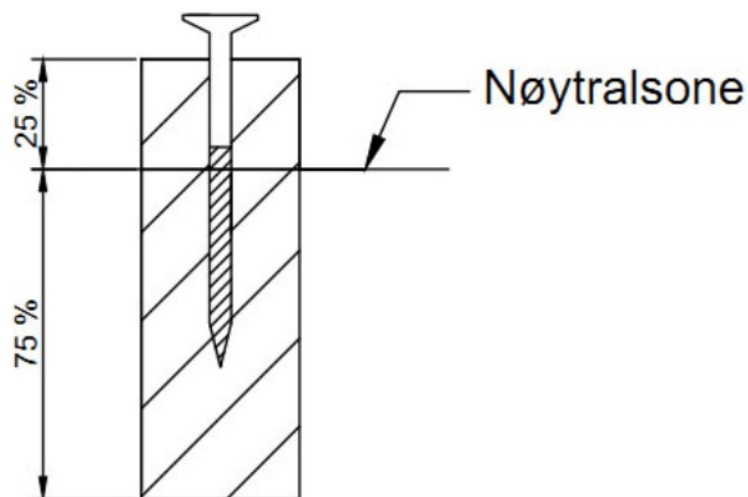
Bergby sitt andre forsøk omhandlet undersøkelser av festemidlenes bevegelser i treverket under uttørking. Det ble her utført forsøk på to ulike kombinasjoner av festemidler og hvor langt ned i treverket festemidlene var plassert. Resultatene viste her at potensialet for bevegelse i festemidlene er størst der senter av festemiddelets gjengede parti ligger dypt i stenderen.

Masteroppgaven til Bergby konkluderer med at de to største faktorene som påvirker mulig oppsprekking i skjøten og utvikling i luftlekkasjen er:

- Avstanden fra toppen av skruen ned til senter av skruens gjengede parti. Dette vil bety at kortere skruer vil bevege seg mindre enn lengre skruer og dermed gi lavere luftlekkasjer. En konsekvens av dette er at det også vil være nødt til å benyttes tynnere klemler.
- Differansen mellom høyeste og laveste fuktnivå i materialene. Større differanse her vil gi et større potensial for oppsprekking mellom stender og lekt. Dette betyr at lektene burde monteres med et fuktnivå som er likt som det fuktnivået lekten opplever under bruk.

Det konkluderes med at lektetykkelse 11 mm, senteravstand 150 mm og skruetype 4x50 mm kan benyttes som en generell anbefaling.

Bergby definerer i sin masteroppgave begrepet «nøytralsone». Hensikten med denne definisjonen er å illustrere bevegelsen til treverket rundt festemiddelet. Nøytralsonen er et snitt i tverrsnittet som ikke vil bevege seg under uttørking av treverket. Resten av tverrsnittet vil derfor tørke innover mot dette snittet. En illustrasjon av et tverrsnitt med påtegnet nøytralsone er vist i Figur 12.



**Figur 12: Illustrasjon av nøytralsone (Bergby, 2011b)**

Nøytralsonen kan defineres med følgende formel:

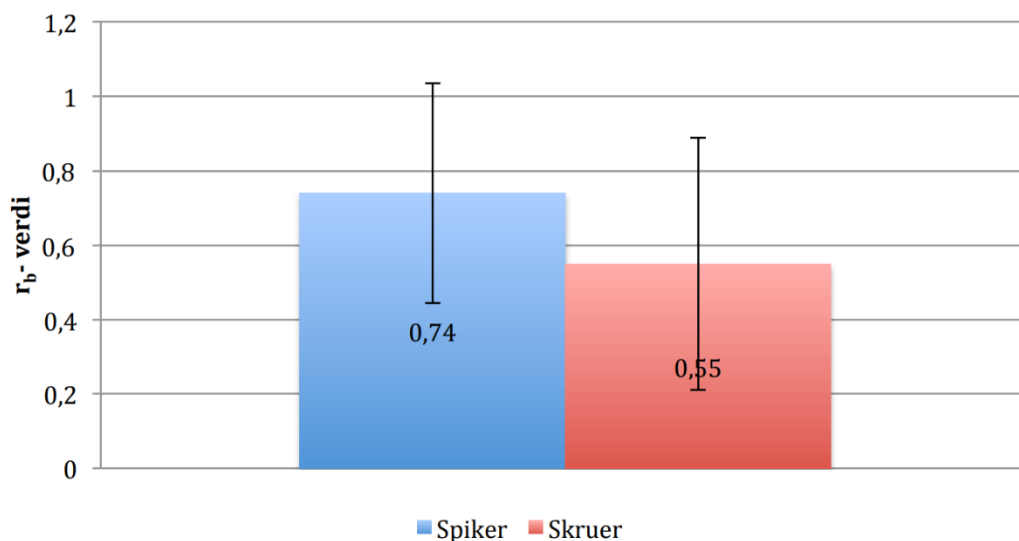
$$\text{Nøytralsone} = \frac{\Delta \text{instikk i stender}}{\Delta \text{høyden til stender}}$$

Forskjellen på festemiddelets innstikk og stenderens høyde er før og etter tørking. Ved en nøytralsone som ligger høyt i stenderen, vil det føre til at det er mindre bevegelser mellom stender og lekt. På bakgrunn av dette er det gunstig at nøytralsonen ligger så høyt som mulig i tverrsnittet. I sitt andre laborieforsøk kommer Bergby frem til at nøytralsonen for skruer ligger midt i skruens gjengede parti. Det ble ikke utført lignende forsøk på maskinspiker, men Bergby antar at nøytralsonen til spiker vil ligge omtrent i senter av spikerens innstikk i stenderen.

### 2.2.3 Selmer (2013)

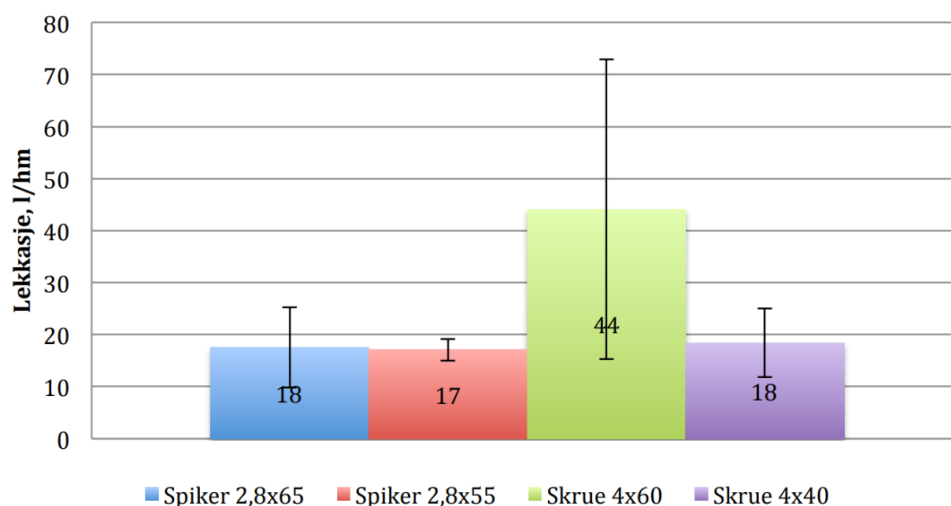
Arbeidet til Bergby ble fortsatt i Selmer sin masteroppgave fra 2013. Selmer gjennomførte også i sin masteroppgave to laborieforsøk med hensikt å undersøke faktorer som er med på å påvirke bevegelsene i en klemst skjøl i dampsperrsjiktet.

I Selmer sitt første forsøk ble festemidlenes bevegelser i stenderen undersøkt. Her ble både spiker og stender montert i en stender og bevegelsen til disse under tørking ble registrert. I motsetning til Bergby (2011b) ble det her gjennomført fuktzykluser, ikke bare én uttørking. Resultatene som ble oppnådd i dette forsøket ble benyttet til å finne verdier  $r_b$ -verdier, en verdi for relativ avstand fra festemidlets fastpunkt i stenderen og til stenders klemflate.  $r_b$ -verdien er definert som en metode for å beskrive friksjonen som finnes mellom festemiddelet og treverket. Lave  $r_b$ -verdier vil bety at det oppstår mindre sprekke dannelse mellom klemlekt og stender. Det er ønskelig at sprekke dannelsen skal være så lav som mulig, derfor er det også ønskelig med en lav  $r_b$ -verdi for festemiddelet.  $r_b$ -verdien stammer fra en beregningsmodell som ble utarbeidet i Selmer sin masteroppgave. Tanken bak beregningsmodellen er at alle festemidler har sin  $r_b$ -verdi. Dersom  $r_b$ -verdien til festemiddelet er kjent, vil det være mulig å forutsi hvordan denne vil bevege seg. Resultatene fra det første forsøket ga  $r_b$ -verdier for ulike festemidler. Snittverdiene for alle spikre og skruer er vist i Figur 13.



**Figur 13:  $r_b$ -verdi med standardavvik for spikre og skruer (Selmer, 2013)**

Det andre laboratorieforsøket testet Selmer luftlekkasjen i klemte skjøter i dampsperrsjiktet. Forsøket ble gjennomført i to omganger, en gang ved montasje og en gang etter en uttørking. I dette forsøket var senteravstanden og lektetykkelsen konstant, men festemiddelet ble variert mellom ulike typer spikre og skruer. Resultatene viser i likhet med Bergby at lekkasjene øker betraktelig etter uttørking. I dette forsøket ble det målt at klemlækker med maskinspikre ga lavere lekkasjer enn skruerprøvene. Dette gjaldt både før og etter uttørking. Resultatene fra forsøket er vist i Figur 14. Resultatene er etter uttørking.



**Figur 14: Resultater fra Selmer sitt andre laboratorieforsøk (Selmer, 2013)**

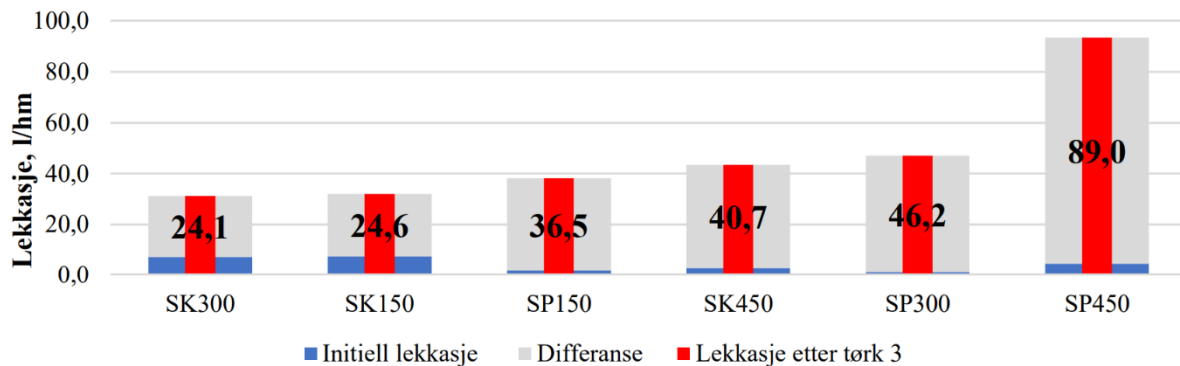


## 2.2.4 Norvik (2018)

Arbeidet med klemte skjøter i dampspærresjiktet ble videreført i masteroppgaven til Norvik (2018). Norvik sin masteroppgave omhandlet i større grad hvordan fuktsykluser påvirker luftlekkasjen i klemte skjøter, og ikke kun én uttørking. Norvik bygget en kombinert test- og oppfuktingsboks. Denne boksen fungerte slik at den kunne benyttes til testing av prøvestykker ved å sette på et lufttrykk og den kunne benyttes til oppfukning av prøvestykkene.

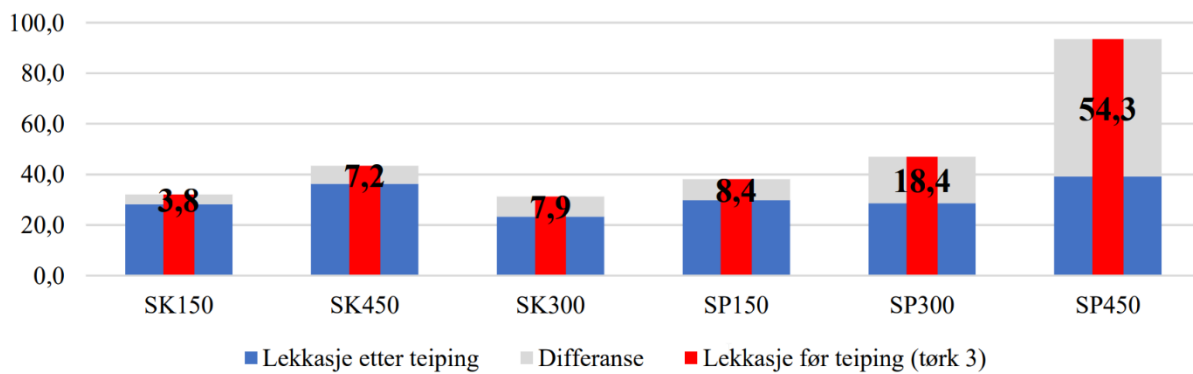
I Norvik sitt laboratorieforsøk ble det gjennomført testing på prøvestykker hvor parameterne som ble endret var type festemiddel og senteravstanden mellom disse. Det ble variert mellom skruer og spiker og senteravstander 150 mm, 300 mm og 450 mm. På slutten av den siste fuktsyklusen som ble utført ble dampspærreskjøtene på prøvestykkene teipet igjen. Hensikten med dette var å undersøke hvilken effekt bruken av teip ville ha på luftlekkasjen i dampspærreskjøten.

Norvik sine resultater viser at skruer gir en lavere luftlekkasje enn det spiker gjør. Skruer festet med en senteravstand på 400 mm blir anslått til å gi lik luftlekkasje som spiker festet med en senteravstand på 190 mm. Resultatene viser at en senteravstand lavere enn 300 mm ved bruk av skruer ikke gir noen lavere luftlekkasjer. Resultatene viser også at lekkasjen i skjøtene øker for hver syklus. Utviklingen er størst for prøvestykker med senteravstand på 450 mm. For de andre senteravstandene er utviklingen mindre, og for senteravstand 150 mm er det ingen utvikling etter første syklus. Utviklingen i lekkasjen mellom hver syklus er større for prøvestykkene med spiker enn for skruer-prøvene. Resultatene med forskjellen på initiell lekkasje og lekkasje etter siste tørking er vist i Figur 15.



**Figur 15: Forskjellen mellom initiell lekkasje og lekkasje etter siste uttørking (Norvik, 2018)**

Etter å ha teipet dampspærreskjøtene ble det en størst reduksjon i luftlekkasjen der hvor det var benyttet spiker og senteravstanden mellom festemidlene var stor. Dette viser at en stor del av luften vil lekke ut gjennom perforeringen som er forårsaket av festemidlene. Resultatene som ble oppnådd etter påføring av teip er vist i Figur 16.



**Figur 16: Forskjellen i luftlekkasje før og etter påføring av teip (Norvik, 2018)**

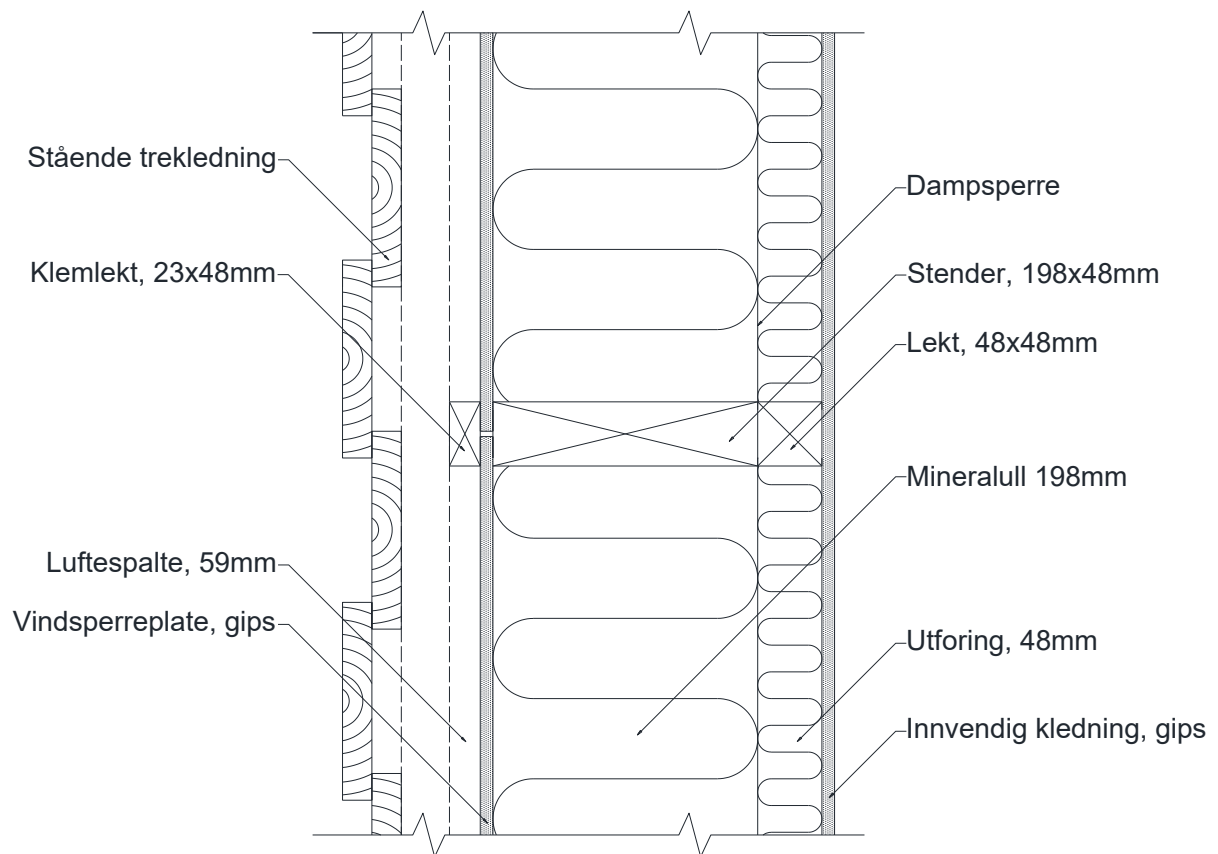
## 3 Fuktsimuleringer

En av oppgavens problemstillinger omhandler hvordan luftlekkasjen i en klemte skjøt utvikler seg over tid. Det er derfor ønskelig å simulere en aldring av den klemte skjøten i laboratorieforsøket. Prosedyren for denne aldringen er presentert i Kap. 4.3.4. Denne aldringen utføres ved å variere forsøkets prøvestykker mellom to ulike fuktnivåer. Disse fuktnivåene har til hensikt å simulere de faktiske fuktvariasjonene som vil oppstå i en klemte skjøt på en reell konstruksjon i løpet av et år. For å finne ut hvilke fuktnivåer det er realistisk at en klemte skjøt i vindsperrsjiktet opplever, er det valgt å gjennomføre fuktsimuleringer.

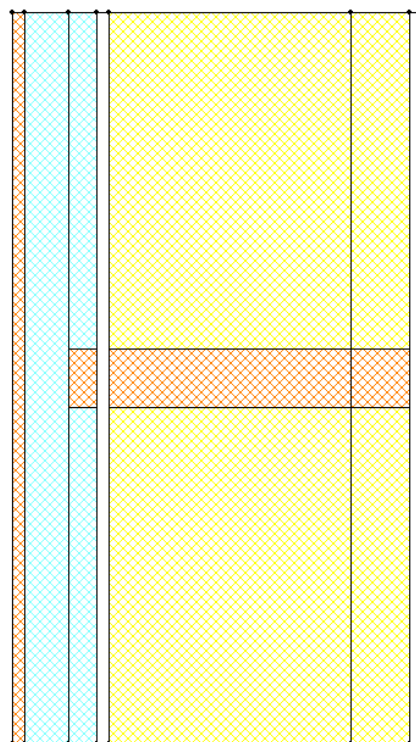
Denne fuktsimuleringen utføres med simuleringsprogrammet WUFI-2D. WUFI-2D er et beregningsprogram i to dimensjoner som gir muligheter for å simulere fukt- og varmetransport i bygningskomponenter (Geving, 2016). Dette programmet lar brukeren selv bygge opp geometrien til konstruksjonen som skal simuleres, samt velge hvilke materialer som den består av. Videre settes parametere som er nødvendige for beregningen. Eksempler på slike parametere er klimasted, orientering og fuktpåkjenninger. Årsaken til at det er valgt å benytte WUFI-2D i motsetning til WUFI-1D, er at det er antatt at WUFI-2D gir mer nøyaktige svar på fuktnivå i den klemte skjøten. I det todimensjonale programmet finnes også muligheten til å se hvordan fuktnivået varierer i hele lekten og stenderen, og ikke bare langs en dimensjon.

### 3.1 Metode benyttet i WUFI-2D

Konstruksjonen som simuleringene skal utføres på bygges først opp i simuleringsprogrammet. Den er bygget opp slik at den klemte skjøten i simuleringsprogrammet blir mest mulig lik den som benyttes i laboratorieforsøket. Parameterne som benyttes på den klemte skjøten i laboratorieforsøket finnes i Kap. 4.1. Ved å gjøre dette vil simuleringene bli så realistiske som mulig for nøyaktig den type klemte skjøt som blir undersøkt i forsøket. Det er også valgt å benytte stående trekledning med krysslekting bak. Dette vil føre til en luftespalte på totalt 59 mm. Dette ansees som en svært vanlig type kledning, samtidig som det gir en klemlekt som er godt eksponert for den luften som finnes i luftespalten. Konstruksjonen som simuleringen tar utgangspunkt i er vist i Figur 17. Hvordan denne er modellert i WUFI-2D er vist i Figur 18.



**Figur 17: Oppbygning av konstruksjonen som er benyttet for simuleringer i WUFI-2D**



**Figur 18: Modellen i WUFI-2D**

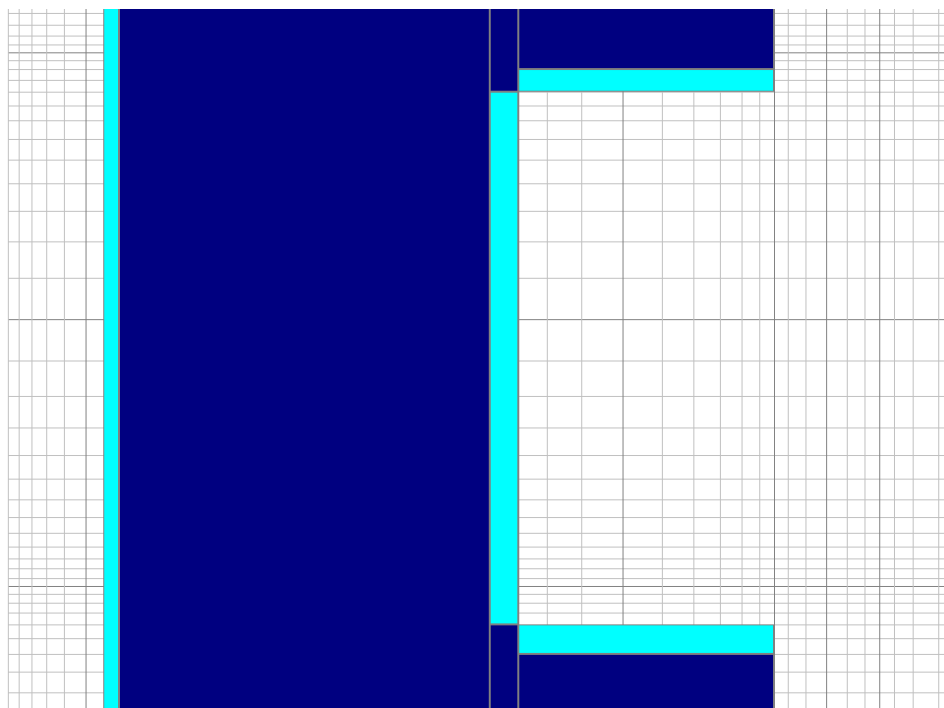
I WUFI-2D finnes det en database over ulike materialer som benyttes til å bygge opp konstruksjonen. I denne databasen er det for alle materialer valgt et materiale som passer godt med det materialet som konstruksjonen i Figur 17 er bygget opp av. For mineralull er det valgt materiale fra databasen, men varmekonduktiviteten er endret fra 0,040 W/mK til 0,034 W/mK. For treverket i konstruksjonen (lekt, stender og kledning) er det valgt materialet «*Scandinavian spruce transverse direction II*». Dette materialet inneholder oppdaterte materialelegenskaper om fukttransport og fuktlagring fra Bergheim, Geving og Time (1998). Luftespalten er valgt med materialet «*Air layer 60 mm; without additional moisture capacity*», siden det er luft uten ekstra kapasitet for opptak av fukt som benyttes når luftespalter skal modelleres.

For å skaffe et større grunnlag når fuktintervallet skal velges er det valgt å utføre flere ulike simuleringer. Disse simuleringene gjennomføres ved bruk av ulike parametere som er tenkt å kunne gi forskjellige utslag på mengden fukt i den klemte skjøten. Det er valgt å endre på følgende parametere i de ulike simuleringene:

- Veggens orientering
- Farge på kledningen
- Mengden slagregn som trenger inn gjennom kledningen

Veggens orientering vil ha stor innvirkning på hvor mye varmetilskudd veggen vil få som direkte stråling fra sola. Dette vil kunne påvirke hvilke temperaturer som vil oppstå i luften rundt den klemte skjøten. Fargen på kledningen vil også kunne spille en stor rolle, da en mørkere kledning vil absorbere større mengder av strålingen enn en lysere kledning. Dersom veggen simuleres med slagregn som trenger inn gjennom kledningen vil det kunne føre til at større mengder fukt vil kunne tas opp av treverket i den klemte skjøten. Det er kombinasjoner av disse som vil benyttes i de ulike simuleringene.

Luftespalten i modellen modelleres med et luftskifte på  $50 \text{ h}^{-1}$ . Slagregnet som trenger inn gjennom kledningen modelleres som fuktkilder i modellen. Her velges det at 1 % av mengden slagregn trenger inn gjennom kledningen og legger seg som fritt vann på innsiden av kledningen inn mot luftespalten. Samtidig velges den samme mengden slagregn og avsettes som fritt vann på klemlekten. Dette tilsvarer 0,08 % av total mengde slagregn på klemlektens langside og 0,038 % av total mengde slagregn på klemlektens kortsider. Modellens fuktkilder kan sees i Figur 19. Her er de lyseblå feltene til høyre fuktkildene rundt klemlekten. De lyseblå feltene til venstre er fuktkilden på innsiden av kledningen. De mørkeblå feltene er felt med luftskifte.



**Figur 19: Luftskifte og fukkilder i simuleringmodellen**

Kledningens farge modelleres ved å endre verdiene for parameteren «*Short-wave Radiation Absorptivity*». For mørk kledning er denne verdien valgt til 0,8 og for lys kledning er denne valgt til 0,2. Dette er standard-verdiene fra WUFI-2D. For modellens innvendige fukttilskudd er det valgt å benytte verdiene for middels fukttilskudd som finnes i resultatene til artikkelen «*Mean and diurnal indoor air humidity loads in residential buildings*» (Geving og Holme, 2012). Resultatene fra denne artikkelen er en ny kurve for fukttilskudd som er mer tilpasset norske forhold enn den som er gitt fra NS-EN ISO 13788 (Standard Norge, 2012). Den nye kurven baserer seg på målinger fra 117 bolighus i Trondheim og ansees derfor som mer passende enn verdiene fra standarden. I simuleringen er det valgt å benytte en innetemperatur på 20 °C.

Simuleringen av den klemte skjøten gjennomføres ved å benytte fire ulike situasjoner. Disse situasjonene er konstruert ved å endre på parameterne som er nevnt ovenfor. Situasjonene simuleres igjen for tre ulike klimasteder. De klimastedene som er valgt å benytte er Trondheim, Bergen og Karasjok. Dette er tre ulike steder med ulikt klima. Bergen er et område har et vått klima med mye slagregn, mens Karasjok har et tørt og kaldt klima. Trondheim er ansett som en middel mellom disse to. Situasjonene som simuleres er følgende:

- Slagregn trenger inn gjennom kledningen, veggens orientering er mot den retningen med mest slagregn og kledningen er lys.
- Slagregn trenger inn gjennom kledningen, veggens orientering er mot nord og kledningen er lys.
- Ingen slagregn, veggens orientering er mot sør og kledningen er mørk.
- Ingen slagregn, orienteringen er mot nord og kledningen er mørk.

De to første situasjonene som simuleres er antatt å føre til et resultat med høyere fuktnivå enn de to resterende. Den tredje situasjonen antas å kunne gi lavere fuktnivåer i treverket. Den fjerde situasjonen er ansett som en mellomstasjon.

For å kunne simulere dette er det også nødvendig å vite hvilken orientering som opplever størst mengde slagregn for de ulike klimastedene. Denne informasjonen finnes i WUFI-2D sin database over klimasteder. Orienteringene med mest slagregn er som følger (0° er sør, 90° er øst, 180° er nord og 270° er vest, mengden slagregn er gitt i parentes):

- Trondheim – 67,5° (800 mm/år)
- Bergen – 337,5° (1700 mm/år)
- Karasjok – 225° (17 mm/år)

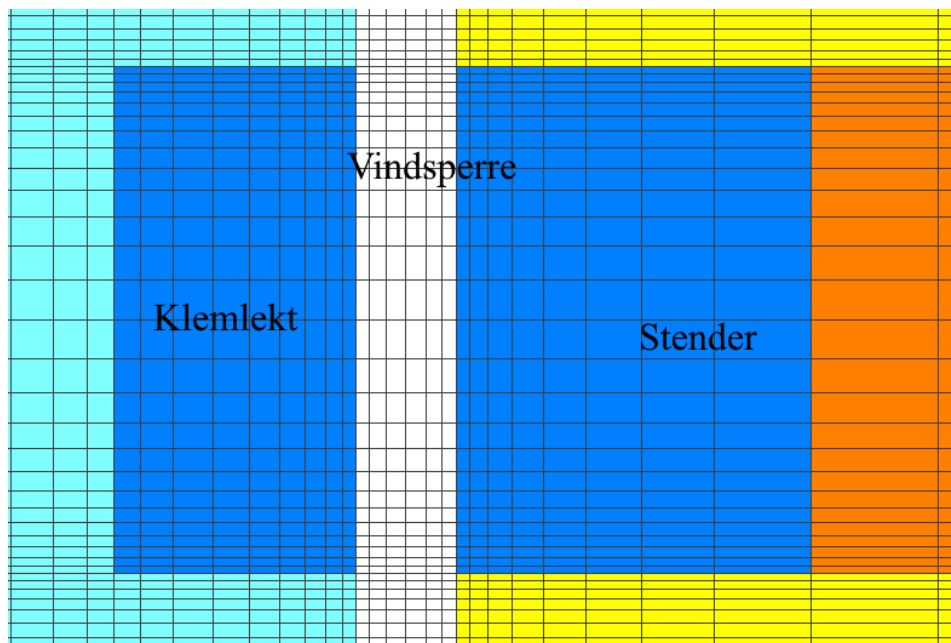
Totalt gir de ulike situasjonene og klimastedene 12 ulike simuleringer. En oversikt over de ulike simuleringene er vist i Tabell 1.

**Tabell 1: Oversikt over simuleringene som er utført**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Klimasted</b>	<b>Karasjok</b>					X	X	X	X				
	<b>Trondheim</b>	X	X	X	X								
	<b>Bergen</b>									X	X	X	X
<b>Slagregn gjennom kledningen</b>	<b>Ja</b>	X	X			X	X			X	X		
	<b>Nei</b>			X	X			X	X			X	X
<b>Farge på kledning</b>	<b>Lys</b>	X	X			X	X			X	X		
	<b>Mørk</b>			X	X			X	X			X	X
<b>Orientering</b>	<b>Nord</b>		X		X		X		X		X		X
	<b>Med mest slagregn</b>	X				X				X			
	<b>Sør</b>			X				X				X	

Simuleringene gjennomføres med startdato 1. oktober 2019. Deretter simuleres det med timesverdier i tre år. Ved ferdig simulering hentes verdier for fuktinnhold (i vekt-%) ut fra lekt og stender hver for seg. I tillegg hentes det ut verdier for den relative fuktigheten. For stenderen velges det å hente ut verdier fra den ytterste delen av stenderen mot klelekten tilsvarende klelektens tykkelse (23 mm). Et skjermtklipp av hvor verdiene hentes fra kan sees i Figur 20. Her hentes verdiene ut fra de mørkeblå feltene. Dataene eksporteres fra WUFI-2D og legges inn i et Excel-ark for videre behandling. I dette forsøket er det verdiene for én enkelt fuktskyklus som er interessant å hente ut. På grunn av dette blir alle verdier for de to første årene filtrert bort og det hentes kun ut verdier for det tredje året. Dette gjøres på grunn av byggfukten i materialene. Det antas at denne er tørket ut innen begynnelsen av det tredje året. Verdiene for det tredje året gjøres om til

gjennomsnittsverdier på ukesbasis. Til slutt blir gjennomsnittet av verdiene for klemløst og stender regnet ut, og det er denne verdien som blir vurdert.



**Figur 20: Hvor i konstruksjonen verdiene for fuktinnhold er hentet fra**

### 3.2 Resultat og diskusjon av simuleringene

Resultatene fra simuleringene er presentert i Tabell 2. I Tabell 2 er det første tallet i hver celle fuktinnholdet i vekt-%. Det andre tallet er relativ fuktighet i %.



**Tabell 2: Oversikt over resultatene fra simuleringene**

Simulering	Lekt		Stender		Gjennomsnitt	
	Maks	Min	Maks	Min	Maks	Min
<b>1</b>	18,3 / 91,6	12,6 / 70,3	15,6 / 82,2	12,3 / 69,0	16,9 / 86,9	12,4 / 69,6
<b>2</b>	17,5 / 88,8	12,9 / 72,0	15,2 / 80,9	12,4 / 69,4	16,3 / 84,6	12,7 / 70,7
<b>3</b>	17,0 / 87,0	9,5 / 53,9	14,2 / 77,3	9,8 / 56,1	15,6 / 82,1	9,6 / 55,0
<b>4</b>	17,1 / 87,4	10,7 / 60,9	14,4 / 78,2	10,8 / 61,6	15,8 / 82,8	10,8 / 61,3
<b>5</b>	16,4 / 84,9	11,4 / 64,6	13,2 / 73,2	11,2 / 63,6	14,8 / 79,0	11,3 / 64,1
<b>6</b>	16,4 / 84,9	11,4 / 64,6	13,2 / 73,2	11,2 / 63,6	14,8 / 79,0	11,3 / 64,1
<b>7</b>	15,9 / 83,3	8,4 / 45,3	12,5 / 69,9	8,9 / 49,5	14,2 / 76,5	8,7 / 47,8
<b>8</b>	15,9 / 83,3	8,4 / 45,3	12,5 / 69,9	8,9 / 49,5	14,2 / 76,5	8,7 / 47,8
<b>9</b>	17,3 / 88,0	9,8 / 55,4	15,0 / 80,2	10,5 / 59,7	16,1 / 83,9	10,3 / 58,3
<b>10</b>	15,7 / 82,6	9,8 / 55,9	14,1 / 76,9	10,3 / 58,9	14,6 / 78,7	10,2 / 57,7
<b>11</b>	15,6 / 82,2	7,6 / 38,3	13,5 / 74,5	8,5 / 46,3	14,5 / 78,2	8,2 / 43,3
<b>12</b>	15,2 / 80,8	8,8 / 48,3	13,2 / 73,4	9,4 / 53,6	14,2 / 77,0	9,2 / 51,3

Fra resultatene er det mulig å se at det for alle situasjonene er det et større fuktinnhold i klemløken enn i stenderen. Årsaken til dette er med stor sannsynlighet grunnet stenderens plassering lengre inn i veggen og den ekstra beskyttelsen denne har for det utvendige klimaet. Et annet funn fra simuleringene er at det ikke er Bergen som har det fuktigste trevirket, men Trondheim. Det kan være flere årsaker til dette. En av årsakene kan være at det generelt er lavere temperaturer i Trondheim enn i Bergen. Dette fører til at mer av fuktigheten i Bergen blir tørket ut fortere. Det kan også diskuteres om kun 1 % slagregn gjennom kledningen er en god representasjon for mengden slagregn i Bergen. Mengden slagregn i Bergen er over dobbelt så stor som den i Trondheim, derfor burde det muligens ha vært høyere enn 1 % som trenger inn gjennom kledningen her. Videre sees det at Bergen også i gjennomsnitt har tørrere treverk enn Karasjok. Dette kan også bety at 1 % slagregn gjennom kledningen er en stor overdrivelse i Karasjok.

Antagelsen om at situasjon 1 og 2 gir høyere fuktinnhold enn de to andre situasjonene stemmer for alle klimasteder. For Karasjok kan det observeres at situasjon 1 og 2 opplever nøyaktig det samme fuktintervallet, noe som tyder på at disse situasjonene er tilsvarende like for dette klimastedet. Dette gir mening da den eneste forskjellen på disse er orienteringen. I Karasjok er orienteringen med mest slagregn mot nordøst og mengden slagregn er nesten tilsvarende som for nord. Det samme gjelder for situasjon 3 og 4. Her er den eneste forskjellen orienteringen på veggen. Dette kan skyldes at veggen opplever så lite soltilskudd i løpet av et år at en sørvendt vegg ikke vil oppleve særlig mer uttørking enn en nordvendt vegg.

Med tanke på overførbarhet til laboratorieforsøket er det størrelsen på fuktintervallene som er interessant å undersøke. Mengden vekt-% som fuktinnholdet varierer med vil ha innvirkning på hvor mye treverket krymper eller sveller. Derfor er det størrelsen på intervallet mellom maksimum fuktinnhold og minimum fuktinnhold som er de viktigste resultatene fra simuleringene. En oversikt over størrelsen på intervallene kan finnes i Tabell 3.

**Tabell 3: Oversikt over størrelse på intervall mellom laveste og høyeste fuktinnhold for de ulike simuleringene**

<b>Simulering</b>	<b>Intervall [vekt-%]</b>
1	4,5
2	3,6
3	6,0
4	5,0
5	3,5
6	3,5
7	5,5
8	5,5
9	5,8
10	4,4
11	6,3
12	5,0

Som det kan sees av resultatene er det ulik størrelse på treverkets intervall mellom laveste fuktnivå og høyeste fuktnivå ved de ulike simuleringene. Størrelsen på intervallene er i stor grad bestemt av hvordan klimaet varierer i løpet av et år. Derfor er det tydelig fra tallene at Karasjok har et mer stabilt klima gjennom hele året enn det som er tilfelle for både Trondheim og Bergen. Det kan også observeres at den største forskjellen mellom laveste og høyeste fuktinnhold finnes for situasjon 3 i Bergen. Her vil det store intervallet komme av et fuktig klima, samtidig som en sørvendt og mørk kledning gir gode muligheter for uttørking på sommeren. Det minste intervallet observeres ved situasjon 1 i Karasjok. I begge disse situasjonene er det benyttet parametere som burde gi et høyt fuktnivå. Disse parametere er ikke like virkningsfulle i Karasjok (i forhold til Trondheim og Bergen), samtidig er det ikke lagt inn parametere som skulle tilsi god uttørking. Kombinasjonen av dette gir et mindre intervall.

### 3.3 Valg av fuktintervall

Fuktintervallet som skal benyttes i forsøket burde gjenspeile de intervallene som ble funnet ved simuleringene. Det gjennomsnittlige intervallet mellom laveste og høyeste fuktinnhold i simuleringene er 4,88 vekt-%. I forsøket som skal utføres er det ønskelig at resultatene kommer tydelig frem. Jo større fuktintervall som benyttes, jo mer bevegelser vil kunne oppstå i vindspærreskjøten. Derfor er det ønskelig at det benyttes et fuktintervall som er noe større enn dette. Samtidig er det viktig å ikke benytte et intervall som er for stort, da dette vil kunne føre til at det ikke vil være representativt for en virkelig skjøt på en bygning. Det velges å benytte et fuktintervall på 6 vekt-%. Siden det er diskutert at en slagregnsmengde på 1 % kan være for lite (spesielt i Bergen), er det ikke utenkelig at et noe større intervall enn det som er tilfelle i simuleringene kan oppstå i virkeligheten.

Laboratorieforsøket blir derfor gjennomført med et fuktintervall på 6 vekt-%. Variasjonen blir satt til å være mellom 9 og 15 vekt-%. Dette intervallet er noe større enn det intervallet som finnes i simuleringene, men det er besluttet at det er bedre med et noe høyere intervall enn noe som ligger lavere (for eksempel mellom 6 vekt-% og 12 vekt-%). Årsaken til dette er usikkerheten som oppstår ved måling av fuktnivå. Målingene blir mer usikre med tørrere treverk.



## 4 Laborieforsøkets oppsett

Hensikten med laborieforsøket er å undersøke luftlekkasjen i klemte plateskjøter i vindsperrsjiktet. I tråd med oppgavens problemstillinger er det ønskelig å undersøke effekten av teip på luftlekkasjen i klemte skjøter i vindsperrsjiktet, samt studere hvordan lekkasjen i slike skjøter utvikler seg over tid. Som nevnt i teoridelen er det flere parametere som inngår i oppbygningen av en klemt skjøt og det synes å være lite forskning på hvilken kombinasjon av disse som viser seg å være mest lufttett over tid.

Laborieforsøket som gjennomføres i denne masteroppgaven ble nøye planlagt i prosjektoppgaven gjennomført høsten 2019. Det ble tatt beslutninger på hvordan selve forsøket skulle utformes og det ble utført en parameterstudie. Parameterstudien hadde som hensikt å finne ut av hvilke av de ulike parametere i en klemt skjøt som var ønskelig å studere nærmere i selve forsøket. Parameterstudien har også hjulpet til med å komme frem til denne oppgavens problemstillinger.

### 4.1 Parametere i forsøket

#### 4.1.1 Parameterstudien

Parameterstudien undersøkte alle de ulike parametere som en klemt skjøt består av. En oversikt over disse kan finnes i Kap. 2.1.4. Det var ønskelig at valget av parametere skulle være tilsvarende det som ble benyttet av byggebransjen. Derfor ble det i studien gjort undersøkelser av hvilken kombinasjon av parametere som ble benyttet ute på byggeplassen, samt hvilke anbefalinger som gis av SINTEF i Byggforskserien og anbefalinger som gis av ulike vindsperreprodusenter. I tillegg ble det gjort vurderinger på hvilke parametere det ville være mest interessant å undersøke, samtidig som laborieforsøket ikke blir en reproduksjon av forsøk som er utført tidligere.

Fra den tidligere forskningen ved NTNU er det valgt å fokusere på ulike parametere i de ulike forsøkene. En oversikt over de ulike parametere som ble studert i de ulike forsøkene kan finnes i Tabell 4. Sagen (2003) undersøkte som nevnt vindsperrsjiktet, de andre forsøkene ble utført på dampsperrsjiktet.

**Tabell 4: Oppsummering over parametere i tidligere forskning ved NTNU**

	Ulike lekt-dimensjoner	Ulike feste-midler	Ulik dimensjon festemidler	Ulik senteravstand	Bruk av teip	Fukt-sykluser	Kun én ut-tørking	Kun testing etter montasje
<b>Sagen (2003)</b>		X		X		X		
<b>Bergby prosjekt-oppgave (2011a)</b>	X			X				X
<b>Bergby master-oppgave (2011b)</b>	X	X	X	X			X	
<b>Selmer (2013)</b>		X	X				X	
<b>Norvik (2018)</b>		X		X	X	X		

I Byggforskserien gir som tidligere nevnt SINTEF anbefalinger om at det i en klemt skjøt i vindsperrsjiktet burde benyttes lekt med tykkelse 18-23 mm i kombinasjon med 2,5-65 spiker. Senteravstanden burde være 300 mm mellom festemidlene (SINTEF, 2007). I et annet byggforskblad (SINTEF, 2008) gis det anbefalinger om lekter med størrelse 11-36 mm avhengig av lekten sin stivhet. Lektene skal enten spikres eller skruses med en senteravstand på 200-300 mm.

Vindsperreprodusentene har generelt svært få anbefalinger knyttet til utførelse av vindsperreskjøter i monteringsanvisningen til sine produkter. I prosjektoppgaven ble monteringsanvisninger fra produsentene Isola, Icopal, SIGA, Norgips, Hunton og Gyproc studert. En oversikt over funn i monteringsanvisningene kan finnes i Tabell 5.

**Tabell 5: Anbefalinger for den klemte skjøten hos ulike produsenter**

<b>Produsent</b>	<b>Type vindsperre</b>	<b>Kilde til monteringsanvisning</b>	<b>Gitt anbefaling til montering av skjøt</b>
<b>Isola</b>	Isola Soft Xtra, vindsperrerull av polyetylen	(Isola, 2019)	Anbefaler at rullproduktet legges med 50 mm omlegg som klemmes til bindingsverket. Lektene festes med maksimalt 150 mm senteravstand. Anbefaler bruk av teip dersom det er strenge krav til tetthet.
<b>Icopal</b>	Icopal Windbreak, vindsperrerull av polypropylen	(Icopal, 2019)	Klemlekter monteres over skjøten. Anbefalt lektetykkelse er 23 mm.
<b>SIGA</b>	SIGA Majvest, vindsperrerull av polypropylen og polyolefin	(SIGA, 2019)	Det gis ingen anbefalinger knyttet til skjøten i monteringsanvisningen.
<b>Norgips</b>	Norgips GU-X, vindsperreplate av gips med overflate av kartong	(Norgips, 2019)	Det gis ingen anbefalinger knyttet til skjøten i monteringsanvisningen.
<b>Hunton</b>	Hunton Vindtett, vindsperreplate av asfaltimpregnert trefiber.	(Hunton, 2019)	Anbefaler at det benyttes minimum 23x36 mm lekter. Utlekkingen kan ikke være mindre enn 20 mm. Dersom det skal benyttes stående trekledning kan det benyttes 11x36 mm, gitt at det monteres horisontale lekter utenpå. Anbefaler å benytte Hunttons egen teip- og primerløsning for å tette plateskjøtene.
<b>Gyproc</b>	Gyproc GUB Bris, vindsperreplate av gips med overflate av kartong	(Gyproc, 2019)	Anbefaler at skjøtene klemmes med klemlekter dersom det ikke benyttes teip. Da skal festemidlene monteres med senteravstand på 250 mm.

Fra tabellen kan det sees at det ikke er alle vindsperreprodusenter som gir anvisning til hvordan skjøtene i deres produkter skal utføres. Hunton og Icopal er de to eneste produsentene som gir anbefalinger knyttet til hvilken lektedimensjon som bør benyttes. Disse stemmer også overens med den anbefalingen som gis av SINTEF. Videre er det kun to av produsentene som anbefaler at det benyttes teip på skjøtene i deres produkter, Isola og Hunton. Ifølge Isola er det kun anbefalt å teipe over skjøtene dersom det stilles strenge krav til konstruksjonens lufttetthet.

For å undersøke parametere som ble benyttet ute på byggeplass ble det utført et byggeplassbesøk til prosjektet Holtermannsveien 1 i Trondheim. Oversikt over disse parametere kan finnes i Tabell 6.

**Tabell 6: Parametere benyttet for den klemte skjøten på prosjektet Holtermannsveien 1**

Parameter	Egenskap
Vindsperre	Plateprodukt, Gyproc GUB Bris, 9,5 mm
Festemiddel	Skrue 6x100 mm, produktnavn ukjent
Senteravstand festemiddel	500 mm
Klemlekt	36x48 mm
Teip	Ja, Relekta vindsperreteip

Tabellen viser at for flere av parameterne så blir ikke anbefalingene fra produsenten (Gyproc) eller SINTEF fulgt. Grunnen til dette er ukjent. En mulig forklaring er at det i dette prosjektet benyttes teip på skjøtene. Det er mulig at det er gjort antagelser om at bruken av teip muliggjør større senteravstand mellom festemidlene. I dette tilfellet er det benyttet en senteravstand på 500 mm. Gyproc anbefaler 250 mm, mens SINTEF sin anbefaling er 300 mm med denne lektetykkelsen.

#### 4.1.2 Parametere som undersøkes i laboratorieforsøket

Valg av parametere som er ønskelig å studere nærmere var resultatet av parameterstudien. De fleste parametere i en klemte skjøte ville ha vært interessant å studere nærmere, men på grunn av mangel på tilstrekkelig tid og begrensninger på utstyret som benyttes (se Kap. 4.2) må det velges ut et utvalg parametere det er ønskelig å undersøke nærmere i forsøket. Som nevnt er det også et ønske å utføre ny forskning, ikke reprodusere tidligere masteroppgaver.

Denne masteroppgaven gjennomføres i samarbeid med forskningsprosjektet TightEN. Som beskrevet i Kap. 2.1.5 er dette et forskningsprosjekt hvor et av delmålene er å kvantifisere hvor stor effekt bruken av teip har på bygningers energiforbruk. Dette har en sterk sammenheng med hvordan lufttettheten endres når skjøter og overganger på en konstruksjon teipes igjen. I dagens byggeprosjekter benyttes det svært store mengder med teip. Ifølge Rüter (2019) kan det i moderne leilighetsprosjekter benyttes syv meter med byggeteip for hver kvadratmeter boligareal. Allikevel er det manglende kunnskaper om hvor stor effekten av denne teipbruken er. I tilfellet for en plateskjøte i vindsperresjiktet (slik som i Figur 3), sees det at teipen vil bli perforert av lektens festemiddel under bruk. Når dette skjer er det ikke sikkert at teipen har en god nok effekt på lufttetthet at det er forsvarlig å benytte den. Dette gjelder både med tanke på tid og kostnader. Ved å inkludere bruken av teip som en parameter i forsøket vil det gi muligheten til å undersøke teipens bidrag til plateskjøtenes lufttetthet.

I tillegg velges det å undersøke hvordan senteravstanden mellom lektens festemidler påvirker plateskjøtenes lufttetthet. Denne parameteren er også inkludert i tidligere masteroppgaver. Allikevel er det interessant å undersøke hvordan senteravstanden mellom festemidlene blir påvirket av teipbruk. Lavere senteravstand mellom festemidlene på lekten vil føre til flere perforeringer gjennom teipen, høyere senteravstand vil føre til det motsatte. Det kan være mulig at flere slike perforeringer gjør at teipens effekt blir mindre.



#### 4.1.3 Øvrige parametere i laboratorieforsøket

Som festemiddel i klemlektene i forsøket velges det å benytte spiker. Tidligere forsøk har funnet ut at skruer generelt gir mindre endringer i luftlekkasje enn spiker. Dette skyldes den ekstra friksjonen skruene har på grunn av gjengene, som igjen fører til mindre bevegelser av skruene når treverket sveller og krymper på grunn av endringer i fuktinnhold. Årsaken til at spiker velges i forsøket er at det er ønskelig at svingningene i luftlekkasjeendring på grunn av bevegelser i treverket og festemidler skal være tydelige. Dersom det benyttes skruer er det en risiko for at endringene ville ha blitt for små til å gi tydelige resultater. I tillegg til dette ansees det som at spiker er det mest brukte festemiddelet som benyttes ute på byggeplassene. Det vurderes slik til tross for at det besøkte byggeprosjektet i parameterstudien benyttet skruer. Det gjøres også en antagelse om at det er mulig å finne de samme sammenhengene mellom bruken av teip og festemiddeleenes senteravstand uavhengig av typen festemiddel som benyttes. Det er valgt å benytte 3,1x90 mm varmforsinket spiker.

I forsøket velges det å benytte stendere med dimensjon 48x98 mm. Det er anbefalt av SINTEF å benytte denne bredden på stenderen der plateprodukter benyttes. Bruk av denne bredden gjør at det vil bli større underlag i stenderen som vindspærren kan skrues fast til. Det er valgt å forkorte tykkelsen på stenderen (fra 198 mm til 98 mm) da dette vil gjøre at prøvestykkene tar mindre plass og fukt-/tørkesyklusene vil ta kortere tid. Det er i likhet med Norvik (2018) gjort en antagelse om at stenderbredden utover festemiddelets penetreringsdybde ikke vil påvirke festemiddeleenes bevegelser. Det vil benyttes lekter med dimensjon 23x48 mm. En lektetykkelse på 23 mm er innenfor alle anbefalinger som gis av SINTEF og vindspærreprodusenter. Det er også et ønske om å holde lektetykkelsen så lav som mulig slik at fukt-/tørkesyklusene tar kortest mulig tid. 23 mm ansees som den minste tykkelsen som er vanlig å benytte til klemlekter.

Senteravstanden mellom festemidlene på klemlekten skal varieres i forsøket. Det velges å benytte senteravstandene 150 mm, 300 mm og 450 mm. Det er valgt å holde senteravstandene under 500 mm, til tross for at det er ønskelig å undersøke så store senteravstander som mulig. Med det forsøksoppsettet som skal benyttes vil senteravstander over 500 mm føre til at det ikke lenger vil være et festemiddel i enden av prøvestykkene. Det antas at dersom det ikke er festemidler i enden av prøvestykkene vil klemmeffekten av prøvestykkene bli kraftig redusert her. Dette skyldes at det ikke er noen festemidler som holder igjen klemlekten ved krymp av treverket. På grunn av dette velges 450 mm som største senteravstand i forsøket.

Som tidligere nevnt er det ønske om å undersøke klemte skjøter i vindspærresjiktet der vindspærren er av plateprodukt. Plateprodukt synes å være mest benyttet i bransjen i dag, spesielt på større næringsbygg. Skjøten i en vindspærreplate er også mer kritisk enn den som finnes ved bruk av vindspærreull. Dersom det benyttes vindspærre som er et rullprodukt vil det kun være en skjøt per 50-100 m. Ved bruk av plateprodukt vil det være én skjøt per 1,2 m. Det er derfor svært mange flere vindspærreskjøter med potensielle luftlekkasjer ved bruk av vindspærreplate enn ved bruk av vindspærreull. Det antas at vindspærreplater av trefiber også vil kunne påvirkes av fukt-/tørkesyklusene i form av dimensjonsendringer. På grunn av dette velges det å benytte plateprodukt av gips. Da unngås det at det også vil oppstå bevegelser i selve vindspærren, som også vil kunne påvirke luftlekkasjen i den klemte skjøten. Når vindspærren ikke beveger seg vil det gjøre at luftlekkasjeendringene kun kan skyldes bevegelser i festemiddel og treverk.

En oversikt over parametere som benyttes i forsøket finnes i Tabell 7.

**Tabell 7: Parametere som velges for laboratorieforsøket**

Parameter	Egenskap
Vindsperre	Plateprodukt av gips
Lekt	23x48 mm
Stender	48x98 mm
Festemiddel	Spiker, 3,1x90 mm
Senteravstander	150, 300 og 450 mm
Teip	Ja og nei

## 4.2 Utstyr som benyttes i laboratorieforsøket

### 4.2.1 Test- og oppfuktingsboks

En av hovedkomponentene i forsøket er en boks laget av kaldvalset stål. Denne boksen er sentral i forsøket ved at den benyttes både under selve testingen, samt under oppfukning av prøvestykkene. Boksen er den samme som ble benyttet av Norvik (2018), men det er gjort noen modifiseringer. Dette utstyret ble tatt vare på slik at det kunne benyttes til lignende forsøk senere. Et bilde av boksen kan sees i Figur 21.



**Figur 21: Test- og oppfuktingsboksen som benyttes i forsøket**

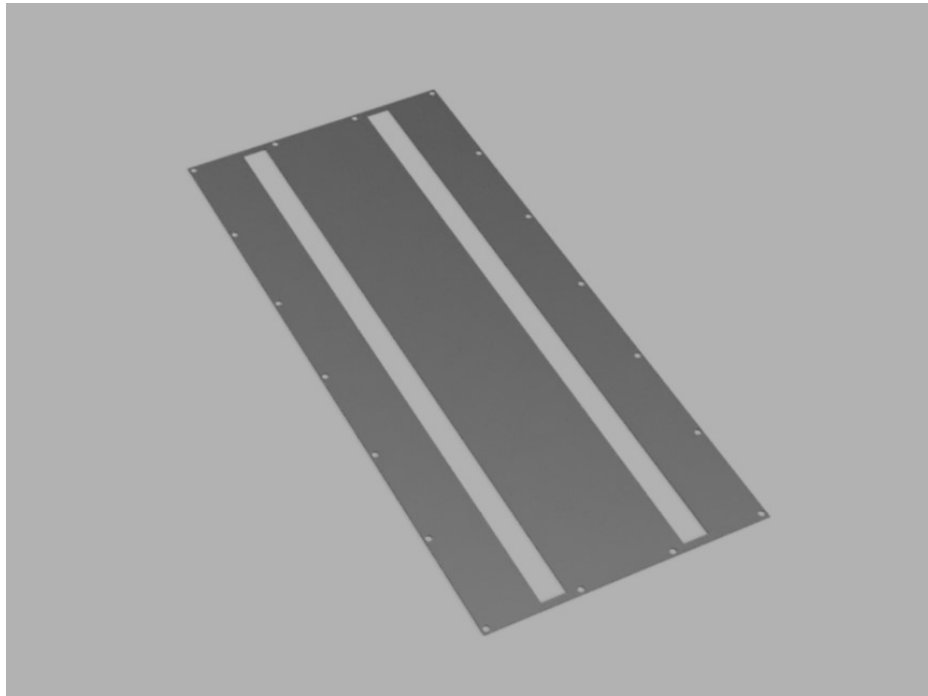
Hensikten med boksen er at den skal være så lufttett som mulig. På denne måten kan det settes på et lufttrykk på boksen som kan benyttes til å måle luftlekkasjen i ulike prøvestykker. Boksen skal også være tett slik at det kan fuktes opp prøver inne i boksen uten at fuktigheten lekker ut. Boksen er derfor laget av en større plate som er brettet opp langs sidene. Bunn- og topplaten er sveiset på plass. Bretten er gjort for å minimere lengden med sveisede skjøter. Størrelsen på boksen er laget etter størrelsen på SINTEF

sine varmeskap, cirka 50 x 114 cm (utvendige mål). Boksens størrelse er slik at den passer nøyaktig i varmeskapet, men med noen centimeter klaring på hver side. Denne klaringen gjør at luften i varmeskapet kan strømme fritt rundt boksen og sørge for jevn temperatur inne i boksen.

Til boksen tilhører det to ulike lokk. Det ene lokket benyttes under oppfukning av prøvene og hensikten med denne er derfor å tette boksen så godt som mulig. Dette lokket er laget til av samme materiale som boksen og er like stor som lysåpningen til boksen. Det andre lokket benyttes under testingen av prøvestykkene. Her finnes det to rektangulære hull som prøvestykkene skal stikke ut av. Overgangen mellom prøvestykkene og platen teipes igjen, og dermed skal det i teorien kun være mulig for luft og strømme gjennom skjøten i prøvestykkene. Bilder av de to lokkene finnes i Figur 22 og Figur 23.



**Figur 22: Lokket som benyttes under oppfukning av prøvene. Lokket ble benyttet som mal under konstruksjon av neste lokk, derfor har denne teip på seg. Disse bitene med teip kan sees bort ifra.**



**Figur 23: Illustrasjon av lokk under prøvetesting**

I lysåpningen av boksen finnes det 18 skruehull med diameter på 11 mm. I disse hullene var det opprinnelig et oppstikkende gjengestål på 5 cm som var festet til fastsveisede muttere på undersiden av skruehullene (slik som i Figur 21). Tilsvarende hull finnes på begge lokkene slik at lokkene kan legges over gjengestålet og deretter klemmes fast med muttere ovenfra. Lokkene lå i dette tilfellet oppå en gummilist som sørget for en tett overgang mellom boks og lokk. Overgangen mellom gjengestål, boksen og de fastsveisede mutterne hadde tidligere blitt tettet med tetningsmasse. Underveis i klargjøringen til forsøket ble det bestemt at det i stedet for å benytte gjengestålene til tetting av boksen skulle benyttes teip. Årsaken til dette er at boksen har stått lagret i SINTEF sin kjeller i to år, og det er derfor svært sannsynlig at tiltakene for å tette boksen (som ble utført av Norvik (2018)), ikke lenger er holdbare. Det er også uheldig med 18 potensielle luftlekkasjer gjennom skruehullene i lysåpningen. Derfor ble bruk av teip ansett som en mer lufttett løsning. Lokket vil i stedet for å skrues fast legges over lysåpningen på boksen. Deretter teipes det rundt overgangen mellom boksen og lokket. Teipen som benyttes til dette formålet er «Nashua 357», en teip som SINTEF har testet lufttettheten til og den benyttes også i andre forsøk hos SINTEF. Gjengestålet ble fjernet fra lysåpningen i boksen, og alle hull både på lokk og boks ble teipet igjen.

#### 4.2.2 Prøvestykkene

Som det er nevnt i Kap. 4.1.4 vil prøvestykkene bygges opp av en gitt sammensetning av parametere. Parameterne som endres på de ulike prøvestykkene er bruken av teip og senteravstand mellom festemidlene. Sammensetningen av parametere gir seks ulike kombinasjoner av prøvestykker. For å maksimere lengden skjøt som testes, samt å ha et større utvalg testresultater å trekke konklusjoner fra, velges det tre prøvestykker for hver kombinasjon av parametere. Dette gir at det totalt vil være 18 prøvestykker i forsøket. Hvert prøvestykke vil bestå av to skjøter siden det er plass til å teste to prøver om gangen. Hver skjøt er på 900 mm, slik at hvert prøvestykke inneholder 1,8 m skjøt som luftlekkasjer kan forekomme i. En oversikt over de ulike prøvestykkene kan finnes i Tabell 8.

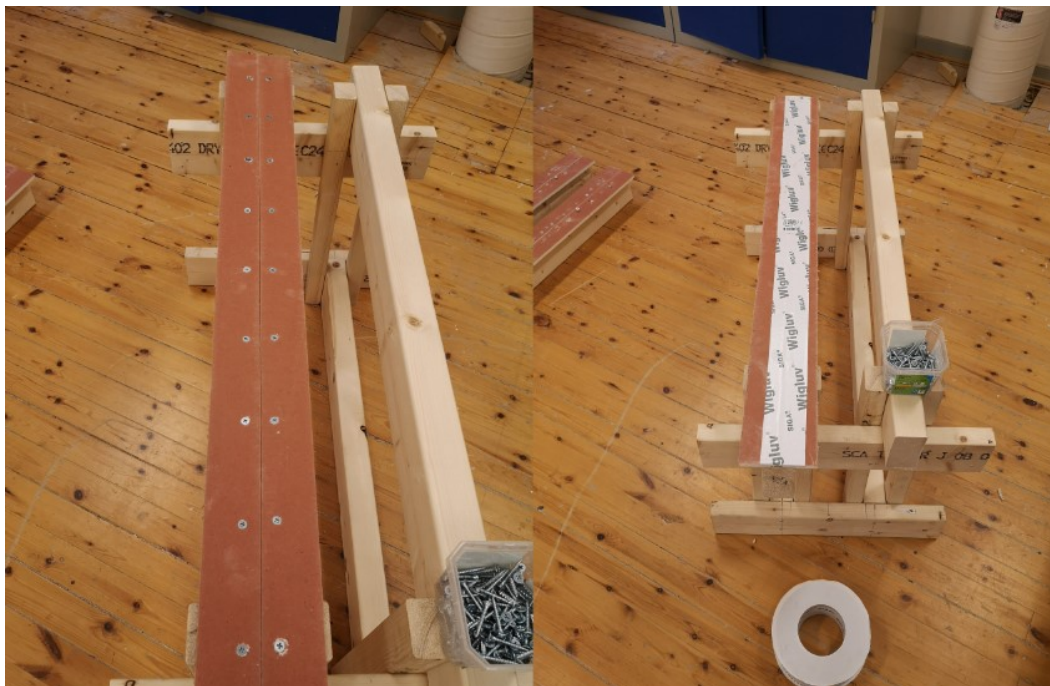
**Tabell 8: Oversikt over prøvestykker som skal benyttes i laboratorieforsøket**

Kombinasjon	Navn på prøvestykke
Bruk av teip, senteravstand festemiddel 150 mm	TEIP150-1
	TEIP150-2
	TEIP150-3
Bruk av teip, senteravstand festemiddel 300 mm	TEIP300-1
	TEIP300-2
	TEIP300-3
Bruk av teip, senteravstand festemiddel 450 mm	TEIP450-1
	TEIP450-2
	TEIP450-3
Uten teip, senteravstand festemiddel 150 mm	UTEN150-1
	UTEN150-2
	UTEN150-3
Uten teip, senteravstand festemiddel 300 mm	UTEN300-1
	UTEN300-2
	UTEN300-3
Uten teip, senteravstand festemiddel 450 mm	UTEN450-1
	UTEN450-2
	UTEN450-3

Prøvestykkene ble tillaget av trevirke 98x48 mm (stender) og 23x48 mm (lekt). Stenderen ble kappet til i lengder på 950 mm og lektene ble kappet til i lengder på 900 mm. Lektene kappes 25 mm kortere for å ha plass til teip i overgangen boks/lokk. Både stender og lekt ble allerede etter kapping markert med navn, slik at det var enkelt å ha kontroll på hvilket treverk som hørte til hvilket prøvestykke. På dette stadiet ble også treverket veid, slik at det finnes en indikasjon på hvor mye treverket i hvert enkelt prøvestykke veier (viktig med hensyn til fuktinnhold, mer om dette i Kap. 4.3.5). Videre ble det laget biter av vindsperremateriale med lengde på 950 mm og tykkelse 50 mm. De ferdig kappede vindsperrebitene kan sees i Figur 24. To slike vindsperrebitene monteres på stenderen inntil hverandre og danner en vindsperreskjøt. Monteringen gjøres ved at det først markeres hvor gipsskruene skal monteres (100 mm senteravstand) før vindsperredelene legges på stenderne slik at det dannes en skjøt midt på stenderen. Deretter monteres vindsperren til stenderen med en elektrisk drill. Dette kan sees i Figur 25. Under monteringen benyttes en bukk for understøttelse. Dette er den samme bukken som senere benyttes til å holde prøvestykkene oppe under trykktestingen.



**Figur 24: Vindsperrebiter som ble benyttet i forsøket**



**Figur 25: Montering av vindsperredeler til stender og montering av byggeteip**

Videre ble det montert byggeteip på halvparten av prøvestykkene, slik det er vist i Figur 25. Klemlektene ble så montert over vindspærreskjøten. Klemlektene var på forhånd markert med hvor i lekten festemidlene skulle festes slik at monteringen skulle gå hurtig. Monteringen av spikrene ble gjort med spikerpistol. Spikrene ble festet slik at de er 1-2 mm nedsunket i lekten. En samling av alle prøvestykkene vises i Figur 26.



**Figur 26: Samling av prøvestykkene**

Som nevnt skal prøvestykkene under testing settes ned i testboksen og deretter dekkes til med lokket vist i Figur 23. For å sikre en lufttett overgang mellom lokket og prøvestykket skal denne overgangen teipes igjen. Dette må repeteres for hver gang prøvestykket skal testes, og dette kan tære på overflaten til vindspærren. Derfor ble det besluttet å teipe rundt kanten av prøvestykkene. På denne måten vil teipen som benyttes til å tette overgangen lokk/prøvestykke bli teipet ned mot et underlag av teip. Et utvalg prøvestykker med slik teipbruk er vist i Figur 27. Dette ble gjort på alle prøvestykkene. Teipen som benyttes i dette tilfellet er også av typen «Nashua 357». Overkanten og underkanten av klemlektene ble også teipet igjen slik at luft ikke kan slippe ut i enden av klemlektene.



**Figur 27: Prøvestykker med beskyttende teip langs kanten**

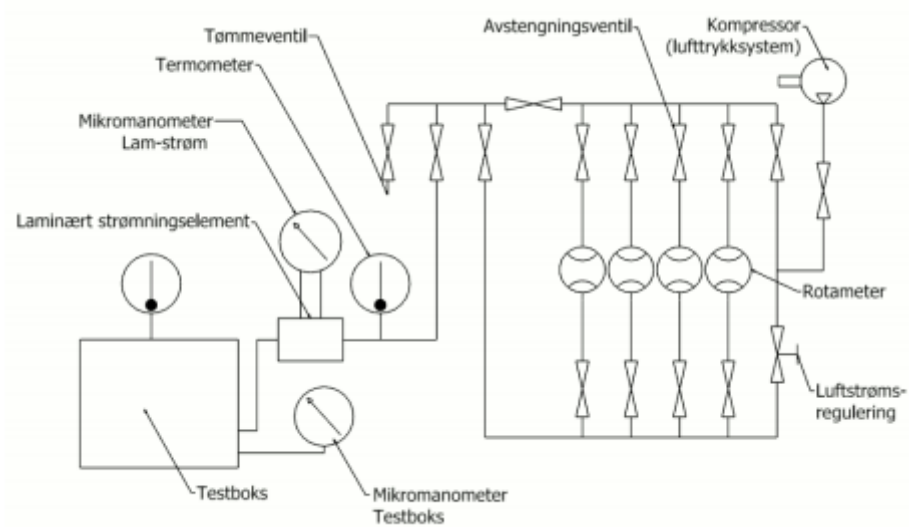
Denne utformingen av prøvestykkene vil i stor grad ligne på en vindspærreskjøt slik som finnes på en faktisk bygning. Siden toppen og bunnen av klemlekten er teipet igjen (i en ordentlig klemlekt ville treverket fortsatt videre) er det kun skjøten hvor det er mulig at luft kan strømme gjennom. En forskjell er vindspærrebitene. På en faktisk vindspærreskjøt vil vindspærren inn mot skjøten være dekket av papp. Overflatepappen på vindspærren er brettet rundt kanten og brettet litt tilbake på baksiden. I prøvestykkenes tilfelle er det eksponert gips som er innover mot skjøten, da platen er skjært til i mindre biter. Dette kan påvirke luftlekkasjen i skjøten. Dette ble allikevel sett på som en bedre løsning enn å kun benytte biter der det var papp rundt kanten. Dersom dette skulle ha blitt gjort måtte det kjøpes inn svært mange flere vindspærreplater, hvor store deler av platene ikke ble tatt i bruk.

#### 4.2.3 Lufttrykkstilførsel

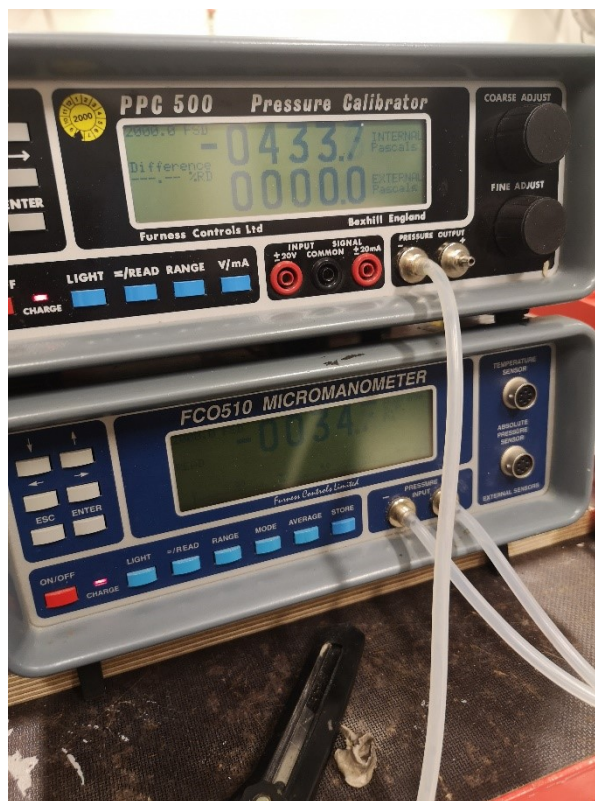
For å måle luftlekkasjen i prøvestykkenes skjøter benyttes luftmålingsriggen som finnes på SINTEF sine laboratorier. Dette systemet tilføres luft fra trykkluftsystemet inne på laboratoriet. Her kan det kobles på luft med trykk på opptil åtte bar. Riggen fungerer slik at luft passerer gjennom ulike rotameterer før den kommer til testboksen. Rotameterne muliggjør en analog avlesning av luftmengde som passerer, i l/h. Mengden luft kan også reguleres ved hjelp av disse rotameterne. Riggen har fire ulike rotameterer, alle med ulike avlesningsintervall. For å gjøre en mer nøyaktig avlesning av mengden luft som tilføres boksen, er det koblet til et laminærstrømningselement mellom rotameterne og boksen. Ved å benytte et mikromanometer koblet til laminærstrømningselementet, gir det muligheten til å lese av trykkforskjellen digitalt og nøyaktig over elementet. Dette kan regnes om til l/h per meter skjøt. Rotameterene benyttes som en ekstra kontroll til avlesningen på mikromanometeret. I laminærstrømningselementet tilsvarer en trykkforskjell på 96,88 Pa en luftgjennomstrømning på 6 l/min. Det er også et mikromanometer som er koblet til boksen. Dette mikromanometer måler trykkforskjellen som oppstår mellom luften i



rommet og luften inne i boksen. En prinsippsskisse av luftmålingsriggeren er vist i Figur 28. Et bilde av mikromanometerne er vist i Figur 29.



**Figur 28: Skisse av oppsettet i luftmålingsriggeren (Norvik, 2018)**



**Figur 29: Mikromanometere som er benyttet i forsøket**

#### 4.2.4 Utstyr for fuktmåling

For å simulere en aldring av vindspærreskjøtene og treverket den er laget av, skal prøvestykkene utsettes for fuktsykluser. Basert på simuleringene i Kap. 3 er det bestemt at prøvestykkene skal fuktes opp og tørkes ut mellom et fuktinnhold på 9 og 15 vekt-%. Denne oppfuktingen og uttørkingen gjøres mulig ved hjelp av utstyr for fuktmåling.

På to av prøvestykkene er det installert to par elektroder. Elektrodene er plassert i stenderen på en av teip-prøvene og en prøve uten teip (TEIP150-1 og UTEN150-1). Det første paret med elektroder er plassert i bunnen av prøvestykket, 250 mm fra bunnen. Det andre elektrodepåret er plassert i toppen, 250 mm fra toppen. Elektrodene er plassert ned i forborede hull og isolert med krympestrømper. På denne måten er det bare spissen av elektrodene som er i kontakt med treverket. Det er så loddet ledninger på alle de fire elektrodepårene. Det ene elektrodepåret er plassert ned i midten av prøvestykkens tverrsnitt, det andre elektrodepåret er plassert ned en fjerdedel i tverrsnittet. Det antas at de to prøvestykkene med elektroder vil være en god representasjon for fuktinnholdet i alle prøvestykkene.

Ved hjelp av disse elektrodene kan fuktnivået i prøvestykkene leses av underveis i oppfuktingen/tørkingen. Siden elektrodene er plassert i forskjellig dybde ned i tverrsnittet muliggjør det å følge med på hvordan fuktnivået utvikler seg innover i tverrsnittet. Under oppfukting/tørking stikker de påloddede ledningene ut av varmeskapets åpning. Her kan ledningene kobles på et protimeter, som muliggjør avlesning av fuktnivå. Når fuktnivået når henholdsvis 9 vekt-% eller 15 vekt-% kan oppfuktingen/tørkingen avsluttes og ny testrunde kan begynne.

### 4.3 Forsøksprosedyre

#### 4.3.1 Egenlekkasje

Før trykktesting av prøvestykkene kan starte må det gjennomføres en test for å undersøke boksens egenlekkasje. Selv om det er tilstrebet å gjøre boksen så lufttett som overhodet mulig, vil det alltid finnes noen utettheter. Disse utetthetene oppstår med stor sannsynlighet i boksens gjennomføringer. Formålet med egenlekkasjetesten er å sørge for at det som måles under prøvetesting kun er luftlekkasjen i vindspærreskjøten. På grunn av at boksen flyttes mellom varmeskap og testtrigen flere ganger i løpet av forsøket, må denne egenlekkasjen måles før hver oppstart av lekkasjemåling. Dette er fordi boksen kan påvirkes av de fukt- og temperaturpåkjenningene den opplever i varmeskapet og den kan oppleve mekaniske skader under transport.

Boksens egenlekkasje måles ved å sette på lokket som benyttes ved prøvetesting. Overgangen mellom boks og lokk tettes med teip som om det skulle foregå en vanlig prøvetesting. Lokket har to hull hvor prøvestykkene skal stikke ut gjennom. Siden det ikke er noen prøvestykker til stede i dette tilfellet, så tettes også disse hullene igjen med samme type teip. Lufttrykket settes så på og det registreres hvilken egenlekkasje som opptrer ved 20, 30, 50, 70 og 90 Pa trykkforskjell mellom boksen og omgivelsene.

### 4.3.2 Trykktesting av prøvestykkene

Før trykktestingen av prøvestykkene begynner blir prøvestykket veid. Hensikten med dette er å senere kunne anslå prøvenes nøyaktige fuktforløp.

Trykktestingen av prøvestykkene gjennomføres ved å plassere prøvestykkene i boksen slik det er beskrevet i Kap. 4.2.1. Det er besluttet at forsøket skal gjennomføres ved å benytte et overtrykk. Dette gir muligheter for sammenligning med forsøk som er utført tidligere. I tillegg er det vurdert at det vil gi mer konservative resultater å benytte et overtrykk enn undertrykk. Ved et overtrykk vil delene i den klemte skjøten bli presset fra hverandre, noe som ikke vil skje ved å benytte et undertrykk. Dette vil føre til at mer luft har muligheten til å passere gjennom skjøten, noe som kan føre til tydeligere resultater.

Prøvestykkene testes ved å sette boksen i et overtrykk på 20, 30, 50, 70 og 90 Pa. Ved hver av disse trykkforskjellene registreres lekkasjene som oppstår. Justeringen av overtrykk som lekkasjene skal leses av ved, gjøres ved å tilføre nok mengde luft til at det kan leses av det nødvendige overtrykket på mikromanometeret som viser trykkforskjellen mellom boksen og omgivelsene. Når det nødvendige overtrykket er oppnådd leses det av på det andre manometeret hvor mye luft som er nødt til å tilføres til boksen for å opprettholde det ønskede overtrykket. Luften som tilføres boksen vil da være det samme som boksens lekkasje, altså mengden luft som passerer gjennom skjøten (og boksens egenlekkasje som blir trukket fra).

Større temperaturredifferanser mellom luften som tilføres boksen, luften i boksen og luften i rommet vil kunne påvirke prøveresultatene. På bakgrunn av at Norvik (2018) i sitt forsøk opplevde en gjennomsnittlig temperaturforskjell mellom tilført luft og luft i boksen på 0,59 °C er dette valgt å neglisjeres.

### 4.3.3 Logging av resultater

Logging av resultatene gjøres for hvert enkelt prøvestykke ved 20, 30, 50, 70 og 90 Pa overtrykk. Når det nødvendige overtrykket er oppnådd leses det av en trykkforskjell over laminærstrømselementet. Som nevnt er luften som passerer gjennom her den samme som vil passere ut av skjøten (og boksens utettheter), og i laminærstrømselementet er en trykkforskjell på 96,88 Pa det samme som en luftstrøm på 6 l/min. Dette kan regnes om til at 1 Pa trykkforskjell tilsvarer en luftstrøm på 2,064 l/hm (gitt 1,8 meter skjøt). Ved å lese av trykkforskjellen i laminærstrømselementet og deretter trekke fra trykkforskjellen som skyldes egenlekkasjen, så vil differansen være trykkforskjellen grunnet lekkasjen i skjøten.

Luftlekkasjen registreres for de fem ulike nivåene av overtrykk. Disse resultatene benyttes så til å danne en trendlinje for luftlekkasjen. Denne trendlinjen leses av ved 50 Pa overtrykk, og det er dette tallet som er resultatet av prøvestykkets luftlekkasje.

Denne prosedyren for logging av resultater er automatisert ved hjelp av et Excel-ark. Det finnes et Excel-ark for hvert enkelt prøvestykke. I dette Excel-arket registreres først egenlekkasjen for hver testrunde. Deretter logges kun trykkforskjellen inkludert egenlekkasjen. Regnearket er programmert til å fullføre resten av utregningene, samt plote resultatene i et linjediagram.

Egenlekkasje [Pa]	Initiell	Tørk 1	Fukt 1	Tørk 2	Fukt 2	1
20	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0

Trykkforskjell [Pa] med egenlekkasje	Initiell	Tørk 1	Fukt 1	Tørk 2	Fukt 2	1
20 Pa	0	0	0	0	0	0
30 Pa	0	0	0	0	0	0
50 Pa	0	0	0	0	0	0
70 Pa	0	0	0	0	0	0
90 Pa	0	0	0	0	0	0

Trykkforskjell [Pa] uten egenlekkasje	Initiell	Tørk 1	Fukt 1	Tørk 2	Fukt 2	1
20 Pa	0	0	0	0	0	0
30 Pa	0	0	0	0	0	0
50 Pa	0	0	0	0	0	0
70 Pa	0	0	0	0	0	0
90 Pa	0	0	0	0	0	0

Lekkasjetall [l/hm]	Initiell	Tørk 1	Fukt 1	Tørk 2	Fukt 2	1
20	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0
Stigningstall	0	0	0	0	0	0
Skjæringspunkt	0	0	0	0	0	0

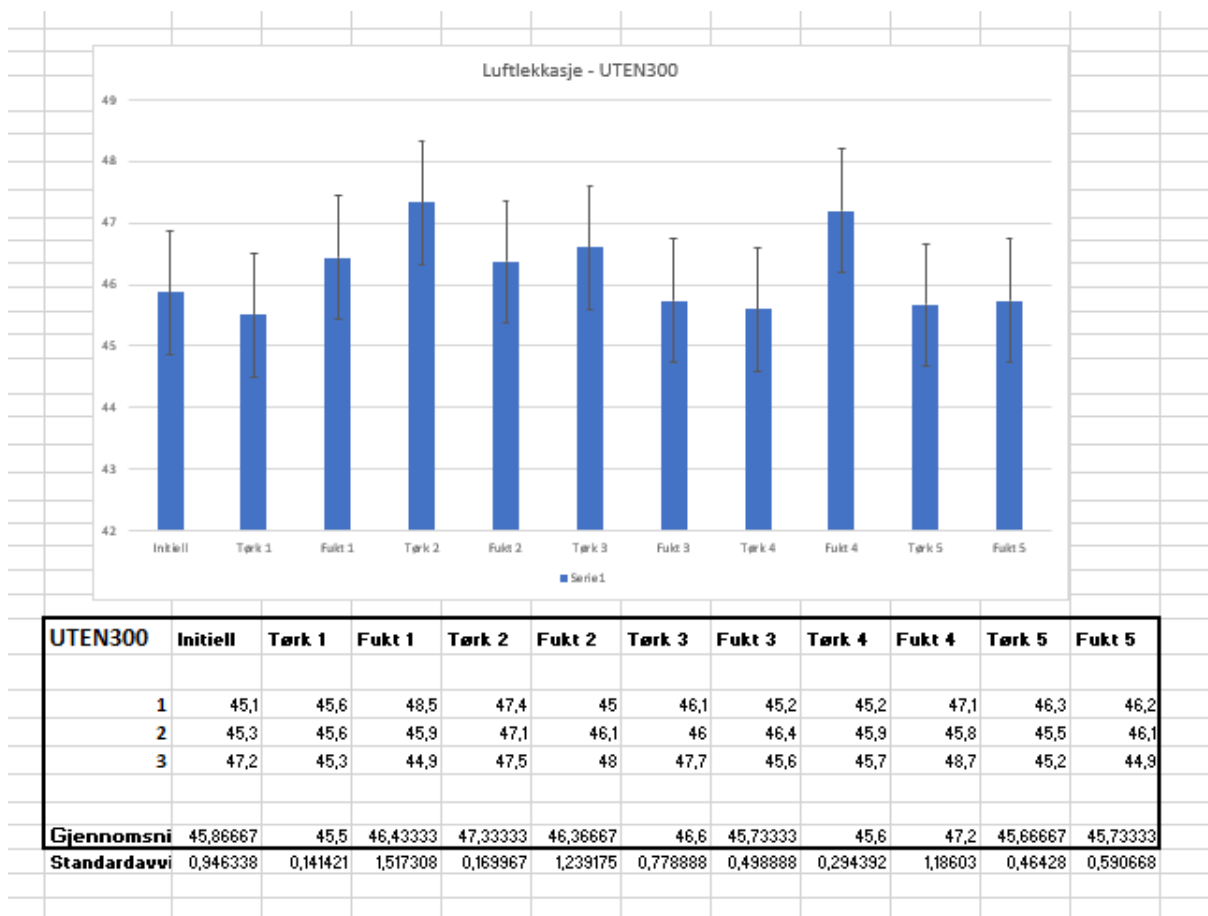
  

Lekkasjetall [l/hm] ved 50Pa overtrykk	Initiell	Tørk 1	Fukt 1	Tørk 2	Fukt 2	1
0	0	0	0	0	0	0

**Figur 30: Skjermtklipp fra Excel-ark for logging av resultater. Prøvestykkets resultat vil automatisk dukke opp i de grønne cellene ved ferdig testing etter å ha lagt inn resultatet fra målingen.**

Skjermtklipp fra Excel-arket er vist i Figur 30. Samme Excel-ark benyttes også til å logge prøvestykkens vekt underveis i forsøket.

Alle resultatene som blir registrert for de ulike prøvestykkene samles i et annet Excel-ark. Her lages det gjennomsnitt og standardavvik for alle prøvestykkene i en gruppe og dette plottes. Skjermtklipp av dette Excel-arket er vist i Figur 31.



**Figur 31: Skjermtutklipp fra Excel-ark for samling av resultater. Verdiene presentert i denne figuren er kun eksempler, ikke faktiske resultater fra forsøket.**

#### 4.3.4 Oppfukning og tørking

For å simulere en aldring av vindsperreskjøtene og treverket den er laget av, skal prøvestykkene utsettes for fuktsykluser. Det vil i løpet av forsøket gjøres trykktesting av prøvestykkene syv ganger. Det gjøres en initiell testing i tillegg til tre ganger uttørket og tre ganger oppfuktet. Prøvestykkene er delt inn i to grupper, de hvor det er benyttet teip og de som ikke benytter teip. På grunn av plassbegrensninger i boksen vil oppfukning og tørking av disse to gruppene skje simultant. Det benyttes da to ulike varmeskap. Mens teip-gruppen fuktes opp, vil gruppen uten teip tørkes. Etter testing bytter gruppene plass. Basert på simuleringene i Kap. 3 er det bestemt at prøvestykkene skal fuktes opp og tørkes ut mellom et fuktinnhold på 9 og 15 vekt-%. Prøvene testes så på nytt mellom hver oppfukning/tørking.

Oppfuktingen gjøres ved at det plasseres en beholder med vann i bunnen av oppfukningsboksen. Prøvestykkene settes over beholderen (på en rist). Mengden vann i beholderen er beregnet ut slik at det er nøyaktig nok vann til at prøvestykkene når det nødvendige fuktnivået. Lokket som skal benyttes under oppfukning teipes på boksen og temperaturen i varmeskapet justeres opp til 70 °C. Vannet i beholderen vil fordampe og tas opp av treverket. Siden boksen er tett, vil ikke fuktigheten slippe ut av boksen. Ved tørking av prøvestykkene settes disse direkte inn i varmeskapet, uten boks. Den samme temperaturen på 70 °C benyttes også her.

Under uttørking og oppfukting vil det være muligheter for å følge med på fuktinnholdet i to av prøvestykkene, slik det er beskrevet i Kap. 4.2.4. Når gruppen av prøvestykker har oppnådd det ønskede fuktinnholdet, tas prøvestykkene ut av varmeskapet. Siden den ene gruppen tørkes ned til 9 vekt-% fuktinnhold og den andre fuktes opp til 15 vekt-% fuktinnhold vil det måtte tas hensyn til at oppfukting og tørking ikke er ferdig på nøyaktig samme tidspunkt. Mengden vann til oppfukting av prøvestykkene blir beregnet til å være nøyaktig det den trenger å være for å nå 15 vekt-%. Siden boksen er tilstrekkelig lufttett vil det ikke være mulighet for at treverket tørker ut etter at dette fuktinnholdet er oppnådd. Derfor kan varmeskapet skrus av, og denne gruppen av prøvestykker kan vente til den andre gruppen er tilstrekkelig tørket. Dersom prøvestykkene som skal tørkes er ferdig først, vil disse prøvestykkene fjernes fra varmeskapet og pakkes inn i PE-folie. Dette gjøres for å holde fuktnivået stabilt til neste runde med prøvetesting.

#### 4.3.5 Demontering og absolutt tørking

Etter at det er gjennomført tre fuktsykluser på prøvestykkene og luftlekkasjen er testet syv ganger, skal prøvestykkene demonteres. Dette gjøres ved å fjerne alt som ikke er treverk fra prøvestykkene og veie dette. Vekten av det som ikke er treverk i prøvestykkene trekkes fra vekten av prøvestykkene ved hver trykktesting av prøvene. Dette gir muligheten til å vite nøyaktig hva vekten av treverket var ved alle trykktestene.

Så settes alle prøvestykkene (kun treverket) inn i varmeskapet for å gjøre en absolutt uttørking. Denne uttørkingen gjøres for å finne tørrvekten av treverket. Dette gjør det mulig å finne prøvestykkenes nøyaktige fuktnivå ved trykktestingene som ble utført. Dette vil også vise om det tenkte fuktnivået (9 og 15 vekt-%) faktisk ble oppnådd ved testing.

## 5 Diskusjon

Ettersom denne oppgaven ble gjennomført uten mulighet til å oppnå noen resultater, vil det i diskusjonen presenteres hvilke resultater som mest sannsynlig ville ha forekommet. Basert på tidligere forskning og antagelser er det mulig å skape visse hypoteser om hvilke resultater som er et sannsynlig utfall av det planlagte forsøket. Videre vil det i diskusjonen presenteres mulige og interessante metoder for å arbeide videre med de resultatene som kan oppnås i forsøket. Det vil også presenteres mulige feilkilder til laboratorieforsøket.

### 5.1 Hypoteser

Det er rimelig å anta at det i forsøket ville ha vært en betydelig forskjell på luftlekkasjen i prøvestykkene mellom tørket og oppfuktet tilstand. På samme måte som i den tidligere forskningen ville det med stor sannsynlighet ha vært en større lekkasje når treverket er tørket på grunn av krymp. Den motsatte effekten vil kunne bli observert ved fuktet tilstand, på grunn av svelling. En effekt som er vanskelig å anslå er hvordan luftlekkasjen utvikler seg over tid. For å få en bedre oversikt over dette vil det være nødvendig å gjøre flere sykluser enn tre. De tre første kan gi visse antydninger til hvilken form utviklingen kan ha. Slik som hos Norvik (2018) er det rimelig å anta at sammenhengen mellom de lekkasjene på henholdsvis oppfuktingsmåling og tørkemåling ville ha vært tilnærmet lineær. Men det er mulig at dersom flere sykluser ville ha blitt gjennomført at den kunne ha fått tendenser til en eksponentiell utvikling.

Videre er det rimelig å anta at prøvestykkene med teip ville ha vært mer lufttett enn prøvestykkene uten teip. Dette gjelder spesielt TEIP300 og TEIP450. I TEIP150 er teipen som er benyttet gjennomhullet av hele seks perforeringer grunnet festemiddelet. Her er det ikke sikkert at forskjellen mellom prøvestykkene med og uten teip ville ha vært like stor. Disse perforeringshullene ville med stor sannsynlighet bidratt til en økt luftlekkasje. VED TEIP300 og TEIP450 er det ikke like mange perforeringer og derfor er det rimelig å anta at disse vil være mer lufttett. Et mulig resultat fra forsøket kan også være at TEIP450 er omtrent like lufttett som UTEN150. Dette vil igjen bety at dersom teip benyttes kan senteravstanden økes og fortsatt oppnå den samme lufttettheten. Det betyr også at dersom teip ikke benyttes vil det oppnås den samme lufttettheten ved å benytte korte senteravstander.

Det som er interessant i sammenligningen mellom prøvestykker med og uten teip er hvor stor forskjellen mellom dem eventuelt måtte være. Dette er derimot vanskelig å anslå, spesielt siden det ikke er utført flere av slike forsøk tidligere. Norvik (2018) testet teip som en ekstra del av sitt forsøk og kom frem til at reduksjonen i luftlekkasje var spesielt stor der det var benyttet høy senteravstand. På Norvik sitt prøvestykke med størst senteravstand var reduksjonen opp imot 50 %. Det er derfor mulig å anta at en tilsvarende reduksjon kan finne sted i dette forsøket.

## 5.2 Faktisk påvirkning for total lufttetthet

Resultatene fra dette forsøket kan benyttes til å anslå hvor stor konsekvens økningen i luftlekkasjen mellom hver syklus utgjør for en bygning sin totale lufttetthet. Ved å anta at vindsperrsjiktet er det eneste lufttette sjiktet, samtidig som dette er de eneste lekkasjene som måtte finne sted på klimaskallet, kan det estimeres hvor stor andel av luftlekkasjekravet som blir «oppbrukt» i vindsperreskjøten.

Resultatene fra forsøket er de ulike verdiene for prøvestykkene i l/hm. Dette kan enkelt regnes om til et tall i luftskifte per time, gitt at det finnes en konkret bygning å gjennomføre beregningene på. Da kan det regnes ut hvor mange meter skjøt det er på klimaskallet på den aktuelle bygningen har. Samtidig benyttes bygningens totale volum for å finne et tall i prosent på hvor stor andel av luftlekkasjekravet som oppstår i vindsperreskjøten.

Ved å utføre denne typen beregninger vil det med stor sannsynlighet oppdages at denne typen luftlekkasjer står for en svært liten andel av bygningens totale luftlekkasjer. Dette forsterkes ytterligere av de forenklingene som er gjort for å utføre beregningen. Det vil også være en stor forskjell på om det beregnes på et vanlig småhus eller et større næringsbygg. I et større bygg vil det nok observeres at disse lekkasjene står for en svært liten andel av det totale luftskiftet. Men dette gjelder kun med resultatene som oppnås i dette forsøket. Dersom luftlekkasjen etter hvert begynner å utvikle seg eksponentielt kan denne lekkasjen bli betydelig etter kun få år.

## 5.3 Kost/nytte-evaluering

Med resultatene som oppnås i forsøket er det mulig å tallfeste den eventuelle ekstra lufttettheten som oppnås ved å benytte teip på de klemte skjøtene i vindsperrsjiktet. Med visse forenklinger gjør dette det mulig å beregne hvilke kostnader en eventuelt kan spare på å benytte teip. Samtidig er teip, slik det er nevnt tidligere, en stor kostnad i dagens byggeprosjekter. Det er derfor interessant å studere om det faktisk oppnås noen nytte av den ekstra kostnaden som legges inn i prosjektene. Dersom resultatene i dette forsøket kun hadde vist en svært liten økning av lufttettheten i skjøtene, kan det diskuteres om det i det hele tatt er nødvendig å benytte den dersom energieffektiviteten bare blir litt bedre. Bruk av teip er ressurskrevende, både som kostnader og arbeidskraft. Selv om dette ikke er undersøkt her, innebærer produksjon av teip også en påvirkning på miljøet med tanke på utslipp av klimagasser.

Å benytte teip i prosjektene er som nevnt fordelaktig av flere årsaker. Bygningen blir mer lufttett, men det kan også forhindre fuktproblematikk, samt sørge for et bedre inneklima. Effektene av et bedret inneklima og mindre sannsynlighet for fuktproblemer er vanskelig å tallfeste. Men dersom det antas at vindsperrsjiktet er klimaskallets eneste lufttette sjikt, og at all infiltrasjon skjer gjennom dette sjiktet, kan teipens nytte kvantifiseres gjennom en energibesparelse knyttet til mindre mengde infiltrasjon. Det betyr at den slik type kost/nytte-evaluering vil måtte gjøres i sammenheng med en beregning for luftlekkasjeutviklingens konsekvens for en faktisk bygning, slik det er foreslått tidligere. Energibesparelsene kan beregnes på flere ulike måter, enten som beskrevet i SN-NSPEK 3031:2020 (Standard Norge, 2020) eller ved bruk av beregningsprogrammer for energisimulering.

Energibesparelsene som måtte forekomme kan videre benyttes til å regne om til CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Denne energibesparelsen kan igjen sammenlignes med hvor stor miljøpåkjønning teipen har. Denne kan finnes ut ifra tilgjengelige EPD-er for teipprodukter.



Dersom dette skal utføres må det også gjøres beregninger på hvor stor mengde teip som benyttes på bygningen. I dette tilfellet ville det også ha vært interessant å studere forskjellen på småhus og større næringsbygg.

Det er viktig å bemerke seg at denne beregningen, ved bruk av denne metoden, vil være basert på store antagelser om at vindspærresjiktet er det eneste lufttette sjiktet og at alle luftlekkasjer forekommer her. Selv om dette ikke faktisk er tilfellet, er det interessant å se om bruken av teip vil gi en positiv effekt på energibruk og miljøet. Dersom det skulle vise seg at teipbruk ikke kan forsvares med bruk av disse antagelsene, er det svært lite sannsynlig for at dette kan forsvares med reelle antagelser til grunn.

## 5.4 Feilkilder

### 5.4.1 Likheten med en virkelig skjøt

Det kan diskuteres hvor lik prøvestykkene er en faktisk plateskjøt i vindspærresjiktet. Til tross for at det er forsøkt å gjøre det så likt som mulig, vil det ikke kunne bli helt likt ved bruk av dette forsøksoppsettet. En stor forskjell i dette tilfellet er at skjøtene i prøvestykkene består av vindspærreplater som er kuttet opp i mange små biter. Dette betyr at plateskjøten inn mot kanten ikke vil ha et papplag som er brettet rundt kanten. Det er mulig at dette ekstra laget av papp kan ha en effekt på luftlekkasjene.

I forsøket gjøres prøvingen med et innvendig overtrykk. Dette er en grov forenkling av trykkforskjellene som vanligvis vil oppstå over en vindspærreskjøt. Trykkforskjellen her avhenger spesielt sterkt av vind, ventilasjon og temperatur og vil variere sterkt over døgnet. Siden det i de fleste tilfeller vil være et lufttett dampspærresjikt på innsiden av konstruksjonen er det mer sannsynlig at vindspærreskjøten opplever et undertrykk enn et overtrykk. Dersom forsøket blir gjennomført med et undertrykk ville nok resultatene ha blitt mer konservative, da et undertrykk vil bidra til å klemme skjøtene sammen.

### 5.4.2 Aldringsprosessen

I dette forsøket ble prøvestykkene aldret ved å benytte høye temperaturer, samt å tilføre fuktighet i form av vanndamp. Dette ville ha fungert godt med tanke på endringer i treverkets fuktinnhold, men det er mer uvisst om hvordan teipen som er benyttet blir påvirket av denne aldringen. Sammenlignet med de vanlige testmetodene for teip (NS-EN 1296) er dette en svært kort temperaturpåkjenning for teipen. Her er den påkjent 70 °C i en ukes tid, mens vanlig testmetode tilsier en aldring på 24 uker. Dette betyr at teipen «henger etter» treverket med tanke på aldring.

### 5.4.3 Test- og oppfuktingsboksen

Test- og oppfuktingsboksen som blir benyttet i forsøket bærer preg av å være noen år gammel. Boksen ble bygget av Norvik (2018) og det måtte gjøres en rekke utbedringer på boksen for at den skulle oppnå tilstrekkelig lav egenlekkasje. Det kunne med fordel ha blitt konstruert en ny boks hvor det ikke var benyttet skruehull til innfestning av de ulike lokkene. Det er uheldig med slike skruehull dersom boksen skal være så lufttett som mulig. En ny boks kunne med fordel ha blitt bygget slik at boksen baserte seg på bruk av teip til lufttetting, og derav ikke behøver skruehull.



## 6 Konklusjon og videre arbeid

I denne oppgaven er det ikke kommet frem til noen resultater. Allikevel er det presentert et prøveoppsett og en forsøksmetode som er mulig for andre å arbeide videre med. Utstyret og prøvestykkene ligger klart til forsøksoppstart for en prosjektoppgave/masteroppgave senere.

Dersom oppgaven fortsettes av andre masterstudenter vil anbefales det at forsøket startes opp så tidlig som mulig, gjerne allerede som en del av en prosjektoppgave. Det å starte forsøket så tidlig vil gi muligheten til å gjennomføre enda flere sykluser enn det som er planlagt her, og det som er utført tidligere. Det er interessant å se hvordan luftlekkasjen i skjøtene utvikler seg ved gjentagende prøving, helst med flere enn tre sykluser.

Forsøket kan også suppleres ved å legge til enda flere prøvestykker med enda flere parametere. Det ville ha vært interessant å se hvordan en skjøt i et rullprodukt er sammenlignet med en plateskjøt, samt å se om forskjellene ved bruk av spikre og skruer også er til stede i dette forsøket.

Videre vil jeg også anbefale at forsøket gjennomføres med en prøveboks som er konstruert for å bli tett igjen med teip, og som derfor utføres uten skruehull. Det er mulig for den som måtte ønske å fortsette med forsøket å konstruere en ny boks til prøvetesting, men benytte samme boks som benyttes her til oppfukning av prøvene.



# Referanser

- Bankvall, C. (2013) *Luftboken: luftrørelser og tetthet i byggnader*. Lund: Studentlitteratur.
- Bergby, J. C. (2011a) *Lufttetthet av klemte skjøter i vind- og dampspærresjikt*. Prosjektoppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Bergby, J. C. (2011b) *Lufttetthet av klemte skjøter i vind- og dampspærresjikt*. Masteroppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Bergheim, E., Geving, S. og Time, B. (1998) *Hygroscopic material properties : water vapour permeability and hygroscopic sorption curves for materials used in a test house*. (Prosjektrapport 234). Oslo: Norges byggforskningsinstitutt. Tilgjengelig fra: <https://www.sintefbok.no/book/index/276> (Hentet: 12.12.2019).
- DiBK (2019) *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/> (Hentet: 02.03.2020).
- Edwardsen, K. I. og Ramstad, T. Ø. (2014) *Trehus*. 10. utg. Oslo: SINTEF akademisk forlag.
- Engen, A. U. (2019a) *Luftgjennomgang i vindspærreskjøten - Innledende rapport*. Prosjektoppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Engen, A.U. (2019b) *Luft- og regntetting av bygninger – Erfaringsinnhenting*. (TightEN-rapport, sommerstudent). Trondheim: SINTEF Community.
- Fufa, S. M. et al. (2018) Durability evaluation of adhesive tapes for building applications, *Construction and Building Materials*, 161, s. 528-538. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.056.
- Geving, S. og Holme, J. (2012) Mean and diurnal indoor air humidity loads in residential buildings, *Journal of Building Physics*, 35(4), s. 392-421. doi: 10.1177/1744259111423084.
- Geving, S. (2016) *WUFI*. Tilgjengelig fra: [www.wufi.no](http://www.wufi.no) (Hentet: 05.12.2019).
- Gullbrekken, L. et al. (2019) Durability of traditional clamped joints in the vapour barrier layer: experimental and numerical analysis 1, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(11), s. 996-1000. doi: 10.1139/cjce-2018-0593.
- Gyproc (2013) *Gyproc - Monteringshåndbok*. Tilgjengelig fra: <http://ehaandbok.gyproc.no/Gyproc/gyprocno/GyprocMonteringsshndbok/?page=52/> (Hentet: 30.11.2019).
- Hunton (2018) *Monteringsanvisning - Hunton Vindtett*. Tilgjengelig fra: [https://www.hunton.no/wp-content/uploads/2018/04/hunton-vindtett\\_monteringsanvisning\\_web-1.pdf](https://www.hunton.no/wp-content/uploads/2018/04/hunton-vindtett_monteringsanvisning_web-1.pdf) (Hentet: 30.11.2019).

- Icopal (2019) *Icopal Windbreak - Monteringsanvisning*. Tilgjengelig fra: <http://www.icopal.no/~media/IcopalNO/3/brosjyre/vindsperrerdampsperr/windbreak.pdf> (Hentet: 30.11.2019).
- Isola (2019) *Isola vindsperrer*. Tilgjengelig fra: <https://media.bluestonepim.com/571075b9-1b51-47ff-b416-bc99a7eef69d/0f053018-2c5d-4185-b03d-89e3d350b9eb/sZ4LZZbUgxSFaq4IvmdBsOdoG/eq0jWFogctZzk0dZyWgN6VfcO.pdf> (Hentet: 30.11.2019).
- Kalamees, T., Alev, Ü. og Pärnalaas, M. (2017) Air leakage levels in timber frame building envelope joints, *Building and Environment*, 116, s. 121-129. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.02.011.
- Kosiński, P., Wójcik, R. og Semen, B. (2019) Experimental study on the deterioration of thermal insulation performance due to wind washing of the cavity insulation in leaky walls, *Science and Technology for the Built Environment*, 25(9), s. 1164-1177. doi: 10.1080/23744731.2019.1634420.
- Standard Norge (2020) *SN-NSPEK 3031:2020 - Bygningers energiytelse-Beregning av energibehov og energiforsyning*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1124340> (Hentet: 08.04.2020).
- Norgips (2019) *Montasjehåndbok*. Tilgjengelig fra: <https://norgips.no/assets/planningpdfs/Montasjeha%CC%8Andbok-oktober-2019.pdf> (Hentet: 30.11.2019).
- Norvik, Ø. (2018) *Fuktvariasjoners innflytelse på lufttettheten til klemte skjøter i dampsperran – og effekten av teip*. Masteroppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Norvik, Ø., Geving, S. og Gullbrekken, L. (2019) The Effect of Repeated Moisture Cycles on the Air Tightness of Traditional Clamped Vapour Barrier Joints, *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 24(1), s. 44-51. doi: 10.5755/j01.sace.24.1.22159.
- Rüther, P. (2019) *Tape fra Trondheim til Værnes*. Tilgjengelig fra: <https://blogg.sintef.no/sintefbuilding-nb/tape-fra-trondheim-til-vaernes/> (Hentet: 04.03.2020).
- Sagen, V. (2003) *Vindsperrers lufttetthet avhengig av fuktighet og festemåte av klemløstene - Eksperimentelle undersøkelser*. Prosjektoppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Selmer, J. B. (2013) *Festemidlers innflytelse på lufttetthet av klemte skjøter i vind- og dampsperrsjikt*. Masteroppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- SIGA (2019) *SIGA Majvest - monteringsanvisning*. Tilgjengelig fra: [https://www.siga.swiss/\\_Resources/Persistent/f3fc382da9a6eb8c83f0e3fff1ca2020cc6127f3/Montering-av-vindsperr\\_no.pdf](https://www.siga.swiss/_Resources/Persistent/f3fc382da9a6eb8c83f0e3fff1ca2020cc6127f3/Montering-av-vindsperr_no.pdf) (Hentet: 30.11.2019).
- SINTEF (2003) *573.121 Materialer til luft- og dampetting*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/598/materialer\\_til\\_luft\\_og\\_dampetting](https://www.byggforsk.no/dokument/598/materialer_til_luft_og_dampetting) (Hentet: 02.03.2020).

- SINTEF (2007) *523.255 Bindingsverk av tre. Varmeisolering og tetting*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/361/bindingsverk\\_av\\_tre\\_varmeisolering\\_og\\_tetting#i42](https://www.byggforsk.no/dokument/361/bindingsverk_av_tre_varmeisolering_og_tetting#i42) (Hentet: 02.03.2020).
- SINTEF (2007) *523.255 Bindingsverk av tre. Varmeisolering og tetting*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/361/bindingsverk\\_av\\_tre\\_varmeisolering\\_og\\_tetting#i42](https://www.byggforsk.no/dokument/361/bindingsverk_av_tre_varmeisolering_og_tetting#i42) (Hentet: 03.03.2020).
- SINTEF (2008) *523.002 Yttervegger over terreng. Egenskaper og konstruksjonsprinsipper. Krav og anbefalinger*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/348/yttervegger\\_over\\_terreng\\_egenskaper\\_og\\_konstruksjonsprinsipper\\_krav\\_og\\_anbefalinger](https://www.byggforsk.no/dokument/348/yttervegger_over_terreng_egenskaper_og_konstruksjonsprinsipper_krav_og_anbefalinger) (Hentet: 03.03.2020).
- SINTEF (2013a) *Totrinnstetning mot slagregn på fasader. Luftede kledninger og fuger*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/470/totrinnstetning\\_mot\\_slagregn\\_paa\\_fasader\\_luftede\\_kledninger\\_og\\_fuger](https://www.byggforsk.no/dokument/470/totrinnstetning_mot_slagregn_paa_fasader_luftede_kledninger_og_fuger) (Hentet: 02.03.2020).
- SINTEF (2013b) *Lufttetting av bygninger. Framgangsmåte for å oppnå lavt lekkasjetall*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/4110/lufttetting\\_av\\_bygninger\\_framgangsmate\\_for\\_aa\\_oppnaa\\_lavt\\_lekkasjetall](https://www.byggforsk.no/dokument/4110/lufttetting_av_bygninger_framgangsmate_for_aa_oppnaa_lavt_lekkasjetall) (Hentet: 16.03.2020).
- SINTEF (2014) *Bindingsverk av tre i småhus. Dimensjonering og utførelse*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/358/bindingsverk\\_av\\_tre\\_i\\_smaahus\\_dimensjonering\\_og\\_utfoerelse](https://www.byggforsk.no/dokument/358/bindingsverk_av_tre_i_smaahus_dimensjonering_og_utfoerelse) (Hentet: 02.03.2020).
- SINTEF (2019) *TightEN*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/prosjekter/tighten/> (Hentet: 04.03.2020).
- Standard Norge (2012) *NS-EN ISO 13788 Bygningskomponenters og bygningsdelers hygrotermiske egenskaper - Innvendig overflatetemperatur for å unngå kritisk overflatefuktighet og kondensasjon i mellomrom - Beregningsmetoder*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=626361> (Hentet: 01.04.2020).
- Thue, J. V. (2016) *Bygningsfysikk: grunnlag*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Tronstad, S. (2006) *Tre og fuktighet - fra produsent til forbruker*. 3. utg. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.





Del 2

Fuktteknisk analyse av  
trebjelkelagets kantbjelke



# Innhold

1	Innledning .....	1
2	Teori .....	3
2.1	Etasjeskiller av trebjelkelag .....	3
2.2	Fuktteori .....	6
2.3	Skader i trebjelkelagets kantbjelke .....	8
2.4	Muggvekst.....	10
2.5	Simuleringsprogrammer .....	12
3	Metode .....	15
3.1	Oppbygning av modellen .....	15
3.2	Oppsett av simuleringene .....	17
3.3	Simuleringenes resultater.....	17
3.4	Metode i VTT-programmet .....	17
3.5	Valg av monitorpunkt .....	19
4	Parameterstudien.....	23
4.1	Referansesituasjonen.....	24
4.2	Klima.....	27
4.3	Innvendig fuktpåkjening.....	30
4.4	Vindsperre.....	33
4.5	Lufttett sjikt i himling .....	36
4.6	Smart dampspærre i himlingen .....	39
4.7	Trefiberisolasjon.....	43
4.8	Undergulv .....	46
4.9	Materiale i kantbjelken .....	49
4.10	Byggfukt .....	52
4.11	Bjelkelagshøyde .....	55
4.12	Veggtykkelse .....	58
4.13	Luftlekkasjer.....	61
4.14	Tidspunkt for simuleringsstart.....	66
4.15	Oppsummering av parameterstudien .....	69
5	Tiltaksanalyse.....	73
5.1	Situasjoner i tiltaksanalysen .....	73
5.2	Tiltak som undersøkes .....	74
5.3	Situasjon A.....	76
5.4	Situasjon B.....	79
5.5	Situasjon C.....	82

5.6	Situasjon D .....	85
6	Diskusjon.....	91
6.1	Generelle betraktninger .....	91
6.2	Parameterstudien .....	93
6.3	Tiltaksanalysen .....	97
6.4	Resultatenes anvendbarhet .....	100
6.5	Usikkerhet og feilkilder .....	101
7	Videre arbeid.....	103
8	Konklusjon .....	105
9	Referanser .....	107
	Vedlegg.....	A
	Vedlegg 1: Liste over materialer benyttet i WUFI-2D.....	A
	Vedlegg 2: Temperatur, relativ fuktighet og fuktinnhold fra simuleringene .....	B

# 1 Innledning

Trebjelkelag er den vanligste metoden å benytte for å bygge etasjeskillere i norske småhus. Et trebjelkelag kan utføres på flere ulike måter, men felles for dem alle er at trebjelkelaget trenger et opplegg på konstruksjonens yttervegg. Samtale med Stig Geving og Lars Gullbrekken 5. mai 2020 har avdekket at det i overgangen mellom ytterveggen og trebjelkelaget er problemer knyttet til muggvekst i kantbjelken. SINTEF Community har hatt flere skadesaker som angår nettopp denne detaljen. Dette gjelder i konstruksjoner der hvor det ikke er lagt en kontinuerlig dampspærre forbi etasjeskilleren. Årsaken til kantbjelkens skadepotensiale er måten denne detaljen vanligvis bygges opp på. I dette tilfellet er det muligheter for vanndamp fra inneluften å diffundere utover i konstruksjonen. Denne vanndampen vil kunne kondensere når den møter en høyere vanndampmotstand i form av kantbjelken. Overgangen mellom trebjelkelag og yttervegg er også en utsatt konstruksjonsdetalj med tanke på luftlekkasjer, noe som gjør kantbjelken enda mer utsatt. Til tross for at denne måten å bygge på er svært vanlig i Norge, har det ikke vært utført noen nærmere undersøkelser på skader i kantbjelken tidligere.

I denne masteroppgaven gjennomføres det en nærmere undersøkelse av kantbjelken. Risikoen for muggvekst i kantbjelken, og hvordan denne påvirkes ved endring av ulike parametere, vil bli nærmere undersøkt. Parameterne er en kombinasjon av valg som kan gjøres i selve oppbygningen av konstruksjonsdetaljen og ytre påkjenninger. I tillegg til dette vil det gjennomføres en tiltaksanalyse. Hensikten med denne analysen er å finne ut om det kan gjøres tiltak i konstruksjonen i overgangen mellom trebjelkelaget og ytterveggen som kan redusere risikoen for muggvekst i kantbjelken. Tiltakene som undersøkes i denne oppgaven er å legge inn et vertikalt sperresjikt mellom kantisolasjonen og bjelkelagsisolasjonen, samt å flytte kantbjelken lengre inn i konstruksjonen. Undersøkelsene vil gjennomføres ved bruk av simuleringsprogrammer. Programmet WUFI-2D benyttes til å simulere hvilke fuktforhold som vil oppstå i kantbjelken ved endring av de ulike parameterne og når tiltakene benyttes. Videre benyttes tilleggsprogrammet til WUFI-2D, WUFI Mould Index VTT, til å analysere kantbjelkens risiko for muggvekst.

Økt kunnskap om hvilke parametere som påvirker kantbjelkens risiko for muggvekst kan være svært nyttig. Dette vil kunne bidra til en økt forståelse for hvilke valg som burde tas for å forhindre at skader i kantbjelken oppstår. Det vil også hjelpe til med å forstå i hvilke tilfeller det er størst sannsynlighet for at det har oppstått skader, dersom eldre konstruksjoner skal vurderes. I tillegg er det oppklarende med en generell undersøkelse av hvor skadeutsatt kantbjelken faktisk er. En studie av mulige tiltak vil være nyttig da det kan bidra til økt forståelse om hvilke tiltak som kan utføres i byggefasen for å hindre at slike skader vil oppstå. Denne oppgaven undersøker kun konstruksjoner der hvor det er benyttet en diskontinuerlig dampspærre som ikke går forbi etasjeskilleren. Resultatene gjelder kun for kantbjelker som er plassert mellom oppvarmede rom. I tillegg vil kun resultatene gjelde for den oppbygningen av overgangen mellom trebjelkelag og yttervegg som er undersøkt i denne oppgaven.

I oppgavens første del vil det bli presentert teori tilknyttet oppgavens tema. Videre vil en nøye gjennomgang av modellen som benyttes i simuleringsprogrammene bli gjennomgått. I den følgende parameterstudien er hver enkelt parameter behandlet hver for seg slik at

de kan analyseres uavhengig av hverandre. I tiltaksanalysen vil de to ulike tiltakene for å begrense kantbjelkens skadepotensiale bli testet på fire ulike situasjoner. Situasjonene er basert på resultatene som er funnet i parameterstudien. Til slutt vil det være en drøfting av resultatene.

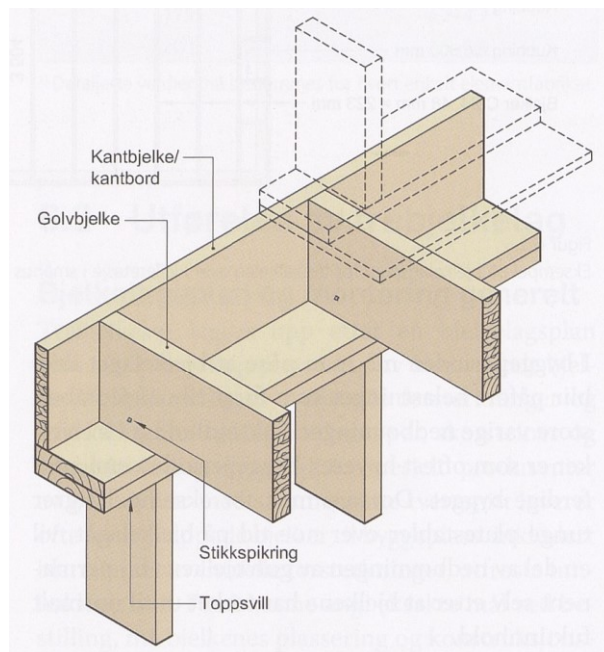
Oppsummert skal følgende problemstillinger besvares i denne oppgaven:

- Hvordan blir kantbjelkens risiko for muggvekst påvirket ved endring av ulike parametere?
- Kan et vertikalt sperresjikt bidra til å redusere risikoen for muggvekst i trebjelkelagets kantbjelke?
- Kan det å flytte trebjelkelagets kantbjelke lengre inn i konstruksjonen redusere risikoen for muggvekst i kantbjelken?

## 2 Teori

### 2.1 Etasjeskiller av trebjelkelag

Den vanligste formen for etasjeskillere som benyttes i småhus er trebjelkelag (Edwardsen og Ramstad, 2010). Trebjelkene som benyttes i en slik konstruksjon kan for eksempel være konstruksjonsvirke, limtrebjelker, I-bjelker eller ulike typer fagverksbjelker. Selve bjelkelaget av tre skal sørge for at etasjeskilleren har tilstrekkelig kapasitet til å bære etasjen over. Trebjelkelag er fleksible, da det enkelt kan tilpasses ulike typer planløsninger og gjennomføringer mellom etasjene. Trebjelkenes opplegg gjøres på toppsvillen til ytterveggen i etasjen under. Til bruk i vanlig småhus ansees en oppleggslengde på 70 mm som tilstrekkelig i de fleste tilfeller (SINTEF, 2011). I enden av trebjelkene benyttes det en kantbjelke. Denne skal sørge for at trebjelkelaget ikke velter og at bjelkene holder seg på plass. En illustrasjon av trebjelkelagets opplegg på en yttervegg er vist i Figur 1.



**Figur 1: Trebjelkelagets opplegg over yttervegg (Edwardsen og Ramstad, 2010)**

I tillegg til å sørge for tilstrekkelig evne for bæring skal også etasjeskilleren tilfredsstillende nødvendige krav til brannmotstand, lydisolering og varmeisolering. Varmeisoleringen avhenger av om etasjeskilleren grenser mot kaldt loft/uteklime eller innvendig rom. Mot kaldt loft regnes etasjeskilleren som tak og skal derfor ha en U-verdi på maksimum 0,13 W/m<sup>2</sup>K. Mot åpen fundamentering regnes etasjeskilleren som gulv og skal ha en U-verdi på maksimum 0,10 W/m<sup>2</sup>K. Disse kravene kan fravikes ved å benytte omfordelingsmetoden, da har etasjeskilleren et minimumskrav på 0,18 W/m<sup>2</sup>K.

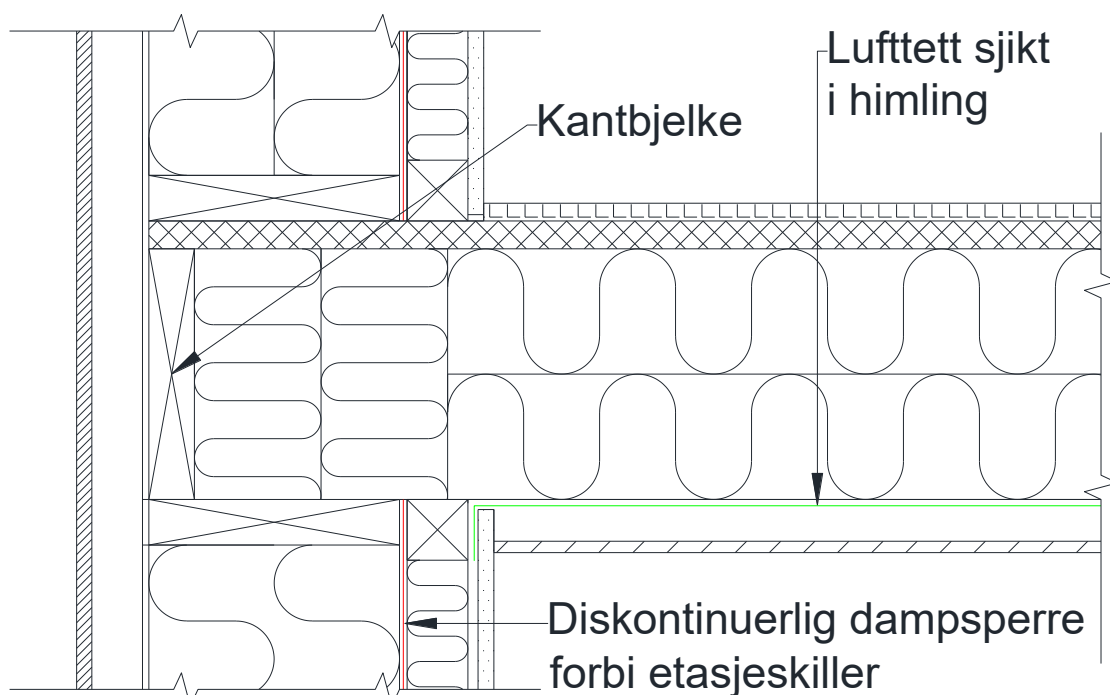
For å oppnå det nødvendige kravet til varmeisolering fylles rommet mellom bjelkene med isolasjon. Vanligvis benyttes mineralullisolasjon, men det kan også benyttes trefiberisolasjon eller ulike former for blåseisolasjon. Eventuelt kan det som alternativ benyttes en reflekterende folie. I underkant av isolasjonen på undersiden av etasjeskilleren

legges det et lufttett sjikt etterfulgt av himlingen. Det er ønskelig at trebjelkelaget er lufttett på undersiden og oversiden av hensyn til luft som kan trenge både inn og ut av bygningskroppen, samt luftlekkasjer mellom rom. I tillegg er lufttetthet i bjelkelaget viktig med tanke på lydisolering og inneklima (SINTEF, 2008). Lufttett sjikt på undersiden av trebjelkelaget hindrer også at støv og partikler fra isolasjonen faller ned i rommet under. Lufttettheten sørges for ved gode tettetdetaljer, slik som ved bruk av klemte skjøter og teip. Dette er spesielt viktig her da det ofte er et innvendig overtrykk mot etasjeskilleren fra undersiden, grunnet skorsteinseffekten. På oversiden av etasjeskilleren legges det et undergulv. Undergulvet sørger for lufttettheten på oversiden og skal ta imot punktlaster fra etasjen over og fordele denne nedover i trebjelkene. På toppen av undergulvet legges ytterligere gulvmaterialer. Ifølge SINTEF (2011) er undergulvet som regel sponplater, kryssfinérplater eller OSB-plater. I noen tilfeller er det også vanlig å benytte samme materiale på kantbjelken som på undergulvet.

Dersom etasjeskilleren grenser mot kaldt loft eller uteklime, er det viktig at det lufttette sjiktet som monteres på undersiden er en dampsperre. På denne typen etasjeskillere vil det kunne oppstå en risiko for kondens dersom fukt fra inneluften trenger inn i etasjeskilleren. Som lufttett sjikt i tilfellene hvor etasjeskilleren grenser mot oppvarmet rom benyttes ofte vindsperre eller en annen form for lufttett folie. Det er svært viktig at dette sjiktet er dampåpent. Mer om dette i Kap. 2.3.

Det er også viktig at overgangen mellom yttervegg og etasjeskiller utføres slik at den er så lufttett som mulig. I denne detaljen er det kort vei mellom inne- og uteklime, og eventuelle lekkasjer her vil kunne føre til infiltrasjon av uteluften. Trebjelkelagets opplegg på ytterveggen kan gjøres på flere måter. Den tradisjonelle metoden kan sees i Figur 2. Figuren viser et snitt mellom to bjelker i etasjeskilleren.

Ved den tradisjonelle oppbygningen av detaljen har trebjelkelaget et opplegg over hele toppsvillen til ytterveggen den hviler på. Dette betyr også at kantbjelken legges helt ute mot vindsperran. En ulempe ved å benytte denne metoden er at det ikke er mulig å føre en kontinuerlig dampsperre forbi etasjeskilleren. Ifølge Bankvall (2013) er denne detaljen

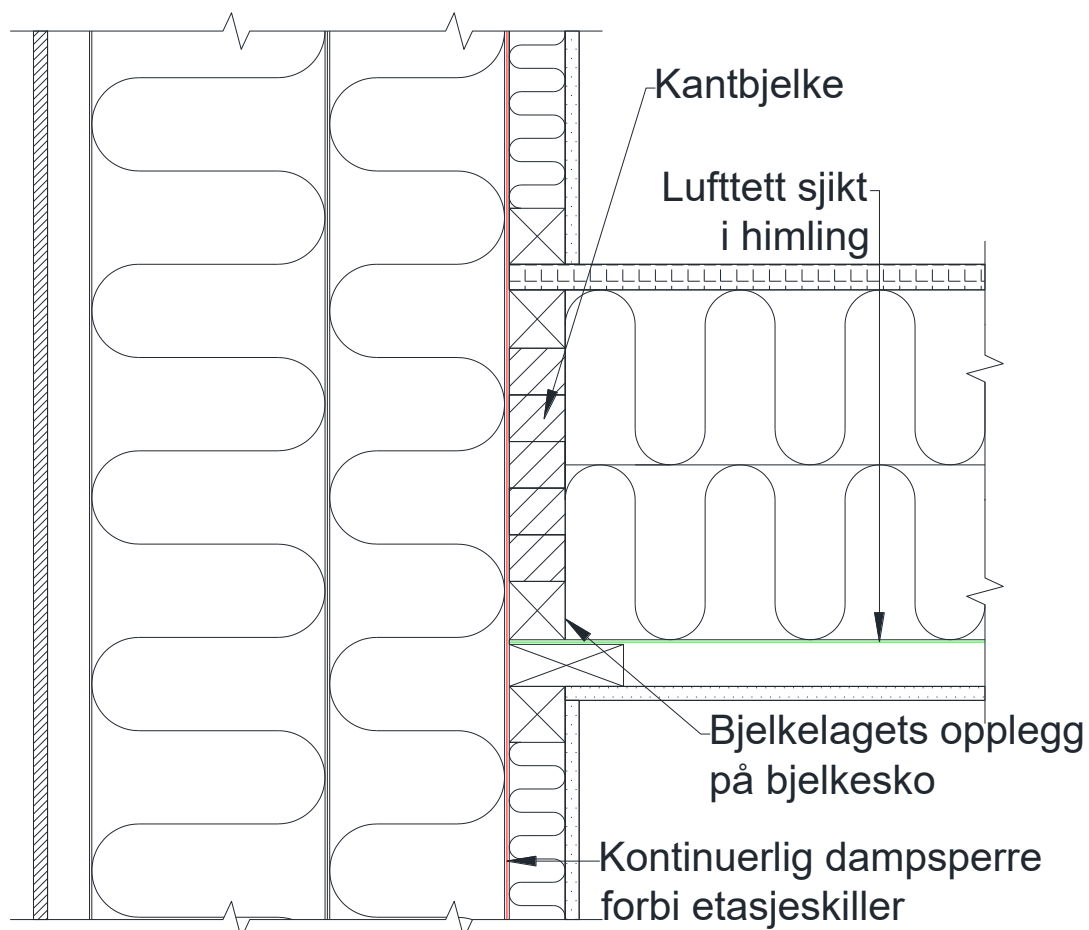


**Figur 2: Tradisjonell oppbygning av overgang mellom trebjelkelag og yttervegg**



derfor en av de mest krevende å få tilstrekkelig lufttett, da lufttettheten må sørges for ved å tette igjen enden på dampsperran. Dette kan ofte være krevende, spesielt opp imot trebjelkene. I denne detaljen oppstår det ofte trykkforskjeller mellom de to etasjene, samt mellom inneluften og uteluften. Dette gjør at det lett kan oppstå luftstrømmer. Dette fører til mindre god energieffektivitet og et forverret inneklima i form av kalde gulv i den øverste etasjen. Dette er en detalj som er vanskelig å utbedre, grunnet kombinasjonen av nødvendig oppleggslengde samt at dampsperran ikke kan ligge for langt ute mot kald side i konstruksjonen.

En annen løsning for tilslutningen mellom trebjelkelag og yttervegg er vist i Figur 3. Her er trebjelkelagets opplegg utført ved bruk av bjelkesko. Siden det da ikke er nødvendig med opplegg som går innover i veggkonstruksjonen muliggjør dette å føre en kontinuerlig dampsperre forbi etasjeskilleren. Ved bruk av denne løsningen er det også enklere å sørge for at konstruksjonens lufttetthet opprettholdes. En annen fordel med denne løsningen er at etasjeskillerens kuldebroverdi reduseres (SINTEF, 2012).



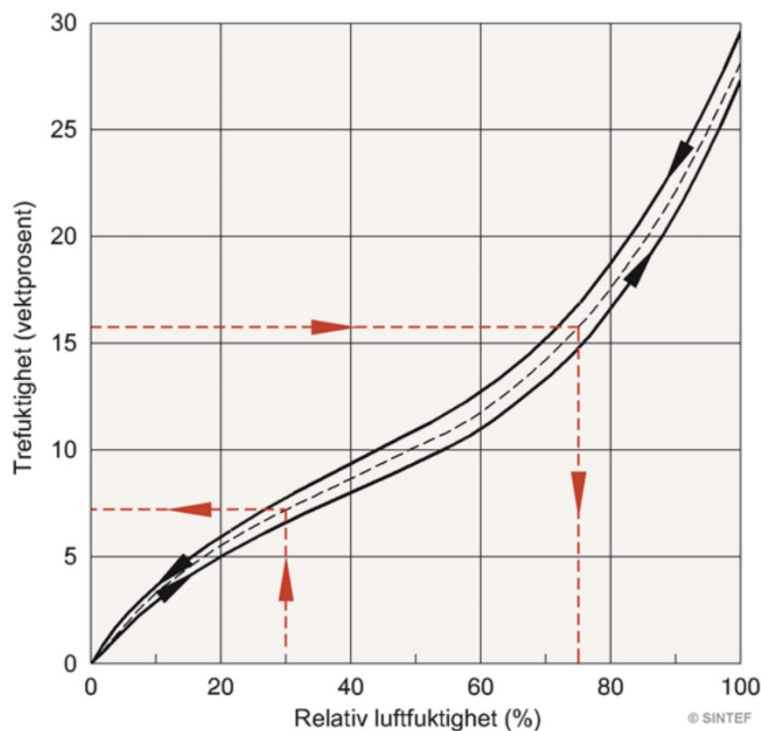
**Figur 3: Overgang mellom trebjelkelag og yttervegg med kontinuerlig dampsperre forbi etasjeskilleren**

## 2.2 Fuktteori

### 2.2.1 Generell fuktteori

I alle materialer hvor materialstrukturen består av et poresystem, vil det forekomme en fuktutveksling med omgivelsene. Dette kan skje enten i damp- eller væskeform (Geving og Thue, 2002). Det er et viktig skille mellom vann som er kjemisk bundet til materialet og vann som er fysikalsk bundet. Dersom vannet er kjemisk bundet til materialet er bindingene svært sterke, og dette vannet blir derfor ansett som en del av materialet. Vann som er kjemisk bundet, er vanligvis ikke ansett som en del av materialets fuktinnhold. Fysikalsk bundet vann er det vannet som ansees som vanninnholdet i materialet. Her opptrer bindinger i form av osmotiske bindinger (dersom det er salter til stede), adsorptive bindinger eller kapillærkondensasjon. Vannet som er fysikalsk bundet, er vann som kan fordampe og de adsorptive bindingene er relativt svake i forhold til de kjemiske bindingene. Materialer hvor vann kan bli bundet i poresystemet kalles for hygroskopiske materialer. Det totale vanninnholdet i et materiale er i hovedsak avhengig av oppbygningen til porestrukturen (type materiale) og tidligere fukthistorikk. Fuktinnholdet i et materiale uttrykkes enten som den relative fukten til luften i porene eller det absolutte fuktinnholdet i  $\text{kg/m}^3$ . For treverk oppgis fuktinnholdet hovedsakelig som antall vektprosent fuktighet sammenlignet med vekten av det tørkede treverket (SINTEF, 2018a).

Hygroskopiske materialer vil til enhver tid justere seg etter fuktigheten i den omkringliggende luften. Det vil si at fuktinnholdet i et materiale vil stille seg inn på en gitt verdi ved en gitt relativ fuktighet. Dette fuktinnholdet kalles likevektsfuktigheten. Hvordan likevektsfuktigheten til et materiale varierer med den relative fuktigheten i omkringliggende luft kan illustreres med sorpsjonskurver. En sorpsjonskurve for furu er vist i Figur 4.



**Figur 4: Sorpsjonskurve for furu (SINTEF, 2018a)**

Endringer i luftens relative fuktighet oppstår på grunn av fukttransport. Fukttransport kan skje på flere måter, både mens vannet er i væskeform og i dampform (SINTEF, 2018a). Når vannet er i dampform skjer fukttransport hovedsakelig som vanndampdiffusjon og fuktkonveksjon. Ved vanndampdiffusjon vil vanndampmolekylene fordele seg jevnt ved at de beveger seg fra høyt til lavt damptrykk. Ved fuktkonveksjon transporteres vanndampen sammen med en luftstrøm som strømmer fra høyt lufttrykk til lavere lufttrykk. Fuktkonveksjon kan i noen tilfeller føre med seg større mengder vanndamp enn den som transporteres ved vanndampdiffusjon (Geving og Thue, 2002). Ifølge Thue (2016) er det som regel fukttransport ved fuktkonveksjon som er årsak til fuktskader. Når fukttransporten skjer i væskeform er dette på grunn av kapillærsuging i materialets porer, vanntrykk, tyngdekraft eller vindtrykk (SINTEF, 2018a).

Dersom overganger i konstruksjonen er tilstrekkelig lufttett, vil fukttransport i materialene kun skje ved vanndampdiffusjon. Hastigheten til vanndampdiffusjonen gjennom et materiale avhenger av materialets vanndamppermeabilitet (Geving og Thue, 2002). Et materiale sin vanndamppermeabilitet kan uttrykkes på flere måter. Det vanligste er å uttrykke permeabiliteten gjennom ekvivalent luftlagstykkelse. Denne størrelsen angir hvor tykt et stillestående lag med luft må være for å ha samme permeabilitet som materialet. Denne verdien er kalt  $s_d$ -verdi, og har meter som enhet. Denne verdien beregnes ved å multiplisere materialets diffusjonsmotstandsfaktor,  $\mu$ , med materialets tykkelse. Diffusjonsmotstandsfaktoren til et materiale er definert som forholdet mellom vanndamppermeabiliteten til luft dividert med materialets vanndamppermeabilitet.

### 2.2.2 Fukt i bygninger

Bygninger vil oppleve ulike fuktpåkjenninger gjennom hele bygningens levetid. Det er viktig å ha kontroll på fuktkildene slik at det kan gjøres nødvendige tiltak for å hindre potensielle skader. Ifølge SINTEF (2018a) er 75 % av alle byggskader direkte eller indirekte forårsaket av fukt. Hovedkildene til fukt i bygninger er følgende:

- Nedbør
- Fuktighet i inne- og uteluften
- Byggfukt
- Fukt i grunnen
- Lekkasje fra overflatevann
- Bruksvann fra våtrom
- Lekkasjevann fra VVS-installasjoner

Disse fuktkildene kan føre til skader på konstruksjonen, dersom det ikke blir gjort nødvendige tiltak. Slike skader kan for eksempel være muggvekst, råte, frostskafer, volumendringer og korrosjon.

For å unngå at disse fuktkildene fører til skader på konstruksjonen, må den prosjekteres slik at den kan håndtere de fuktpåkjenningene som måtte oppstå (Geving og Thue, 2002). Konstruksjonen må beskyttes mot nedbør ved at det bygges slik at slagregn ikke kan trenge inn over i konstruksjonen. Dersom dette allikevel skulle skje, er det viktig at konstruksjonen har tilstrekkelig evne til å tørke ut. Dette gjelder også for å tørke ut byggfukten i materialene, som også burde holdes på et så lavt nivå som mulig. I tillegg er det viktig at fuktpåkjenningen fra inneluften begrenses ved å benytte dampspærre på innvendig side av konstruksjonen, samt sørge for god ventilasjon som kan fjerne den fuktige inneluften. I de områdene av konstruksjonen som skal tåle fuktpåkjenninger (slik som i våtrom), er det viktig at det benyttes materialer som tåler den nødvendige fuktpåkjenningen. Det er også viktig å sørge for at konstruksjonen ikke får tilført fukt fra

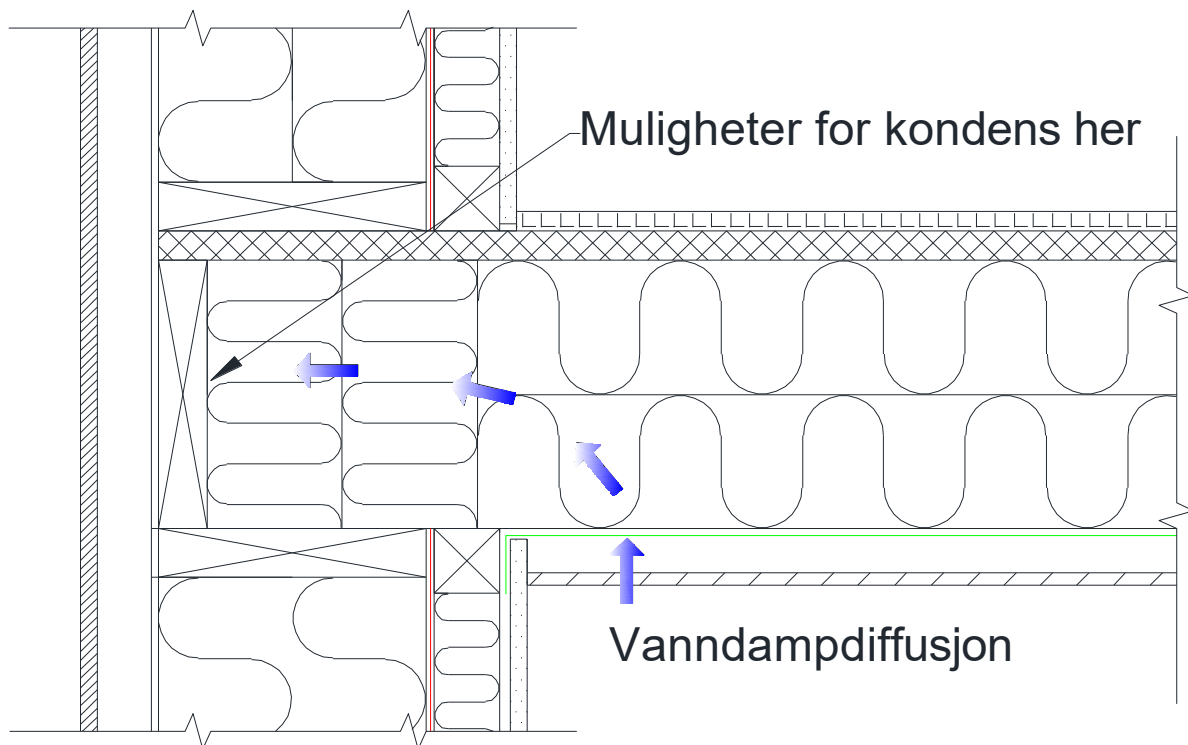
grunnen. Dette kan hindres ved å sørge for at overflatevann blir ledet vekk fra konstruksjonen, samt sørge for effektiv drenering.

## 2.3 Skader i trebjelkelagets kantbjelke

Som nevnt er det ønskelig at det lufttette sjiktet som benyttes i himlingen skal være dampåpent. Årsaken til dette er at dersom det skulle oppstå fuktighet i etasjeskilleren, så skal denne ha muligheten til å tørke ut. Fukt i etasjeskilleren kan være forårsaket av byggfukt i trebjelkelaget eller eventuelle lekkasjer fra VVS-installasjoner. Ofte er gulvkonstruksjonen som benyttes i overetasjen damptett. Her benyttes undergulv i tillegg til en kombinasjon av ulike platematerialer (som for eksempel trinnlydsplater eller andre gulvplater). På toppen settes det gjerne et damptett gulvbelegg. Gulvkonstruksjonen gir derfor ingen uttørkingsmuligheter til potensiell fuktighet, derfor må denne skje nedover gjennom himlingen. Dersom det benyttes en dampspærre i himlingen, vil fuktigheten sperres inne mellom to damptette sjikt. Uttørring er spesielt viktig med tanke på byggfukten i trebjelkelaget, som må tørkes ut. Bruk av dampåpent sjikt i himling er kun nødvendig til bruk mellom oppvarmede rom. I andre tilfeller der hvor etasjeskilleren grenser mot uteklimaet eller kaldt loft skal sjiktet være damptett. Dersom sjiktet ikke er damptett i dette tilfellet vil vanndamp kunne diffundere oppover i konstruksjonen og kondensere.

Ved bruk av dampåpent sjikt i himlingen er det muligheter for at vanndamp fra den fuktige inneluften kan diffundere oppover i trebjelkelaget. Mellom oppvarmede rom er dette ikke noe problematisk da temperaturene som regel ikke er lave nok her til å tillate kondens. Men i ytterkanten av trebjelkelaget, mot ytterveggen, er det kort vei fra dampåpent sjikt til veggkonstruksjonen med lavere temperaturer. I samtale med veiledere er det avdekket at det i denne detaljen har vært erfaringer med skader på grunn av muggvekst. SINTEF Community har hatt flere skadesaker som angår denne detaljen.

I overgangen mellom trebjelkelaget og ytterveggen er det muligheter for at vanndamp fra inneluften kan diffundere utover i ytterveggen. Lengre ut i ytterveggen synker temperaturen og når vanndampen møter kaldere temperaturer, er det muligheter for at vanndampen kan kondensere. Fukten møter videre motstand i form av kantbjelken, og det er i denne det ligger et stort skadepotensial. Kantbjelken utføres vanligvis i en form for trevirke eller av et trebasert materiale, og har derfor gode betingelser for biologisk aktivitet. Det er derfor ønskelig å forhindre at det oppstår gunstige forhold for muggvekst i kantbjelken. En illustrasjon av problemstillingen er vist i Figur 5.



**Figur 5: Vanndampdiffusjon i overgangen mellom trebjelkelag og yttervegg**

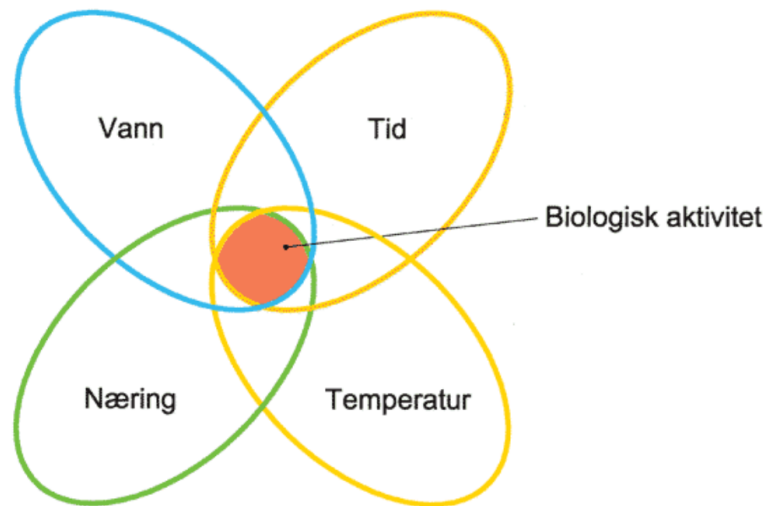
Problemstillingen rundt kondens og mulig muggvekst på kantbjelken vil gjelde for alle tilfeller der hvor det ikke er ført en kontinuerlig dampspærre forbi etasjeskilleren. Bruk av en diskontinuerlig dampspærre er svært vanlig. En av grunnene til dette er som nevnt avveiningen mellom nødvendig oppleggslengde og det å ikke ha dampspærren for langt ut i konstruksjonen. Det er vanskelig å sørge for et godt opplegg av kantbjelken og samtidig montere en korrekt plassert dampspærre, dersom dampspærren skal gå forbi etasjeskilleren. Derfor er det enkleste å plassere dampspærren i to omganger. Dette gjør at vanndamp vil diffundere utover i bjelkelaget der det ikke er noen dampspærre. Som nevnt er også denne detaljen krevende å utføre lufttett. Dersom det er luftlekkasjer til stede i overgangen vil dette kunne føre til konvektiv fukttransport av den fuktige inneluften ut mot kantbjelken, noe som kan føre til enda større problemer da kantbjelken blir mer fuktig.

Overgangen mellom trebjelkelaget og ytterveggen kan gjøres på flere ulike måter og med forskjellige egenskaper for materialene som benyttes. Blant parameterne som kan påvirke fuktigheten i kantbjelken og potensialet for muggvekst er:

- Klima
- Innvendig fuktpåkjenning
- Damptettheten til vindspærren
- Damptettheten til det lufttette sjiktet i himlingen
- Type isolasjon
- Damptettheten til undergulvet
- Hvilken type kantbjelke som er benyttet
- Byggfukt i materialene
- Høyden til bjelkelaget
- Veggtykkelse
- Eventuelle luftlekkasjer

## 2.4 Muggvekst

Muggvekst på bygningsdeler kan være et problem på grunn av flere årsaker. I tillegg til at det kan være et estetisk problem dersom det oppstår på synlige overflater, kan muggvekst være en trussel for inneklimate. Dette gjelder spesielt dersom området med muggvekst er i direkte kontakt med inneluften. Dette er fordi muggveksten produserer sopp sporer som kan transporteres gjennom luften (Mycoteam, 2020). For at det skal kunne oppstå muggvekst på bygningsmaterialer må forholdene ligge til rette for at biologisk aktivitet kan forekomme. En illustrasjon av dette er vist i Figur 6.



**Figur 6: Forutsetninger for biologisk aktivitet (SINTEF, 2005)**

Det finnes forskjellige typer arter av muggsopper, men alle er avhengige av de samme forutsetningene for å kunne vokse. Generelt benyttes en relativ fuktighet på 80-85 % som grense for tilstrekkelig fuktighet. Jo høyere fuktnivået er, jo mer gunstig er muggsoppens vekstbetingelser. For vanlig trevirke tilsvarer dette ca. 20 vekt-% (SINTEF, 2005). Det samme gjelder for temperatur, da høye temperaturer gir gode vekstbetingelser. Den biologiske aktiviteten kan finne sted for temperaturer i intervallet mellom 5 °C og 50 °C. Muggveksten har best betingelser for vekst i temperaturområdet 25-30 °C. Den generelle tommelfingerregelen som benyttes når det gjelder muggvekst er at biologisk aktivitet kan finne sted dersom temperaturen er høyere enn 5 °C og den relative fuktigheten er høyere enn 80% (Geving og Thue, 2002).

I tillegg er det nødvendig at bygningsdelene blir utsatt for slike forhold i tilstrekkelig tid, da muggvekst trenger tid for å utvikle seg. Næring finnes allerede i de organiske materialene muggveksten ofte forekommer på. Muggvekst kan også forekomme på uorganiske materialer, dersom næring er til stede. Næring kan i disse tilfellene være støv, bindemidler eller mykgjørere (SINTEF, 2005).

På grunn av flere ulike faktorer som spiller inn, i tillegg til ulike vekstbetingelser for ulike materialer, kan det være en vanskelig oppgave å forutsi hvor mye muggvekst som kan forventes på ulike overflater. På bakgrunn av dette er det utviklet flere ulike beregningsmodeller som kan benyttes til å analysere hvor utsatt en konstruksjon vil være for muggvekst. En slik modell er den finske VTT-modellen (Hukka og Viitanen, 1999).

VTT-modellen er en matematisk modell for å simulere graden av muggvekst på materialoverflater. Ojanen et al. (2011) videreutviklet modellen slik at den også kunne

benyttes på andre materialer enn de med overflater av tre. VTT-modellen er basert på tidligere regresjonsmodeller for muggvekst og kvantifiserer mugg ved hjelp av «Mould Growth Index», heretter kalt muggindeks. Muggindeksen er basert på visuelle tegn på overflater som kan oppdages enten ved hjelp av mikroskop eller det blotte øye. Indeksen er på en skala fra 0-6, hvor 0 er minst mugg og 6 er mest mugg. En oversikt over indeksene er vist i Tabell 1.

**Tabell 1: Oversikt over indeksene i VTT-modellen (Huuka og Viitanen, 1999)**

Indeks	Beskrivelse
0	Ingen muggvekst
1	Små mengder med muggvekst på overflaten, kan sees med mikroskop, initiell stadie av lokal vekst
2	Flere lokale muggvekst-kolonier, synlig med mikroskop
3	Visuelt funn av mugg på overflaten, < 10 % dekning, eller 50 % dekning av muggvekst på overflaten synlig med mikroskop
4	Visuelt funn av mugg på overflater, 10 - 50 % dekning, eller > 50 % dekning av muggvekst på overflaten synlig med mikroskop
5	Større mengder synlig mugg på overflaten, > 50 % dekning
6	Kraftig og tett muggvekst, omtrent 100 % dekning.

Ifølge Ojanen et al. (2011) er kritisk muggindeks avhengig av hvor på bygningskroppen muggveksten befinner seg. I den finske standarden er det slik at dersom overflaten er i direkte kontakt med inn klimaet, skal muggindeksen alltid være mindre enn 1. Dette betyr at det på disse overflatene ikke skal oppstå noe muggvekst, ikke en gang på mikroskopisk nivå. Lengre ut i konstruksjonen er ikke kravene like strenge. Her er den generelle anbefalingen her at den maksimale muggindeksen er 3. Dette er fordi det må forventes at det oppstår noe muggvekst på utvendige overflater (Ojanen et al., 2007).

Modellen er bygget opp av differensialligninger som beskriver vekstraten for muggveksten basert på ulike parametere. Endringen i muggindeks per tidsenhet kan beskrives med følgende formel:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 * \exp(-0,68 * \ln(T) - 13,9 * \ln(RF) + 0,14 * W - 0,33 * SQ + 66,02)} * k_1 * k_2$$

I tillegg til denne formelen er det flere ligninger for å regne ut korreksjonsfaktorene  $k_1$  og  $k_2$ , som avhenger av materialet.  $W$  og  $SQ$  er avhengig av typen treverk (furu eller gran) og overflatekvaliteten (saget overflate eller ovnstørket kvalitet). Faktorene settes til 0 eller 1. I tillegg benyttes følgende formel for å avgjøre grensen for når den relative fuktigheten er slik at muggvekst kan oppstå:

$$RF_{kritisk} = \begin{cases} -0,00267 * T^3 + 0,160 * T^2 - 3,13 * T + 100, & \text{når } T \leq 20 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 80 \%, & \text{når } T \geq 20 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases}$$

En svært viktig parameter i modellen er materialets sensitivitet for muggvekst. Ifølge Ojanen et al. (2011) er dette den parameteren som er mest krevende å velge når muggvekst skal analyseres. Ulike materialer har ulik motstand mot muggvekst. Organiske materialer som treverk (spesielt yteved) er særlig sensitive mot muggvekst. Basert på eksperimentelle undersøkelser utviklet Ojanen et al. (2011) et tillegg til modellen som inneholdt sensitivitetsklasser. Ved å benytte disse klassene vil det gis verdier for korreksjonsfaktorene,  $k_1$  og  $k_2$ , til bruk i modellen. Sensitivitetsklassene er vist i Tabell 2.

**Tabell 2: Oversikt over sensitivitetsklasser (Ojanen et al., 2011)**

<b>Sensitivitetsklasse</b>	<b>Materialer</b>
Veldig sensitiv	Ubehandlet treverk, inneholder mye næring til biologisk aktivitet
Sensitiv	Høvlet treverk, trebaserte plater, produkter belagt med papp
Middels motstandsdyktig	Betong og plastikkbaserte materialer
Motstandsdyktig	Glass og metallprodukter, materialer med effektiv beskyttelsesbehandling

VTT-modellen tar også høyde for at muggindeksen reduseres når forholdene (temperatur og relativ fuktighet) ikke ligger til rette for muggvekst. Modellen er lagt opp slik at dersom forholdene ikke ligger til rette for biologisk aktivitet i lengre perioder, så vil muggindeksen synke lineært. Denne modellen for synkende muggindeks er basert på observasjoner i laboratoriet, men inneholder allikevel noe usikkerhet (Hukka og Viitanen, 1999). Mengden reduksjon avhenger sterkt av materialet, og effekten av rask skiftende relativ fuktighet og periodelengder har ikke blitt undersøkt nøye nok. På bakgrunn av usikkerheten anbefales det at en lav faktor for reduksjon benyttes i modellen.

## 2.5 Simuleringsprogrammer

### 2.5.1 WUFI-2D

I denne oppgaven benyttes WUFI-2D til å utføre simuleringer. WUFI-2D er et simuleringsprogram som gir mulighet for beregning av varme- og fukttransport i todimensjonale bygningskomponenter (Geving, 2016). Programmet benytter en rekke transportmekanismer for varme-, væske- og vanndamptransport for å beregne hygrottermiske forhold i konstruksjoner. Ifølge Thue, Oustad og Gustavsen (2007) er det følgende transportmekanismer som er inkludert i programvaren:

- Varmetransport
  - Varmeledning
  - Entalpiendringer ved faseoverganger i fukt
  - Kortbølget stråling
  - Langbølget stråling
- Vanndamptransport
  - Vanndampdiffusjon
  - Løsningsdiffusjon
- Væsketransport
  - Kapillærledning
  - Overflatekrypning

Programmet baserer seg på at brukeren selv bygger opp bygningsdetaljens geometri og velger hvilke materialer som skal inngå i modellen. For å kunne gjennomføre simuleringer må følgende materialdata være oppgitt for materialet:

- Romdensitet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- Porøsitet [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]



- Spesifikk varmekapasitet for tørt materiale [J/kg]
- Varmekonduktivitet for tørt materiale [W/mK]
- Vanndampdiffusjonsmotstand for tørt materiale ( $\mu$ ) [-]

I tillegg til dette kan materialene ilegges fuktavhengige parametere, slik at verdiene endrer seg med materialets fuktinnhold. Materialene kan enten velges fra WUFI-2D sin database eller de kan lages av brukeren.

Videre settes det inn overflater i modellen. Her velges både inne- og uteklimaet. For utvendige overflater velges det en klimafil. Denne filen inneholder data for ulike klimaparametere slik som temperatur, relativ fuktighet, mengde regn, strålingsmengder med mer. WUFI-2D inneholder klimadata for ti ulike lokasjoner i Norge. I tillegg til klimafilen velges også orientering av overflaten, helning, overgangsmotstander, overflatens overgangskoeffisienter og mengden slagregn som inkluderes i beregningen. For det innvendige klimaet velges det fuktpåkjønning, temperatur og overgangskoeffisienter. Valget her kan baseres på flere ulike metoder basert på ulike standarder.

### 2.5.2 WUFI Mould Index VTT

WUFI Mould Index VTT, heretter kalt VTT-programmet, er et tilleggsprogram til WUFI-2D. Dette programmet lar brukeren vurdere konstruksjoners risiko for muggvekst. Programmet er basert på modellen som ble utviklet av Huuka og Viitanen (1999) og videreutviklet av Ojanen et al. (2011), som er beskrevet i Kap. 2.4. I dette programmet lastes det inn data fra resultatene i WUFI-2D. Sammen med parametervalg som gjøres av brukeren, gir programmet en grafisk representasjon (ved visning av muggindeks) av konstruksjonens risiko for muggvekst. I programmet finnes det en database med materialer som kan velges. Ved å velge materialer fra denne databasen blir parameterne bestemt ut ifra disse. Det er også mulig for brukeren og bestemme parameterne selv. Parameterne som velges er:

- Sensitivitetsklasse
- Materialklasse
- Type overflate
- Type treverk

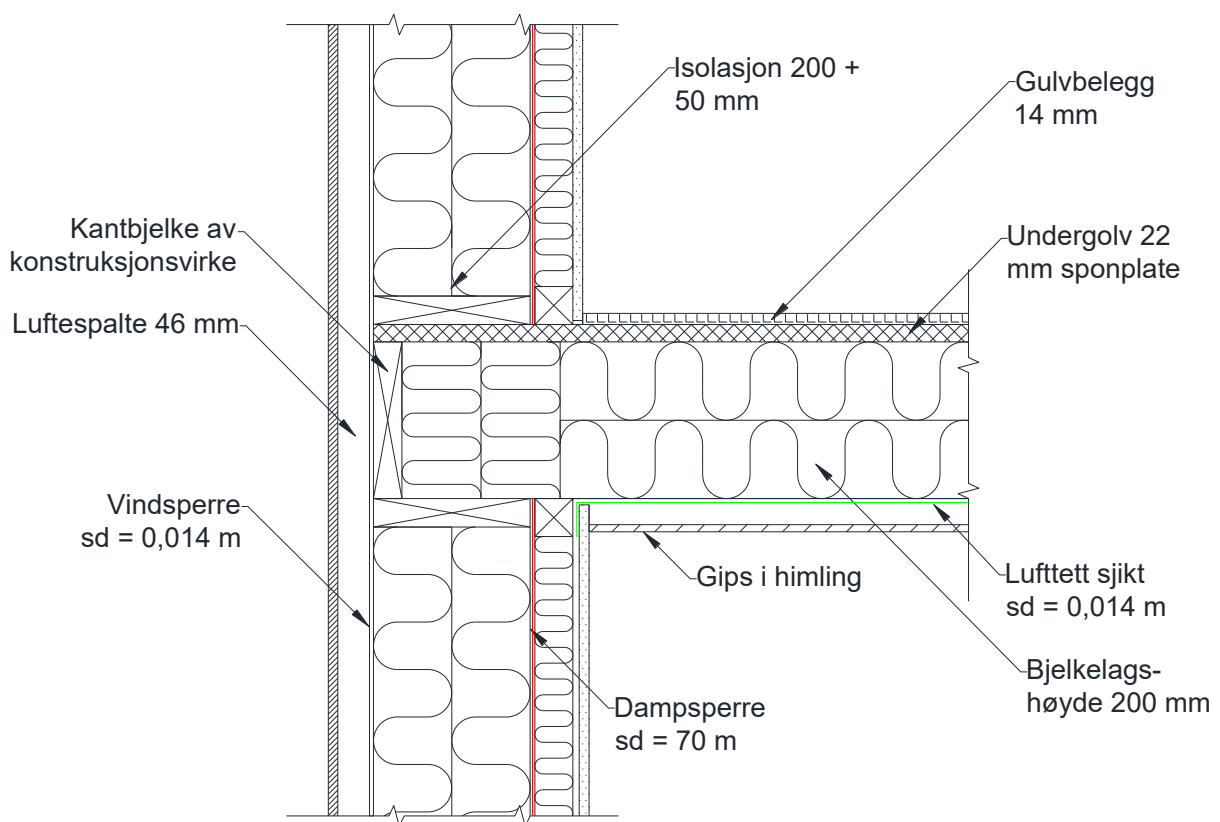
De ulike parameterne i VTT-programmet er nærmere beskrevet i Kap. 3.4.



## 3 Metode

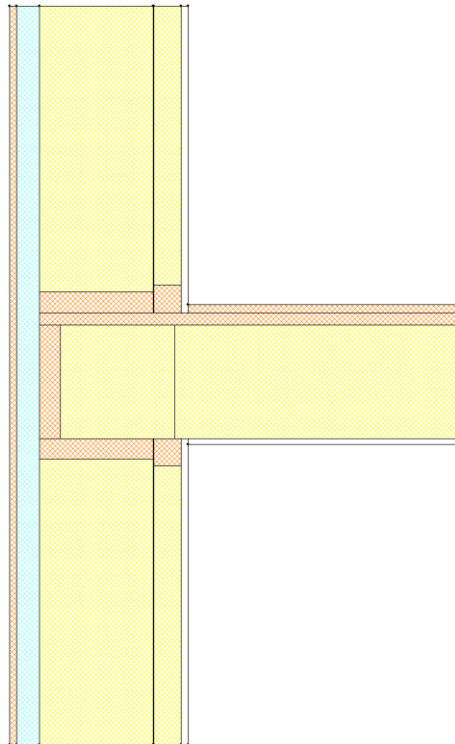
### 3.1 Oppbygning av modellen

Parameterstudien og tiltaksanalysen gjennomføres ved å utføre simuleringer i WUFI-2D. Her bygges det opp en modell som simuleringene skal utføres på. Modellen i WUFI-2D er bygget opp etter et trebjelkelag som er utført på den tradisjonelle metoden med diskontinuerlig dampsperre slik det er beskrevet i Kap. 2.1. Detaljen som modellen i WUFI-2D er bygget opp etter kan sees i Figur 7. Dette er den samme oppbygningen av overgangen mellom yttervegg og trebjelkelag som anbefales av SINTEF (2008).



**Figur 7: Modell av overgang mellom yttervegg og trebjelkelag benyttes i WUFI-2D**

Modellen i WUFI-2D er bygget opp så lik som mulig som detaljen i Figur 7, men med en forenkling. I taket på underetasjen er det ikke modellert noe luft mellom det lufttette sjiktet i himlingen og himlingsplatene. Gipsen i himling er dermed lagt inntil det lufttette sjiktet. Hvordan modellen er bygget opp i WUFI-2D kan sees i Figur 8.



**Figur 8: Geometrien til modellen som er bygget opp i WUFI-2D**

I løpet av de ulike simuleringene er det flere parametere som skal endres. Allikevel er det enkelte parametere som er fast i alle simuleringene. En oversikt over disse og deres verdier kan finnes i Tabell 3. En oversikt over materialene som er benyttet i WUFI-modellen kan finnes i Vedlegg 1.

**Tabell 3: Faste parametere i simuleringene.**

Parameter	Verdi
Orientering av vegg	180° (nordvendt)
Helning på vegg	90°
Varmeovergangstall – utvendig vegg	17 W/m <sup>2</sup> K
Varmeovergangstall – innvendig tak	8 W/m <sup>2</sup> K
Varmeovergangstall – innvendig tak	10 W/m <sup>2</sup> K
Varmeovergangstall – innvendig vegg	6 W/m <sup>2</sup> K
s <sub>d</sub> -verdi for maling – innvendig vegg	0,2 m
Absorptivitet for kortbølget stråling	0,8 (mørk kledning)
Emissivitet for langbølget stråling	0,9
Andel regn som setter seg på overflaten	0 %
Initiell fuktighet i materialene (relativ fuktighet)	80 %
Initiell temperatur i materialene	20 °C
Innvendig temperatur	20 °C
Luftskifte i luftespalten	50 h <sup>-1</sup>

Simuleringene gjennomføres med timesverdier og startdatoen for simuleringene er satt til 1. oktober 2019 (alle bortsett fra én simulering). Det simuleres for tre år, noe som gjør det mulig å se på hvordan konstruksjonen fungerer etter at byggfukten er tørket ut. Tre år gir også muligheten til å se om de samme fuktmonstrene opptrer over tid eller om konstruksjonen tørker/fuktes opp gjennom årene.

## 3.2 Oppsett av simuleringene

I denne oppgaven er det ønskelig å undersøke hvilken effekt endring av ulike parametere i oppbygningen av trebjelkelaget har for fukttilstanden i kantbjelken, samt undersøke ulike tiltak. Som det er nevnt i Kap. 2.3, er det ønskelig å forhindre at forholdene ligger til rette for biologisk aktivitet i kantbjelken. Dette vil gjøres ved å endre på de ulike parameterne i hver simulering og dermed undersøke hvilke endringer som oppstår i simuleringens resultater.

I hver simulering hvor en parameter er endret vil denne bli sammenlignet med en referansesituasjon. På denne måten er det mulig å undersøke effekten av hver enkel parameter isolert sett. Videre utføres det en tiltaksanalyse på fire ulike situasjoner. Situasjonene er basert på resultatene fra parameteranalysen. På disse situasjonene vil effekten av tiltakene bli testet. Parameterstudien og tiltaksanalysen er nærmere beskrevet i Kap. 4 og 5.

## 3.3 Simuleringenes resultater

For å kunne undersøke risikoen for muggvekst i de ulike simuleringene er det flere resultater som hentes ut. Først og fremst er dette temperatur og relativ fuktighet. Som nevnt i Kap. 2.4, er tommelfingerregelen at det er risiko for biologisk aktivitet dersom temperaturen er over 5 °C og at samtidig den relative fuktigheten er over 80 %.

Derfor hentes resultat-kurver for temperatur og relativ fuktighet ut ifra WUFI-2D. Disse eksporteres videre til Excel for ytterligere behandling. Her er det mulighet for å finne ut av hvor mange timer med  $T > 5$  °C og  $RF > 80$  %. I tillegg er det også ønskelig å vite hvor mange timer der  $T > 5$  °C og  $RF > 90$  % og hvor mange timer hvor  $T > 5$  °C og  $RF > 95$  %. Dersom det er mange timer med  $RF$  større enn 90 % og 95 % vil det tyde på at det kan være større risiko for muggvekst i disse tilfellene. Disse timene er videre i oppgaven kalt «kritiske timer».

Antallet på slike kritiske timer vil ikke alene være nok til å vurdere risikoen for muggvekst. I tillegg til høy nok temperatur og relativ fuktighet er også tilstrekkelig eksponeringstid, samt typen materiale viktig for å kunne bedømme risikoen. Derfor benyttes VTT-programmet, som beskrevet i Kap. 2.5. For å benytte VTT-programmet eksporteres «Isopleth»-resultatene fra WUFI-2D, som viser sammenhengen mellom temperatur og relativ fuktighet i ett enkelt diagram. Denne filen kan åpnes i VTT-programmet. Fra VTT-programmet oppnås det verdier for muggindeksen som oppstår i materialet i løpet av perioden det er simulert for.

## 3.4 Metode i VTT-programmet

I VTT-programmet lastes «Isopleth»-filen inn, og deretter settes parametere for «Sensitivity Class», «Material Class», «Type of surface» og «Type of Wood». Det er observert at valgene som gjøres her gir store virkninger på resultatene som oppnås. På bakgrunn av dette er det valgt å ta ut resultater for muggvekstrisiko i to omganger. Det tas ut resultater for to ulike kombinasjoner av parametere. Parameterkombinasjonen er brukerdefinert, og benytter derfor ikke de forhåndsinnlagte materialene i VTT-programmet. De to ulike kombinasjonene som benyttes skal forestille et materiale som er svært sensitivt for muggvekst og et materiale som kun er sensitivt for muggvekst. Det er antatt at sensitivt materiale er det materialet som er mest likt vanlig konstruksjonsvirke, da parameterne som velges for dette er omtrent likt det som ligger inne for ubehandlet treverk i VTT-databasen. Parametere som er valgt for «Svært sensitiv» og «Sensitiv» er

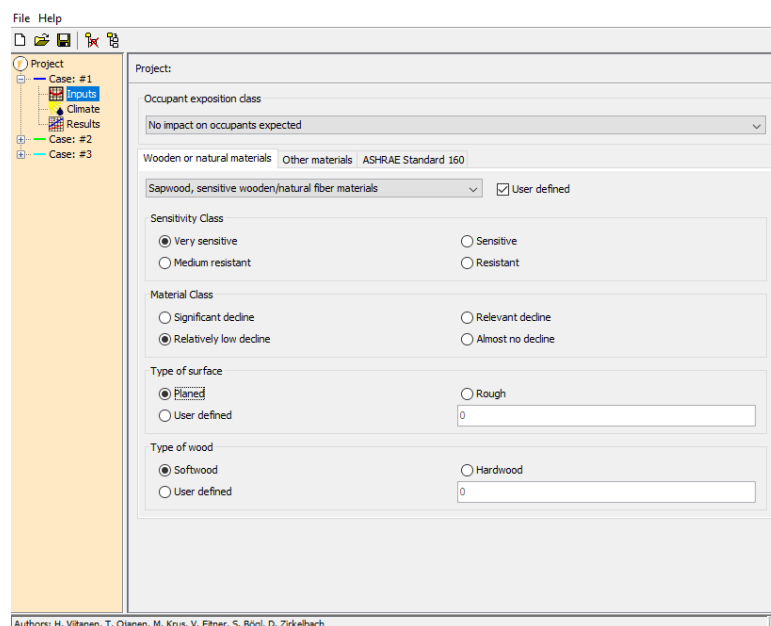
vist i henholdsvis Tabell 4 og Tabell 5. Et skjermbilde fra VTT-programmet er vist i Figur 9.

**Tabell 4: Parametervalg for materialet «Svært sensitivt»**

Parameter	Verdi
Sensitivity Class	Very sensitive
Material Class	Relatively low decline
Type of surface	Planed
Type of wood	Softwood

**Tabell 5: Parametervalg for materialet «Sensitivt»**

Parameter	Verdi
Sensitivity Class	Sensitive
Material Class	Relatively low decline
Type of surface	Planed
Type of wood	Hardwood



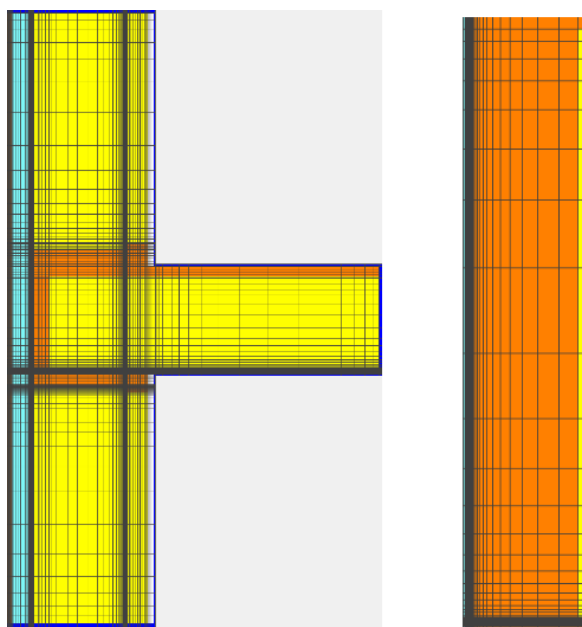
**Figur 9: Skjermtutklipp fra parametervalg i VTT-programmet**

Parameterne som settes i VTT-programmet synes å være annerledes enn de som finnes i VTT-modellen forklart i Kap. 2.4, til tross for at det er samme modell som benyttes. Som det er nevnt settes det i VTT-modellen verdier for parameterne  $W$  og  $SQ$ , hvor  $W = 0$  for furu,  $W = 1$  for gran,  $SQ = 0$  for saget overflate og  $SQ = 1$  for ovnstørket kvalitet på overflaten. Siden programmet er bygget opp etter VTT-modellen er det rimelig å anta at parametervalget for «Type of surface» tilsvarer valg av parameteren  $SQ$  og «Type of Wood» tilsvarer valg for parameteren  $W$ . Ønsket om å velge disse parameterne selv er grunnen til at det er valgt å ikke benytte materialene som allerede er lagt inn i VTT-databasen. Denne fremgangsmåten støttes av metoden som er valgt i masteroppgaven «Moisture Safety in Highly Insulated Wood-Frame Wall Constructions» (Nelson, 2017). Dette betyr at typen treverk som er valgt for det svært sensitive materialet tilsvarer furu (softwood i VTT-programmet) og treverk for det sensitive materialet er gran (hardwood i

VTT-programmet). Typen overflate som velges tilsvarer saget i begge tilfellene. Det velges også at eventuell muggvekst ikke har noen forventet innvirkning på inneklimate, da kantbjelken ikke er i kontakt med inneluften. Dette har ikke innvirkning på resultatene, men påvirker hvilke nivåer for muggvekst som ansees som akseptabelt. Når eventuell muggvekst er forventet å ikke ha noen påvirkning på inneklimate, er grensen mellom akseptabel og uakseptabel muggindeks satt til 3. Det er denne grensen som benyttes i vurderingen av resultatene i denne oppgaven. VTT-modellen tar også hensyn til at muggveksten reduseres i perioder med ugunstige betingelser. Hastigheten til denne nedgangen bestemmes av parameteren «Material Class». Det er ønskelig at denne effekten skal være lav slik at resultatene for muggvekst blir konservative. Denne reduksjonen innebærer som nevnt noe usikkerhet. Derfor er det valgt å benytte «Relatively low decline» for begge materialene.

### 3.5 Valg av monitorpunkt

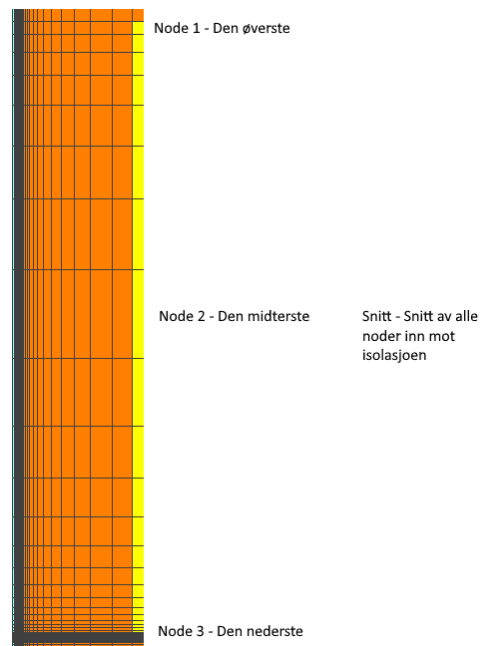
Når det utføres simuleringer i WUFI-2D, deles konstruksjonen opp i noder. Antallet noder som benyttes bestemmer hvor nøyaktig simuleringen blir. Resultatene fra simuleringen kan hentes ut av hver enkelt node, eller som et gjennomsnitt mellom flere noder. Som nevnt i Kap. 2.3 er det i et trebjelkelag kantbjelken som er interessant å undersøke med tanke på risiko for muggvekst. I modellen består kantbjelken av flere ulike noder. Det må derfor gjøres en vurdering på hvor i kantbjelken resultatene skal hentes ut ifra. Nodene i modellen og kantbjelken er vist i Figur 10.



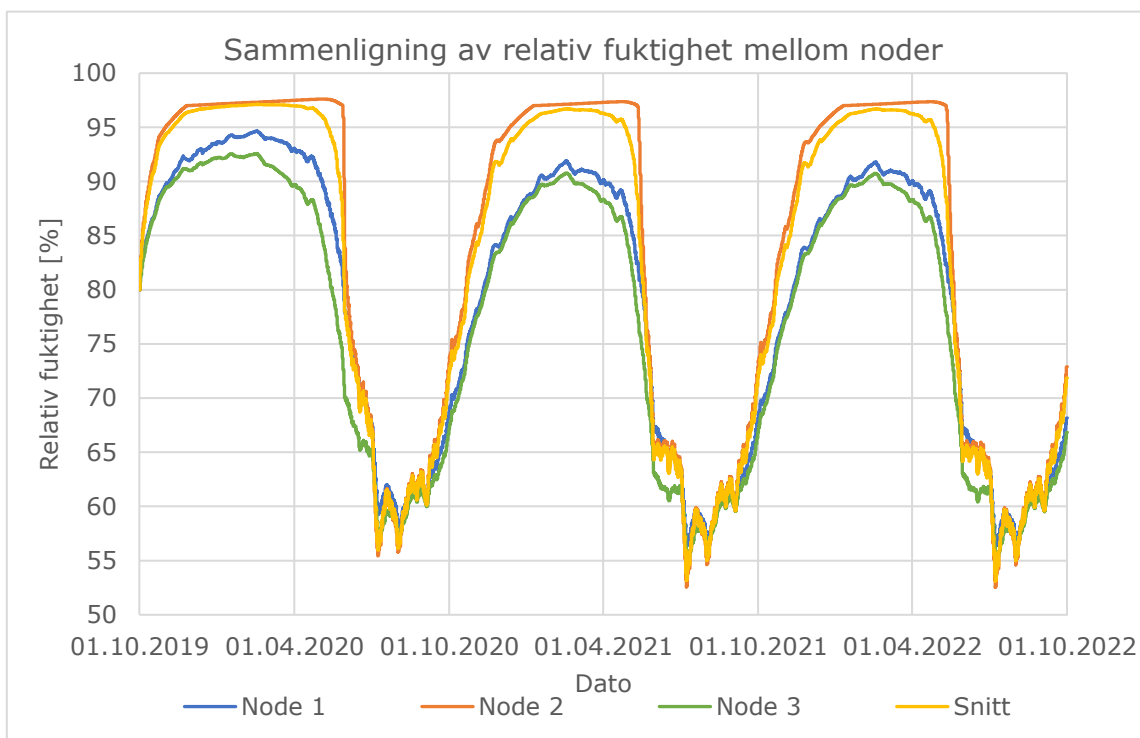
**Figur 10: Noder i modellen og i kantbjelken**

Det er mest interessant å undersøke nodene til kantbjelken inn mot isolasjonslaget. Innerst mot isolasjonen er det en hel rekke med noder som resultater kan hentes ut ifra. Derfor er det utført en simulering med den hensikt å hente ut verdier for relativ fuktighet og vekt-% fuktinnhold for tre ulike steder inn mot isolasjonslaget. I tillegg er det undersøkt snittet av alle nodene som ligger mot isolasjonen. Ved å undersøke disse kan det gjøres en beslutning om hvor i kantbjelken fuktnivåene er høyest, og dermed hvor det er størst risiko for muggvekst. Det antas at eventuelle temperaturforskjeller som eventuell finnes mellom de ulike nodene ikke er store nok til å ha en effekt på risikoen for muggvekst. Simuleringen som utføres benytter de samme parameterne som referansesituasjonen i

parameterstudien i Kap. 4.1. Det tilfellet hvor resultatene viser høyest relativ fuktighet og fuktinnhold vil være det stedet i kantbjelken som er mest kritisk. Derfor er det dette nodevalget som vil bli benyttet videre. Nodene som er undersøkt nærmere er vist i Figur 11. Resultatene av sammenligningen mellom nodene er vist i Figur 12 og Figur 13.

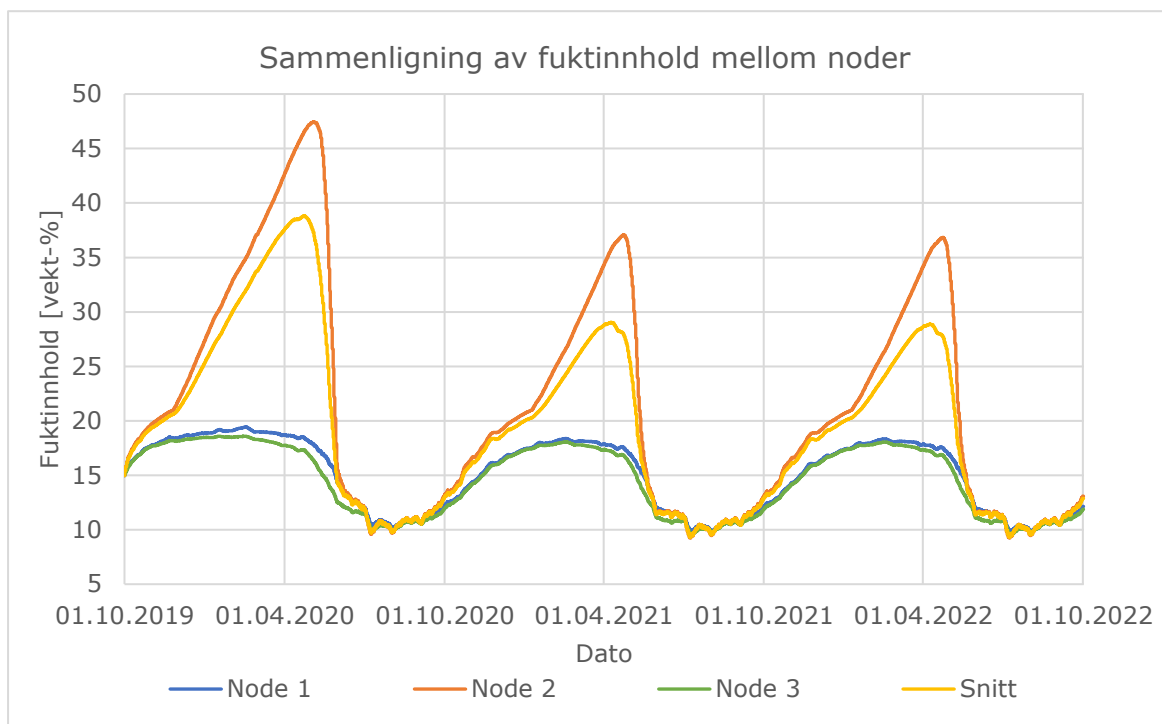


**Figur 11: Noder som er undersøkt**



**Figur 12: Kantbjelkens relative fuktighet ved de ulike nodene**

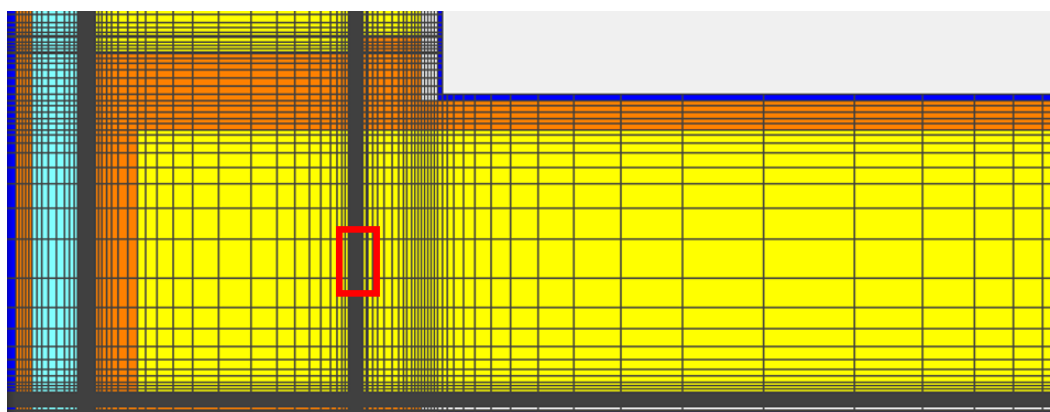




**Figur 13: Kantbjelkens fuktinnhold ved de ulike nodene**

Det kan sees fra Figur 12 og Figur 13 at det tydelig er noden midt på kantbjelken som opplever de største fuktpåkjenningene i løpet av perioden som simuleringene er utført. På bakgrunn av dette velges det videre å undersøke noden midt på bjelken i de videre simuleringene.

I tillegg til å undersøke fuktforholdene i kantbjelken er det også valgt å undersøke en node lengre inn i konstruksjonen, for å se hvordan fuktforholdene er her. Noden som er valgt for dette tilfellet er en node som ligger et godt stykke inn i kantisolasjonen, noen centimeter inn fra overgangen mellom kantisolasjonen og bjelkelagsisolasjonen. Nodens plassering er vist i Figur 14.



**Figur 14: Monitorpunkt lengre inn i konstruksjonen**



## 4 Parameterstudien

I denne delen av oppgaven vil parameterstudien som er utført bli presentert. For å holde all informasjon knyttet til samme parameter samlet på et sted i oppgaven, er mer enn kun simuleringens resultater presentert her. Hver del starter med en kort innføring i hvorfor den aktuelle parameteren er forventet å påvirke fuktforholdene i trebjelkelaget. For hver parameter vil det videre være en kort metodedel som forteller om valgene som er tatt for parameterne, samt hvordan parameterne er modellert i WUFI-2D. Etter at resultatene er presentert vil det også komme en kommentar til resultatene.

Resultatene som presenteres vil være data fra simuleringene som gjør det enkelt å sammenligne effekten av forandrede parametere. Det er valgt å presentere en oversikt over antall kritiske timer hvor temperatur og relativ fuktighet er over et gitt nivå. Det vises også hvor mange prosent endring dette er fra referansesituasjonen. I tillegg vil det vises en grafisk oversikt over den relative fuktigheten i kantbjelken. Muggindeksen som oppstår ved hvert tilfelle vises også, for de to ulike materialene presentert i Kap. 3.4, svært sensitivt materiale og sensitivt materiale. Til slutt kommer en oversikt over den relative fuktigheten lengre inn i konstruksjonen, ved overgangen mellom kantisolasjonen og bjelkelagsisolasjonen. Ved fremstilling av resultatene er data for de ulike parameterne samlet i samme diagram slik at det er muligheter for sammenligning. Kurver for relativ fuktighet og temperatur ved de ulike simuleringene, samt fuktinnholdet i kantbjelken i vekt-% er vist i Vedlegg 2.

I parameterstudien vil det gjennomføres simuleringer hvor følgende parametere blir variert:

- Klima
- Endring av innvendig fuktpåkjenning
- Endring av vindsperrens damptetthet
- Endring av damptetthet til lufttett sjikt i himling
- Bruk av smart dampsperre som lufttett sjikt i himling
- Bruk av trefiberisolasjon
- Endring av materiale som benyttes som undergulv
- Endring av materiale som benyttes som kantbjelke (kombinert med undergulv)
- Endring av mengden byggfukt i materialene
- Endring av høyden til bjelkelaget
- Endring av veggtykkelsen
- Innføring av luftlekkasjer i detaljen
- Når konstruksjonen lukkes (Endring av simuleringsstart)

En oppsummering av parameterstudiens resultater finnes i tabellformat kan finnes i Kap. 4.15.

## 4.1 Referansesituasjonen

Den første simuleringen utføres på en referansesituasjon. De videre simuleringene hvor parametere er justert vil bli sammenlignet med denne for å undersøke hvilke endrede fuktforhold som oppstår. Siden det er denne situasjonen som resultatene skal sammenlignes med i hvert tilfelle, er det viktig å ha god oversikt over denne simuleringens resultater. Parametere som er benyttet i referansesituasjonen er presentert i Tabell 6.

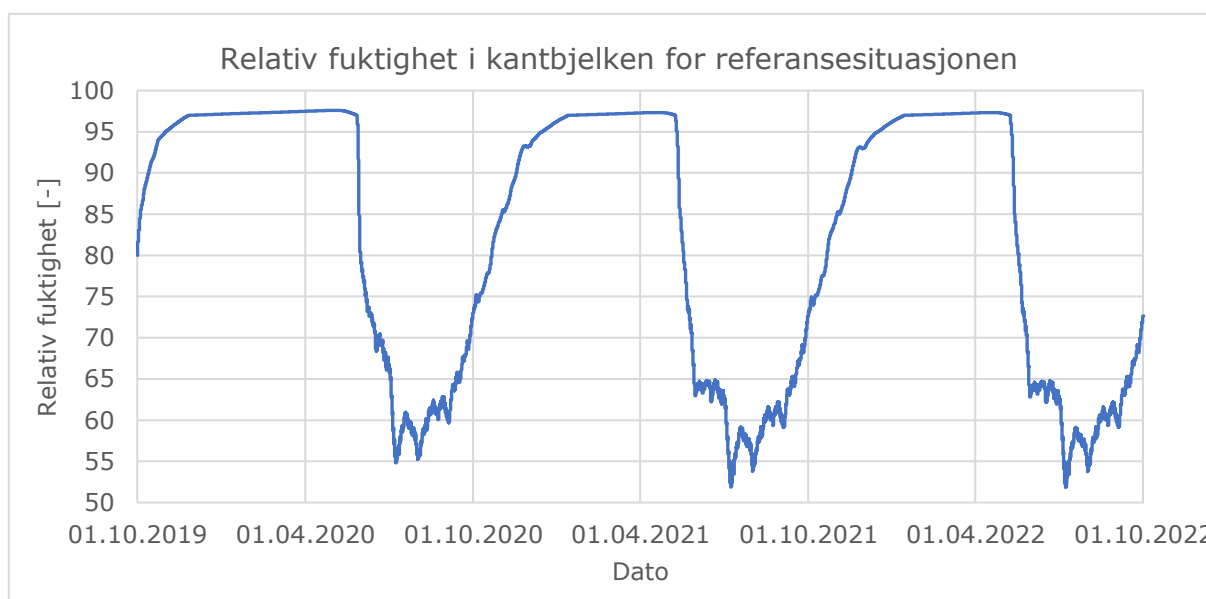
**Tabell 6: Parametere som benyttes i referansesituasjonen**

Parameter	Verdi
Klimasted	Oslo
Innvendig fuktpåkjenning	Middels
Vindsperrrens damp tetthet	$s_d = 0,014$ m
Damp tetthet til lufttett sjikt i himling	$s_d = 0,014$ m
Smart damp sperre i himling	Ikke benyttet
Trefiberisolasjon	Ikke benyttet
Materiale som undergulv	Sponplate, $s_d = 1,5$ m
Materiale som kantbjelke	Konstruksjonsvirke
Byggfukt	RF = 80 %
Bjelkelagshøyde	200 mm
Veggtykkelse	250 mm
Luftlekkasjer	Ingen
Simuleringsstart	1. oktober

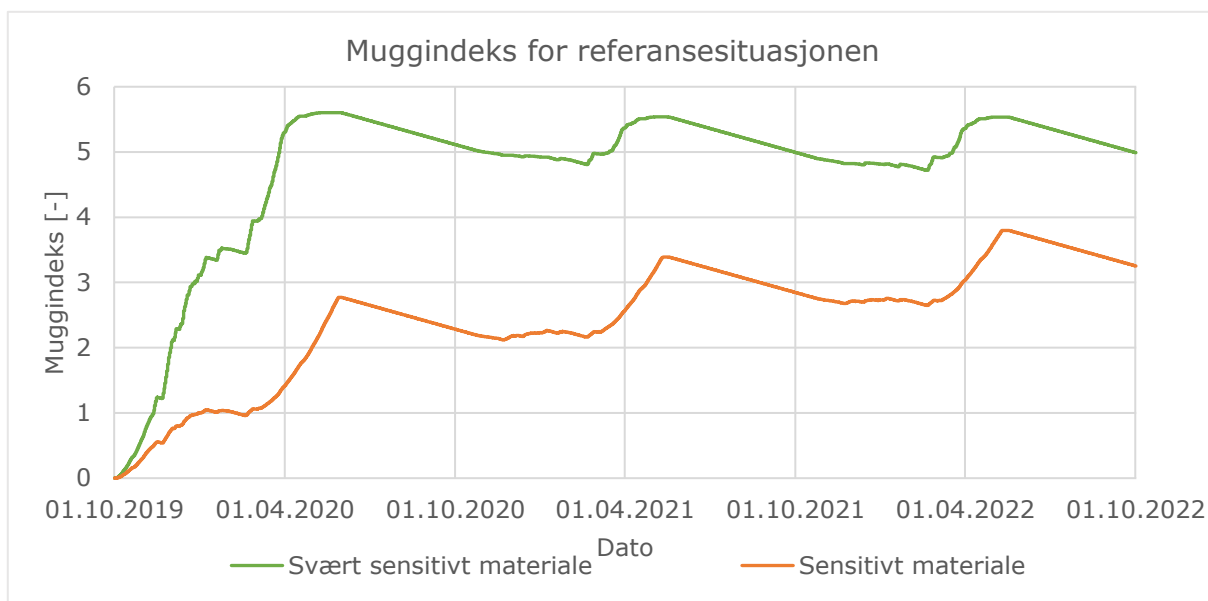
Referansesituasjonen - Resultater:

**Tabell 7: Antall kritiske timer for kantbjelken ved referansesituasjonen**

Kritiske timer hvor...	Antall timer i løpet av tre år
$T > 5$ °C og RF > 80 %	6954
$T > 5$ °C og RF > 90 %	5500
$T > 5$ °C og RF > 95 %	4554



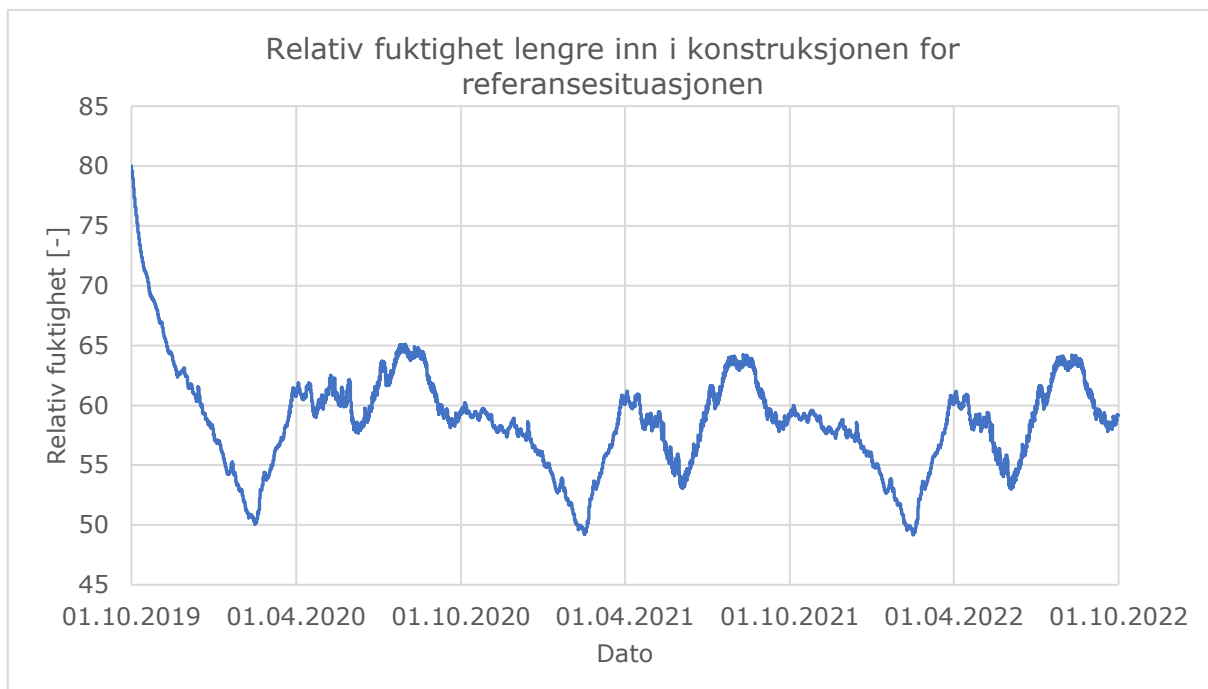
**Figur 15: Relativ fuktighet i kantbjelken for referansesituasjonen**



**Figur 16: Muggindeks for kantbjelken ved referansesituasjonen**

**Tabell 8: Høyeste verdier for muggindeks ved referansesituasjonen**

	Svært sensitivt materiale	Sensitivt materiale
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,6	2,77
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80



**Figur 17: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen for referansesituasjonen**

Fra referansesituasjonens resultater sees det at det oppstår et høyt antall timer i løpet av de tre årene som kan ansees som kritisk med tanke på muggvekst. I kantbjelken kan det observeres at den relative fuktigheten stiger raskt til verdier opp mot 97 % som holdes stabilt gjennom hele vinteren og et ut i våren. Videre nås et bunnpunkt på omtrent 55 % relativ fuktighet om sommeren.

Den høye relative fuktigheten har konsekvenser for kantbjelkens muggindeks. For det svært sensitive materiale nås en muggindeks på 5,5 allerede etter rundt 6 måneder, som er godt over det kritiske nivået. Denne holdes videre stabilt gjennom hele simuleringen. For det sensitive materialet oppnås en akseptabel muggvekst på under 3 det første året. Muggindeksens reduksjon i de ugunstige periodene om sommeren er ikke nok til at muggindeksen holdes stabil. Derfor vil denne oppleve en svak økning hvert år.

Lengre inn i konstruksjonen observeres det en relativ fuktighet som holder seg stabil mellom 50 % og 65 %.

## 4.2 Klima

Ved ulike klima vil fuktforholdene i trebjelkelaget kunne variere. Spesielt med tanke på muligheter for uttørking av konstruksjonen er soltilskudd og temperatur viktige faktorer. Dette avhenger sterkt av hvilken geografisk lokasjon som benyttes. Siden trebjelkelagets kantbjelke ligger så langt ut i konstruksjonen vil den følge svingninger som oppstår i klimaet utenfor. Siden det antas at potensialet for muggvekst er til stede ved  $T > 5 \text{ °C}$  og  $RF > 80 \text{ %}$  vil klimaet kunne ha stor innvirkning for når muggvekst opptrer.

Klimaet endres i WUFI-2D ved å endre for hvilken geografisk lokasjon simuleringen finner sted. WUFI-2D inneholder klimafilere for 10 ulike lokasjoner i Norge. Fra disse er det valgt å benytte Oslo som referanse, mens det varieres med bruk av Bergen og Karasjok. Utvendig klima er også endret for innvendige overflater, da den innvendige fuktpåkjenningen er gitt som funksjon av utetemperaturen. En oversikt over relevante klimadata fra lokasjonene som er benyttet er vist i Tabell 9.

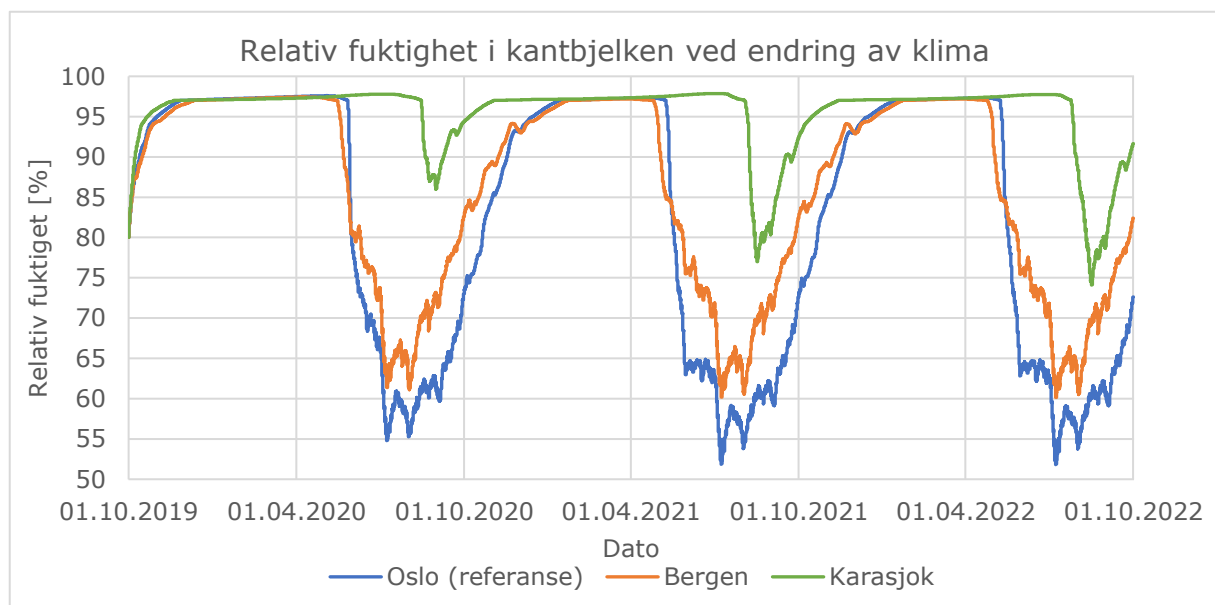
**Tabell 9: Relevante klimadata fra lokasjonene som er benyttet**

Lokasjon	Gjennomsnittstemperatur	Gjennomsnittlig RF
Oslo	6,8 °C	73,1 %
Bergen	8,3 °C	79,2 %
Karasjok	-3,1 °C	87,3 %

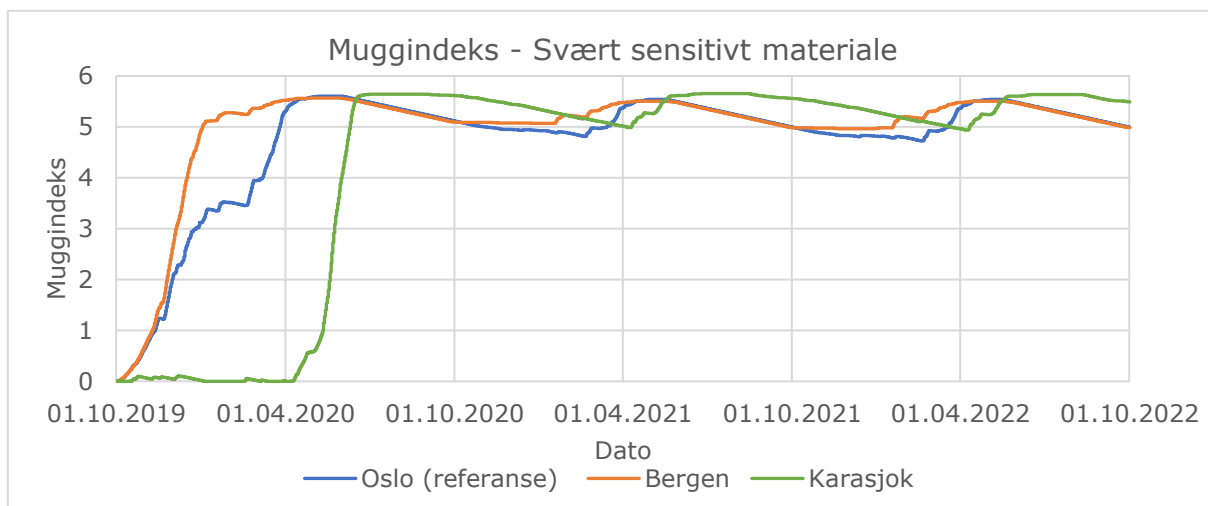
Klima – Resultater:

**Tabell 10: Antall kritiske timer ved endring av klima**

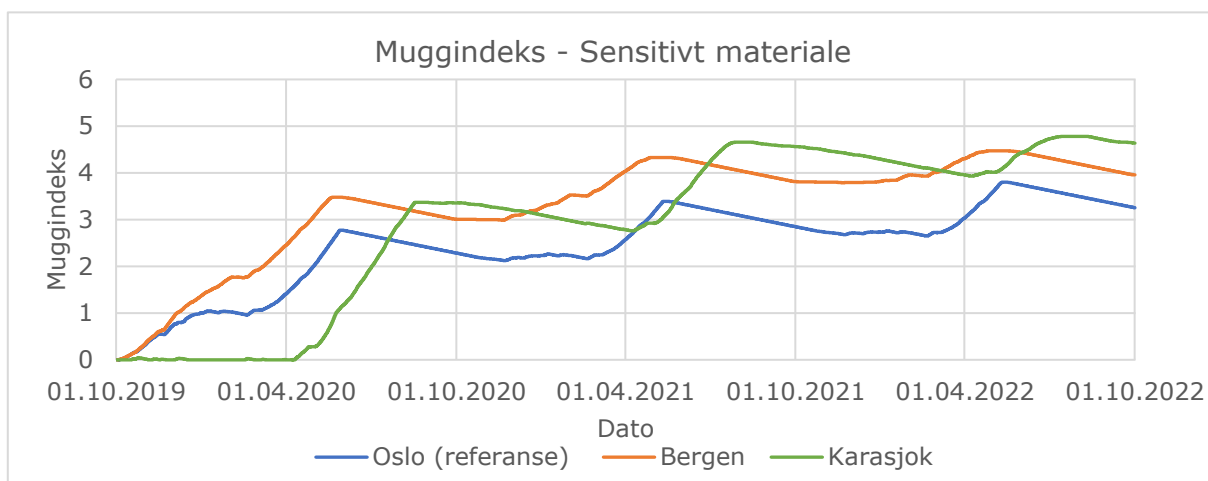
Kritiske timer hvor...	Oslo (referanse)	Bergen		Karasjok	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
$T > 5 \text{ °C}$ og $RF > 80 \text{ %}$	6954	13766	+98,0 %	9483	+36,4 %
$T > 5 \text{ °C}$ og $RF > 90 \text{ %}$	5500	9771	+77,7 %	7788	+41,6 %
$T > 5 \text{ °C}$ og $RF > 95 \text{ %}$	4554	7321	+60,8 %	7149	+57,0 %



**Figur 18: Relativ fuktighet i kantbjelken ved endring av klima**



**Figur 19: Muggindeks for kantbjelken ved ulike klima med svært sensitivt materiale**

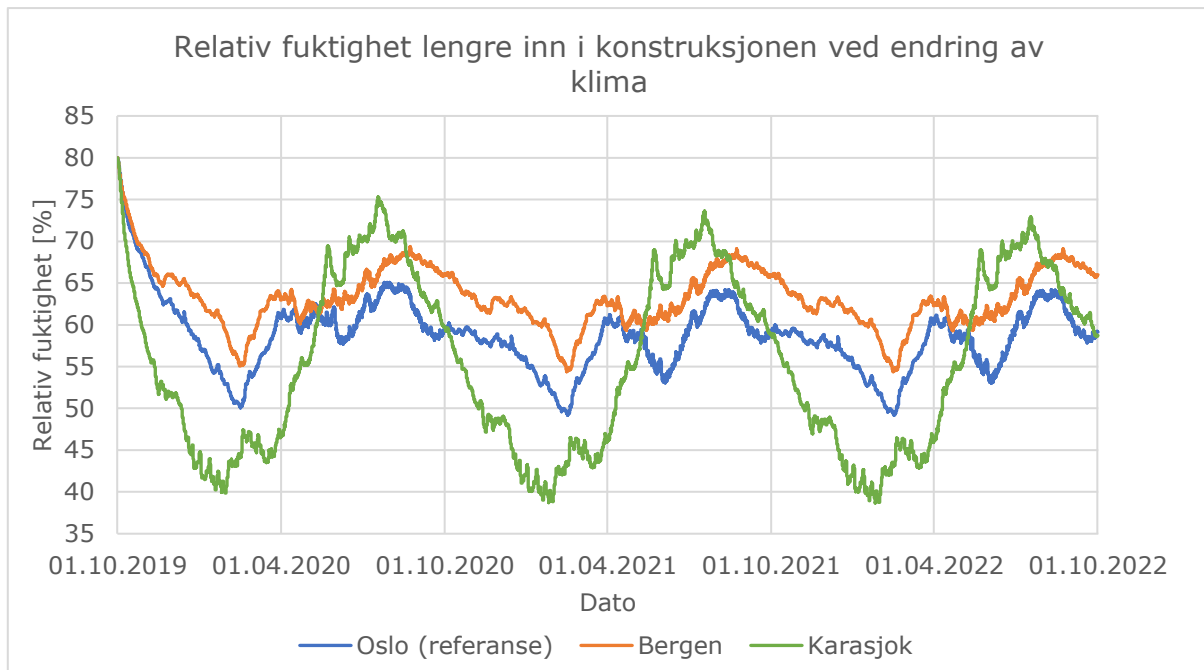


**Figur 20: Muggindeks for kantbjelken ved ulike klima med sensitivt materiale**

**Tabell 11: Høyeste verdier for muggindeks ved endring av klima**

	Oslo (referanse)		Bergen		Karasjok	
	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,56	3,48	5,64	3,37
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,50	4,33	5,65	4,66
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,50	4,47	5,64	4,78





**Figur 21: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved endring av klima**

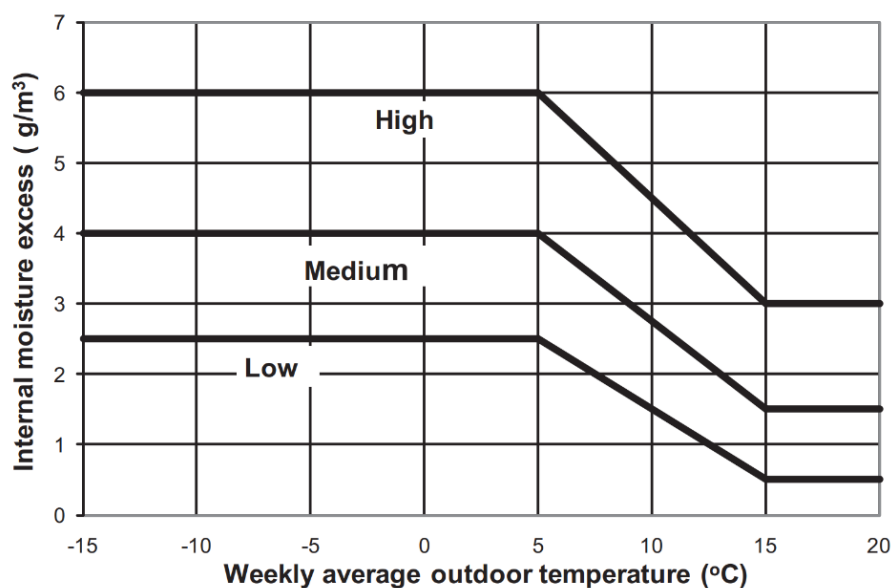
Endring av klima har ført til at det forekom et større antall kritiske timer for begge klimaene det ble endret til. Bergen har den største økningen i forhold til Oslo, men økningen er betydelig også for Karasjok. I Karasjok er det i kantbjelken svært liten variasjon i relativ fuktighet over året, kun en liten nedgang på sommeren før den raskt stiger igjen utpå høsten. Det kan også sees av oppførselen til den relative fuktigheten i kantbjelken at Karasjok har en nedgang noen måneder senere enn for Oslo og Bergen.

Dette er også synlig for muggindeksene. I Bergen og Oslo er det en økning i muggindeks fra den første høsten, mens i Karasjok kommer ikke økningen før i slutten av april året etter. For muggindeksen har denne forskyvningen lite å si da den for svært sensitivt materiale raskt er oppe i en muggindeks på over 5. Nedgangen i ugunstige perioder er heller ikke kraftig nok til å få muggindeksen ned til et mindre kritisk nivå. For det sensitive materiale er muggindeksen raskt oppe på 3 i løpet av det første året. Nedgangen i de ugunstige periodene er heller ikke tilstrekkelig nok for dette materialet. Derfor vil muggindeksen øke for hvert år som går. Lengre inn i konstruksjonen observeres det noe større variasjoner i den relative fuktigheten for Karasjok enn for de andre lokasjonene. Bergen ligger litt over Oslo gjennom hele året, men følger samme mønster.

### 4.3 Innvendig fuktpåkjenning

Nivået av fuktighet i inneluften, vil kunne ha en påvirkning for fuktnivået i trebjelkelaget. Fuktpåkjenningen fra inneluften varierer av flere årsaker. Viktige faktorer som bestemmer den innvendige fuktpåkjenningen er ventilasjonen, antall personer og menneskelig aktivitet (vasking, dusj, tørking av klær) (Geving og Thue, 2002). Fuktproduksjonen som oppstår i innemiljøet kan variere mye, både over døgnet og over lengre tid. Spesielt kan det være store variasjoner mellom ulike husstander. På grunn av dette er det interessant å undersøke hvordan fukttilstanden i kantbjelken vil være ved ulike fuktpåkjenninger.

I simuleringen er det valgt å benytte kurvene for fukttilskudd som er presentert i artikkelen «*Mean and diurnal indoor air humidity loads in residential buildings*» (Geving og Holme, 2012). Artikkelen inneholder kurver for fukttilskudd basert på målinger fra 117 bolighus i Trondheim. Kurvene gir et fukttilskudd i  $\text{g/m}^3$  som er avhengig gjennomsnittstemperaturen til uteluften. Det finnes tre kurver; lav, middels og høy. Kurvene er vist i Figur 22.

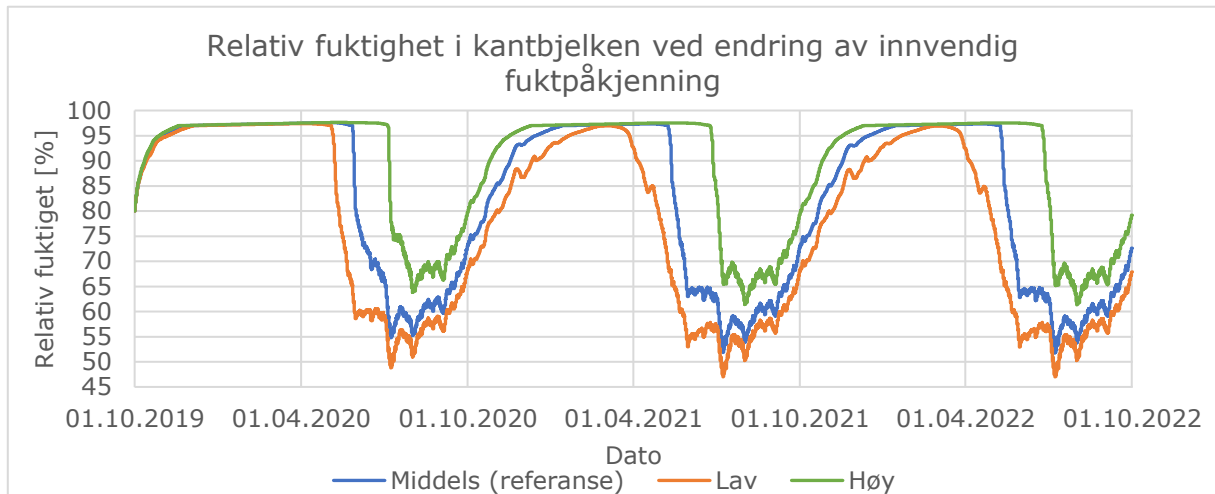


Figur 22: Kurver for innvendig fukttilskudd (Geving og Holme, 2012)

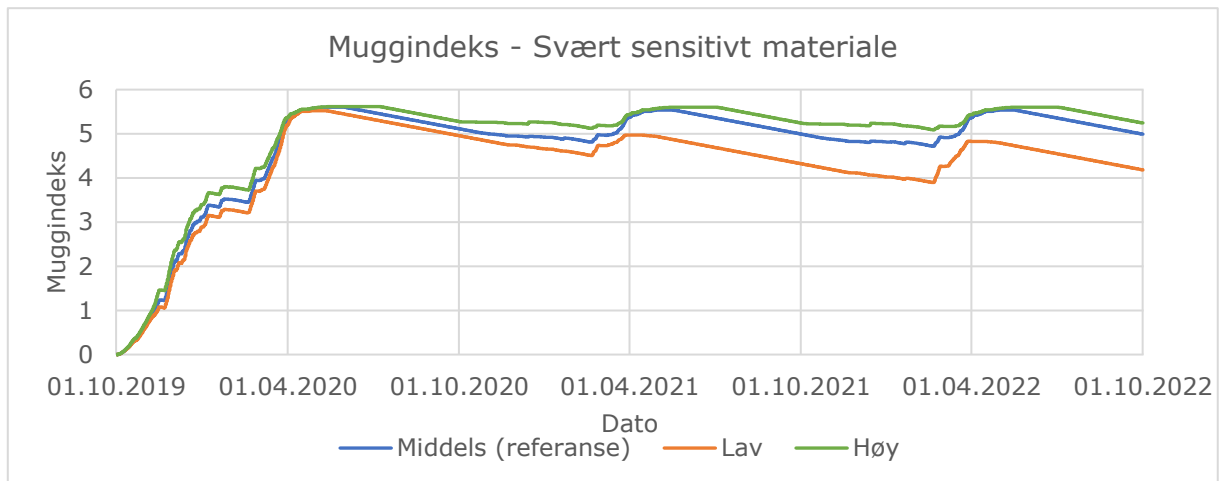
Innvendig fuktpåkjenning – Resultater:

Tabell 12: Antall kritiske timer ved endring av innvendig fuktpåkjenning

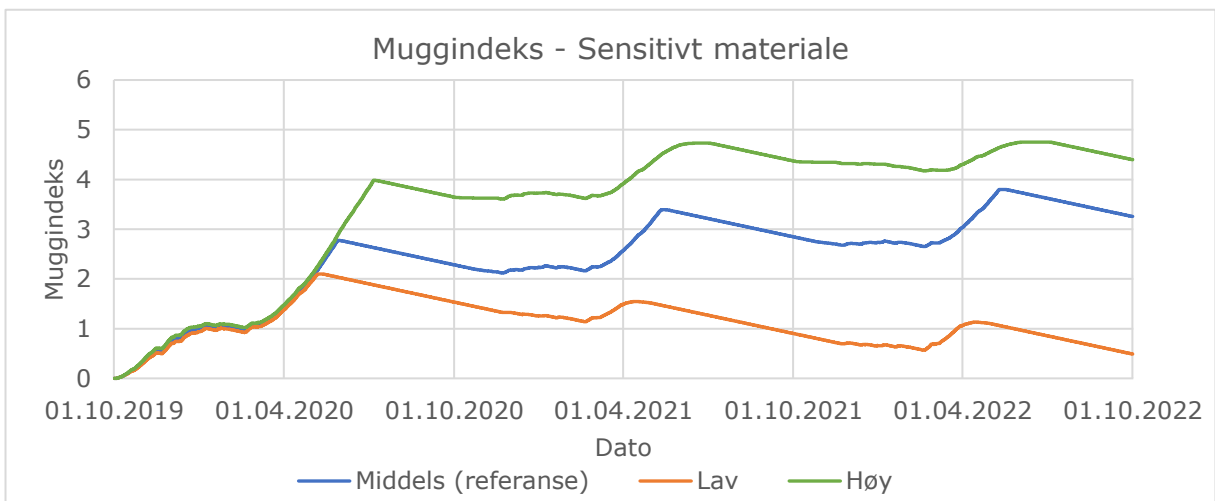
Kritiske timer hvor...	Middels (referanse)	Lav		Høy	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
T > 5 °C og RF > 80 %	6954	4850	-30,3 %	11180	+60,8 %
T > 5 °C og RF > 90 %	5500	2830	-48,5 %	9576	+74,1 %
T > 5 °C og RF > 95 %	4554	1812	-60,2 %	8429	+85,1 %



**Figur 23: Relativ fuktighet i kantbjelken ved endring av innvendig fuktpåkjenning**



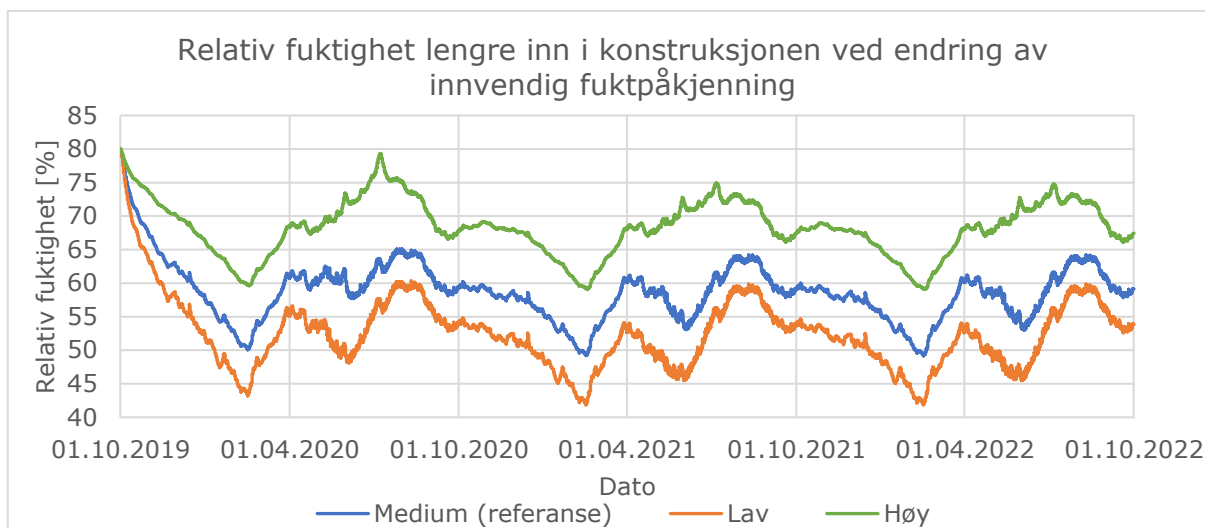
**Figur 24: Muggindeks for kantbjelken ved endring av innvendig fuktpåkjenning med sensitivt materiale**



**Figur 25: Muggindeks for kantbjelken ved endring av innvendig fuktpåkjenning med svært sensitivt materiale**

**Tabell 13: Høyeste verdier for muggindeks ved endring av innvendig fuktpåkjenning**

	Middels (referanse)		Lav		Høy	
	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,52	2,10	5,61	3,98
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	4,97	1,55	5,60	4,73
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	4,83	1,13	5,60	4,75



**Figur 26: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved endring av innvendig fuktpåkjenning**

Fra resultatene kan det tydelig observeres at jo lavere fuktpåkjenningen er, jo tidligere vil kantbjelken tørke ut. Lavere fuktpåkjenning gir også en lengre periode med lavere relativ fuktighet om sommeren. Det kan observeres at kantbjelken ikke vil nå det samme «plataet» med svært høy relativ fuktighet ved lav fuktpåkjenning som den gjør ved de høyere fuktpåkjenningene. Lengre inn i konstruksjonen kan det sees at den relative fuktigheten følger fuktpåkjenningen fra inneluften tydeligere enn i kantbjelken. Dette tyder på at den relative fuktigheten i dette området i større grad justerer seg etter det innvendige klimaet.

For muggindeksen ved svært sensitivt materiale har ikke den innvendige fuktpåkjenningen svært stor betydning. Indeksen er noe høyere ved høy fuktpåkjenning enn ved middels fuktpåkjenning, men dette er ikke nok til at det utgjør noen tydelig forskjell. Ved den lave fuktpåkjenningen er muggindeksen noe lavere, men fortsatt godt oppe på et kritisk nivå. Det kan observeres en sakte nedgang i muggindeksen i løpet av årene som er simulert for den lave fuktpåkjenningen. For det sensitive materialet er det store variasjoner på muggindeksen ved de ulike påkjenningene. For høy og middels fuktpåkjenning observeres en svak stigning hvert år. Ved middels fuktpåkjenning starter simuleringen med en akseptabel verdi (mindre enn 3), men den er over akseptabelt nivå allerede etter det andre året. Ved den lave fuktpåkjenningen nås toppen av muggindeksen det første året. Deretter er det ved den lave fuktpåkjenningen lange nok perioder med ugunstige forhold til at muggindeksens toppunkt synker i løpet av årene. Ved den lave fuktpåkjenningen er muggindeksen alltid på en verdi under 3, noe som er som akseptabelt.

## 4.4 Vindsperre

Bruk av forskjellige typer vindsperrer kan ha betydning for fuktforholdene i kantbjelken. Vindsperrer finnes med ulik grad av damptetthet, noe som påvirker kantbjelkens muligheter for uttørking. En vindsperre med lav damptetthet vil gi bedre muligheter for uttørking enn en vindsperre med høyere damptetthet. Vindsperrer av plateprodukt, spesielt plater av trefiber har også en viss varmeisolerende effekt som kan påvirke fuktforholdene.

Damptettheten til vindsperrere bør ikke overstige en  $s_d$ -verdi på 0,5 m (SINTEF, 2003). Det er derfor valgt å benytte tre ulike dampsperrer i simuleringene:

- Vindsperrerull ( $s_d$ -verdi = 0,014 m) (Referanse)
- Trefiberplate ( $s_d$ -verdi = 0,2 m)
- Damptett folie ( $s_d$ -verdi = 0,5 m)

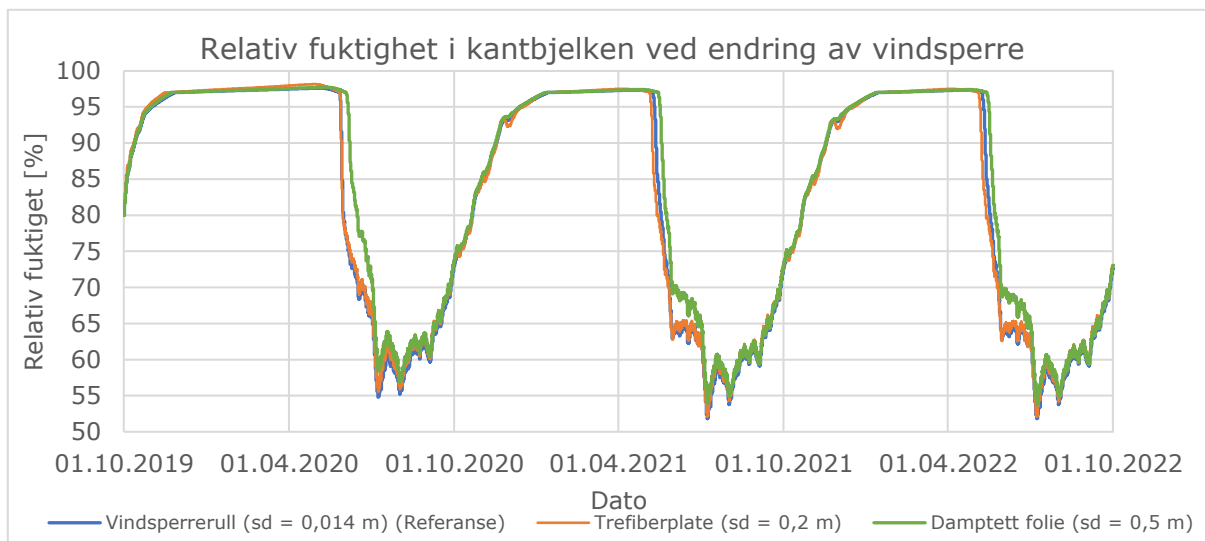
Ved å benytte disse tre ulike vindsperrere i simuleringene blir hele det akseptable spekteret av damptetthet undersøkt da vindsperrerullen er svært åpen, mens den damptette folien er helt i det øverste sjiktet av hva som er akseptabelt. Trefiberplaten gir også indikasjoner om det er gunstig med noe isolasjon utenpå kantbjelken.

I WUFI-databasen er det vindsperrerullen fra NTNU-databasen, «*Membrane of laminated polyetylen and polypropylen*», som er benyttet. Denne har en diffusjonsmotstandsfaktor på 14 og modelleres med 1 mm tykkelse, siden det er en folie. Dette gir en  $s_d$ -verdi på 0,014 m. For den damptette folien er samme materiale benyttet, men diffusjonsmotstandsfaktoren er justert opp til 500. For trefiberplaten benyttes materialet «*AiF Wood-Fiber Insulation Board WF high density*», med en diffusjonsmotstandsfaktor endret til 17 (tilsvarer en  $s_d$ -verdi på 0,2 m med 12 mm tykkelse). Dette materialet er benyttet da det har parametere som er ganske nære parameterne for Hunton Vindtett (Hunton, 2020a). For vindsperreren med  $s_d$ -verdi på 0,5 meter benyttes «*Membrane of laminated polyetylen and polypropylen*» med tykkelse 1 mm og diffusjonsmotstandsfaktor på 500.

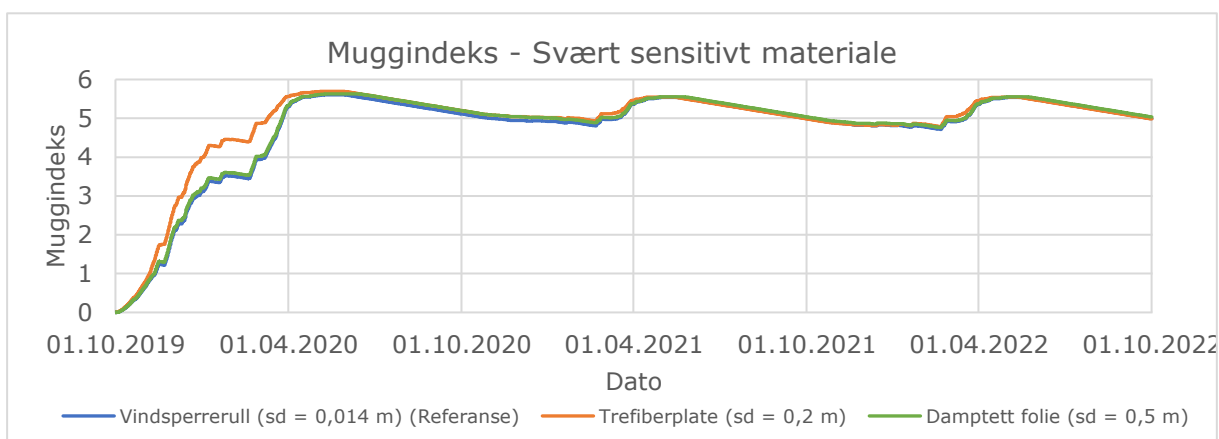
### Vindsperre – Resultater:

**Tabell 14: Antall kritiske timer ved endring av vindsperre**

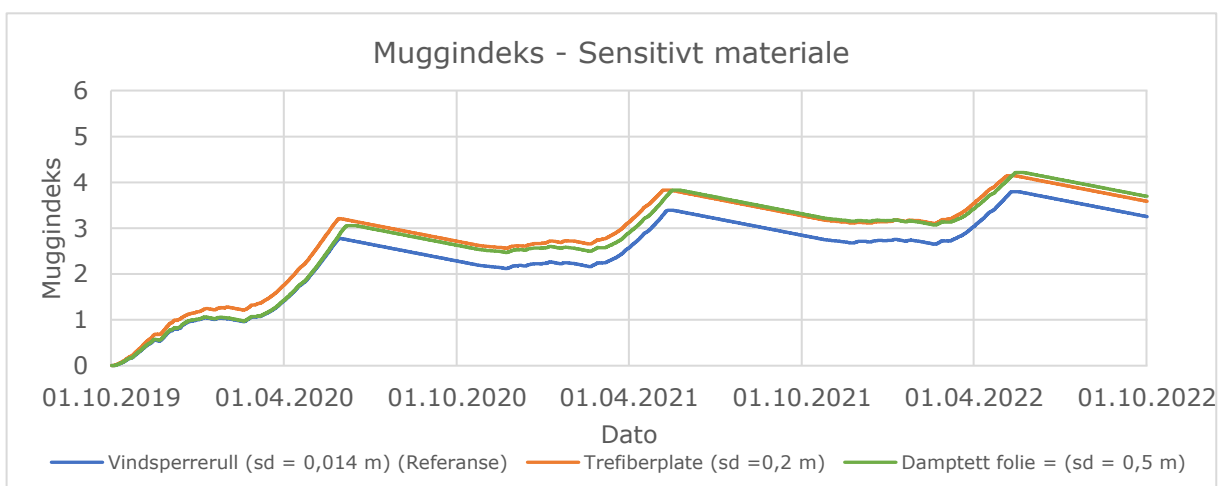
Kritiske timer hvor...	Vindsperrerull ( $s_d = 0,014$ m) (referanse)	Trefiberplate ( $s_d = 0,2$ m)		Damptett folie ( $s_d = 0,5$ m)	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 80 %</b>	6954	7667	+10,3 %	7617	+9,5 %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 90 %</b>	5500	6111	+11,1 %	6032	+9,7 %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 95 %</b>	4554	5108	+12,2 %	5159	+13,3 %



**Figur 27: Relativ fuktighet i kantbjelken ved endring av vindsperre**



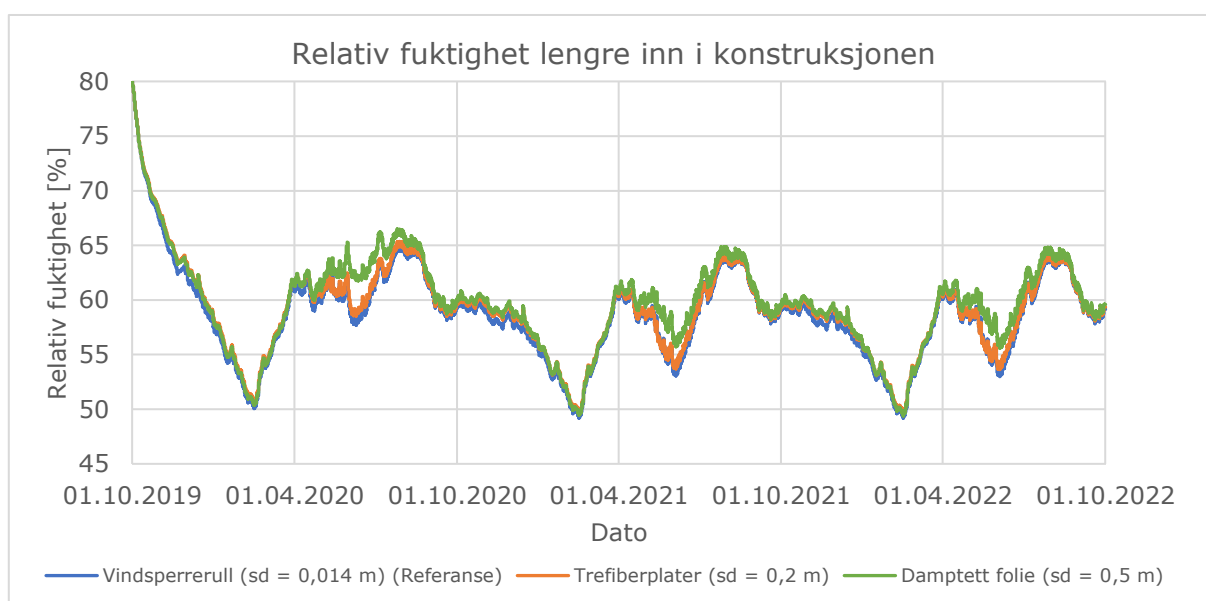
**Figur 28: Muggindeks for kantbjelken ved endring av vindsperre med sensitivt materiale**



**Figur 29: Muggindeks for kantbjelken ved endring av vindsperre med svært sensitivt materiale**

**Tabell 15: Høyeste verdier for muggindeks ved endring av vindsperre**

	Vindsperrerull ( $s_d = 0,014$ m) (referanse)		Trefiberplate ( $s_d = 0,2$ m)		Damp tett folie ( $s_d = 0,5$ m)	
	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,69	3,21	5,63	3,06
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,55	3,83	5,56	3,83
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,54	4,15	5,56	4,22



**Figur 30: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved endring av vindsperre**

Fra den relative fuktigheten i kantbjelken er det tydelig at damp tettheten til vindsperran har liten betydning. Den relative fuktigheten følger i stor grad samme trend uavhengig av damp tettheten til vindsperran. Antallet kritiske timer går allikevel noe opp med høyere damp tetthet, noe som viser at det er fordelaktig med så dampåpen vindsperre som mulig. Det kan også sees at bruk av trefiberplate gjør at den relative fuktigheten faller noe tidligere om sommeren, noe som kan skyldes den ekstra varmeisolerende effekten denne platen har. Denne effekten er svært liten og har i praksis ingen betydning.

For begge materialene benyttet i muggindeksene nås det kritiske nivåer allerede i løpet av det første året. Dampåpenheten gir nesten ingen variasjon i muggindeks, men den er lavest ved bruk av den mest dampåpne vindsperran. For det sensitive materialet sees det at toppunktet til muggindeksen stiger hvert år mot mer kritiske verdier, mens den for det svært sensitive materialet holder seg stabilt på rundt 5,5.

## 4.5 Lufttett sjikt i himling

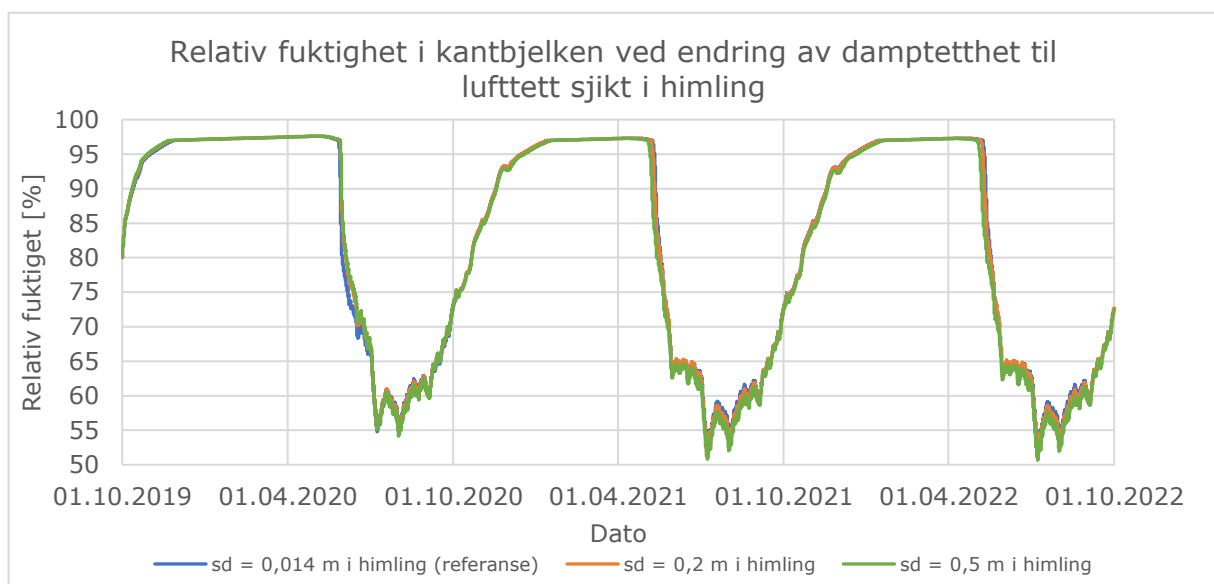
Slik det er nevnt i Kap. 2.3 er det ønskelig at det lufttette sjiktet i himlingen skal være dampåpent. Graden av dampetthet i dette sjiktet avhenger av hva slags type produkter som blir benyttet. Det er ikke funnet noen anbefalinger i Byggforskserien til hvilken type dampetthet som anbefales for dette sjiktet. Det er allikevel rimelig å anta at det vanligvis benyttes flere typer produkter med ulik dampetthet. Dampettheten til dette sjiktet er antatt å ligge i samme intervall som vindsperrermaterialer, opptil en  $s_d$ -verdi på 0,5 m. Det er derfor interessant å undersøke effekten av forskjellig dampetthet i dette sjiktet.

For å modellere dette sjiktet i WUFI-2D er det benyttet samme folien som er benyttet som vindsperre i referansesituasjonen. Dette er folien «*Membrane of laminated polyetylen and polypropylen*» fra NTNU-databasen. Den er lagt inn med følgende dampettheter:

- $s_d = 0,014$  m (referanse)
- $s_d = 0,2$  m
- $s_d = 0,5$  m

Dampettheten til folien er endret i WUFI med å endre materialparameteren for diffusjonsmotstandsfaktor. Denne er satt til henholdsvis 14, 200 og 500, som gir de rette  $s_d$ -verdiene når folien modelleres med 1 mm tykkelse.

### Lufttett sjikt i himling – Resultater:

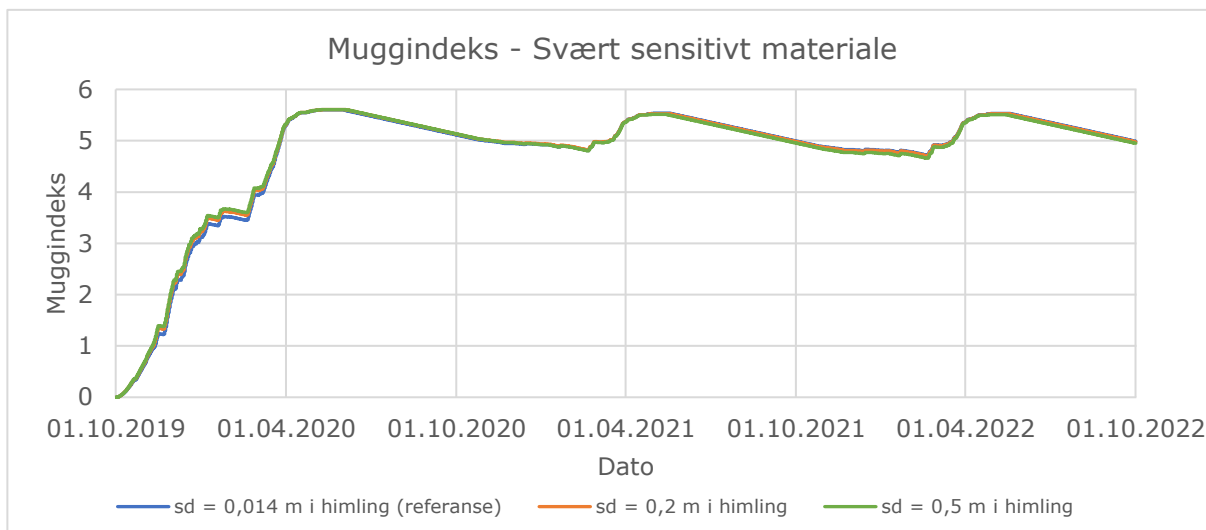


**Figur 31: Relativ fuktighet ved endring av dampetthet til lufttett sjikt i himling**

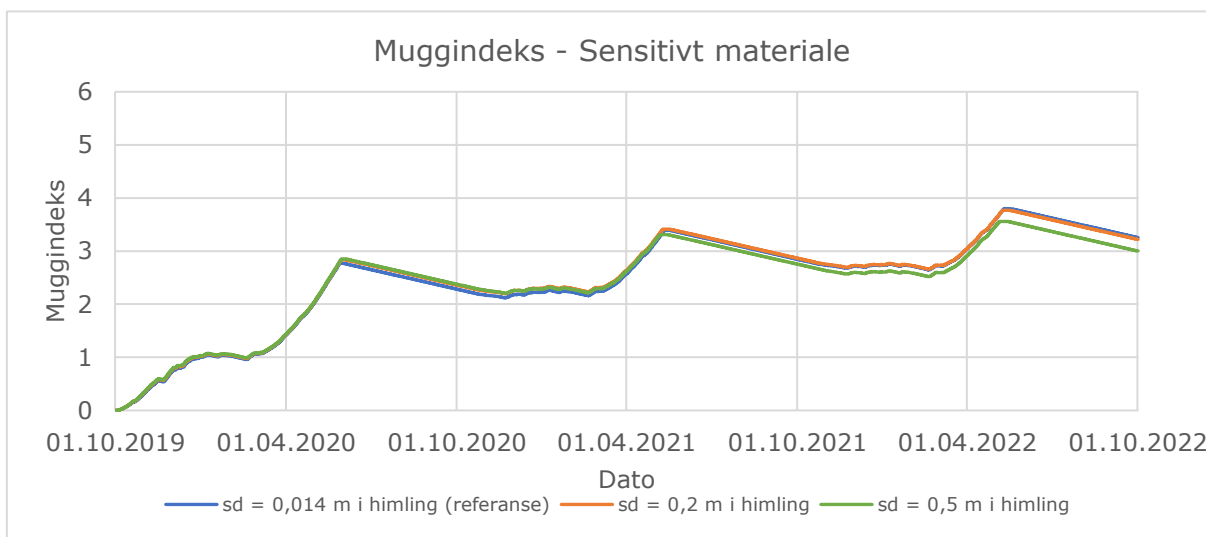
**Tabell 16: Antall kritiske timer ved endring av dampetthet til lufttett sjikt i himling**

Kritiske timer hvor...	$s_d = 0,014$ m (referanse)	$s_d = 0,2$ m		$s_d = 0,5$ m	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 80 %</b>	6954	7017	+0,9 %	6841	+1,6 %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 90 %</b>	5500	5472	-0,5 %	5331	+3,1 %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 95 %</b>	4554	4568	+0,3 %	4398	+3,4 %





**Figur 32: Muggindeks for kantbjelken ved endring av damp tetthet til lufttett sjikt i himling med svært sensitivt materiale**



**Figur 33: Muggindeks for kantbjelken ved endring av damp tetthet til lufttett sjikt i himling med sensitivt materiale**

**Tabell 17: Høyeste verdier for muggindeks ved endring av damp tetthet til lufttett sjikt i himling**

	<b>s<sub>d</sub> = 0,014 m (referanse)</b>		<b>s<sub>d</sub> = 0,2 m</b>		<b>s<sub>d</sub> = 0,5 m</b>	
	<b>Svært sensitivt</b>	<b>Sensitivt</b>	<b>Svært sensitivt</b>	<b>Sensitivt</b>	<b>Svært sensitivt</b>	<b>Sensitivt</b>
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,61	2,83	5,61	2,85
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,53	3,41	5,51	3,31
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,53	3,77	5,51	3,56



**Figur 34: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved endring av damp tetthet til lufttett sjikt i himling**

Fra den relative fuktigheten i kantbjelken kan det observeres at damp tettheten til det lufttette sjiktet i himlingen har lite å si for fuktnivået i kantbjelken. For det mest damp tette sjiktet er den relative fuktigheten noe lavere enn de to andre damp tetthetene, men forskjellen er svært liten. Dette er også synlig på antall kritiske timer som oppnås i de ulike tilfellene. Antall kritiske timer går noe ned når damp tettheten øker.

Den samme effekten kan sees på muggindeksene. For begge materialene går denne ned med økende damp tetthet i himling, men denne nedgangen er svært liten. Det svært sensitive materiale får en muggindeks raskt oppe på 5,5 som forblir på kritisk nivå i løpet av simuleringen. For det sensitive materiale er den på akseptabelt nivå det første året, men stiger de påfølgende årene. Til tross for at muggindeksen går ned med økende damp tetthet i det lufttette sjiktet i himlingen, er det ikke anbefalt å øke damp tettheten her. Virkningen for kantbjelken er for liten til at det har noen betydelig effekt. I tillegg er det som nevnt ønskelig at dette sjiktet skal være så dampåpent som mulig slik at fukt ikke risikerer å bli sperret inne i bjelkelaget.

## 4.6 Smart dampsperre i himlingen

En smart dampsperre er en folie hvor vanndampmotstanden varierer med den relative fuktigheten til luften rundt (SINTEF, 2018a). Den fungerer slik at den har høy vanndampmotstand når den relative fuktigheten i omkringliggende luft er lav, mens vanndampmotstanden er lav ved høy relativ fuktighet. Vanndampmotstanden til denne folien vil i stor grad være avhengig av den relative fuktigheten i inneluften, siden den ligger rett over kledningen i himlingen. Den relative fuktigheten i inneluften er gjerne størst om sommeren, noe som vil gjøre at den smarte dampsperreren er mest dampåpen på denne tiden av året.

For å modellere smart dampsperre i WUFI-2D er det tatt utgangspunkt i materialet «*Intello (according to German approval 2015)*». Videre er materialdata for hvordan diffusjonsmotstandsfaktoren avhenger med relativ fuktighet i omkringliggende luft endret. De smarte dampsperrere er forenklet til å ha vanndampmotstand etter gjennomsnittet mellom de to ulike sidene av den smarte dampsperreren. Dataen for vanndampmotstand er endret i to omganger for å forestille to ulike smarte dampsperrere. De smarte dampsperrere som modelleres er «*Isola DuPont AirGuard Smart*» og «*SIGA Majrex*». Dette er samme metode som er benyttet av Sletfjerding (2019). Materialdata for vanndampmotstand er vist i Tabell 18 og Tabell 19.

**Tabell 18: Data for vanndampmotstand for «Isola DuPont AirGuard Smart» (Sletfjerding, 2019)**

Gjennomsnittlig relativ fuktighet [%]	s <sub>d</sub> -verdi [m]	Diffusjonsmotstandsfaktor, μ [-]
0	100	100000
12,5	90	90000
25	35	35000
37,5	13	13000
62,5	3,3	3300
75	0,21	210
90	0,2	200
100	0,2	200

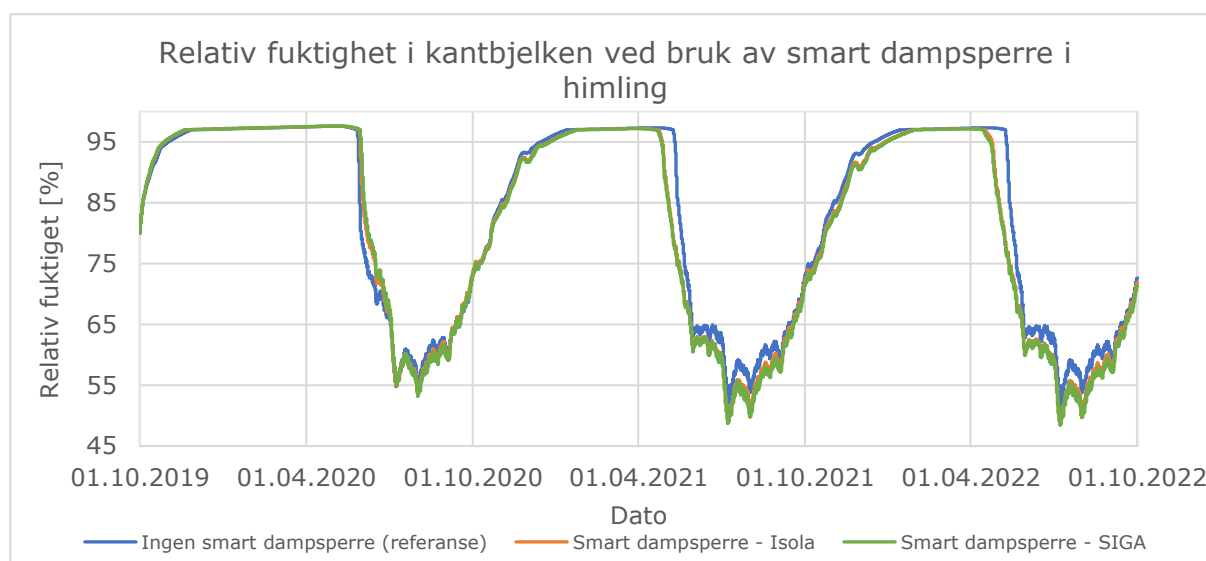
**Tabell 19: Data for vanndampmotstand for «SIGA Majrex» (Sletfjerding, 2019)**

Gjennomsnittlig relativ fuktighet [%]	s <sub>d</sub> -verdi [m]	Diffusjonsmotstandsfaktor, μ [-]
0	35	35000
15	35	35000
40	11	11000
50	11	11000
70	3	3000
90	1	1000
100	1	1000

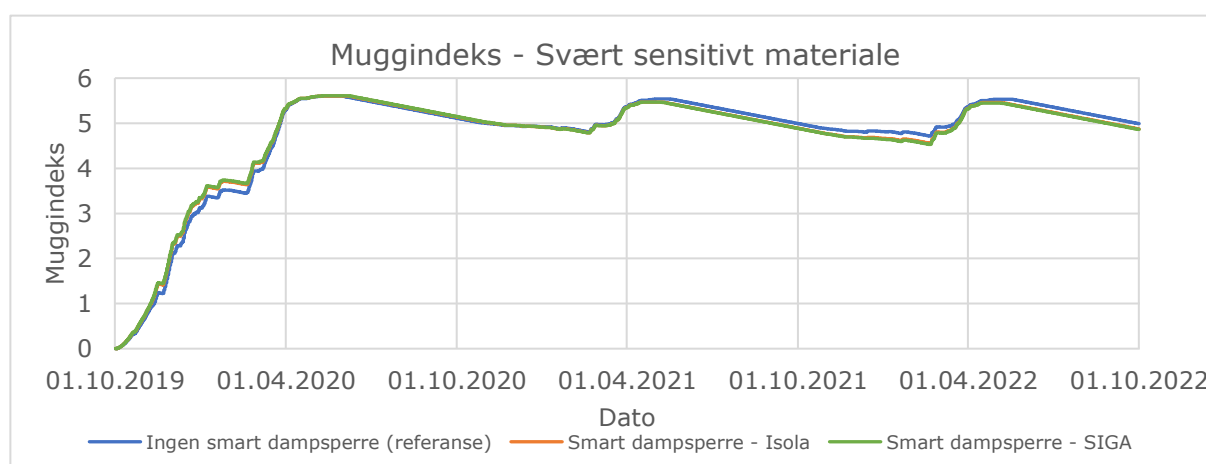
## Smart dampsperre i himlingen – Resultater:

**Tabell 20: Antall kritiske timer ved bruk av smart dampsperre i himling**

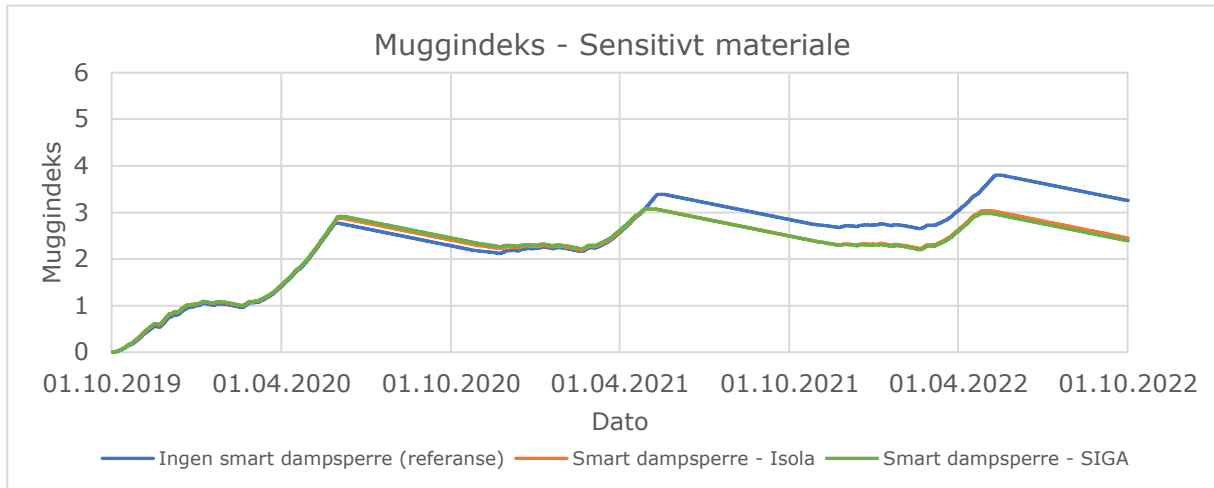
Kritiske timer hvor...	Ingen smart dampsperre (referanse)	Smart dampsperre, Isola		Smart dampsperre, SIGA	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
T > 5 °C og RF > 80 %	6954	6587	-5,3 %	6588	-5,3 %
T > 5 °C og RF > 90 %	5500	4913	-10,7 %	4900	-10,9 %
T > 5 °C og RF > 95 %	4554	3924	-13,8 %	3890	-14,6 %



**Figur 35: Relativ fuktighet i kantbjelken ved bruk av smart dampsperre**



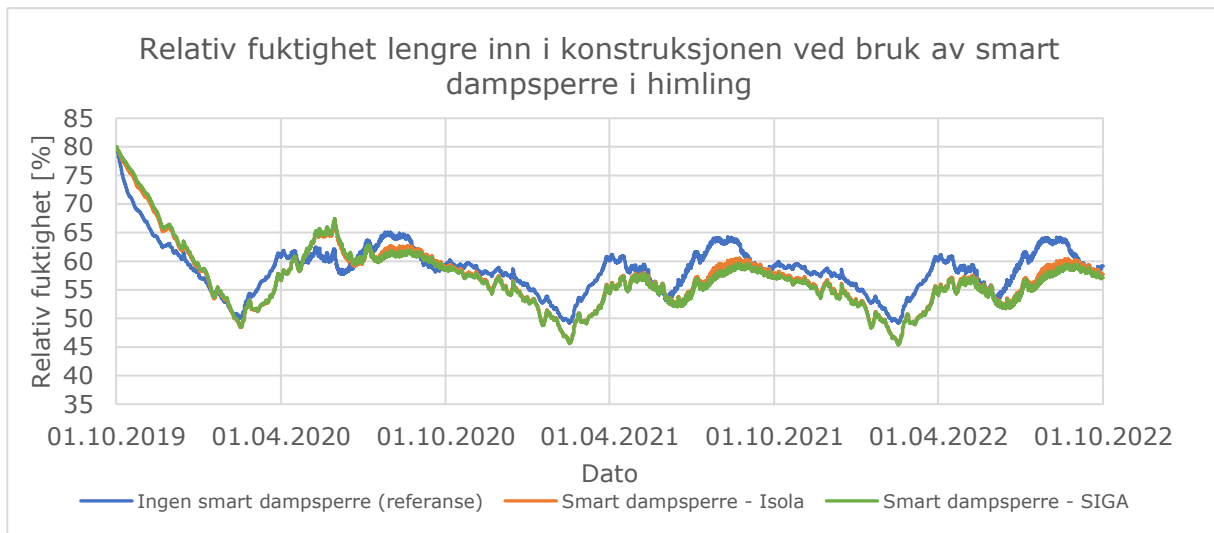
**Figur 36: Muggindeks for kantbjelken ved bruk av smart dampsperre i himling med svært sensitivt materiale**



**Figur 37: Muggindeks for kantbjelken ved bruk av smart dampsperre i himling med sensitivt materiale**

**Tabell 21: Høyeste verdier for muggindeks ved bruk av smart dampsperre i himling**

	Ingen smart dampsperre (referanse)		Smart dampsperre, Isola		Smart dampsperre, SIGA	
	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,61	2,87	5,61	2,91
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,47	3,07	5,47	3,07
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,46	3,04	5,45	2,98



**Figur 38: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved bruk av smart dampsperre i himling**

Fra antallet kritiske timer i kantbjelken kan det sees at disse går noe ned når det benyttes smart dampsperre i himlingen. Den største nedgangen skjer for de kritiske timene med relativ fuktighet større enn 90 % og 95 %. Kurvene for relativ fuktigheter følger i stor grad det samme mønsteret som referansesituasjonene, men begynner å tørke ut noe tidligere om våren. I tillegg oppnås det noe lavere verdier om sommeren.

Den noe tidligere uttørkingen og lavere verdier om sommeren gjør slik at det forekommer tilstrekkelig tid med ugunstige betingelser for muggvekst, når det sensitive materialet undersøkes. Her observeres det at muggindeksen, for begge de smarte dampsperrene, ikke vil øke hvert år, men holde seg stabilt på en verdi rundt 3. Dette ansees som akseptabelt. Denne effekten opptrer ikke for det svært sensitive materialet, her er muggindeksen på et kritisk nivå like raskt som i referansesituasjonen.

## 4.7 Trefiberisolasjon

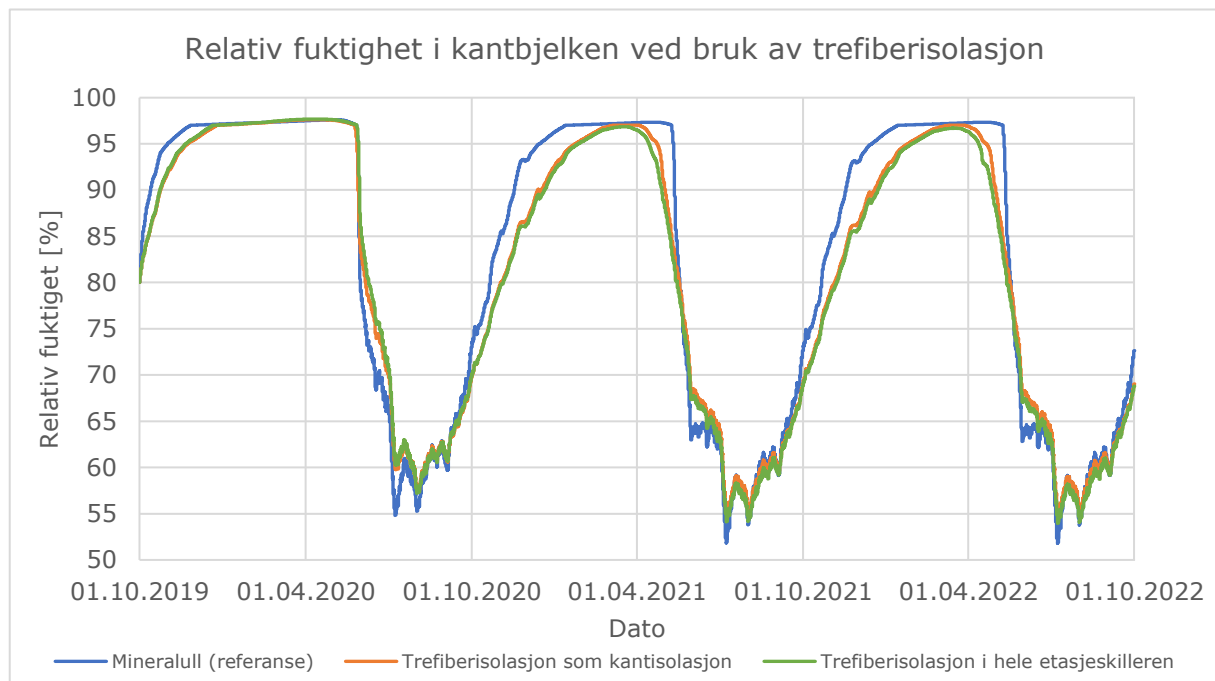
Trefiberisolasjon er en type varmeisolasjon som er fremstilt av bartrevirke (Edvardsen og Ramstad, 2010). Ifølge Norsk Trefiberisolering (2020) har bruken av trefiberisolasjon en rekke fordeler. En av disse fordelene er trefiberisolasjonens evne til å ta opp og holde på fuktighet. Dersom denne typen isolasjon benyttes i trebjelkelaget, enten som kantisolasjon eller i hele etasjeskilleren, kan det ha påvirkning på fuktforholdene i kantbjelken.

I WUFI-2D modelleres trefiberisolasjonen som materialet «AiF Flexible Wood-Fibre Insulation WF». Dette materialet har omtrent de samme materialparameterne som Hunton Nativo Trefiberisolasjon (Hunton, 2020b). Det er antatt at sorpsjonskurven for dette materialet tilsvarer det som er normalt for trefiberisolasjon. Simuleringene med trefiberisolasjon er gjennomført i to omganger. En gang med trefiberisolasjon som kantisolasjon og en gang hvor all isolasjon i etasjeskilleren er av trefiber.

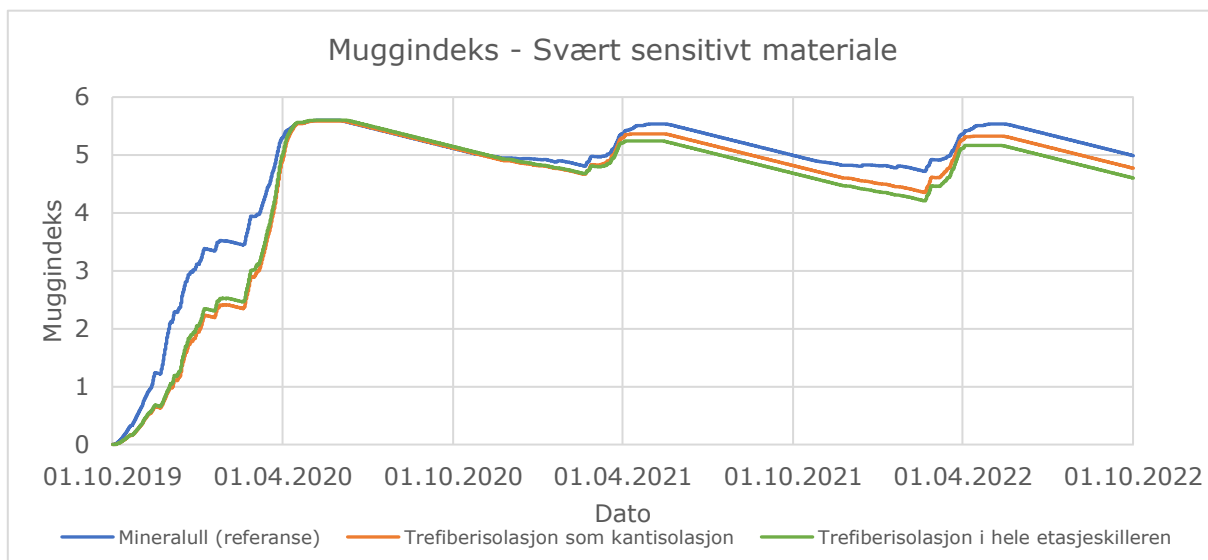
### Trefiberisolasjon – Resultater:

**Tabell 22: Antall kritiske timer for kantbjelken ved bruk av trefiberisolasjon**

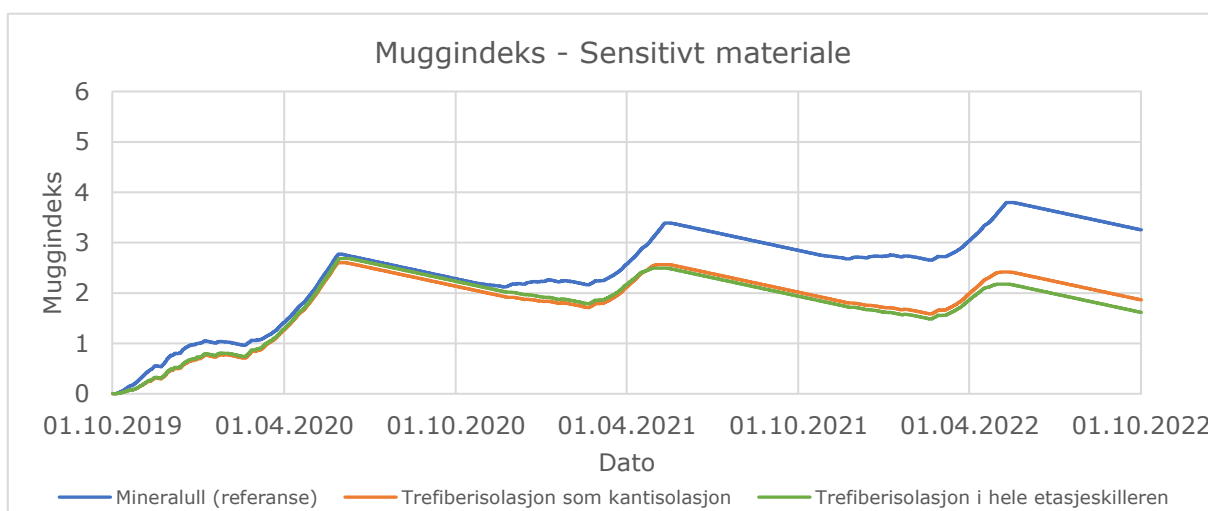
Kritiske timer hvor...	Mineralull (referanse)	Trefiberisolasjon som kantisolasjon		Trefiberisolasjon i hele etasjeskilleren	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 80 %</b>	6954	6600	-5,1 %	6418	-7,7 %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 90 %</b>	5500	4369	-20,6 %	4198	-23,7 %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 95 %</b>	4554	3428	-24,7 %	3142	-31,0 %



**Figur 39: Relativ fuktighet i kantbjelken ved bruk av trefiberisolasjon**



**Figur 40: Muggindeks for kantbjelken ved bruk av trefiberisolasjon med svært sensitivt materiale**

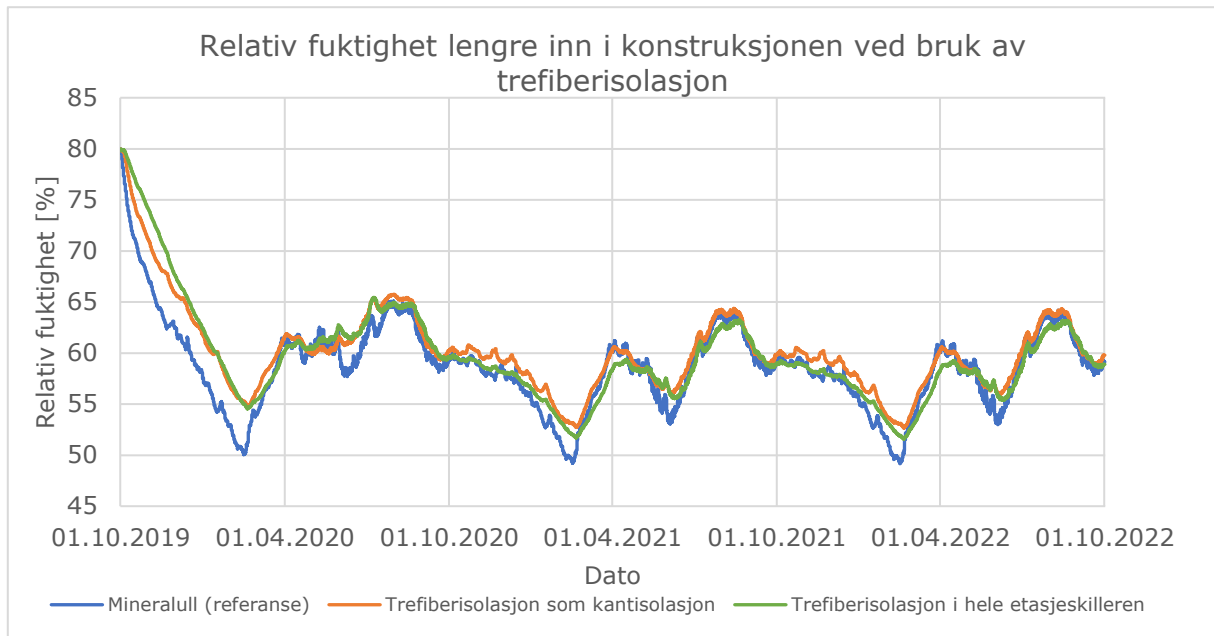


**Figur 41: Muggindeks for kantbjelken ved bruk av trefiberisolasjon med sensitivt materiale**

**Tabell 23: Høyeste verdier for muggindeks ved bruk av trefiberisolasjon**

	Mineralull (referanse)		Trefiberisolasjon som kantisolasjon		Trefiberisolasjon i hele etasjeskilleren	
	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,59	2,60	5,60	2,69
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,37	2,56	5,24	2,50
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,32	2,41	5,17	2,18





**Figur 42: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved bruk av trefiberisolasjon**

Fra antallet kritiske timer er det tydelig at det ekstra fuktopptaket som trefiberisolasjonen sørger for, har innvirkninger på fuktnivået i kantbjelken. Antallet kritiske timer med relativ fuktighet større enn 80 % har en liten nedgang, mens timer der relativ fuktighet er større enn både 90 % og 95 % har fått en betydelig nedgang. Dette kan også observeres på kurvene over relativ fuktighet i kantbjelken. Her sees det at kantbjelkene ikke når det samme stabile og høye fuktnivået om vinteren/våren, men kun har en liten periode hvor den relative fuktigheten er så høy.

Dette har også følger for kantbjelkens muggindeks. Ved svært sensitivt materiale er muggindeksen raskt oppe på kritisk nivå, men nedgangen i ugunstige perioder er noe større når trefiberisolasjon er benyttet. Denne effekten er størst når det er kantisolasjon i hele bjelkelaget. For svært sensitivt materiale synker toppunktet noe de første årene, men ikke nok til å unngå kritiske nivåer. Effekten er også synlig ved sensitivt materiale. Her observeres det at nedgangen i ugunstige perioder er nok til at muggindeksen holder seg på et stabilt og akseptabelt nivå.

## 4.8 Undergulv

Typen undergulv som benyttes i etasjen over bjelkelaget kan ha betydning for kantbjelkens fukttilstand. Ulike typer undergulv har forskjellig damptetthet, noe som påvirker hvordan konstruksjonen blir påvirket av fuktighet i inneluften i den øverste etasjen, samt mulighetene for uttørking innover. Ifølge SINTEF (2011) er sponplater, OSB-plater og kryssfinérplater vanlig å benytte som undergulv. Det er disse tre forskjellige typene undergulv som er simulert her. I tillegg til undergulvet er også gulvbelegget i modellen med på å øke damptettheten til gulvet i den øverste etasjen. Gulvbelegget er det samme i alle simuleringene.

Undergulvene er endret i WUFI-2D ved å benytte ulike materialer i hver simulering. En oversikt over materialene som er benyttet og relevante data for vanddampmotstand er presentert i Tabell 24. Vanddampmotstandene til materialene er justert til å være det samme som det som er oppgitt for de ulike materialene av Geving og Thue (2002). Alle undergulvene er modellert med en tykkelse på 22 mm.

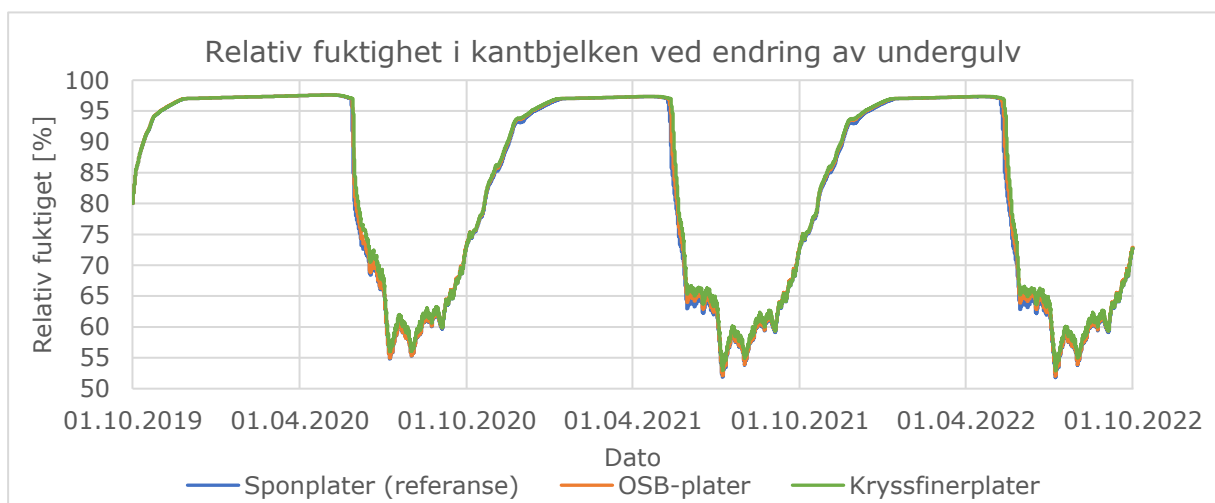
**Tabell 24: Materialdata for undergulvene som er benyttet**

Type undergulv	Materiale i WUFI-2D	Diffusjonsmotstandsfaktor	s <sub>d</sub> -verdi [m]
Sponplater	«Chipboard»	70	1,54
OSB-plater	«AiF OSB 3»	30	0,66
Kryssfinérplater	«Plywood density 600»	210	4,62

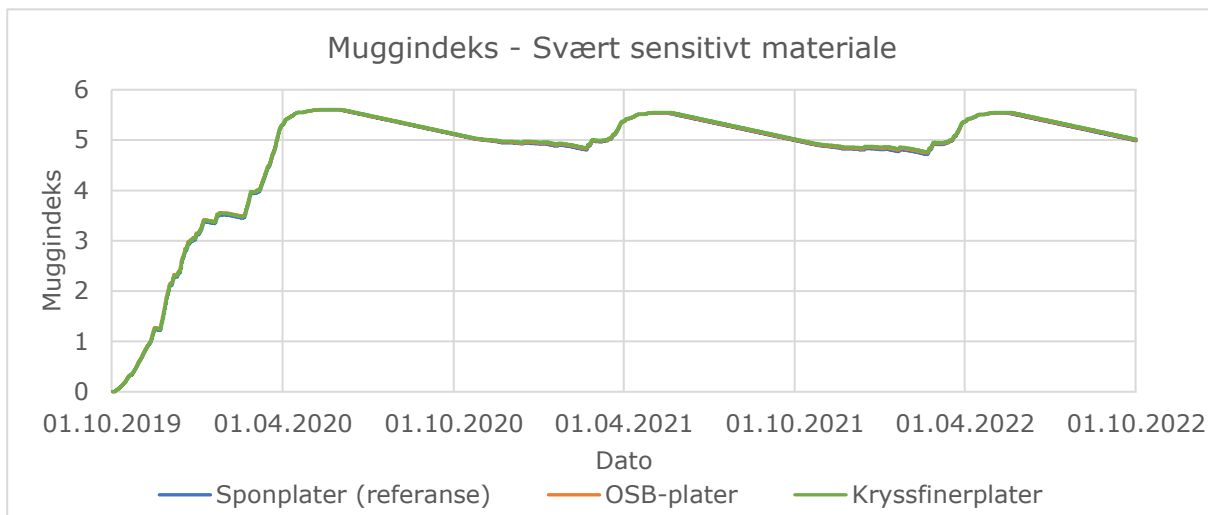
### Undergulv – Resultater:

**Tabell 25: Antall kritiske timer ved endring av undergulv**

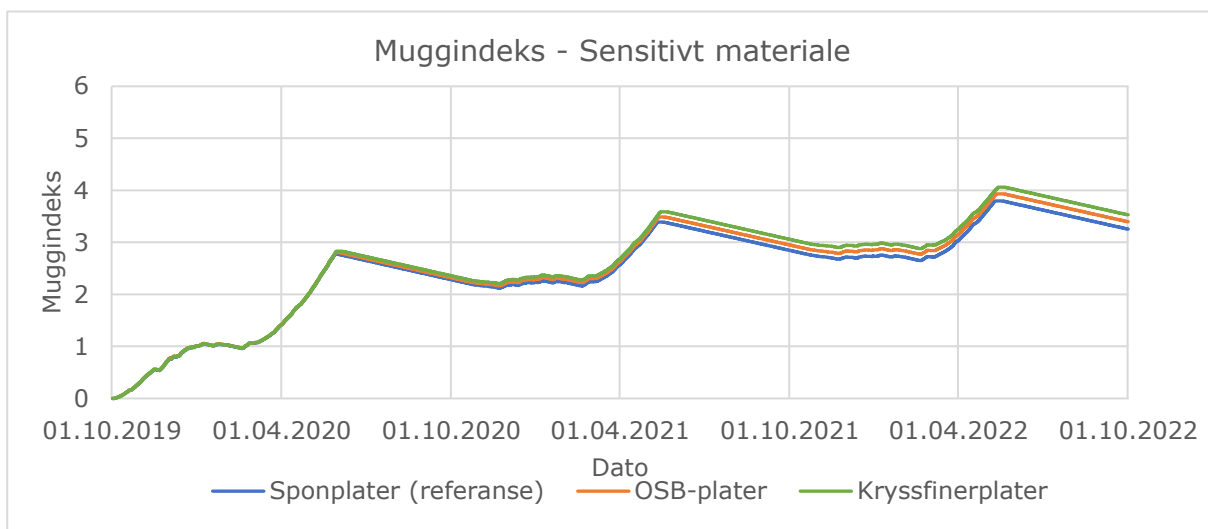
Kritiske timer hvor...	Sponplater (referanse)	OSB-plater		Kryssfinérplater	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
T > 5 °C og RF > 80 %	6954	7059	+1,5 %	7234	+4,0 %
T > 5 °C og RF > 90 %	5500	5585	+1,5 %	5745	+4,5 %
T > 5 °C og RF > 95 %	4554	4754	+4,4 %	4861	+6,7 %



**Figur 43: Relativ fuktighet i kantbjelken ved endring av undergulv**



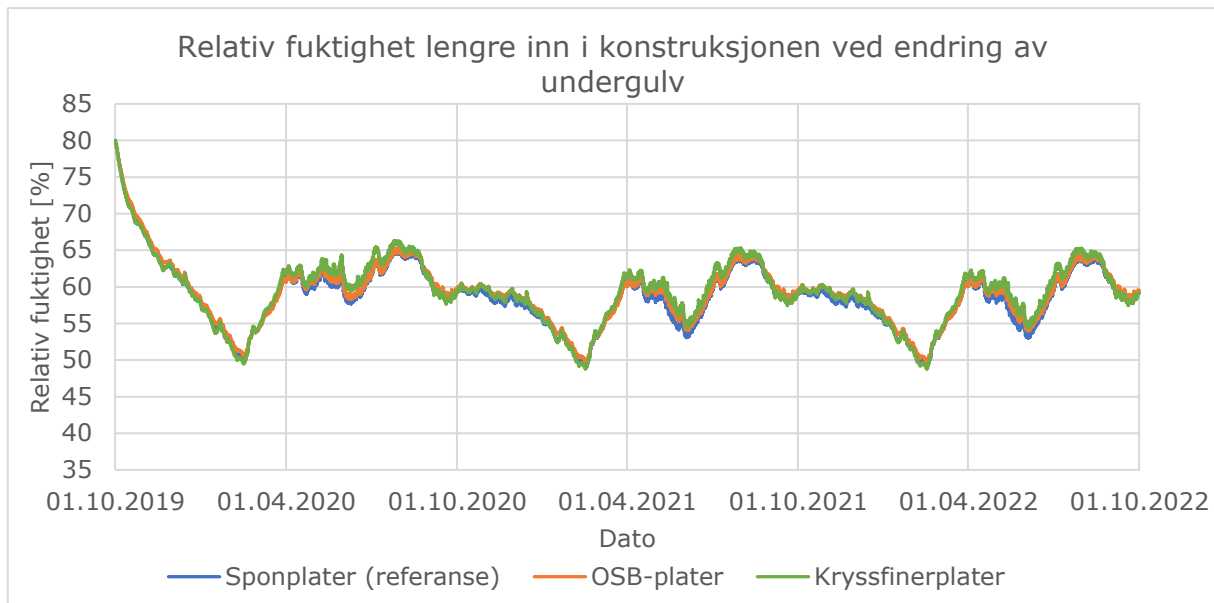
**Figur 44: Muggindeks for kantbjelken ved endring av undergulv med svært sensitivt materiale**



**Figur 45: Muggindeks for kantbjelken ved endring av undergulv med sensitivt materiale**

**Tabell 26: Høyeste verdier for muggindeks ved endring av undergulv**

	Sponplater (referanse)		OSB-plater		Kryssfinerplater	
	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,60	2,81	5,60	2,83
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,54	3,49	5,55	3,59
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,54	3,93	5,55	4,06



**Figur 46: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved endring av undergulv**

Fra resultatene kan det observeres at type undergulv har liten betydning for den relative fuktigheten i kantbjelken. For både OSB-plater og kryssfinerplater oppleves det en liten økning i relativ fuktighet i forhold til referansesituasjonen. Sponplater, som benyttes i referansesituasjonen, er en middel med tanke på damptetthet, men allikevel er det denne som gir den laveste relative fuktigheten.

For muggindeksen med svært sensitivt materiale har ikke de små forskjellene i relativ fuktighet noe betydning. Her følger muggindeksen samme mønster som i referansesituasjonen. For det sensitive materialet kan det observeres at forskjellen i muggindeksen øker over tid, noe som tilsier at undergulv av kryssfinerplater vil gi den høyeste muggindeksen over tid.

## 4.9 Materiale i kantbjelken

I trebjelkelaget kan det benyttes ulike typer kantbjelker. I de fleste tilfellene benyttes det konstruksjonsvirke, slik som i referansesituasjonen, men andre ganger benyttes samme materiale som det er benyttet på undergulvet. Dersom det benyttes et annet materiale enn konstruksjonsvirke vil risikoen for muggvekst være annerledes. Dette er fordi ulike materialer innebærer ulik risiko for muggvekst, men også fordi materialenes fuktegenskaper er ulike.

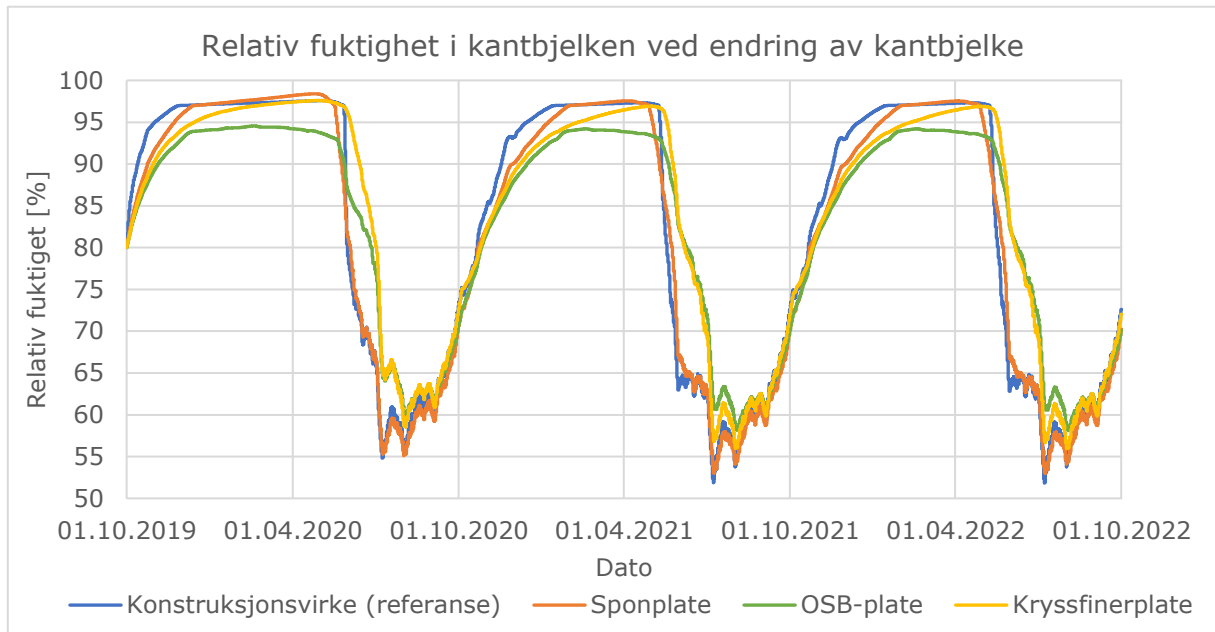
I simuleringene er det valgt å benytte kantbjelker av samme materiale som ble benyttet når undergulvet ble undersøkt som parameter. Når kantbjelken er endret er også undergulvet endret. Med dette følger det at simuleringene i tillegg har ulike undergulv. En oversikt over hvilket materiale som er benyttet og deres data for vanddampmotstand er vist i Tabell 24.

Siden det er gjort utskiftninger i materialet for kantbjelken har dette fått konsekvenser for hvordan muggveksten modelleres. Det benyttes kun materialene «Svært sensitivt» og «Sensitivt» i referansesituasjonen der det er benyttet konstruksjonsvirke. For de andre materialene er det benyttet materialer som allerede ligger inne i material-databasen i VTT-programmet. Dette betyr at det ikke er gjort valg for parameterne «Sensitivity Class», «Material Class», «Type of Surface» og «Type of Wood» i dette tilfellet. For OSB-plater er det benyttet «OSB» og for kryssfinérplater er det benyttet «Plywood (softwood)». Det ligger ikke materialdata for sponplater i programmet, men her er det gjort en antagelse om at materialet «Particle Board» er det materialet som er den beste tilnærmingen.

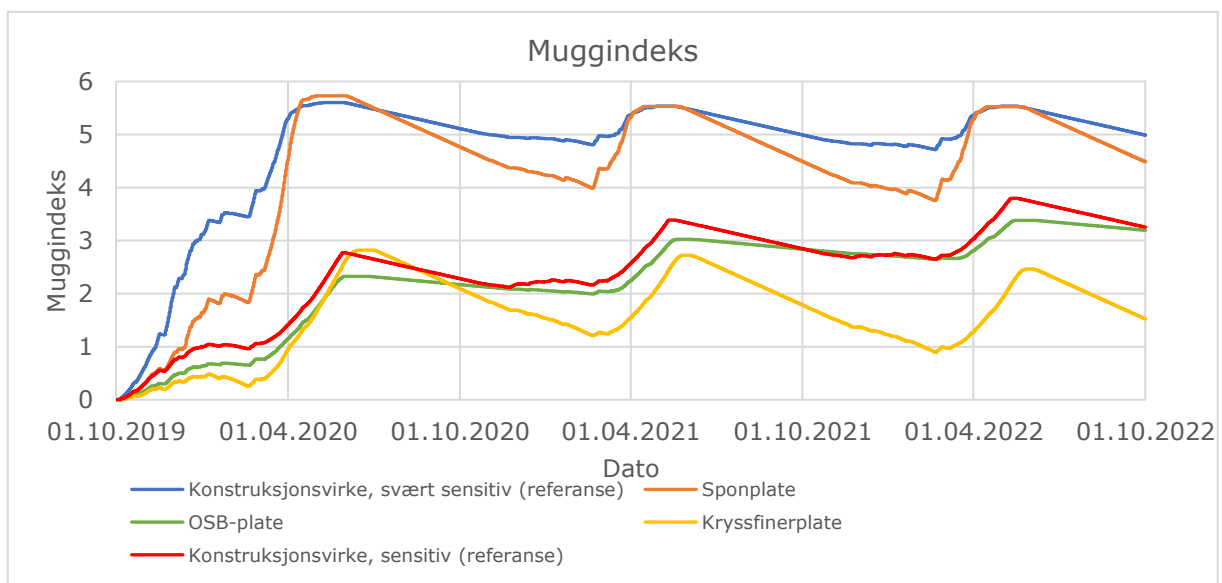
Materiale i kantbjelken – Resultater:

**Tabell 27: Antall kritiske timer ved endring av materiale i kantbjelken**

Kritiske timer hvor...	Konstruksjonsvirke (referanse)	Sponplate		OSB-plate		Kryssfinérplate	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
T > 5 °C og RF > 80 %	6954	6926	-0,4 %	8125	+16,8 %	8191	+17,8 %
T > 5 °C og RF > 90 %	5500	4503	-18,4 %	4680	-14,9 %	5515	+0,3 %
T > 5 °C og RF > 95 %	4554	3480	-23,6 %	0	-100 %	4457	-2,1 %



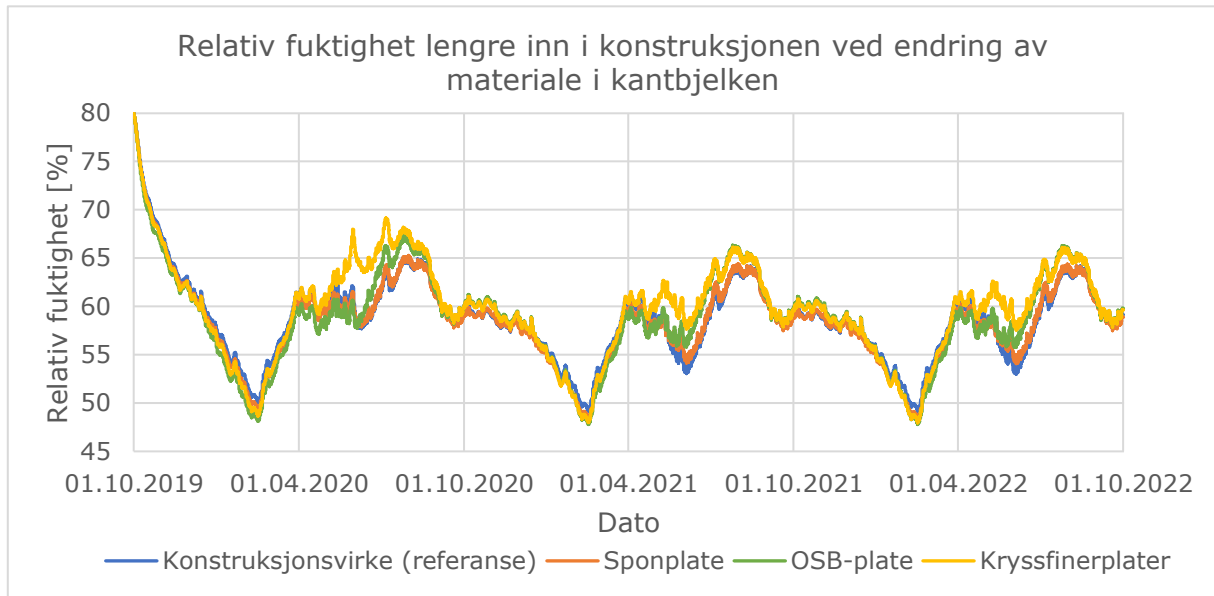
**Figur 47: Relativ fuktighet i kantbjelken ved endring av materiale i kantbjelken**



**Figur 48: Muggindeks for kantbjelken ved endring av materiale i kantbjelken**

**Tabell 28: Høyeste verdier for muggindeks ved endring av materiale i kantbjelken**

	Konstruksjonsvirke (referanse)		Sponplate	OSB-plate	Kryssfinérplate
	Svært sensitiv	Sensitivt			
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,73	2,33	2,82
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,53	3,02	2,72
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,53	3,38	2,46



**Figur 49: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved endring av materiale i kantbjelken**

Fra den relative fuktigheten i kantbjelken sees det at simuleringene med endrede kantbjelker gir en liten endring i fuktmønsteret. De ulike kantbjelkene gir en noe tregere oppfukning om høsten/vinteren slik at toppunktet nås senere. Uttørkingen på sommeren skjer raskt i alle tilfeller, men noe senere for kryssfinérplaten og OSB-platen. Det observeres også at OSB-platen ikke når en relativ fuktighet på over 95 %. For antallet kritiske timer er det en stor nedgang i antall timer med relativ fuktighet større enn 90 % og 95 % for både sponplaten og OSB-platen. Denne reduksjonen er ikke til stede for kryssfinérplaten som har en stor økning i antall timer med relativ fuktighet større enn 80 %.

I diagrammet over muggindeks observeres det at sponplaten har en svært lik kurve som for det svært sensitive materialet i referansesituasjonen, men med lavere verdier på våren. OSB-platen følger samme mønster som referansesituasjonen med sensitivt materiale og stiger hvert år. Kryssfinérplaten som kantbjelke gir et akseptabelt nivå på muggindeksen det første året. Toppunktet til muggindeksen er noe lavere de kommende årene, noe som gir at bruken av kryssfinérplater gir et akseptabelt nivå for muggvekst.

## 4.10 Byggfukt

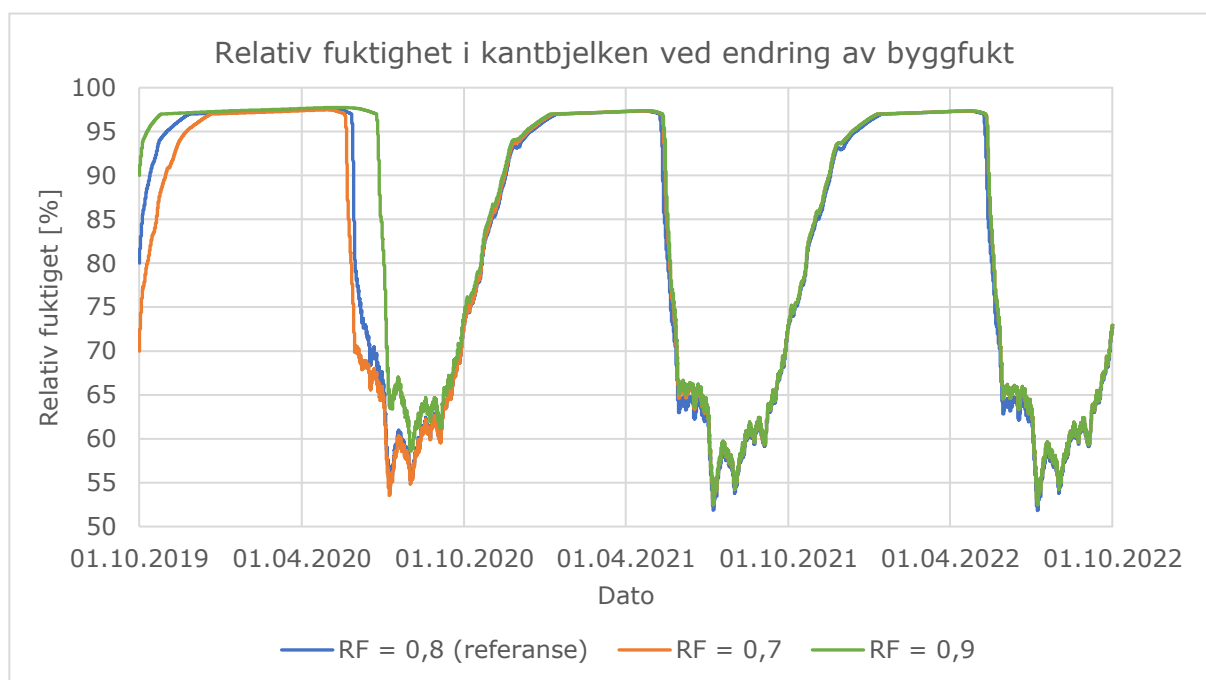
Byggfukt er den initielle fuktigheten som finnes i materialene når de installeres i konstruksjonen. Denne fuktigheten må avgis for at materialene skal komme i fuktlikevekt med omgivelsene når konstruksjonen er i normal bruk (Geving og Thue, 2002). Mengden byggfukt som finnes i materialene vil kunne ha påvirkning for fuktforholdene i kantbjelken. Det er derfor interessant å undersøke trebjelkelaget med ulike mengder av byggfukt.

I simuleringene er det valgt å undersøke konstruksjonen med tre ulike nivåer av byggfukt. Disse tre situasjonene er en relativ fuktighet på 70, 80 og 90 % i et utvalg av materialene i konstruksjonen, hvorav 80 % tilsvarer referansesituasjonen. I modelleringen er den relative fuktigheten i alt av konstruksjonsvirke justert. I tillegg er byggfukt i undergulvet og isolasjonen justert. Et økt nivå av byggfukt i isolasjonen er ment å simulere byggfukten i trebjelkelaget. Dette kan ikke gjøres direkte da selve bjelkene ikke er en del av modellen.

### Byggfukt – Resultater:

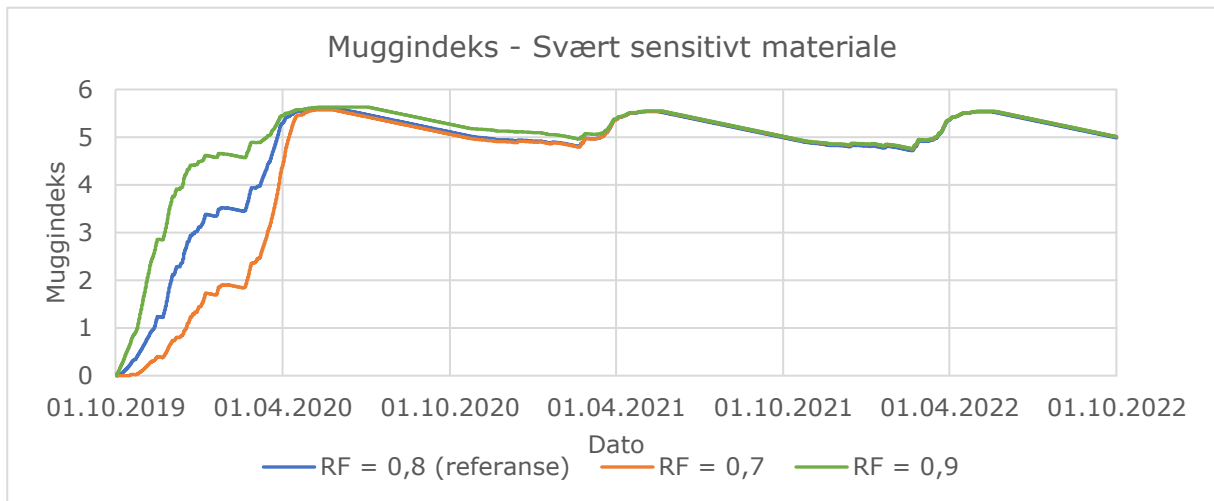
**Tabell 29: Antall kritiske timer ved endring av byggfukt**

Kritiske timer hvor...	RF = 0,8 (referanse)	RF = 0,7		RF = 0,9	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
T > 5 °C og RF > 80 %	6954	6725	-3,3 %	7901	+13,6 %
T > 5 °C og RF > 90 %	5500	5090	-7,5 %	6685	+21,5 %
T > 5 °C og RF > 95 %	4554	4357	-4,3 %	5950	+30,7 %

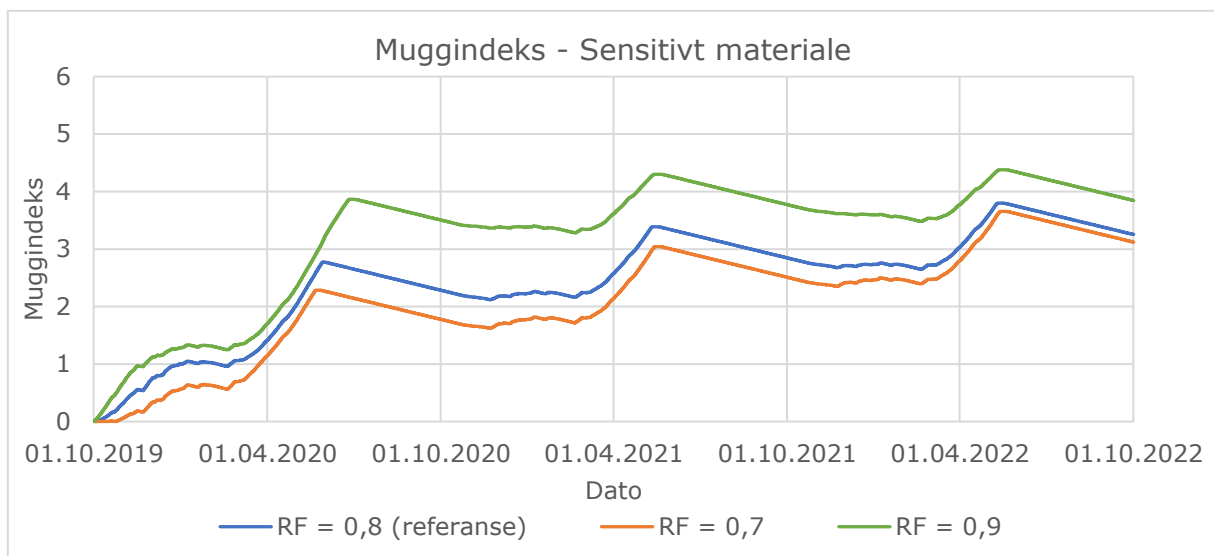


**Figur 50: Relativ fuktighet i kantbjelken ved endring av byggfukt**





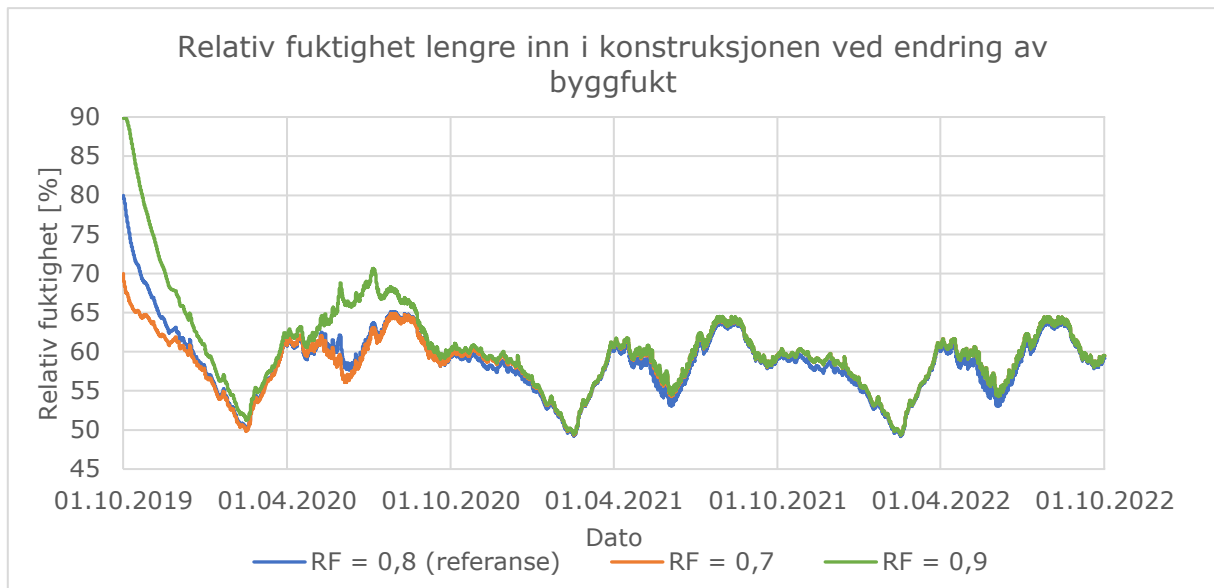
**Figur 51: Muggindeks for kantbjelken ved endring av byggfukt med svært sensitivt materiale**



**Figur 52: Muggindeks for kantbjelken ved endring av byggfukt med sensitivt materiale**

**Tabell 30: Høyeste verdier for muggindeks ved endring av byggfukt**

	RF = 0,8 (referanse)		RF = 0,7		RF = 0,9	
	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,57	2,28	5,63	3,86
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,55	3,04	5,55	4,30
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,55	3,66	5,55	4,38



**Figur 53: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved endring av byggfukt**

For antallet kritiske timer observeres det at med byggfukt på 70 % går disse noe ned. Ved byggfukt på 90 % går antallet kritiske timer opp. Det kan sees at økningen ved 90 % er høyere enn nedgangen ved 70 %. Fra kurvene for relativ fuktighet i kantbjelken sees det at de største forskjellene som forekommer opptrer det første året. Her observeres det en noe lengre periode med høy relativ fuktighet for byggfukt på 90 %. Lengre inn i konstruksjonen har den relative fuktigheten et høyere nivå den første sommeren, ellers følges samme mønster for alle situasjonene.

Muggindeksen for svært sensitivt materiale følger den samme kurven for alle situasjonene. De eneste forskjellene er en raskere økning for byggfukt på 90 % og en noe senere økning for byggfukt på 70 %. Videre er verdiene helt like. For det sensitive materiale kan det sees en større forskjell mellom situasjonene. Muggindeksen følger samme mønster i alle situasjonene, men er forskjøvet. Byggfukt på 70 % har noe lavere verdier enn i referansesituasjonen, mens byggfukt på 90 % har høyere verdier. Det sees at som for de kritiske timene er økningen fra referansesituasjonen til byggfukt på 90 % høyere enn nedgangen fra referansesituasjon til byggfukt på 70 %. Muggindeksen stiger fortsatt for alle situasjonene. Byggfukt på 70 % gir et akseptabelt nivå kun det første året. Det observeres også at forskjellen mellom toppunktene blir mindre for hvert år som går.

## 4.11 Bjelkelagshøyde

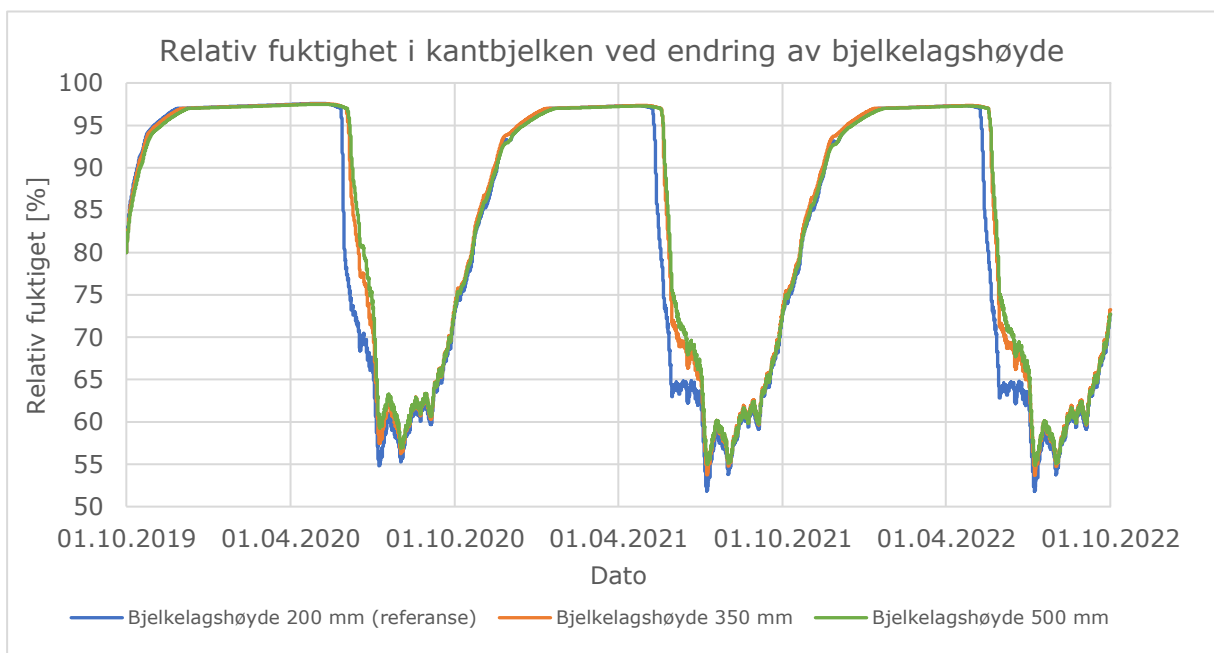
Høyden til trebjelkelaget kan variere på grunn av flere faktorer. Nødvendig bjelkelagshøyde kan bestemmes av krav til isolasjonsmengde eller av hensyn til lastene som skal bæres. Den maksimale bjelkelagshøyden ved bruk av konstruksjonsvirke er 223 mm. Dersom ytterligere høyde på bjelkelaget skal benyttes må sammenlimte bjelkeprofiler, I-profiler eller fagverksbjelker tas i bruk (SINTEF, 2011). Ulike bjelkelagshøyder vil gi ulike avstander mellom kantbjelken og overflatene i himling og gulv, noe som kan gi forandrede fuktforhold utover mot kantbjelken.

I simuleringene er det modellert med bjelkelagshøydene 200 mm, 350 mm og 500 mm. 200 mm er referansesituasjonen. De ulike bjelkelagshøydene er modellert i WUFI-2D ved å endre høyden til isolasjonslaget mellom etasjene. Med dette fører også at kantbjelken i modellen blir høyere. Det er valgt å beholde samme materiale (konstruksjonsvirke) for kantbjelken, til tross for at denne blir like høy som bjelkelaget. I realiteten ville kantbjelken ha vært et plateprodukt eller flere bjelker satt over hverandre i dette tilfellet, men det er valgt å ikke endre denne for å ikke innføre enda en parameterendring i simuleringen.

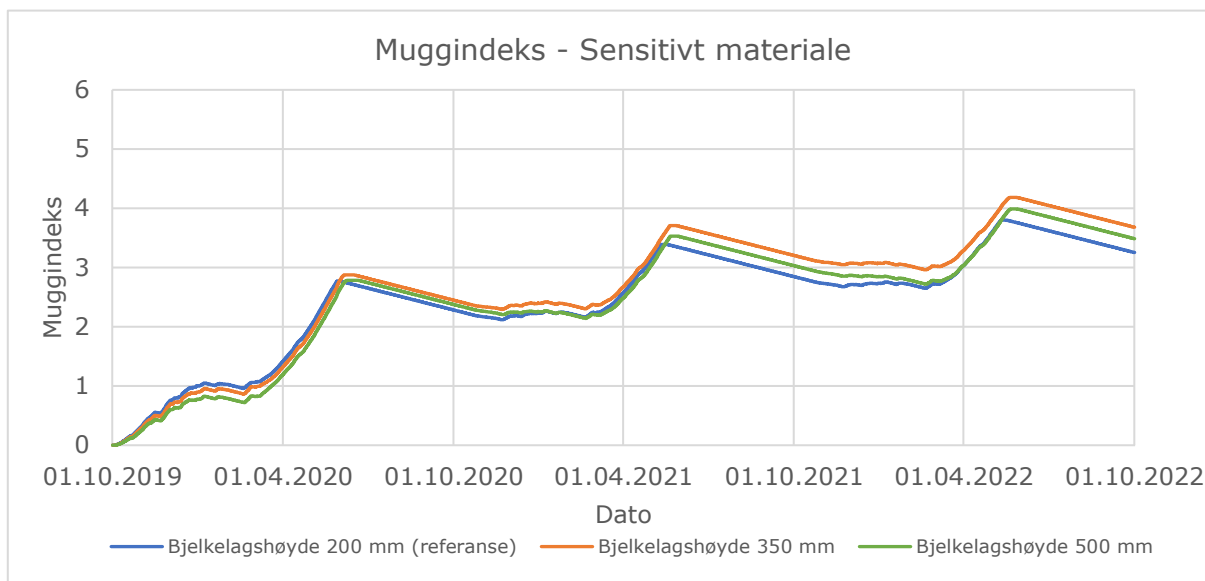
### Bjelkelagshøyde – Resultater:

**Tabell 31: Antall kritiske timer ved endring av bjelkelagshøyde**

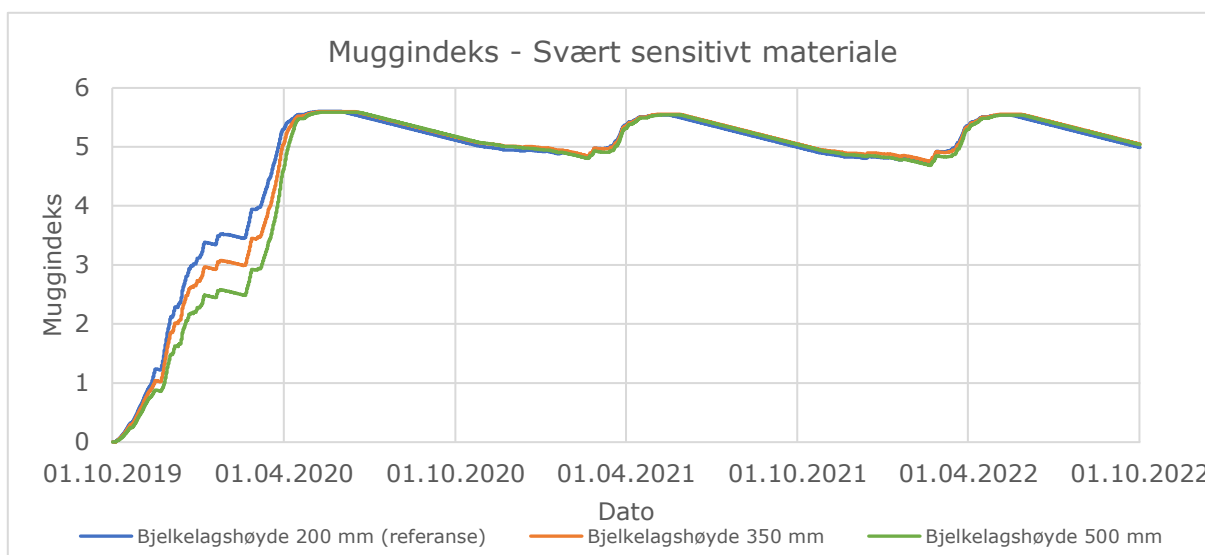
Kritiske timer hvor...	Bjelkelags- høyde 200 mm (referanse)	Bjelkelagshøyde 350 mm		Bjelkelagshøyde 500 mm	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 80 %</b>	6954	7429	+6,8 %	7975	+14,7 %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 90 %</b>	5500	5849	+6,3 %	5726	+4,1 %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 95 %</b>	4554	4997	+9,7 %	4769	+4,7 %



**Figur 54: Relativ fuktighet i kantbjelken ved endring av bjelkelagshøyde**



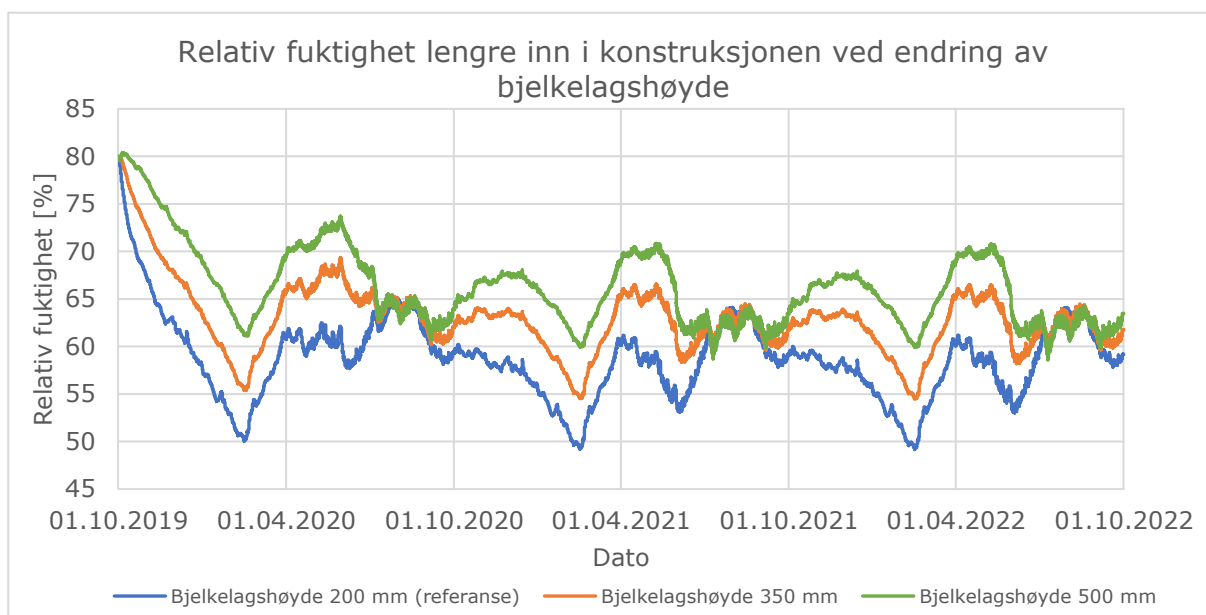
**Figur 55: Muggindeks for kantbjelken ved endring av bjelkelagshøyde med svært sensitivt materiale**



**Figur 56: Muggindeks for kantbjelken ved endring av bjelkelagshøyde med sensitivt materiale**

**Tabell 32: Høyeste verdier for muggindeks ved endring av bjelkelagshøyde**

	Bjelkelags- høyde 200 mm (referanse)		Bjelkelags- høyde 350 mm		Bjelkelags- høyde 500 mm	
	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,60	2,88	5,59	2,79
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,55	3,71	5,54	3,53
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,55	4,18	5,54	3,99



**Figur 57: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved endring av bjelkelagshøyde**

Det observeres at økt bjelkelagshøyde gir et økt antall med kritiske timer. Det kan sees at en bjelkelagshøyde på 500 mm gir en størst økning på timer hvor den relative fuktigheten er over 80 %, mens bjelkelagshøyde på 350 mm gir en større økning på timer hvor den relative fuktigheten er over 90 % og 95 %.

For muggindeksen med svært sensitivt materiale er det et annerledes forløp det første året. Her gir økt bjelkelagshøyde en tregere økning i muggindeks. Allerede etter seks måneder er muggindeksen for alle tilfellene oppe på over 5,5 og følger det samme forløpet videre. For det sensitive materialet følger alle situasjonene det samme forløp, men med noe forskjellige verdier. Først er de på et akseptabelt nivå og deretter følger en jevn stigning hvert år. Det sees at det er bjelkelagshøyde på 350 mm som har de høyeste toppene.

Lengre inn i konstruksjonen er forskjellen mellom de relative fuktighetene større. Dette er naturlig da disse punktene i hver simulering vil ligge på en ulik plassering mellom ute- og inneklimate.

## 4.12 Vegglykkelse

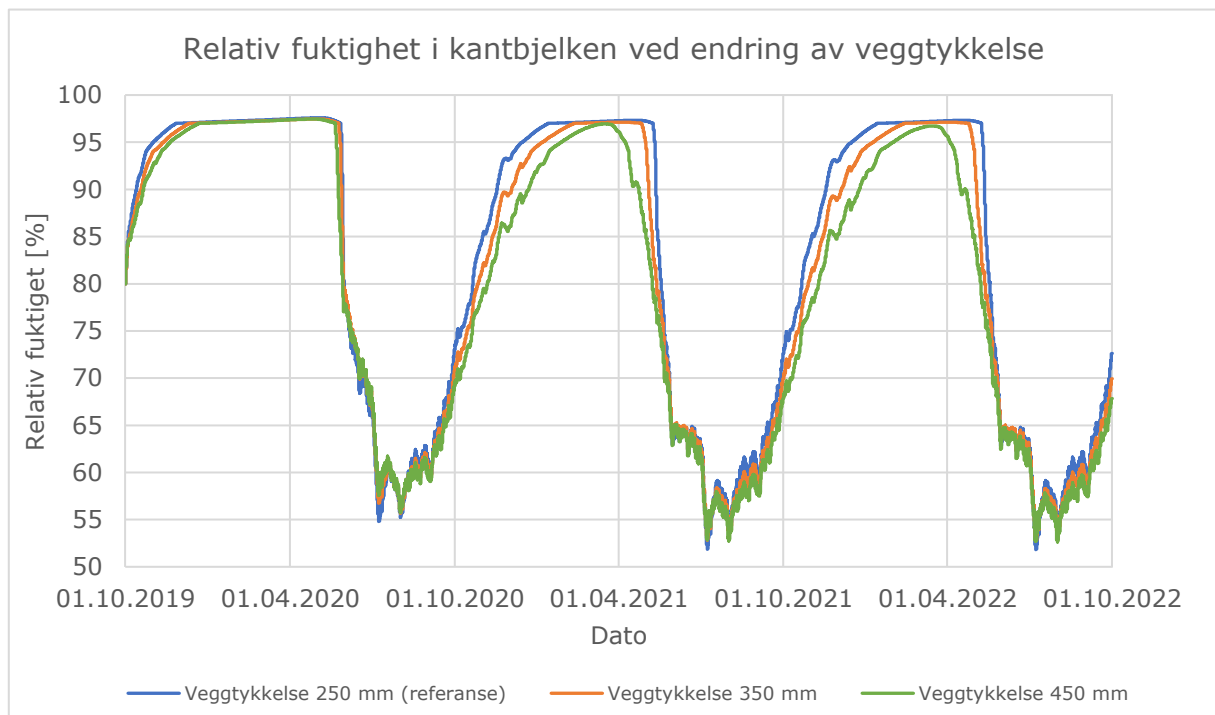
Vegglykkelsen som benyttes avhenger i stor grad av hvilke ambisjoner som er ønskelig for veggens varmeisolering. Ulike vegglykkelser vil gi ulike fuktforutsetninger for kantbjelken, da en større mengde isolasjon vil gi lavere temperaturer og potensielt endrede fuktforhold i overgangen mellom trebjelkelaget og ytterveggen.

Økningen av vegglykkelsen modelleres i WUFI-2D ved å øke tykkelsen til isolasjonen i vegg. Vegglykkelsen er modellert som 250 mm, 350 mm og 450 mm, hvorav 250 mm tilsvarer referansesituasjonen. For WUFI-modellen må også dimensjonen til bunn- og toppsvillen økes når vegglykkelsen øker. For å ikke endre på ytterligere parametere er dimensjonene til disse endret uten å endre hva slags type materialet som benyttes. Dette betyr at det i modellen benyttes bunn- og toppsviller med samme bredde som tykkelsen til vegg.

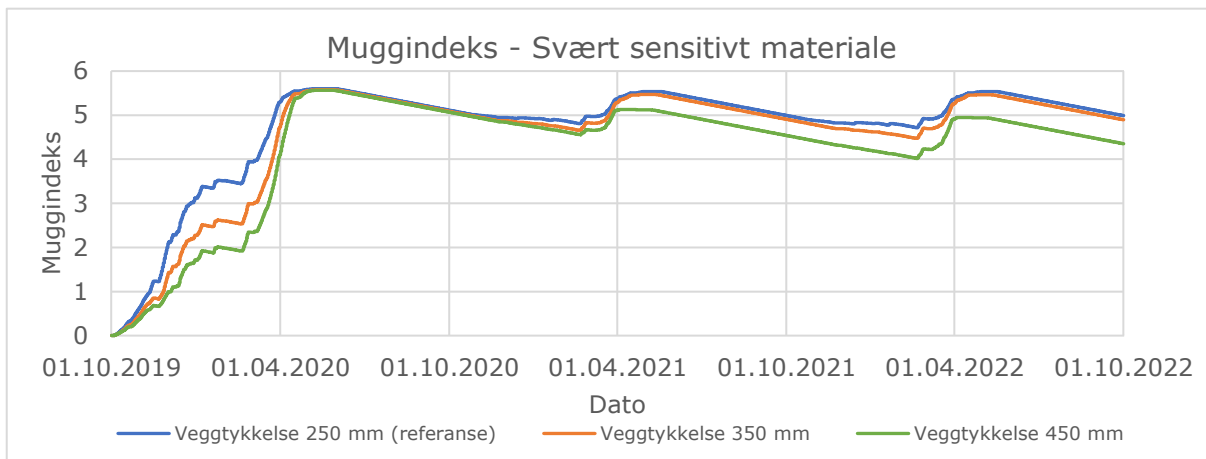
### Vegglykkelse – Resultater:

**Tabell 33: Antall kritiske timer ved endring av vegglykkelse**

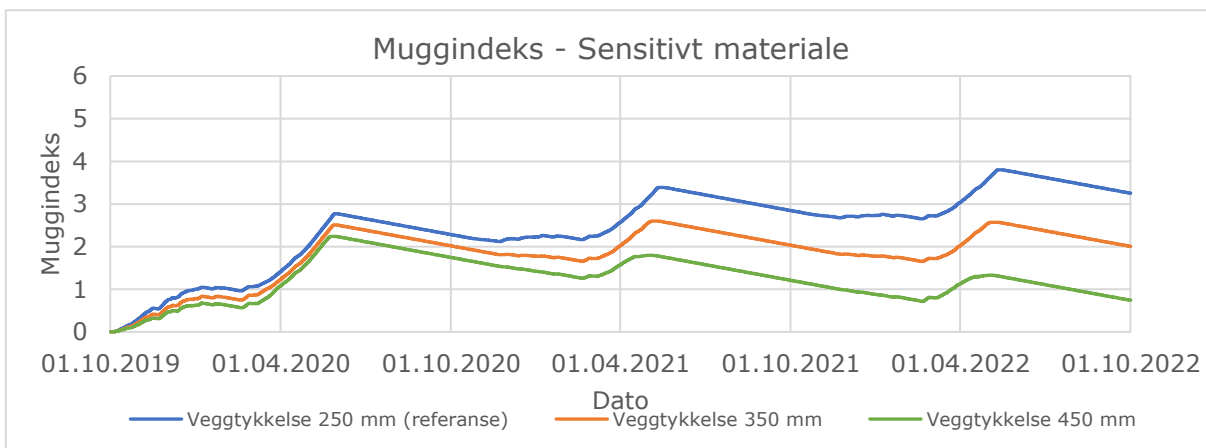
Kritiske timer hvor...	Vegglykkelse 250 mm (referanse)	Vegglykkelse 350 mm		Vegglykkelse 500 mm	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
T > 5 °C og RF > 80 %	6954	6051	-13,0 %	5112	-26,5 %
T > 5 °C og RF > 90 %	5500	4266	-22,4 %	3263	-40,7 %
T > 5 °C og RF > 95 %	4554	3850	-21,4 %	2299	-49,5 %



**Figur 58: Relativ fuktighet i kantbjelken ved endring av vegglykkelse**



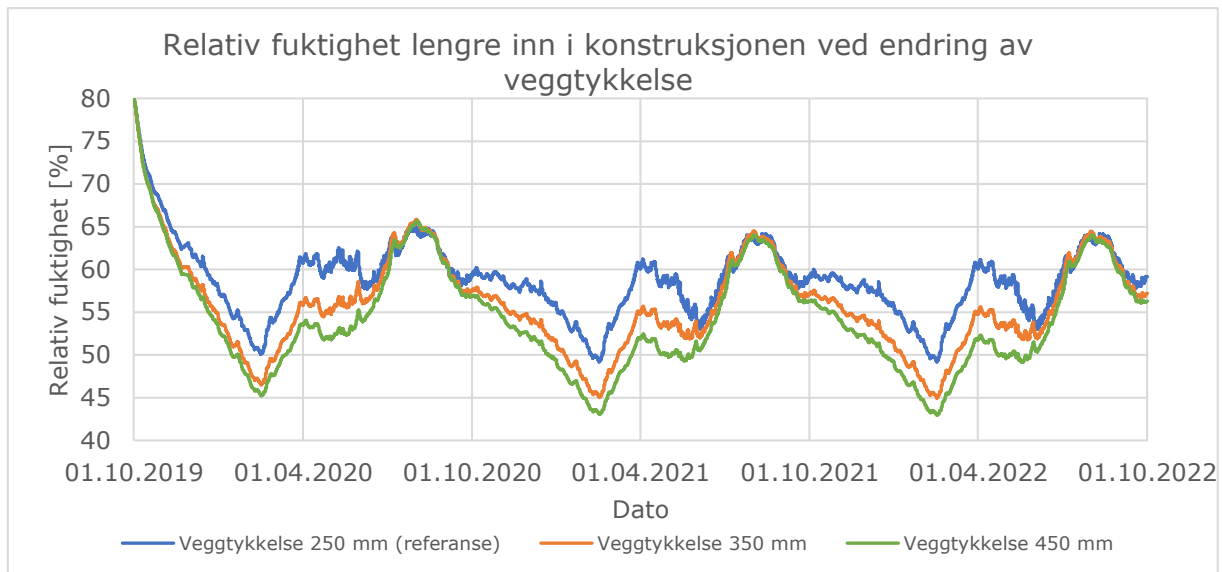
**Figur 59: Muggindeks for kantbjelken ved endring av veggtykkelse med svært sensitivt materiale**



**Figur 60: Muggindeks for kantbjelken ved endring av veggtykkelse med sensitivt materiale**

**Tabell 34: Høyeste verdier for muggindeks ved endring av veggtykkelse**

	Veggtykkelse 250 mm (referanse)		Veggtykkelse 350 mm		Veggtykkelse 500 mm	
	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,58	2,51	5,56	2,24
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,47	2,60	5,13	1,79
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,46	2,57	4,95	1,33



**Figur 61: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved endring av veggtykkelse**

Økt veggtykkelse gir en betydelig reduksjon i antall kritiske timer for kantbjelken. Fra resultatene sees det at jo tykkere veggen er, jo færre kritiske timer vil forekomme. Alle situasjonene følger det samme mønsteret for relativ fuktighet i kantbjelken, men med noen forskjeller i den fuktige perioden om vinteren/våren. Økt veggtykkelse gjør at oppfuktingen av kantbjelken tar lengre tid og at perioden med høy relativ fuktighet blir kortere.

Reduksjonen i relativ fuktighet i kantbjelken har konsekvenser for muggindeksen. For det svært sensitive materialet nås det kritiske nivåer det første året for alle situasjonene. For veggtykkelse 450 mm avtar så muggindeksen litt hvert år, noe som ikke er tilfellet for de andre veggtykkelsene. For det sensitive materialet er forskjellene mellom situasjonene mer tydelig. De når alle en muggindeks på 2,5-3 det første året. Deretter skiller situasjonene seg fra hverandre. Der referansesituasjonen øker, så vil veggtykkelse på 350 mm holde seg stabilt gjennom årene. Ved veggtykkelse 450 mm vil perioden med ugunstige betingelser være lang nok til at det blir en reduksjon i muggindeksens toppunkt hvert år. Dette gjør at en veggtykkelse på 450 mm alltid vil være på et akseptabelt nivå for muggindeks.

Lengre inn i konstruksjonen sees det noe forskjell i den relative fuktigheten på sen vinter/vår. Dette skyldes ulike temperaturer i punktet som er undersøkt, da temperaturen vil avhenge av veggtykkelsen.

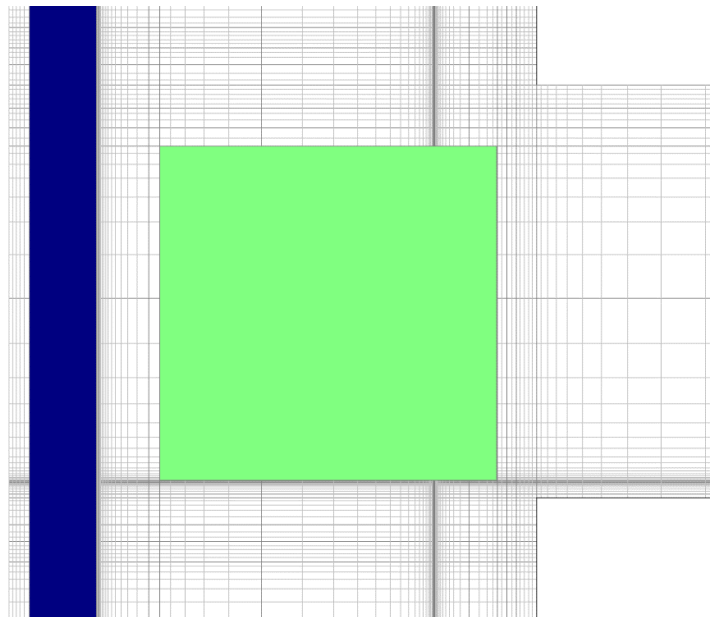


## 4.13 Luftlekkasjer

Som nevnt er overgangen mellom ytterveggen og etasjeskiller i småhus en krevende detalj å få tilstrekkelig lufttett. Dette gjelder spesielt i konstruksjoner der det ikke er en kontinuerlig dampsperre forbi etasjeskilleren. Luftlekkasjer vil kunne føre til en konvektiv fukttransport inn mot kantbjelken, som kan påvirke fuktnivået. Dermed kan luftlekkasjer også bidra til muggvekst.

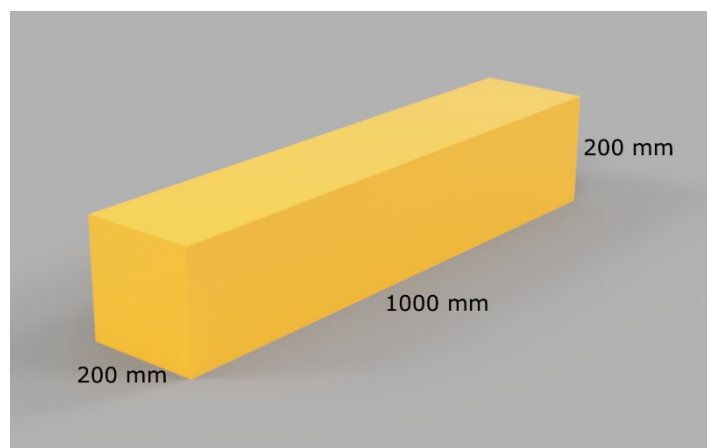
I WUFI-2D modelleres luftlekkasjer ved å legge inn en kilde for luftskifte i modellen. Luftskiftet plasseres på ønsket sted i modellen og ønsket mengde luftlekkasje settes som luftskifte per time ( $\text{h}^{-1}$ ). I tillegg velges det hvilken overflate i modellen som luftskifte skal skje ved. Her velges det at luftlekkasjen skal skje ved den innvendige veggen. Dette vil tilsvare at luft innenfra lekker ut til kantbjelken. Det er antatt at dette er et mer konservativt valg enn å ha luftskifte mot uteluften. Dette er fordi inneluften gjerne inneholder mer fuktighet enn uteluften, noe som er ugunstig for kantbjelken.

I dette tilfellet er det valgt å plassere luftlekkasjen i hele kantisolasjonen. Luftlekkasjene i modellen vil ha en direkte innvirkning på kantbjelken dersom den plasseres her. I realiteten vil en slik luftlekkasje finne sted i hele isolasjonslaget. Det er kun valgt å modellere lekkasjen i kantisolasjonen, da det er luftskifte nærmest kantbjelken som vil ha mest påvirkning på denne. En figur av luftlekkasjen er vist i Figur 62. Her er det lysegrønne feltet luftlekkasjen. Det blå feltet er luftskiftet i luftespalten.



**Figur 62: Luftlekkasje plassert i WUFI-modellen**

Mengden på luftlekkasjene er beregnet ut ifra verdier som er funnet i artikkelen «*The influence of structural floors on the airtightness of wood-frame houses*» (Relander et al., 2010). I denne artikkelen er det utført laborietester for å finne luftlekkasjen til trebjelkelag med flere ulike parametere. Her er det funnet at en etasjeskiller med diskontinuerlig dampsperre og kantisolasjon har en lekkasjeverdi på  $8,76 \text{ m}^3/\text{hm}$ . Denne verdien er fra innsiden av konstruksjonen og utover og ved en trykkforskjell på 50 Pa. Denne verdien for luftlekkasjer kan regnes om til en verdi i luftskifte per time som videre kan benyttes i WUFI-2D.



**Figur 63: Volum av kantisolasjonen som benyttes i omregningen**

Omregningen gjøres ved at det sees på et volum av kantisolasjonen med en meter bredde, slik som er vist i Figur 63. Siden dybden til dette volumet er én meter vil det si at det i timen passerer  $8,76 \text{ m}^3$  med luft gjennom kantisolasjonen. Ifølge Betongelementforeningen (2008) kan mineralull antas å ha en porøsitet på 95 %. Dette gir at luftskifte i kantisolasjonen kan beregnes på følgende måte:

$$V_{kantisolasjon} = 0,2 \text{ m} * 0,2 \text{ m} * 1 \text{ m} = 0,04 \text{ m}^3$$

$$V_{luft} = 0,04 \text{ m}^3 * 0,95 = 0,038 \text{ m}^3$$

$$Luftskifte \text{ i kantisolasjon} = \frac{8,76 \text{ m}^3}{0,038 \text{ m}^3} \approx 231 \text{ h}^{-1}$$

Dette luftskiftet opptrer ved et påsatt overtrykk på 50 Pa. I virkeligheten vil trykkforskjellen mellom inne og ute variere sterkt over døgnet basert på temperatur, ventilasjon og vindforhold. Derfor er det ansett som at et luftskifte på  $231 \text{ h}^{-1}$  vil tilsvare en stor luftlekkasje. Derfor er det ønskelig å skalere denne ned slik at det er muligheter for å simulere ulike størrelser av luftlekkasjen. Dette gjøres ved å nedskalere luftskifte med 50 % og 75 %. Oversikt over luftlekkasjene som er benyttet i simuleringene er vist i Tabell 35.

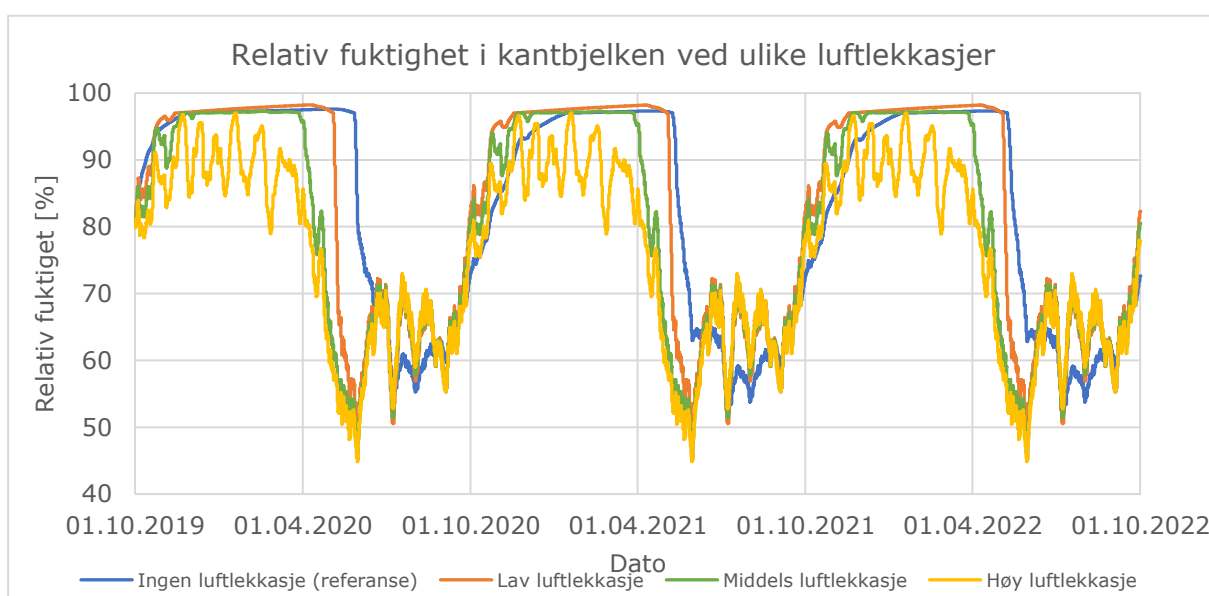
**Tabell 35: Størrelser for luftlekkasjene i simuleringene**

Størrelsen på luftlekkasjen	Verdi
Lav	$58 \text{ h}^{-1}$
Middels	$116 \text{ h}^{-1}$
Høy	$231 \text{ h}^{-1}$

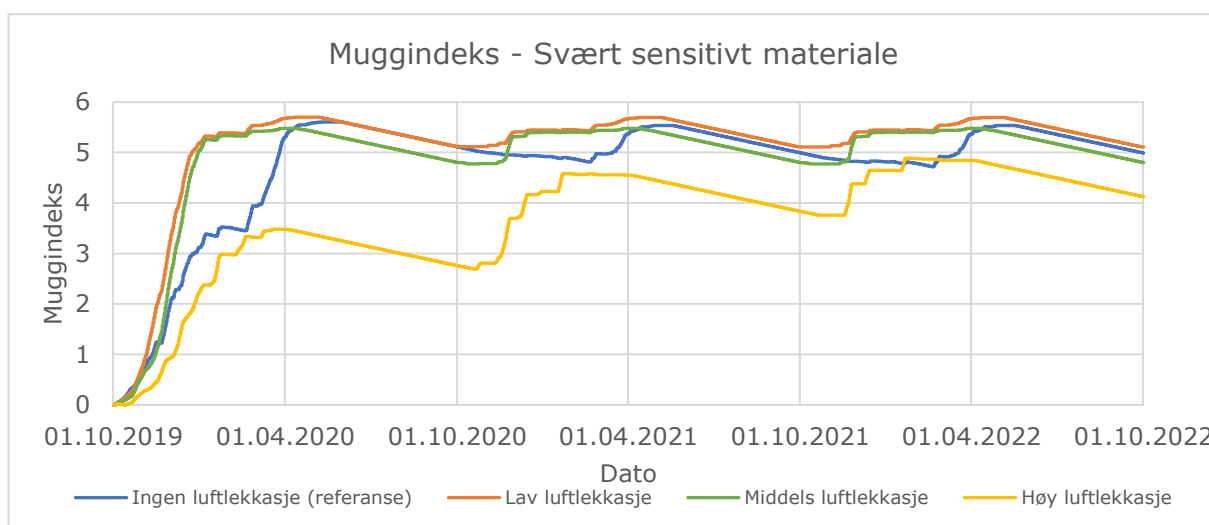
## Luftlekkasjer – Resultater:

**Tabell 36: Antall kritiske timer ved ulike luftlekkasjer**

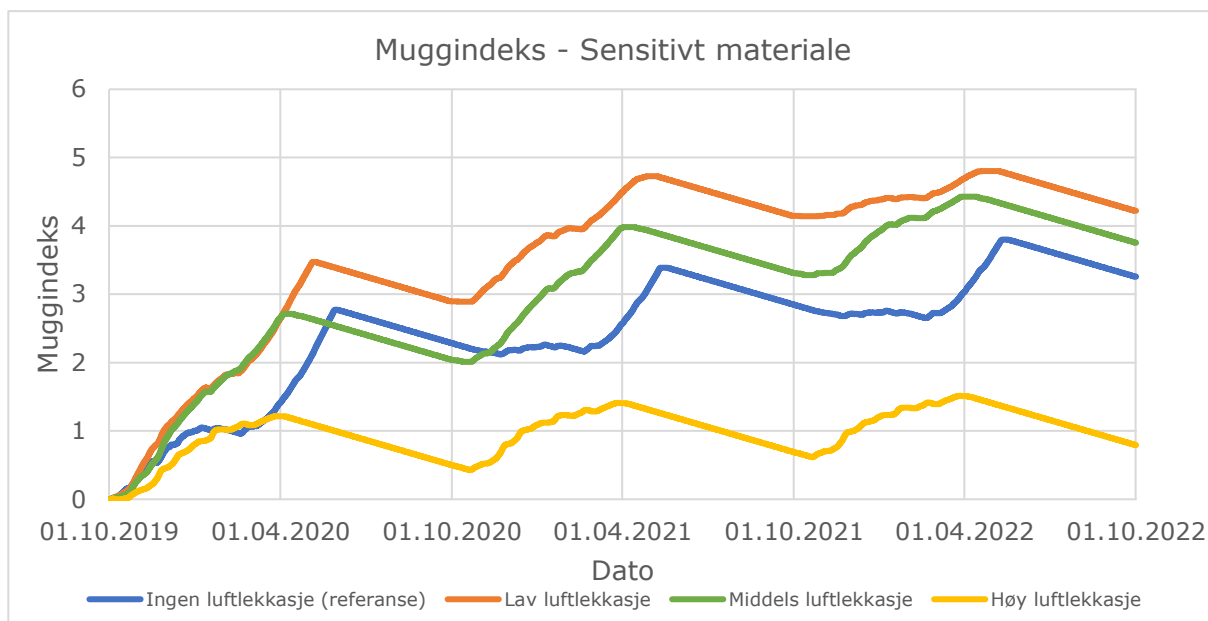
Kritiske timer hvor...	Ingen luftlekkasje (referanse)	Lav		Middels		Høy	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
T > 5 °C og RF > 80 %	6954	11553	+66,1 %	1139 3	+63,9 %	11252	+61,8 %
T > 5 °C og RF > 90 %	5500	9873	+79,5 %	8883	+61,5 %	3350	-39,1 %
T > 5 °C og RF > 95 %	4554	9285	+103,9 %	7223	+58,6 %	958	-79,0 %



**Figur 64: Relativ fuktighet i kantbjelken ved ulike luftlekkasjer**



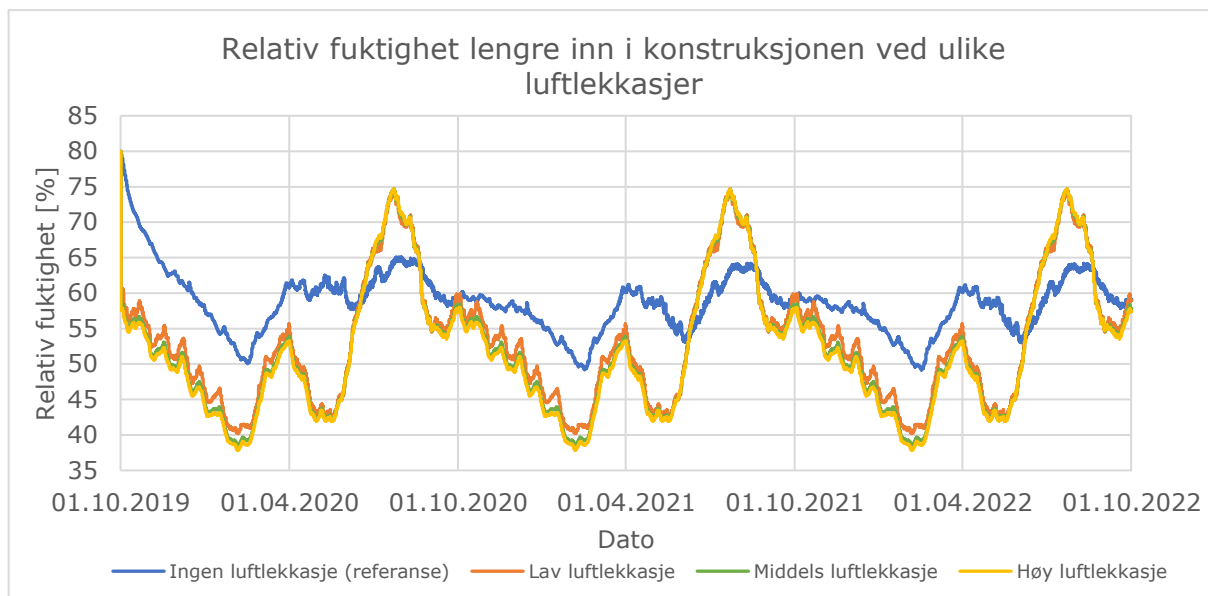
**Figur 65: Muggindeks for kantbjelken ved ulike luftlekkasjer med svært sensitivt materiale**



**Figur 66: Muggindeks for kantbjelken ved ulike luftlekkasjer med sensitivt materiale**

**Tabell 37: Høyeste verdier for muggindeks ved ulike luftlekkasjer**

	Ingen luftlekkasje (referanse)		Lav luftlekkasje		Middels luftlekkasje		Høy luftlekkasje	
	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	5,70	3,47	5,48	2,71	3,48	1,22
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,69	4,73	5,47	3,98	4,58	1,41
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,69	4,80	5,47	4,43	4,89	1,51



**Figur 67: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved ulike luftlekkasjer**

Fra resultatene kan det sees at luftlekkasjene har en stor innvirkning på antall kritiske timer for kantbjelken. Ved både lav og middels luftlekkasje stiger antallet kritiske timer kraftig opp. Den største økningen sees ved den laveste luftlekkasjen. Ved den høye luftlekkasjen er det en økning i antall timer med relativ fuktighet større enn 80 % og en stor nedgang i antall timer med relativ fuktighet større enn 90 % og 95 %. Den relative fuktigheten ved høy luftlekkasje følger ikke det samme mønsteret som for de mindre luftlekkasjene, men har en hurtig variasjon om vinteren. Dataene for den relative fuktigheten til den høye luftlekkasjen kan tyde på at simuleringen har hatt numeriske problemer.

Det økte antallet kritiske timer gir også en økning i muggindeks for den lave og midle luftlekkasjen, for begge materialene. Kritisk nivå nås enda tidligere for det svært sensitive materialet, mens indeksen er forskjøvet oppover for det sensitive materialet. Den høye luftlekkasjen gir en forbedret muggindeks i begge tilfellene grunnet det reduserte antallet kritiske timer med relativ fuktighet større enn 90 % og 95 %. For det sensitive materialet holder den høye muggindeksen seg på et akseptabelt nivå. Som nevnt kan dette skyldes numeriske problemer i beregningen.

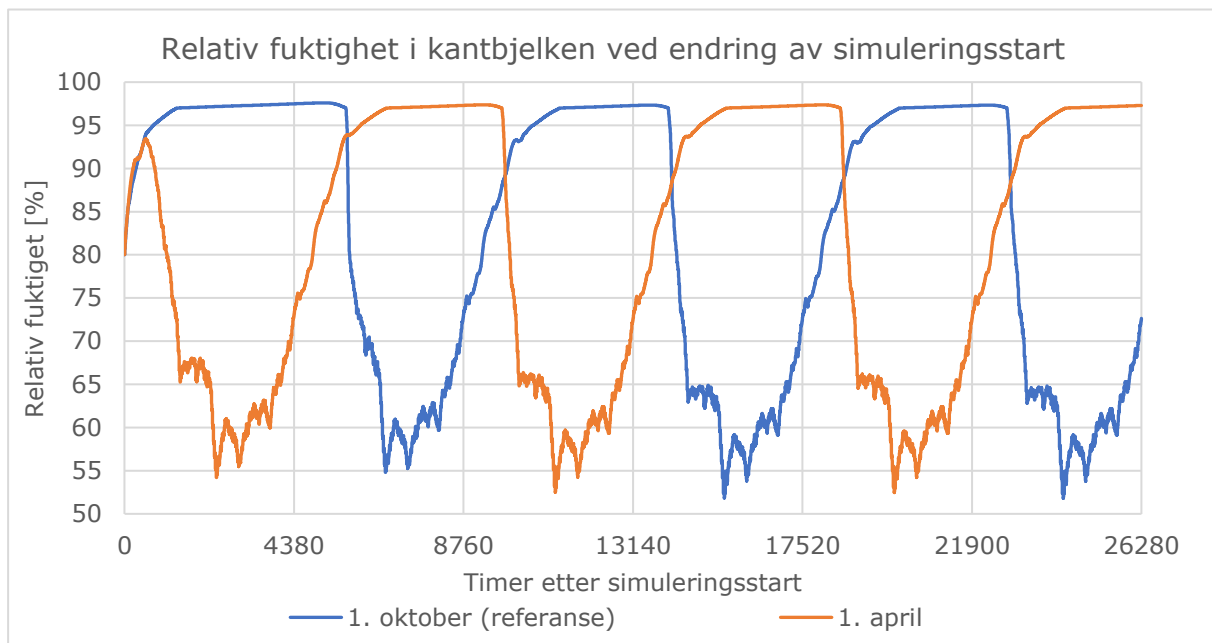
## 4.14 Tidspunkt for simuleringstart

Fuktnivået i kantbjelken kan bli påvirket av hvilket tidspunkt på året konstruksjonen blir lukket. Dette tidspunktet tilsvarer startdatoen for simuleringene. I simuleringene er det som hovedsak benyttet 1. oktober som startdato. Grunnen til dette er at konstruksjonen da går inn i en periode med høyere relativ fuktighet i uteluften, og dermed er det ugunstige forhold for uttørking. Dette er gjort for å være på konservativ side. Dersom simuleringstart settes til 1. april, vil konstruksjonen ha mulighet til uttørking før den fuktige perioden om vinteren. Denne ekstra uttørkingen den første perioden vil kunne være nok til at muggveksten blir redusert. I disse simuleringene er det valgt å undersøke effekten av å flytte starten av simuleringen til den andre halvdel av året. Det er valgt å undersøke et starttidspunkt som er seks måneder tidligere, 1. april 2019.

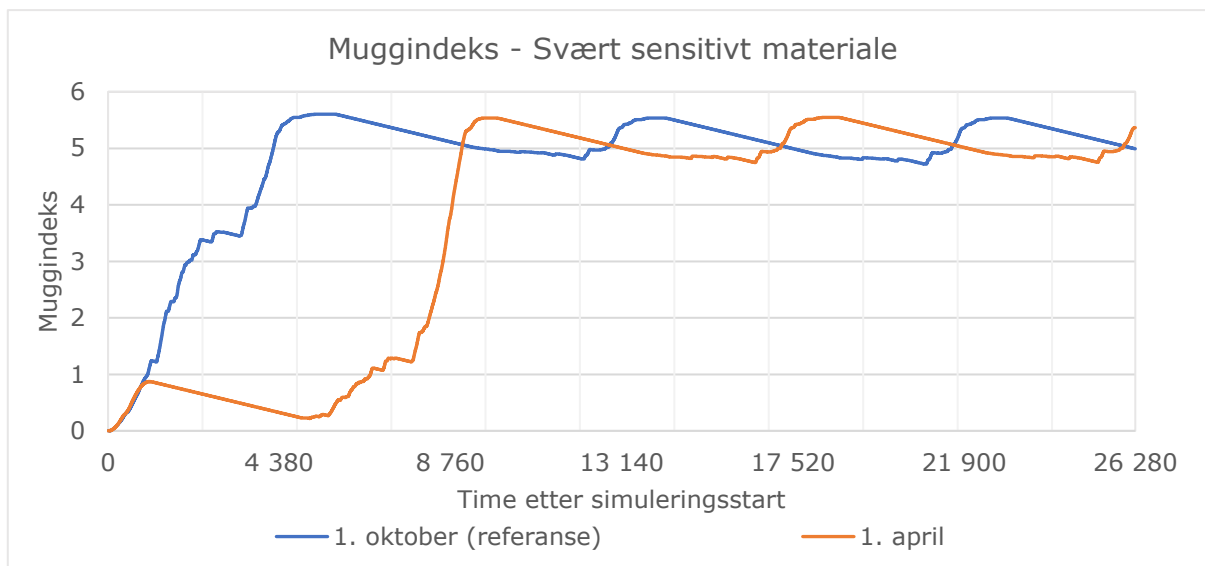
Tidspunkt for simuleringstart – Resultater:

**Tabell 38: Antall kritiske timer ved endring av tidspunkt for simuleringstart**

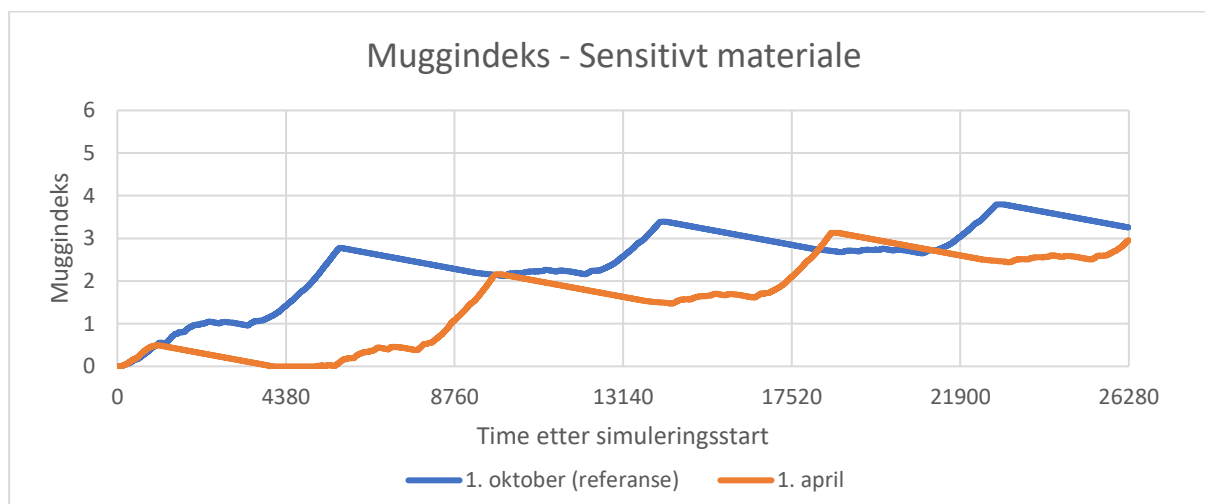
Kritiske timer hvor...	1. oktober (referanse)	1. april	
		Timer	Endring i %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 80 %</b>	6954	6245	-10,2 %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 90 %</b>	5500	4203	-23,6 %
<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 95 %</b>	4554	3023	-33,6 %



**Figur 68: Relativ fuktighet i kantbjelken ved endring av tidspunkt for simuleringstart**



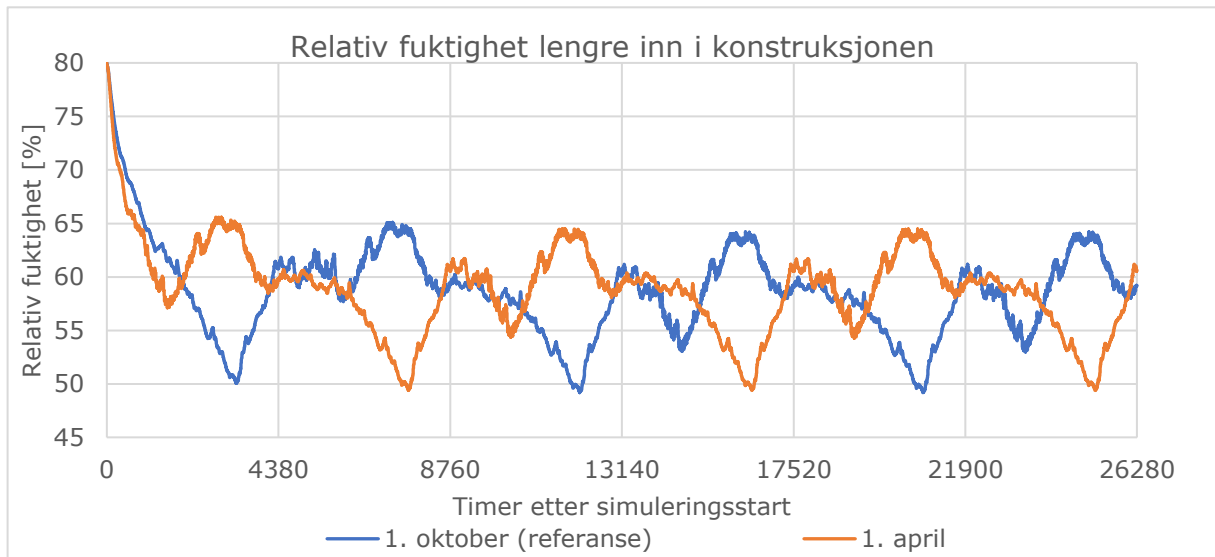
**Figur 69: Muggindeks for kantbjelken ved endring av tidspunkt for simuleringstart, svært sensitivt materiale**



**Figur 70: Muggindeks for kantbjelken ved endring av tidspunkt for simuleringstart, sensitivt materiale**

**Tabell 39: Høyeste verdier for muggindeks ved endring av simuleringstart**

	1. oktober (referanse)		1. april	
	Svært sensitivt	Sensitivt	Svært sensitivt	Sensitivt
<b>Høyeste verdi første år</b>	5,60	2,77	3,80	1,08
<b>Høyeste verdi andre år</b>	5,54	3,39	5,53	2,16
<b>Høyeste verdi tredje år</b>	5,54	3,80	5,55	3,13



**Figur 71: Relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen ved endring av tidspunkt for simuleringstart**

Ved å flytte starten av simuleringen seks måneder tidligere oppnås en reduksjon i antall kritiske timer for kantbjelken. For kantbjelkens relative fuktighet kan det observeres at den etter et halvt år vil følge nøyaktig det samme forløpet som situasjonen med start 1. oktober, men i dette tilfellet er grafen forskjøvet. Årsaken til at antallet kritiske timer har blitt redusert er derfor kun fordi simuleringen avsluttes på et tidspunkt med høy relativ fuktighet. Det er derfor ikke slik at kantbjelken er mindre fuktig i dette tilfellet. Den eneste forskjellen som oppstår mellom tilfellene er de første månedene. Ved start 1. april oppleves en liten økning i relativ fuktighet før uttørkingen om sommeren begynner.

Denne endringen har lite å si for kantbjelkens muggindeks. For det svært sensitive materiale oppleves det en liten økning for start 1. april før den synker i sommermånedene. Så fort den fuktige perioden på vinteren kommer vil muggindeksen stige like raskt som den gjør ved start 1. oktober. Muggindeksen vil også oppleve det samme nivået, en verdi på rundt 5,5. For det sensitive materiale observeres det samme, men med lavere toppunkter. Ved å lukke konstruksjonen på sommeren vil det bare skje en forflytning av når muggindeksen først stiger. Toppunktet til muggindeksen vil forbli det samme.

Det samme sees for den relative fuktigheten lengre inn i konstruksjonen. Her observeres det samme forløpet, bare forskjøvet med seks måneder.



## 4.15 Oppsummering av parameterstudien

Tabell 40: Oppsummering av endring i antall kritiske timer for parameterstudien

Prosentvis endring i antall kritiske timer		T > 5 °C og RF > 80 %	T > 5 °C og RF > 90 %	T > 5 °C og RF > 95 %
<b>Referansesituasjon</b>		6954	5500	4554
<b>Klima</b>	Bergen	98,0 %	77,7 %	60,8 %
	Karasjok	36,4 %	41,6 %	57,0 %
<b>Fuktpåkjening</b>	Lav	-30,3 %	-48,5 %	-60,2 %
	Høy	60,8 %	74,1 %	85,1 %
<b>Damp tetthet vindsperre</b>	S <sub>d</sub> = 0,2	10,3 %	11,1 %	12,2 %
	S <sub>d</sub> = 0,5	9,5 %	9,7 %	13,3 %
<b>Damp tetthet for lufttett sjikt i himling</b>	S <sub>d</sub> = 0,2	0,9 %	-0,5 %	0,3 %
	S <sub>d</sub> = 0,5	-1,6 %	-3,1 %	-3,4 %
<b>Smart dampspærre</b>	Isola	-5,3 %	-10,7 %	-13,8 %
	SIGA	-5,3 %	-10,9 %	-14,6 %
<b>Bruk av trefiberisolasjon</b>	Som kantisolasjon	-5,1 %	-20,6 %	-24,7 %
	I hele bjelkelaget + kantisolasjon	-7,7 %	-23,7 %	-31,0 %
<b>Type undergulv</b>	OSB-plater	1,5 %	1,5 %	4,4 %
	Kryssfinérplater	4,0 %	4,5 %	6,7 %
<b>Type kantbjelke</b>	Sponplate	-0,4 %	-18,4 %	-23,6 %
	OSB-plate	16,8 %	-14,9 %	-100 %
	Kryssfinérplate	17,8 %	0,3 %	-2,1 %
<b>Byggfukt</b>	RF = 0,7	-3,3 %	-7,5 %	-4,3 %
	RF = 0,9	13,6 %	21,5 %	30,7 %
<b>Bjelkelagshøyde</b>	350 mm	6,8 %	6,3 %	9,7 %
	500 mm	14,7 %	4,1 %	4,7 %
<b>Veggtykkelse</b>	350 mm	-13,0 %	-22,4 %	-21,4 %
	450 mm	-26,5 %	-40,7 %	-49,5 %
<b>Luftlekkasjer</b>	Lav	66,1 %	79,5 %	103,9 %
	Middels	63,9 %	61,5 %	58,6 %
	Høy (numeriske problemer)	61,8 %	-39,1 %	-79,0 %
<b>Simuleringsstart</b>	1. april	-10,2 %	-23,6 %	-33,6 %

I Tabell 40 er cellene med økning i antall kritiske timer markert med rødt og cellene med en nedgang markert med grønn.

Tabell 41: Oppsummering av muggindeks for parameterstudien

Høyeste verdi for muggindeks det tredje året		Svært sensitivt materiale	Sensitivt materiale
Referansesituasjon		5,54 (stabil)	3,80 (+)
Klima	Bergen	5,50 (stabil)	4,47 (+)
	Karasjok	5,64 (+)	4,78 (+)
Fuktpåkjenning	Lav	4,83 (-)	1,13 (-)
	Høy	5,60 (stabil)	4,75 (stabil)
Damptetthet vindsperre	$S_d = 0,2$	5,54 (stabil)	4,15 (+)
	$S_d = 0,5$	5,56 (stabil)	4,22 (+)
Damptetthet for lufttett sjikt i himling	$S_d = 0,2$	5,53 (stabil)	3,77 (+)
	$S_d = 0,5$	5,51 (stabil)	3,56 (+)
Smart dampsperre	Isola	5,46 (stabil)	3,04 (stabil)
	SIGA	5,45 (stabil)	2,98 (stabil)
Bruk av trefiberisolasjon	Som kantisolasjon	5,46 (stabil)	2,41 (stabil)
	I hele bjelkelaget + kantisolasjon	5,45 (stabil)	2,18 (stabil)
Type undergulv	OSB-plater	5,54 (stabil)	3,93 (+)
	Kryssfinérplater	5,55 (stabil)	4,06 (+)
Type kantbjelke (Korrekt materiale benyttet, se Kap. 4.9)	Sponplate	5,53 (stabil)	
	OSB-plate	3,38 (+)	
	Kryssfinérplate	2,46 (-)	
Byggfukt	RF = 0,7	5,55 (stabil)	3,66 (+)
	RF = 0,9	5,55 (stabil)	4,38 (+)
Bjelkelagshøyde	350 mm	5,55 (stabil)	4,18 (+)
	500 mm	5,54 (stabil)	3,99 (+)
Veggykkelse	350 mm	5,46 (stabil)	2,57 (stabil)
	450 mm	4,95 (-)	1,33 (-)
Luftlekkasjer	Lav	5,69 (stabil)	4,80 (+)
	Middels	5,47 (stabil)	4,43 (+)
	Høy (numeriske problemer)	4,89 (+)	1,51 (stabil)
Simuleringsstart	1. april	5,45 (stabil)	3,13 (+)


Tabell 41 viser en oversikt over parameterendringenes muggindeks etter tre år. Etter det tredje året ansees konstruksjonen å være i fuktlikevekt med omgivelsene. Derfor er det denne muggindeksen som gir den beste indikasjonen for hvordan konstruksjonen vil være etter flere år.


Forklaring til Tabell 41:


(stabil) – Muggindeksen er stabilt på dette nivået. Muggindeksen ansees som stabil når forskjellen mellom høyeste verdi andre og tredje år er mindre enn 0,1.


(+) – Muggindeksen er stigende.

(-) – Muggindeksen er synkende.

 - Parameterendringen gjør situasjonen verre / Parameterendringen gir ingen endring i muggindeks.

 - Parameteren gjør at situasjonen er på et akseptabelt nivå.

 - Parameteren gir en lavere muggindeks, men situasjonen er fortsatt kritisk eller vil utvikle seg til å bli kritisk.

 - Parameteren gir en lavere muggindeks som er fortsatt er kritisk, men vil utvikle seg til et akseptabelt nivå.



## 5 Tiltaksanalyse

I denne delen av oppgaven vil det bli undersøkt om mulige tiltak vil ha en effekt for å oppnå endrede fukttilstander i kantbjelken. Slik det ble observert i parameterstudien er kantbjelken en svært utsatt del av konstruksjonen med tanke på muggvekst. Det er mulig at risikoen for dette kan reduseres ved å gjøre enkle tiltak i byggefasen.

Tiltakene som utføres er presentert i Kap. 5.2. Disse tiltakene utføres på fire ulike situasjoner, hvorav én er referansesituasjonen fra parameterstudien. De ulike situasjonene vil bli presentert sammen med resultater med og uten de ulike tiltakene som undersøkes. Dette vil bli presentert på den samme måten som resultatene fra parameterstudien. Data for relativ fuktighet i kantbjelken og kantbjelkens muggindeks ved bruk av svært sensitivt og sensitivt materiale vil bli vist grafisk for enkel sammenligning. I stedet for å presentere resultater for relativ fuktighet lengre inn i konstruksjonen er det her presentert resultater for den relative fuktigheten på innsiden av det vertikale sperresjiktet. Dette for å undersøke om det er risiko for kondens her. Kurver for temperatur og relativ fuktighet, samt kantbjelkens fuktinnhold i vekt-% er vist i Vedlegg 2.

En oppsummering av resultatene fra tiltaksanalysen kan finnes i Kap. 5.7.

### 5.1 Situasjoner i tiltaksanalysen

Tiltakene som undersøkes vil utføres på flere ulike situasjoner. Hensikten med dette er å se hvordan tiltakene fungerer når den benyttes på konstruksjoner med ulike forutsetninger for å ha en risiko for muggvekst i kantbjelken. Selv om tiltakene fungerer godt på en konstruksjon hvor risikoen for muggvekst i kantbjelken er svært høy, er det ikke nødvendigvis slik at denne løsningen har noen effekt på mindre utsatte konstruksjoner. Det er effekten av dette som undersøkes ved å se på forskjellige situasjoner. Situasjonene som undersøkes er presentert under:

#### Situasjon A:

Situasjon A tilsvare referansesituasjonen i parameterstudien. Som det ble sett her vil det forekomme muggvekst i dette tilfelle for både svært sensitivt og sensitivt materiale.

#### Situasjon B:

Situasjon B tilsvare en kombinasjon av ugunstige parametere. I denne situasjonen er det valgt å kombinere en høy fuktpåkjønning med bruk av sponplate som kantbjelke. I tillegg er klimastedet for simuleringen flyttet til Bergen. Siden dette er en kombinasjon av ugunstige parameter er det sannsynlig at denne konstruksjonen vil prestere svært dårlig med tanke på muggvekst på kantbjelken.

#### Situasjon C:

Denne situasjonen er en kombinasjon av parametere som bidrar til et mindre antall kritiske timer for kantbjelken. Det er derfor naturlig at denne situasjonen med stor sannsynlighet vil ha lav risiko for muggvekst på kantbjelken. I denne situasjonen er det benyttet smart dampspærre i himling («*Isola DuPont AirGuard Smart*»), trefiberisolasjon som kantisolasjon og en lav innvendig fuktpåkjønning.

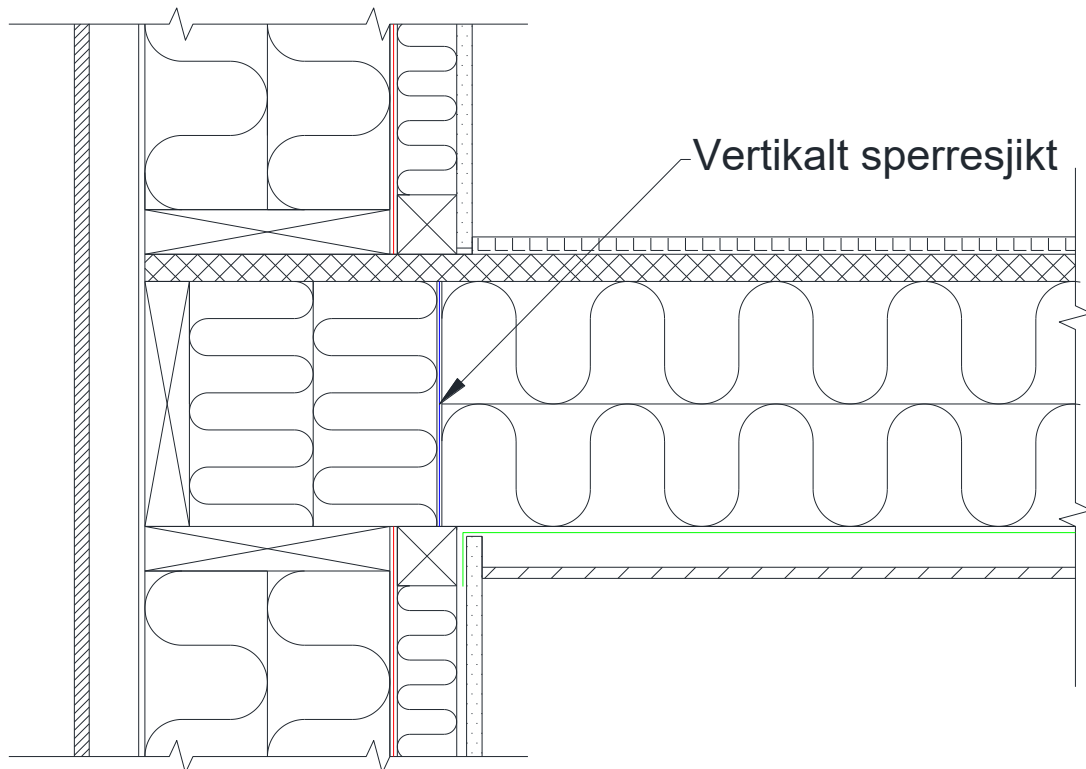
### Situasjon D:

Situasjon D er tilsvarende som for referansesituasjonen, men med økt veggtykkelse og en økt bjelkelagshøyde. Veggtykkelsen og bjelkelagshøyden som er benyttet i parameterstudien og i de andre situasjonene tilsvarer det laveste som er vanlig å bygge med i dag. Det er derfor interessant å se hvordan de ulike tiltakene vil fungere på en konstruksjon med økte dimensjoner. Det benyttes veggtykkelse 450 mm og bjelkelagshøyde 350 mm.

## 5.2 Tiltak som undersøkes

### 5.2.1 Vertikalt sperresjikt

En av årsakene til at kantbjelken er utsatt for muggvekst er vanndampdiffusjon fra inneluft, slik som det er vist i Figur 5. Som et tiltak kan det være muligheter for å legge inn et vertikalt sperresjikt i overgangen mellom kantisolasjonen og bjelkelagsisolasjonen. Dette vil kunne føre til at mindre mengder fuktighet diffunderer utover mot kantbjelken. Tiltaket er vist i Figur 72.



**Figur 72: Tiltak med vertikalt sperresjikt mellom kantisolasjon og bjelkelagsisolasjon**

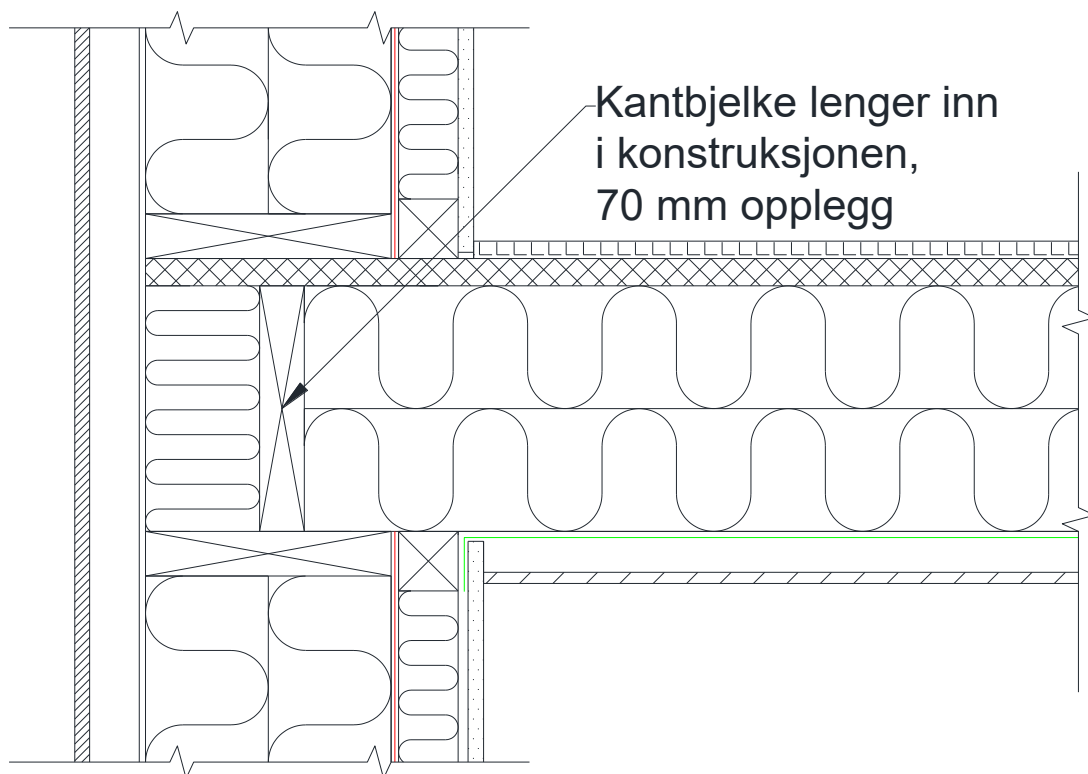
Sperresjiktet kan utføres ved bruk av flere ulike materialer. Sperresjiktet burde ikke være en dampsperre, da det er mulig at det kan forekomme innesperret fukt mellom kantbjelken og sperresjiktet. Vanndampdiffusjon fra innelufta vil også kunne kondensere på dette sjiktet ved bruk av dampsperre. Derfor er det ønskelig å benytte et sperresjikt med lavere dampmotstand. Mulige sjikt er både en dampbrems og bruk av en smart dampsperre. En dampbrems vil kunne være dampåpen nok til at det ikke vil oppstå kondens mot sperresjiktet, men samtidig damptett nok til å hindre en større mengde vanndampdiffusjon ut mot kantbjelken. Den smarte dampsperreren vil være relativt damptett ved lave relative fuktigheter, men dampåpen ved høyere relative fuktigheter. Den variable

vanndampmotstanden kan sørge for at vanndampdiffusjonen ut mot kantbjelken reduseres, men at det også periodevis er muligheter for eventuell fukt å tørke ut.

I undersøkelsen av mulige tiltak velges det å undersøke bruken av både dampbrems og en smart dampsperre som vertikalt sperresjikt. Ifølge Geving et al. (2010) har dampbremsen en  $s_d$ -verdi mellom 0,5 m og 10 m. I dette tilfellet velges det dampbrems med en  $s_d$ -verdi på 5 m. Materialet som benyttes i WUFI-2D er «*vapour retarder (sd=5m)*». Den smarte dampspærren som benyttes er «*Isola DuPont AirGuard Smart*» som er presentert i Kap. 4.6.

### 5.2.2 Kantbjelken lengre inn i konstruksjonen

Et mulig tiltak for kantbjelken er å legge denne lengre inn i konstruksjonen. Ved å gjøre dette vil kantbjelken bli plassert i et område av konstruksjonen med høyere temperaturer samtidig som den er mer beskyttet mot klimaet på utsiden av konstruksjonen. Ved et slikt tiltak kan bjelkelaget legges slik at det kun har den oppleggslengden som er nødvendig, før kantbjelken legges utenpå. Videre legges det kantisolasjon på utsiden av kantbjelken. Løsningen er vist i Figur 73. I WUFI-2D er denne endringen utført ved å endre på modellens geometri. Det modelleres med en oppleggslengde for bjelkelaget på 70 mm.



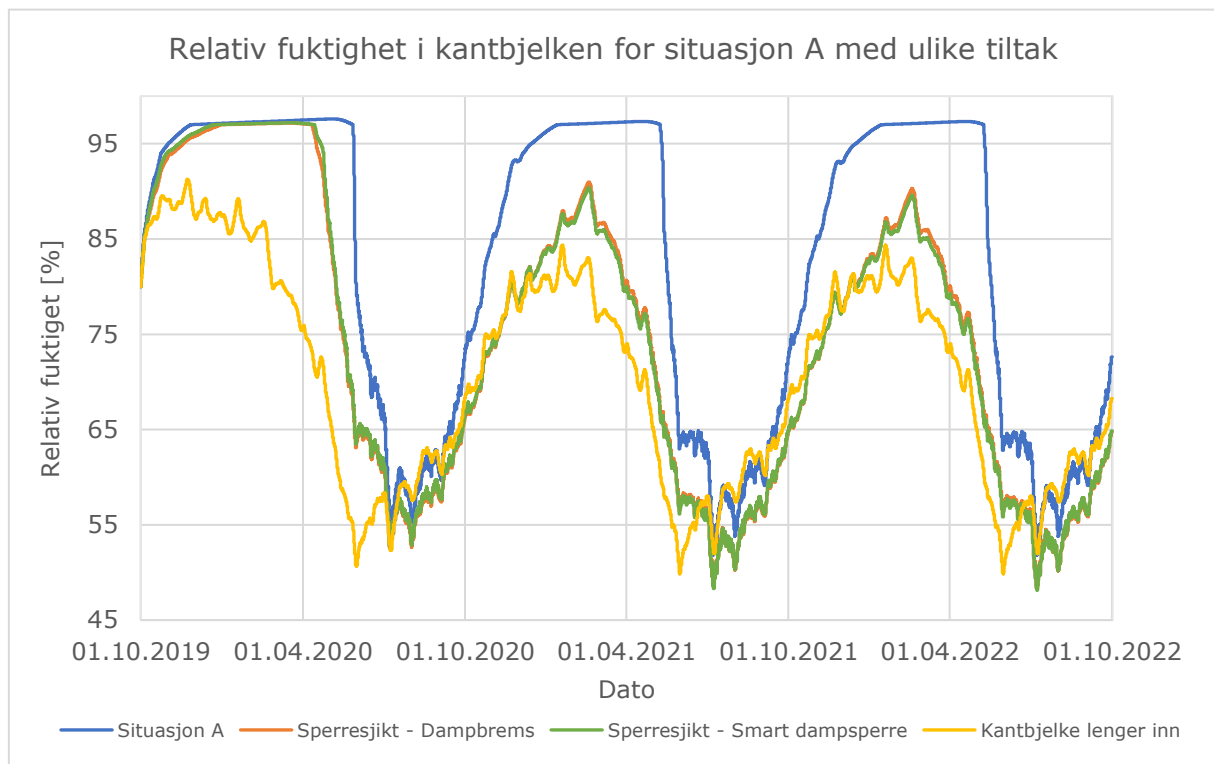
**Figur 73: Kantbjelke flyttet lengre inn i konstruksjonen**

## 5.3 Situasjon A

Situasjon A tilsvarer referansesituasjonen fra parameterstudien. Parametere som er benyttet i denne simuleringen finnes i Kap. 4.1.

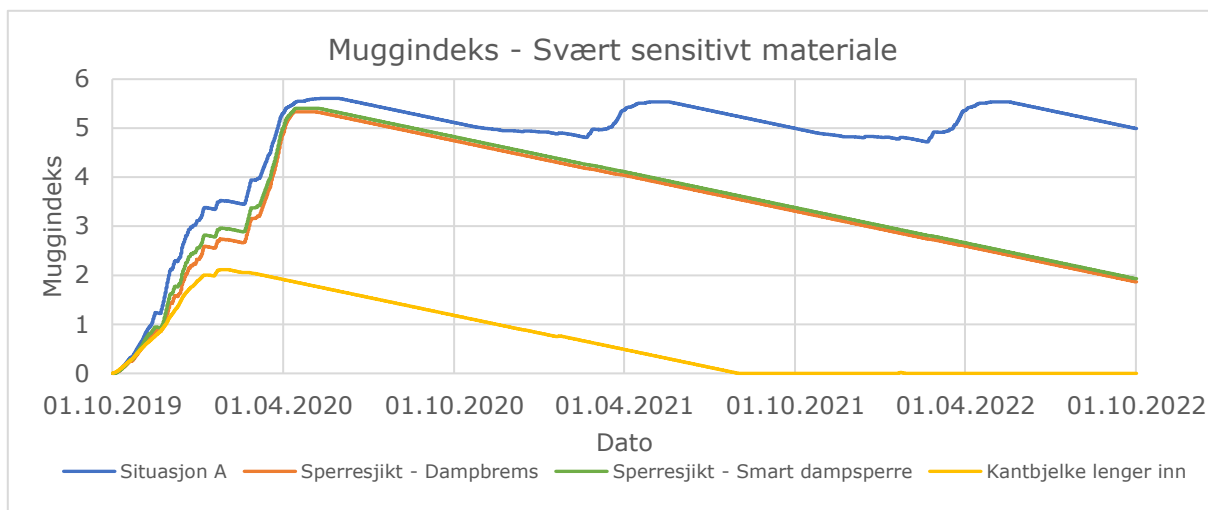
**Tabell 42: Antall kritiske timer ved situasjon A med ulike tiltak**

Kritiske timer hvor...	Situasjon A	Sperresjikt - Dampbrems		Sperresjikt - Smart dampsperre		Kantbjelke lengre inn	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
T > 5 °C og RF > 80 %	6954	2937	-57,8 %	2805	-59,7 %	6309	-9,3 %
T > 5 °C og RF > 90 %	5500	1527	-72,2 %	1626	-70,4 %	165	-97,0 %
T > 5 °C og RF > 95 %	4554	879	-80,7 %	979	-78,5 %	0	-100 %

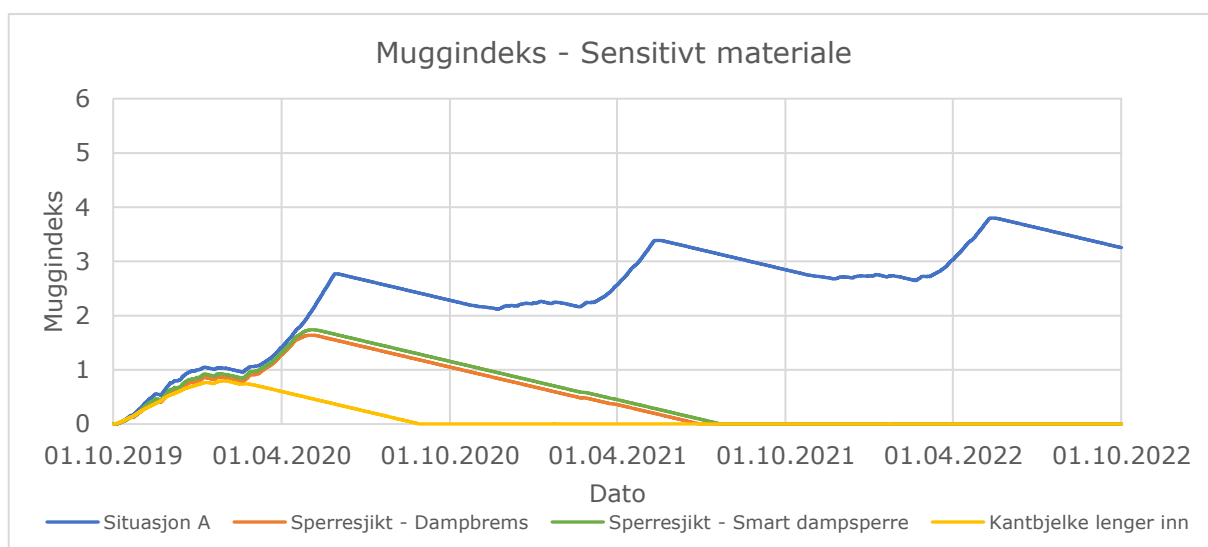


**Figur 74: Relativ fuktighet i kantbjelken for situasjon A med ulike tiltak**





**Figur 75: Muggindeks for kantbjelken ved situasjon A med ulike tiltak, svært sensitivt materiale**



**Figur 76: Muggindeks for kantbjelken ved situasjon A med ulike tiltak, sensitivt materiale**

**Tabell 43: Høyeste verdier for muggindeks ved situasjon A med ulike tiltak**

	Situasjon A		Sperresjikt - Dampbrems		Sperresjikt - Smart dampsperre		Kantbjelke lengre inn	
	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv
Høyeste verdi første år	5,60	2,77	5,33	1,64	5,40	1,74	2,12	0,79
Høyeste verdi andre år	5,54	3,39	4,74	1,05	4,82	1,16	1,18	0,01
Høyeste verdi tredje år	5,54	3,80	3,31	0	3,38	0	0,02	0,01



**Figur 77: Relativ fuktighet på innsiden av sperresjiktet for situasjon A**

Det observeres at for situasjon A har de ulike tiltakene en svært god effekt. Antallet kritiske timer for kantbjelken går kraftig ned i alle tilfellene. Den største nedgangen fås ved å sette kantbjelken lengre inn i konstruksjonen.

Samme effekt kan sees for kantbjelkens relative fuktighet. Ved bruk av et vertikalt sperresjikt mellom kantisolasjonen og bjelkelagsisolasjonen er det en noe kortere periode med høy relativ fuktighet det første året. De neste årene sees et annet mønster hvor den relative fuktigheten ikke når det samme «platået» med høye verdier om vinteren/våren. Her nås et toppunkt på rundt 90 %. Når kantbjelken legges lengre inn i konstruksjonen får den relative fuktigheten et litt annet forløp. Da nås bunnpunktet litt tidligere om sommeren og toppunktet ligger på like under 85 %.

De forandrede mønstrene for relativ fuktighet får konsekvenser for muggindeksen. Med et vertikalt sperresjikt sees det en noe tregere økning i muggindeksen det første året enn for situasjonen uten tiltak, men det samme toppunktet nås for det svært sensitive materialet. For det sensitive materiale ligger toppunktet rundt én indeks lavere med et vertikalt sperresjikt. Videre observeres det at de neste årene er det ikke lange nok perioder med ugunstige forhold for biologisk aktivitet. På grunn av dette skjer det ingen videre økning i muggindeksen. Den synker derfor etter det første året. Når kantbjelken flyttes inn i konstruksjonen er det kun en periode det første året med gunstige forhold for muggvekst og derfor stiger denne noe. Muggindeksen synker ned igjen til null for begge materialene.

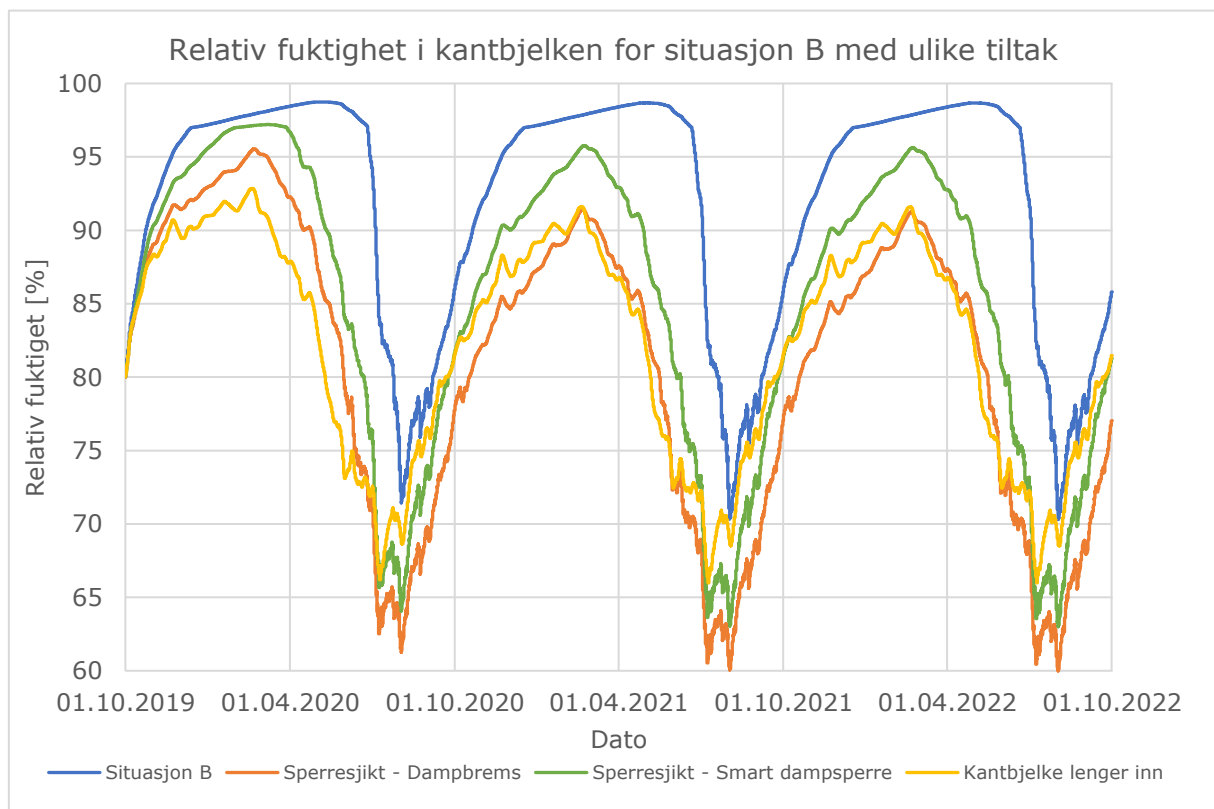
Like innenfor det vertikale sperresjiktet kan det sees at den relative fuktigheten varierer mellom 40 % og 70 % for både dampbrems og smart dampsperre. Det er derfor ingen fare for at det vil oppstå kondens inn mot sperresjiktet.

## 5.4 Situasjon B

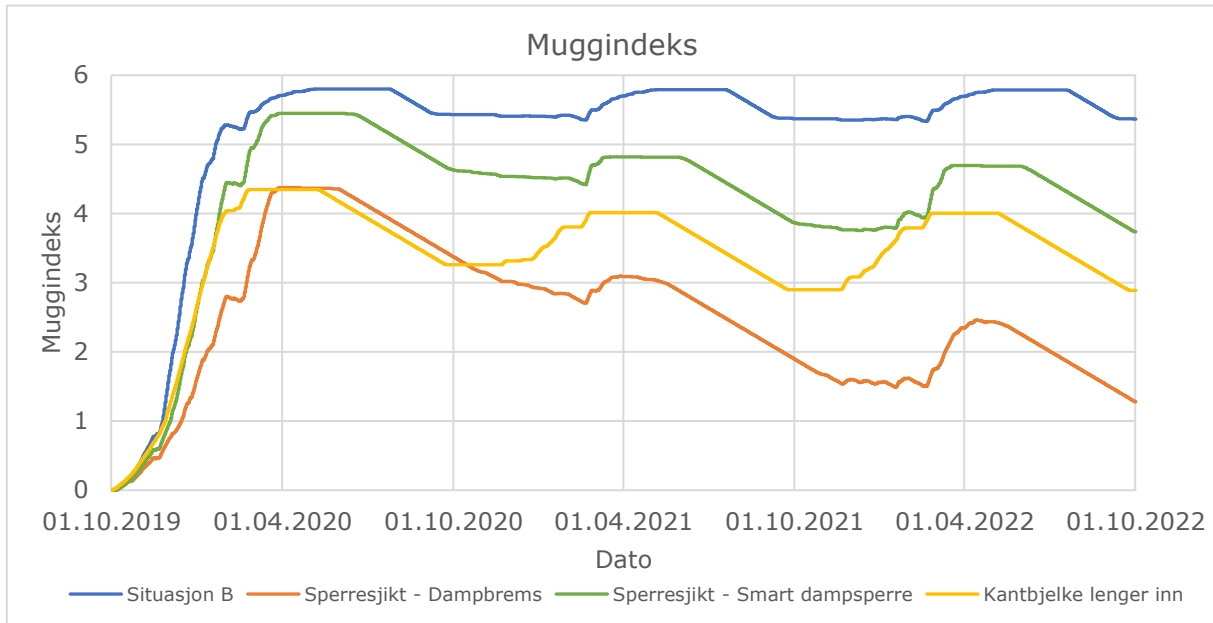
Situasjon B er satt sammen av en kombinasjon av parametere som har vist seg å være ugunstige for muggvekst i kantbjelken. Situasjonen er bygget opp som situasjon A, men har en høy fuktpåkjenning, sponplate som kantbjelke og klimasted satt til Bergen. I denne situasjonen er det kun undersøkt én type materiale for muggindeksen. Dette av samme årsak som er beskrevet i Kap. 4.9.

**Tabell 44: Antall kritiske timer ved situasjon B med ulike tiltak**

Kritiske timer hvor...	Situasjon B	Sperresjikt - Dampbrems		Sperresjikt - Smart dampsperre		Kantbjelke lengre inn	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
T > 5 °C og RF > 80 %	18535	11289	-39,1 %	14179	-23,5 %	16433	-40,1 %
T > 5 °C og RF > 90 %	14020	3111	-77,8 %	7925	-43,5 %	4286	-100 %
T > 5 °C og RF > 95 %	11807	228	-98,1 %	2128	-82,0 %	0	-100 %



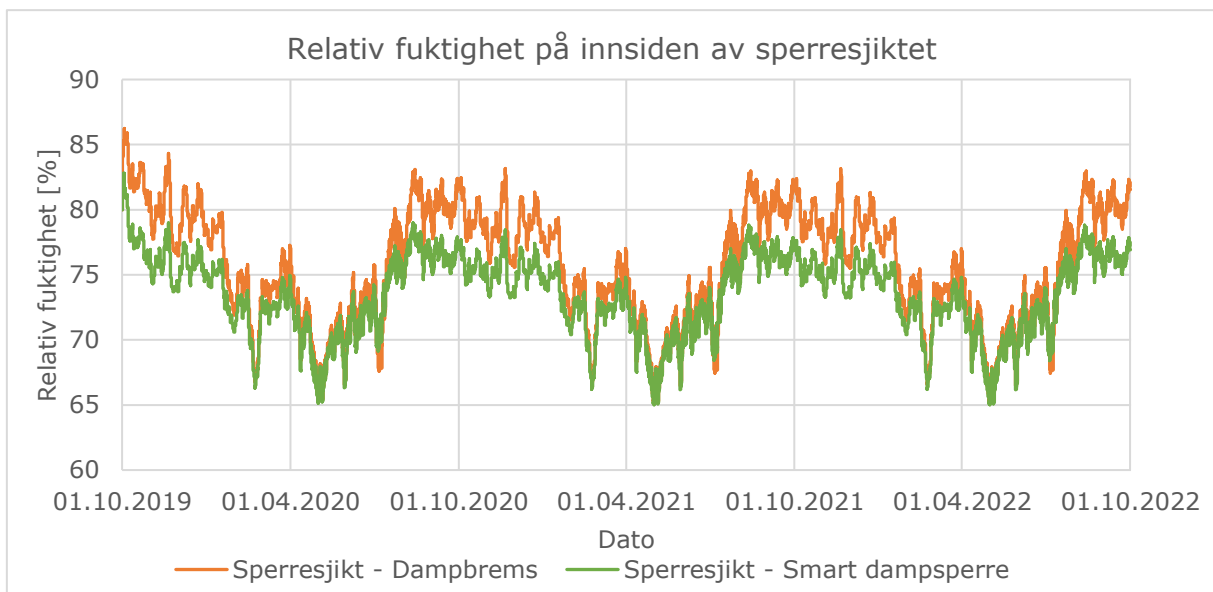
**Figur 78: Relativ fuktighet i kantbjelken for situasjon B med ulike tiltak**



**Figur 79: Muggindeks for kantbjelken ved situasjon B med ulike tiltak**

**Tabell 45: Høyeste verdier for muggindeks ved situasjon B med ulike tiltak**

Kritiske timer hvor...	Situasjon B	Sperresjikt - Dampbrems	Sperresjikt - Smart dampsperre	Kantbjelke lengre inn
T > 5 °C og RF > 80 %	5,80	4,38	5,45	4,31
T > 5 °C og RF > 90 %	5,79	3,38	4,82	4,01
T > 5 °C og RF > 95 %	5,79	2,46	4,69	4,01



**Figur 80: Relativ fuktighet på innsiden av sperresjiktet for situasjon B**

For antallet kritiske timer for situasjon B kan det sees at den ugunstige kombinasjonen av parametere har gitt en stor økning i antall kritiske timer i forhold til situasjon A. Videre sees det at samtlige tiltak gir en betydelig reduksjon i antall kritiske timer for kantbjelken. Den største nedgangen oppnås ved å benytte en dampbrems som vertikalt sperresjikt.

Ved bruk av et vertikalt sperresjikt mellom kantisolasjonen og bjelkelagsisolasjonen observeres det en tydelig nedgang i den relative fuktigheten som oppstår i de fuktige periodene om vinteren og våren. Ved bruk av et vertikalt sperresjikt er oppfuktingen tregere, uttørkingen er raskere og toppunktene er lavere. Det er et noe høyere toppunkt det første året for begge sperresjiktene. Det sees at toppunktet ved bruk av dampbrems ligger lavere enn ved bruk av en smart dampsperre. Ved å flytte kantbjelken lengre inn i konstruksjonen oppnås omtrent det samme mønsteret som ved bruk av dampbrems, men i dette tilfellet har kantbjelken en noe høyere relativ fuktighet om sommeren.

Muggindeksen for situasjon B er ulik for alle tiltakene som undersøkes. Uten bruk av tiltak sees det en rask økning i muggindeks det første året. Denne holder seg på et stabilt og høyt nivå gjennom hele perioden. Ved å benytte en smart dampsperre som vertikalt sperresjikt er det en liten forbedring. Her oppnås en nesten like høy muggindeks det første året, men her er det en svak nedgang vært år. Dersom det benyttes dampbrems som vertikalt sperresjikt er forbedringen større, men muggindeksen er fortsatt på kritisk nivå det første året. Videre gjør dampbremsen at det er tilstrekkelig med ugunstige perioder for muggvekst slik at muggindeksen raskt synker ned på et akseptabelt nivå. Etter tre år er indeksen nede på cirka 1. Ved å trekke kantbjelken lengre inn i konstruksjonen oppnås det en muggindeks på litt over fire det første året. Videre vil det være tilstrekkelig med gunstige perioder for muggvekst slik at muggindeksen holder seg stabilt på rundt 4 de neste årene.

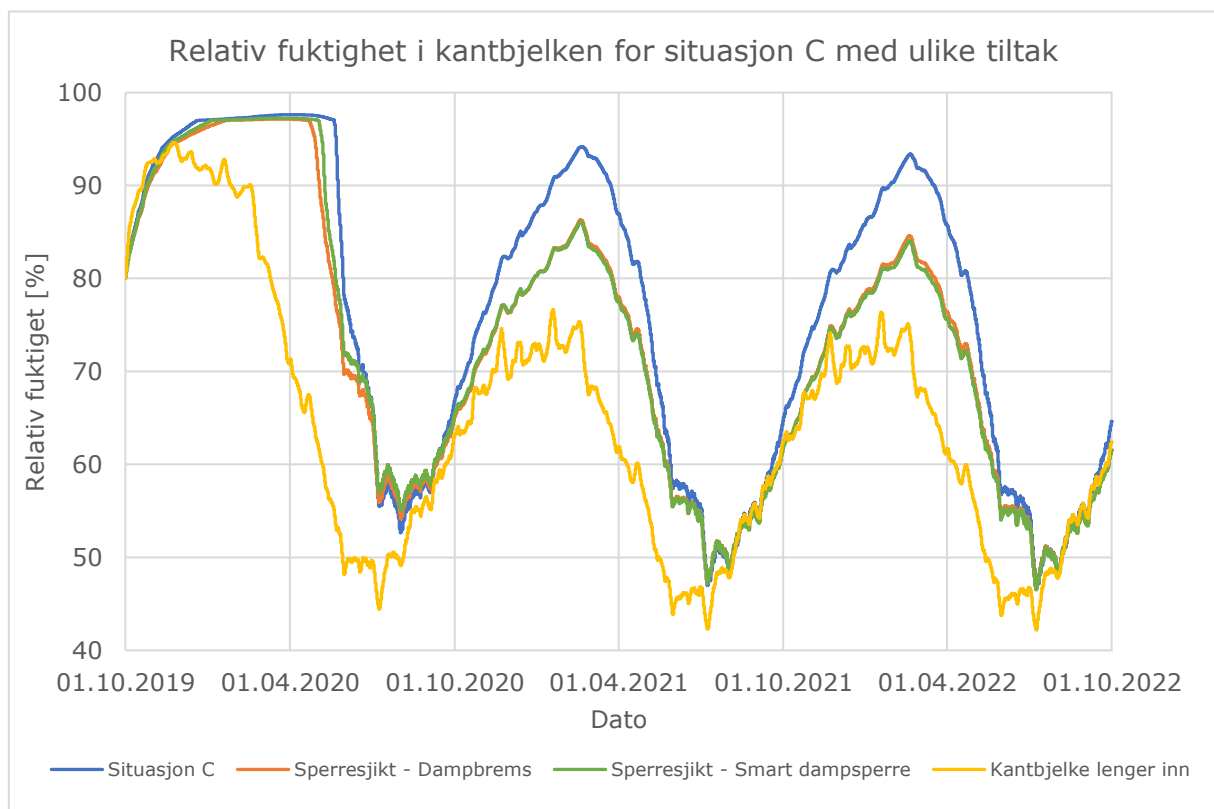
Fra den relative fuktigheten på innsiden av det vertikale sperresjiktet observeres det at det i dette tilfellet ikke vil være risiko for at det skal oppstå kondens inn mot disse.

## 5.5 Situasjon C

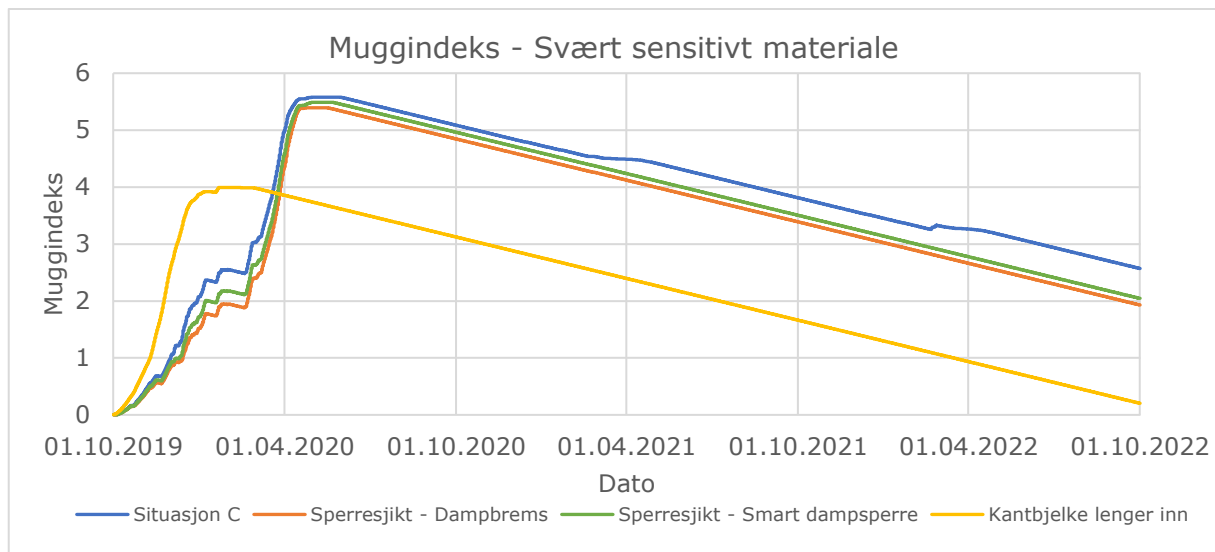
Denne situasjonen er sammensatt av parametere som i parameterstudien var gunstige for å redusere risikoen for muggvekst i kantbjelken. Situasjonen har samme oppbygning som situasjon A, men har en lav fuktpåkjenning, benytter en smart dampsperre i himling («*Isola DuPont AirGuard Smart*»). I tillegg benyttes det trefiberisolasjon som kantisolasjon.

**Tabell 46: Antall kritiske timer ved situasjon C med ulike tiltak**

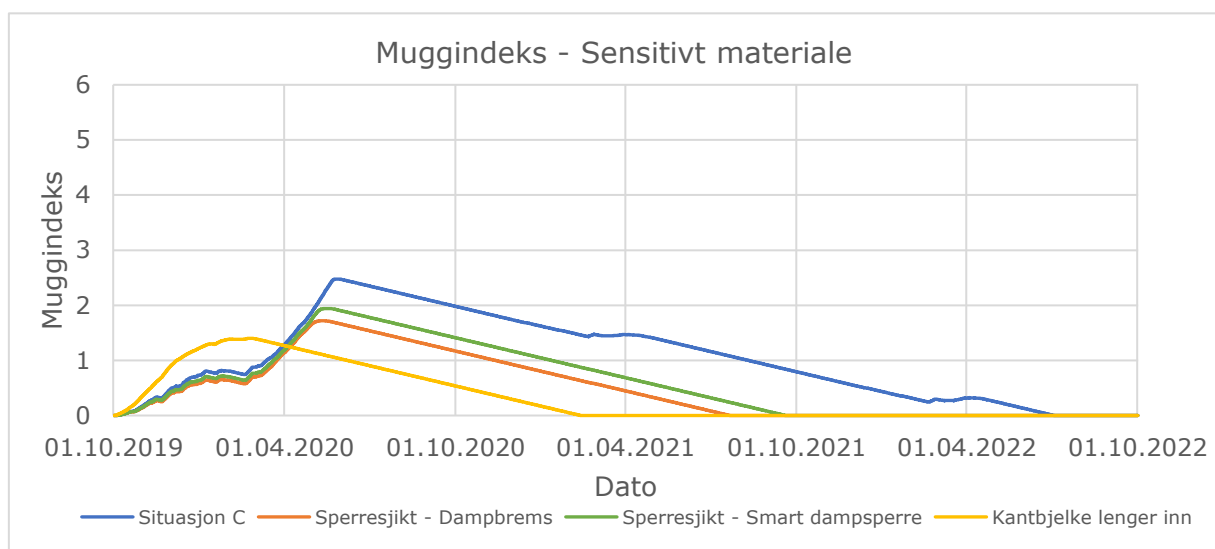
Kritiske timer hvor...	Situasjon C	Sperresjikt - Dampbrems		Sperresjikt – Smart dampsperre		Kantbjelke lengre inn	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
T > 5 °C og RF > 80 %	4996	2772	-44,5 %	2825	-43,5 %	3532	-29,3 %
T > 5 °C og RF > 90 %	2411	1621	-32,8 %	1804	-25,2 %	2259	-6,3 %
T > 5 °C og RF > 95 %	1755	974	-44,5 %	1227	-30,1 %	0	-100 %



**Figur 81: Relativ fuktighet i kantbjelken for situasjon C med ulike tiltak**



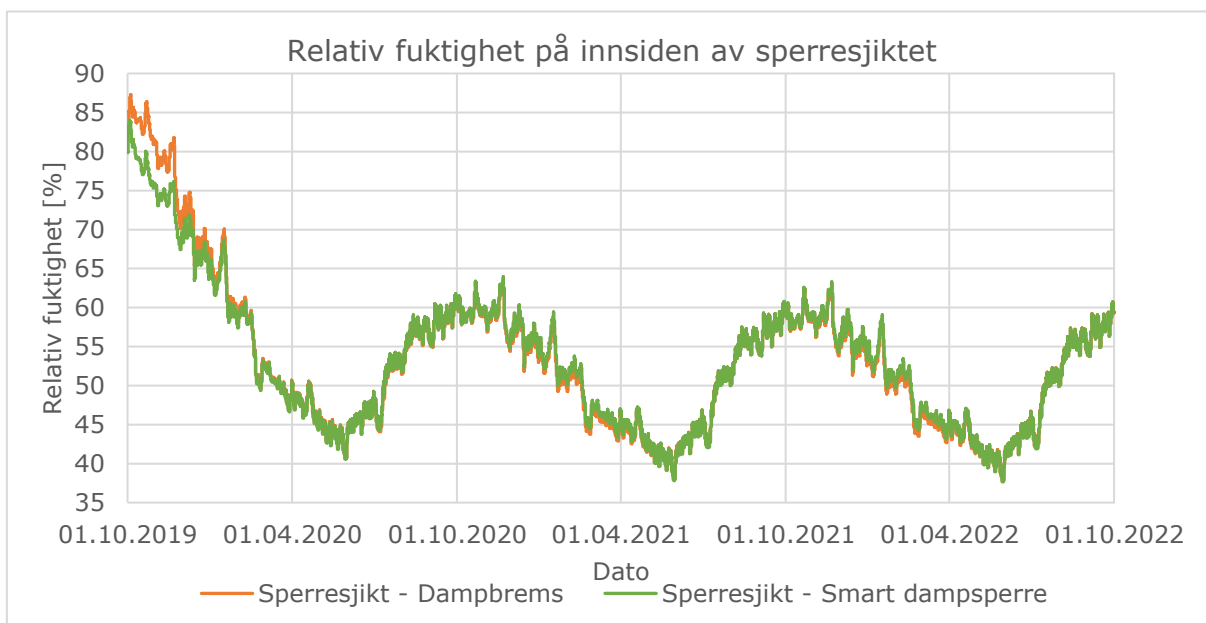
**Figur 82: Muggindeks for kantbjelken ved situasjon C med ulike tiltak, svært sensitivt materiale**



**Figur 83: Muggindeks for kantbjelken ved situasjon C med ulike tiltak, sensitivt materiale**

**Tabell 47: Høyeste verdier for muggindeks ved situasjon C med ulike tiltak**

	Situasjon C		Sperresjikt - Dampbrems		Sperresjikt - Smart dampsperre		Kantbjelke lengre inn	
	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv
Høyeste verdi første år	5,58	2,48	5,39	1,72	5,49	1,94	3,99	1,40
Høyeste verdi andre år	5,09	1,98	4,85	1,17	4,96	1,41	3,12	0,54
Høyeste verdi tredje år	3,81	0,79	3,39	0	3,51	0	1,66	0



**Figur 84: Relativ fuktighet på innsiden av sperresjiktene for situasjon C**

Kombinasjonen av parametere som gir en lavere risiko for muggvekst i kantbjelken, har gitt et lavere antall kritiske timer i forhold til situasjon A, selv uten bruk av tiltak. Tiltakene som undersøkes gir alle en reduksjon i antall kritiske timer.

For den relative fuktigheten i kantbjelken sees det høye og samsvarende nivåer for situasjonen uten tiltak og situasjonene med et vertikalt sperresjikt det første året. Videre har situasjonene med sperresjikt et toppunkt på 85 % om vinteren, mens situasjonen uten tiltak er opp mot 95 %. Det er svært liten forskjell på om det vertikale sperresjiktet er en dampbrems eller en smart dampsperre. Ved å flytte kantbjelken lengre inn i konstruksjonen varierer den relative fuktigheten i kantbjelken mellom 45 % og 75 %.

Situasjonene uten tiltak og med vertikalt sperresjikt har en rask økning i muggindeks og når et toppunkt i løpet av det første året. Dette gjelder for begge typer materialer. For det svært sensitive materiale er toppunktet på 5,5, mens det for det sensitive materialet er på rundt 1,8-2,5, som er et akseptabelt nivå. Videre synker muggindeksen jevnt. For det svært sensitive materiale er muggindeksen på et akseptabelt nivå etter rundt 2,5 år. Ved flytting av kantbjelken lengre inn i konstruksjonen sees en økning i muggindeks det første året. For svært sensitivt materiale når denne 4, som er over akseptabelt nivå. For det sensitive materialet når den 1,4, noe som er akseptabelt. I begge tilfellene vil muggindeksen synke etter det første året, uten noen flere økninger i muggindeks. For svært sensitivt materiale nås et akseptabelt nivå etter cirka et år.

På innsiden av sperresjiktene varierer den relative fuktigheten mellom 40 % og 65 %. Det er derfor ingen risiko for kondens inn mot sperresjiktet i disse tilfellene.

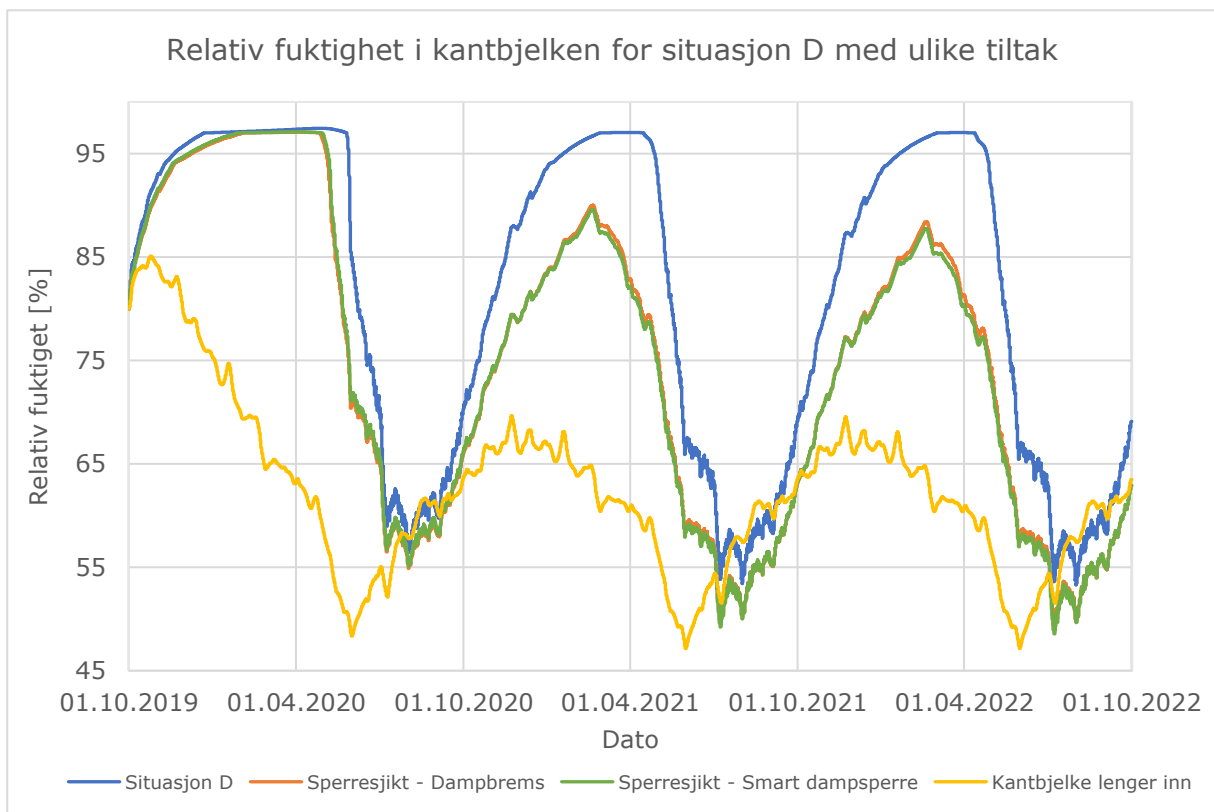


## 5.6 Situasjon D

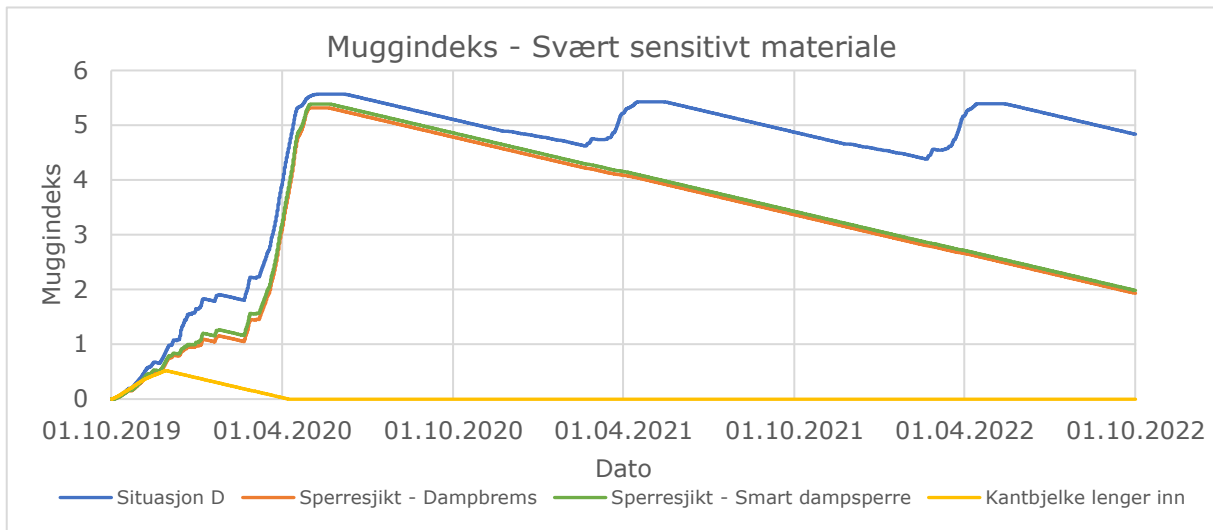
Situasjon D er lik som situasjon A (referansesituasjonen), men har en veggtykkelse på 450 mm og bjelkelagshøyde 350 mm. Parametere som benyttes i denne situasjonen kan finnes i Tabell 6.

**Tabell 48: Antall kritiske timer ved situasjon D uten tiltak**

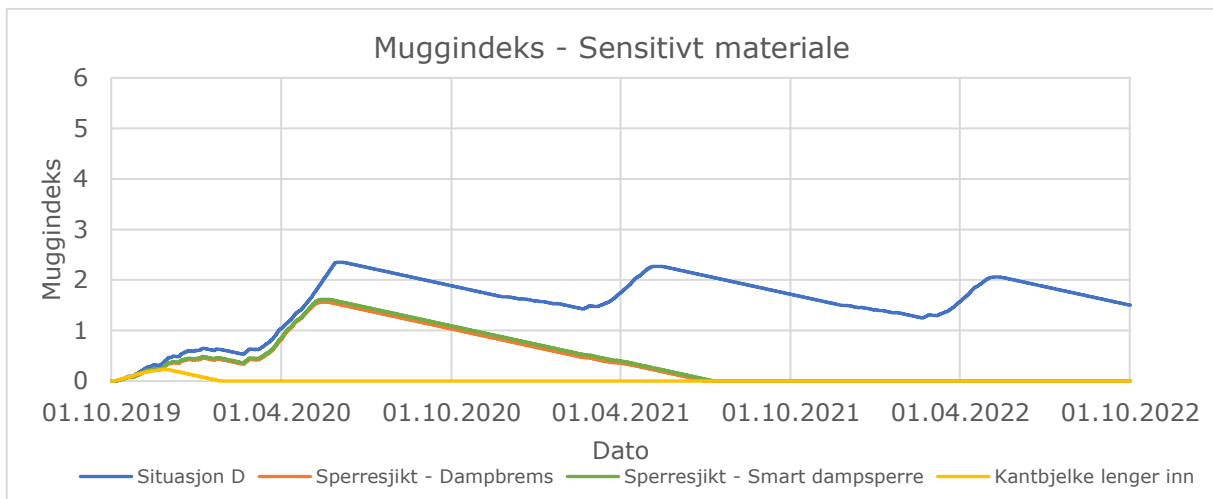
Kritiske timer hvor...	Situasjon D	Sperresjikt - Dampbrems		Sperresjikt - Smart dampsperre		Kantbjelke lengre inn	
		Timer	Endring i %	Timer	Endring i %	Timer	Endring i %
T > 5 °C og RF > 80 %	5848	3240	-44,6 %	3079	-47,3 %	1414	-75,8 %
T > 5 °C og RF > 90 %	3998	1468	-63,3 %	1522	-61,9 %	0	-100 %
T > 5 °C og RF > 95 %	3239	971	-70,0 %	1012	-68,8 %	0	-100 %



**Figur 85: Relativ fuktighet i kantbjelken for situasjon D med ulike tiltak**



**Figur 86: Muggindeks for kantbjelken ved situasjon D med ulike tiltak, svært sensitivt materiale**



**Figur 87: Muggindeks for kantbjelken ved situasjon D med ulike tiltak, sensitivt materiale**

**Tabell 49: Høyeste verdier for muggindeks ved situasjon D med ulike tiltak**

	Situasjon C		Sperresjikt - Dampbrems		Sperresjikt - Smart dampsperre		Kantbjelke lengre inn	
	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv	Svært sensitiv	Sensitiv
Høyeste verdi første år	5,57	2,35	5,31	1,56	5,38	1,62	0,52	0,24
Høyeste verdi andre år	5,43	2,27	4,78	1,03	4,86	1,09	0	0
Høyeste verdi tredje år	5,39	2,06	3,37	0	3,43	0,00	0	0



**Figur 88: Relativ fuktighet på innsiden av sperresjiktene for situasjon D**

For situasjon D uten tiltak sees det en nedgang i antall kritiske timer i forhold til situasjon A. Allikevel er antallet kritiske timer høyt nok til at det vil kunne føre til en risiko for muggvekst i kantbjelken. Ved bruk av samtlige tiltak blir antallet kritiske timer redusert. Den største reduksjonen oppnås ved å flytte kantbjelken lengre inn i konstruksjonen.

Den relative fuktigheten i kantbjelken vil det første året følge omtrent samme mønster med og uten et vertikalt sperresjikt. De neste årene vil det ved bruk av et vertikalt sperresjikt ikke nås et like høyt toppunkt om vinteren, men et toppunkt på rundt 88 %. Om sommeren vil den relative fuktigheten være noe lavere. Det er svært liten forskjell på bruk av dampbrems og smart dampsperre. Den smarte dampspærren har generelt noe lavere verdier enn dampbremsen. Ved å legge kantbjelken lengre inn i konstruksjonen vil den relative fuktigheten i kantbjelken variere mellom 50 % og 70 %.

Kantbjelkens muggindeks vil være stabilt på et kritisk nivå for situasjonen uten tiltak ved svært sensitivt materiale. For det sensitive materiale vill muggindeksen for denne situasjonen være litt over 2, med en svak nedgang hvert år. Ved bruk av et vertikalt sperresjikt sees det omtrent like høye verdier det første året som uten tiltak. Videre er det en jevn nedgang i muggindeksen. For det svært sensitive materialet nås et akseptabelt nivå etter litt over to år. For det sensitive materialet er muggindeksen alltid på et akseptabelt nivå. For kantbjelken lengre inn i konstruksjonen oppleves kun en liten økning i muggindeksen det første året. Denne synker raskt ned igjen til 0. Det er videre ingen ytterligere økninger i muggindeksen.

I de tilfellene hvor det er benyttet et vertikalt sperresjikt, observeres det at den relative fuktigheten på innsiden av sjiktet vil variere mellom 45 % og 68 %. Det er derfor ingen risiko for kondens inn mot sperresjiktene.

## 5.7 Oppsummering av tiltaksanalysen

**Tabell 50: Oppsummering av den prosentvise endringen i antall kritiske timer for tiltaksanalysen**

<b>Prosentvis endring i antall kritiske timer</b>	<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 80 %</b>	<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 90 %</b>	<b>T &gt; 5 °C og RF &gt; 95 %</b>
<b>Situasjon A – Ingen tiltak</b>	<b>6954</b>	<b>5500</b>	<b>4554</b>
Vertikalt sperresjikt – Dampbrems	-57,8 %	-72,2 %	-80,7 %
Vertikalt sperresjikt – Smart dampsperre	-59,7 %	-70,4 %	-78,5 %
Kantbjelken lenger inn i konstruksjonen	-9,3 %	-97,0 %	-100 %
<b>Situasjon B – Ingen tiltak</b>	<b>18535</b>	<b>14020</b>	<b>11807</b>
Vertikalt sperresjikt - Dampbrems	-39,1 %	-77,8 %	-98,1 %
Vertikalt sperresjikt – Smart dampsperre	-23,5 %	-43,5 %	-82,0 %
Kantbjelken lenger inn i konstruksjonen	-40,1 %	-69,6 %	-100 %
<b>Situasjon C – Ingen tiltak</b>	<b>4996</b>	<b>2411</b>	<b>1755</b>
Vertikalt sperresjikt - Dampbrems	-44,5 %	-32,8 %	-44,5 %
Vertikalt sperresjikt – Smart dampsperre	-43,5 %	-25,2 %	-30,1 %
Kantbjelken lenger inn i konstruksjonen	-29,3 %	-6,3 %	-100 %
<b>Situasjon D – Ingen tiltak</b>	<b>5848</b>	<b>3998</b>	<b>3239</b>
Vertikalt sperresjikt - Dampbrems	-44,6 %	-63,3 %	-70,0 %
Vertikalt sperresjikt – Smart dampsperre	-47,3 %	-61,9 %	-68,8 %
Kantbjelken lenger inn i konstruksjonen	-75,8 %	-100 %	-100 %

**Tabell 51: Oppsummering av muggindekser for tiltaksanalysen**


Høyeste verdi for muggindeks det tredje året	Svært sensitivt materiale	Sensitivt materiale
<b>Situasjon A – Ingen tiltak</b>	5,54 (stabil)	3,80 (+)
Vertikalt sperresjikt – Dampbrems	3,31 (-)	0 (stabil)
Vertikalt sperresjikt – Smart dampspærre	3,38 (-)	0 (stabil)
Kantbjelken lenger inn i konstruksjonen	0,02 (stabil)	0,01 (stabil)
<b>Situasjon B – Ingen tiltak (Korrekt materiale benyttet, se kap. 4.9)</b>	5,79 (stabil)	
Vertikalt sperresjikt - Dampbrems	2,46 (-)	
Vertikalt sperresjikt – Smart dampspærre	4,69 (-)	
Kantbjelken lenger inn i konstruksjonen	4,01 (stabil)	
<b>Situasjon C – Ingen tiltak</b>	3,81 (-)	0,79 (-)
Vertikalt sperresjikt - Dampbrems	3,39 (-)	0 (stabil)
Vertikalt sperresjikt – Smart dampspærre	3,51 (-)	0 (stabil)
Kantbjelken lenger inn i konstruksjonen	0 (stabil)	0 (stabil)
<b>Situasjon D – Ingen tiltak</b>	5,39 (stabil)	2,06 (stabil)
Vertikalt sperresjikt - Dampbrems	3,37 (-)	0 (stabil)
Vertikalt sperresjikt – Smart dampspærre	3,43 (-)	0 (stabil)
Kantbjelken lenger inn i konstruksjonen	0 (stabil)	0 (stabil)

Tabell 51 viser en oversikt over muggindeksen til de ulike tiltakene etter det har gått tre år, av samme årsak som Tabell 41. Muggindeksen ansees som kritisk ved en verdi større enn 3. Forklaring til tabellen:


(stabil) – Muggindeksen er stabilt på dette nivået. Muggindeksen ansees som stabil når forskjellen mellom høyeste verdi andre og tredje år er mindre enn 0,1.

(+) – Muggindeksen er stigende.

(-) – Muggindeksen er synkende.

 - Tiltaket gjør situasjonen verre / Tiltaket gir ingen endring i muggindeks.

 - Tiltaket gjør at muggveksten er på et akseptabelt nivå.

 - Tiltaket gir en lavere muggindeks som er fortsatt er kritisk, men som med tid vil utvikle seg til et akseptabelt nivå.



## 6 Diskusjon

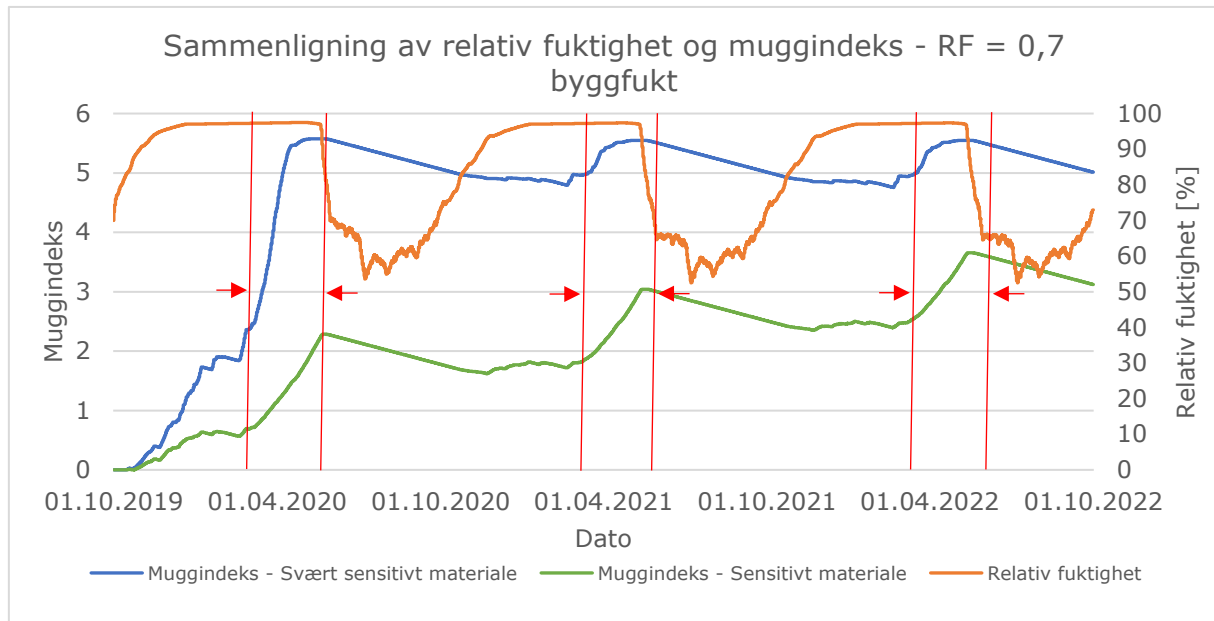
### 6.1 Generelle betraktninger

Fra resultatene i denne oppgaven er det tydelig at kantbjelken er en utsatt detalj i et trebjelkelag. I de fleste simuleringene som er gjennomført viser det seg at kantbjelken vil oppnå svært høye nivåer av relativ fuktighet. Dette har vist seg å være problematisk med tanke på muggvekst, da det i de fleste tilfeller raskt oppnås kritiske verdier for muggindeksen. Dette er synlig allerede i referansesituasjonen. Denne situasjonen skulle gjenspeile en vanlig kombinasjon av parametere, og allerede her oppnås det en betydelig muggvekst svært tidlig. Dette gir indikasjoner på at kantbjelken faktisk er en svært utsatt konstruksjonsdetalj som burde vies ekstra oppmerksomhet med tanke på undersøkelser og muligheter for tiltak. Dette er også en type konstruksjonsdetalj som anbefales av SINTEF Community i Byggforskserien. Derfor er det spesielt viktig å være oppmerksom på at denne utførelsen av trebjelkelaget kan føre til skader (SINTEF, 2008).

Det største problemet kantbjelken opplever er det høye nivået av relativ fuktighet. Ved de aller fleste simuleringene kan det sees at den relative fuktigheten i kantbjelken når et «platå» med høy relativ fuktighet om vinteren og våren. Lengden på denne er avhengig av de ulike parameterne, men generelt er denne fremtredende gjennom hele parameterstudien. Fra resultatene sees det at desto lengre varighet det er på denne perioden med høy fuktighet, jo mer kritisk er det med tanke på muggindeksen. Dette platået ligger i de aller fleste tilfeller på en verdi for den relative fuktigheten på 97 %. I de tilfellene der dette platået er redusert i varighet, som for eksempel ved bruk av trefiberisolasjon, sees det en reduksjon i muggindeks (spesielt ved sensitivt materiale). Den relative fuktigheten i kantbjelken er fortsatt høy, men siden den ikke ligger helt oppe på platå-nivå om vinteren/våren, så gjør det et positivt utslag på muggindeksen. Dette tyder på at det er de kritiske timene med relativ fuktighet større enn 90 % og 95 % som er de mest kritiske. Disse gir en raskere økning i muggindeksen enn kritiske timer med relativ fuktighet større enn 80 %. Samme fenomen er tydelig ved endring av bjelkelagshøyde. Bjelkelagshøyde 350 mm har en noe høyere muggindeks enn bjelkelagshøyde 500 mm. Bjelkelagshøyde 350 mm har et høyere antall kritiske timer med relativ fuktighet større enn 90 % og 95 % i forhold til høyde 500 mm, men har et lavere antall med timer hvor relativ fuktighet er større enn 80 %. Derfor er det rimelig å anta at det er de svært høye verdiene for relativ fuktighet som er de mest kritiske, og at det er disse som burde reduseres. Utenom de høye verdiene om vinteren følger den relative fuktigheten stort sett det samme mønsteret i alle simuleringene. Uttørkingen starter på noe forskjellige tidspunkter om våren (rundt april og mai). Uttørkingen skjer hurtig og den relative fuktigheten er raskt nede på rundt 55 - 65 %. Videre skjer det en rask oppfukning som begynner i september/oktober.

Generelt i alle simuleringene sees også en svært rask økning i muggindeks. Ved det svært sensitive materialet observeres det at muggindeksen i de fleste simuleringene er på et kritisk nivå (større enn 3) etter rundt tre måneder. Innen 6 måneder er muggindeksen oppe på 5,5. Figur 89 viser en graf med en sammenligning av muggindeksene og den relative fuktigheten. I dette tilfellet er situasjonen med  $RF = 0,7$  i materialene som initiell

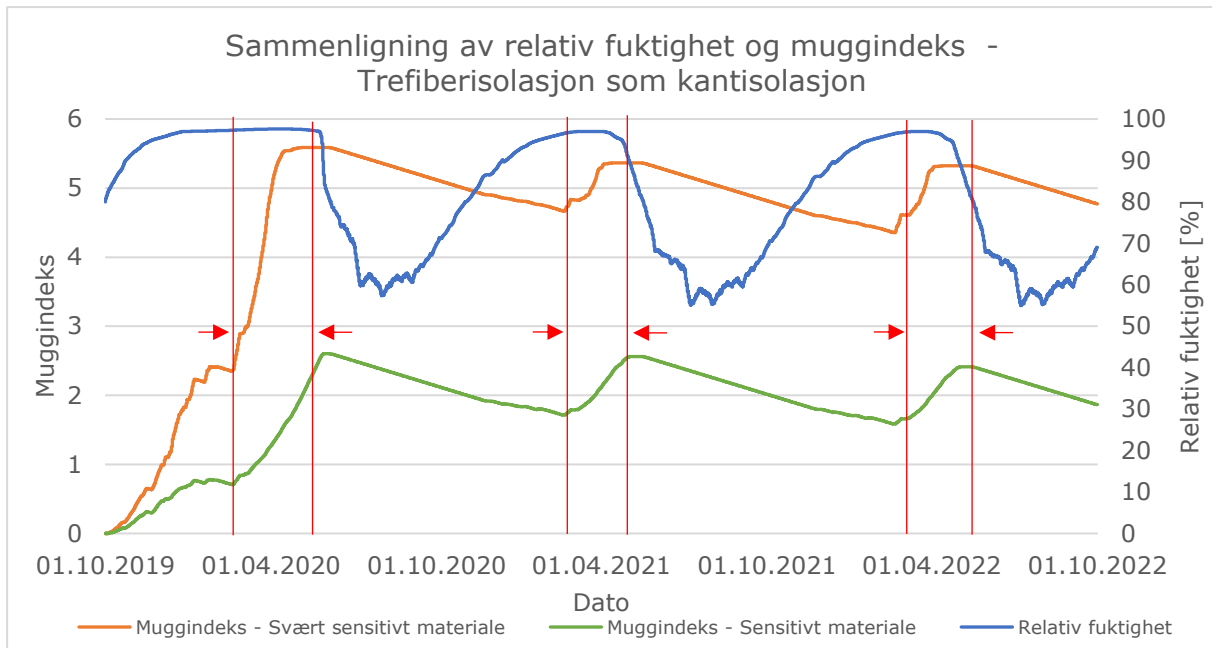
fuktighet undersøkt. Denne simuleringen har en noe tregere økning i muggindeks de første tre månedene enn de resterende simuleringene. Deretter øker den raskt slik som resterende simuleringer. Derfor er det i denne simuleringen enda lettere å undersøke hva som forårsaker den raske økningen i muggindeksen. Perioden med den svært raske økningen er avgrenset av de røde linjene.



**Figur 89: Sammenligning av relativ fuktighet og muggindeks for kantbjelken ved lav byggfukt**

Slik det kan sees fra Figur 89, så er det tydelig at en slik rask økning i muggindeks skyldes den høye relative fuktigheten om vinteren og våren. I tillegg til dette sees det at den raske økningen forekommer etter 1. april. Grunnen til at den raske økningen forekommer da er kombinasjonen med den svært høye relative fuktigheten samtidig som temperaturen i kantbjelken vil øke når det nærmer seg sommer. Det er derfor tydelig at det er disse fuktige periodene etter 1. april som burde forsøkes og begrenses dersom muggindeksen skal reduseres. Den raske økningen er den som er mest kritisk, og denne kan reduseres dersom kantbjelken har mulighet til å tørke tilstrekkelig ut før temperaturene blir høye nok om våren. Dette kunne i stedet ha ført til en svakere økning i muggindeksen. Dersom det i stedet hadde vært en svak økning i flere av tilfellene, ville muligens dette i kombinasjon med en reduksjon av muggindeksen om sommeren være nok til å holde muggindeksen på stabile og akseptable nivåer. I tilfellet der det benyttes trefiberisolasjon som kantisolasjon er dette synlig. Her er perioden med høy relativ fuktighet som nevnt forkortet om våren, noe som gir en svakere økning i muggindeksen. Dette er mest tydelig det andre og tredje året. Dette er nok til å holde situasjonen stabil for det sensitive materialet. Dette er vist i Figur 90.





**Figur 90: Sammenligning av relativ fuktighet og muggindeks for kantbjelken ved bruk av trefiberisolasjon som kantisolasjon**

Det samme kan tydelig sees i simuleringen der Karasjok er benyttet som klimalokasjon (Figur 19). Her øker ikke muggindeksen det første halve året, på grunn av lave temperaturer. Men når våren kommer, så stiger muggindeksen fra 0 til 5,5 på kun et par måneder.

Det er mulig at en uttørking i starten av simuleringene kunne ha hjulpet, men slik det er vist i Kap. 4.14 så vil denne raske økningen forekomme om våren uavhengig av mengden uttørking som er gjort av kantbjelken på forhånd. Det sees også at denne raske utviklingen av muggindeksen forekommer uavhengig av mengden byggfukt. Lavere byggfukt forsinker økningen noe, men den raske økningen i muggindeksen vil skje allikevel.

Fra oppgavens resultater sees det også at den relative fuktigheten lengre inn i konstruksjonen (ved overgangen mellom kantisolasjonen og bjelkelagsisolasjonen) ikke opplever noen store forandringer når parameterne blir endret. Den relative fuktigheten i dette området varierer i området mellom 50 % og 65 %. Det er noen unntak fra dette, blant annet ved endring av klima, endring av fuktpåkjønning og ved luftlekkasjer. Det er ved denne plasseringen ikke noen fare for høye fuktigheter i noen av tilfellene.

## 6.2 Parameterstudien

Fra parameterstudien er det tydelig at kantbjelken er en skadeutsatt detalj uavhengig av hvilke parametere som benyttes. I parameterstudien er det utført 27 parameterendringer, og det er et fåtall av disse som har vist seg å gjøre situasjonen bedre i form av en redusert muggindeks. Ved bruk av det svært sensitive materialet viser det seg at det er problemer med høy muggindeks i samtlige av simuleringene. Omtrent halvparten av simuleringene som er utført fører frem til et redusert antall med kritiske timer. De fleste gir en reduksjon mellom 5 % og 30 %, men enkelte parameterendringer gir en større reduksjon enn dette. Noen parametere gir også en økning i antall kritiske timer, her mellom 1-15 %. Det er også enkelte parametere som gir en langt større økning enn dette, opp imot en fordobling. Reduksjonen i antall kritiske timer er kun en antydning på hvordan risikoen for muggvekst

er. Som det kan sees i Tabell 41, er det til tross for en reduksjon av kritiske timer i mange av tilfellene, fortsatt slik at muggindeksen er på et kritisk nivå. Årsaken til dette er at referansesituasjonen er en kritisk situasjon, og en reduksjon i antall kritiske timer ikke nødvendigvis er nok for at situasjonen skal bli skadefri.

#### Parameter med liten eller ingen effekt:

Flere av parameterne som ble undersøkt viste seg å gi en svært liten innvirkning på risikoen for muggvekst i kantbjelken. Dette gjelder spesielt parametere som angår damptettheten til sjiktene ved de ulike overflatene, slik som vindsperre, lufttett sjikt i himling og undergulvet. Ved å gjøre både vindsperren og det lufttette sjiktet i himlingen noe mer damptett, gjør det svært lite utslag for både relativ fuktighet i kantbjelken og muggindeksen. Graden av damptetthet for disse sjiktene har dermed lite å si for kantbjelken. Begge disse sjiktene skal være dampåpne og det er her undersøkt hele intervallet av damptetthet som er vanlig for produkter som skal være dampåpne. Det samme observeres ved endring av type undergulv. Her ble det gjort en endring til både et mer og et mindre damptett materiale, men dette ga svært lite utslag for kantbjelkens relative fuktighet og muggindeks. En mulig årsak til dette kan være undergulvets plassering under gulvbelegget. Endringen av damptetthet for undergulvet har muligens ikke en like stor innvirkning for gulvkonstruksjonens totale damptetthet.

Konstruksjonens byggfukt er en annen parameter som viste seg å ha liten innvirkning for muggvekst i kantbjelken. Slik som det ble beskrevet i Kap. 4.10, kommer kantbjelken raskt inn på det samme fuktmønsteret, uavhengig av hvor mye byggfukt det er ved oppstarten av simuleringen. Simuleringen av byggfukt slik den er gjort i parameterstudien vil ikke være helt korrekt, da det i simuleringen settes på en varme- og fuktstrøm fra innvendige overflater med en gang simuleringen starter. I virkeligheten vil kantbjelken ha en periode etter at konstruksjonen er lukket før bygningen tas i bruk. Det er antatt at dette ikke vil ha en innvirkning på kantbjelkens fuktmønster da det er vist fra resultatene at kantbjelken starter med en oppfukting når starten av simuleringen er satt til 1. oktober. Endring av simuleringens starttidspunkt vil gi kantbjelken et noe annerledes fuktmønster i starten, men vil også raskt komme inn på det samme fuktmønsteret. Det vil uansett oppstå en rask økning av muggindeksen når temperaturen øker på våren.

Endringen av konstruksjonens bjelkelagshøyde fører til en liten økning i antall kritiske timer for kantbjelken, men har ingen innvirkning på kantbjelkens muggindeks. Bjelkelagshøyde 350 mm gir en jevn økning i antall kritiske timer, mens bjelkelagshøyde 500 mm har en større økning i antall kritiske timer med relativ fuktighet større enn 80 % enn for kritiske timer med relativ fuktighet større enn 90 % og 95 %. Dette kan tyde på at økningen i bjelkelagshøyde innfører en treghet i systemet som gjør at endringer i fuktighet tar noe lengre tid med økt bjelkelagshøyde. Det er derfor ingen grunn til å anbefale en økt bjelkelagshøyde for å redusere muggvekst i kantbjelken.

### Parametere som forverrer situasjonen:

Av parameterendringene er det flere som gir et økt antall med kritiske timer, noe som også fører til en noe forverret situasjonen med tanke på muggvekst. I tilfellene blir ikke muggindeksen for svært sensitivt materiale forverret, da denne allerede er på det mest kritiske nivået ved referansesituasjonen. For det sensitive materialet sees det en økning i muggindeks for disse tilfellene. Parameterne som tydelig påvirker kantbjelken mest i negativ retning er de som tilfører fukt til konstruksjonen. Dette er klimaet som benyttes i simuleringen og den innvendige fuktpåkjenningen. Dette gjelder også til en viss grad innføringen av luftlekkasjer i konstruksjonen.

Ved endring av klima til både Bergen og Karasjok sees det en forverret situasjon for kantbjelken. For begge disse klimaene er den gjennomsnittlige relative fuktigheten i uteluften høyere enn for Oslo. Dette tyder på at et tørrere klima er fordelaktig for å redusere risikoen for muggvekst. På samme måte sees det at det å redusere fuktpåkjenningen fra inneluften har en svært positiv effekt, samtidig som en økning av innvendig fuktpåkjenning gir en tydelig forverret situasjon. Ved å gå fra middels til høy fuktpåkjenning er det nesten en fordobling i antall kritiske timer med relativ fuktighet større enn 90 % og 95 %. Dette er spesielt ille for kantbjelken da det er observert at det er disse timene som er de mest kritiske med tanke på økning av muggindeks. En reduksjon av tilført fukt til konstruksjonen er derfor fordelaktig med tanke på å redusere risikoen for muggvekst. Reduksjon av fukttilskudd er også spesielt viktig med tanke på å sørge for at det er nok ugunstige perioder for muggvekst ( $RF < 80\%$ ) slik at muggindeksen har mulighet til å reduseres. Mindre tilførsel av fuktighet gir lengre perioder med lavere relativ fuktighet. Nok reduksjon av muggindeksen kan være nok til at denne holdes på et stabilt nivå.

Viktigheten av å redusere mengden av tilført fuktighet til konstruksjonen er spesielt viktig dersom det er luftlekkasjer til stede. Slik som det er observert ved luftlekkasje som parameter, så er dette svært avgjørende for antallet kritiske timer i kantbjelken og for hvor hurtig muggindeksen øker. Overgangen mellom yttervegg og trebjelkelag er som nevnt en konstruksjonsdetalj som er svært utsatt for luftlekkasjer og som kan være vanskelig å utføre lufttett. Resultatene det er kommet frem til her viser at lavere risiko for muggindeks er enda et insentiv for å sørge for at overgangen utføres lufttett. Forskjellene som oppstår imellom de ulike størrelsene av luftlekkasjer kan skyldes at det er bedre forutsetninger for inneluften å avgi fuktighet til kantbjelken når luften ikke blir skiftet ut like fort. Den vil da ha tilstrekkelig tid til å avgi mer fuktighet. Dette gjør at den lave luftlekkasjer gir en høyere muggindeks enn middels luftlekkasje. Som observert i parameterstudien kan det synes at simuleringen har hatt numeriske problemer ved den høye luftlekkasjen. Det er ingen grunn til at den høye luftlekkasjen ikke skal følge samme mønster som de andre luftlekkasjene. Derfor er det grunn til å være kritisk til disse resultatene. Det er mulig at en slik høy luftlekkasje på et lite område av modellen er krevende å simulere.

### Parametere som reduserer risikoen for muggvekst:

I parameterstudien er det tre parametere som skiller seg ut ved å redusere risikoen for muggvekst i kantbjelken. Dette er bruk av smart dampspærre som lufttett sjikt i himling, bruk av trefiberisolasjon og økt veggtykkelse.

Ved bruk av smart dampspærre som lufttett sjikt i himling oppnås det en reduksjon i antall kritiske timer for kantbjelken og lengden på perioden med høy relativ fuktighet i kantbjelken forkortes. I tillegg til dette nås det en lavere relativ fuktighet om sommeren. Dette kan skyldes at den smarte dampspærren har en høyere vanndampmotstand ( $s_d = 1000 \text{ m}/200 \text{ m}$ ) enn referansesituasjonen ( $s_d = 0,014 \text{ m}$ ) på denne tiden av året. Dette kan gjøre at fukttilskuddet fra inneluften blir redusert. Effektene av lavere relativ fuktighet om sommeren og noe kortere perioder med høy relativ fuktighet om vinteren, er kombinert nok til at muggindeksen (for sensitivt materiale) holder seg på et stabilt nivå. Dette kan bety at en smart dampspærre som lufttett sjikt i himling mellom oppvarmede rom kan være en aktuell løsning. Dette må allikevel sees i sammenheng med faren for å sperre fukt imellom gulvkonstruksjonen og den smarte dampspærren. Det kan være at den smarte dampspærren er dampåpen nok på deler av året til at potensiell fuktighet i etasjeskilleren har mulighet til å tørke ut. Det kan også være en aktuell løsning dersom det er sørget for at trebjelkelaget er godt nok tørket ut før etasjeskilleren lukkes og det er gjort ekstra tiltak for å hindre at det oppstår eventuelle lekkasjer. Tiltaksanalysen (Situasjon C – Ingen tiltak) gir også gode indikasjoner på at smart dampspærre er et mulig alternativ som lufttett sjikt i himlingen. Det kan også være muligheter for at andre sjikt kan fungere her. For eksempel kan en dampbrems være tilstrekkelig dersom det er sørget for en god uttørring av bjelkelaget før etasjeskilleren lukkes.

Trefiberisolasjonen sin evne til å ta opp og holde på fuktighet gjør at antallet kritiske timer og perioden med høy relativ fuktighet for kantbjelken reduseres. Reduksjonen som trefiberisolasjonen sørger for er nok til at det ikke oppstår noe problem med muggvekst for det sensitive materialet. Muggindeksen etter tre år ligger på 2,4 for trefiberisolasjon som kantisolasjon og 2,2 for trefiberisolasjon i hele etasjeskilleren. I begge tilfellene er trenden synkende. For det svært sensitive materiale er muggindeksen fortsatt høy, men indeksen ligger her på 5,1-5,3. Dette er noe lavere enn det som er observert ved de andre parameterendringene der indeksen ligger på rundt 5,5. Det kan sees at den ekstra gevinsten det oppnås ved bruk av trefiberisolasjon i hele etasjeskilleren i forhold til kun som kantisolasjon er relativt liten. Dette betyr at ved å kun benytte trefiberisolasjon som kantisolasjon, så er risikoen for muggvekst i kantbjelken betydelig redusert. Dette gjelder allikevel kun for sensitivt materiale. Bruk av trefiberisolasjon som kantisolasjon burde ikke gi forandrede forhold i kantbjelken med tanke på temperaturendringer og kuldebroverdi, da trefiberisolasjon ifølge Hunton (2020b) har en varmeledningsevne som er omtrent på samme nivå som vanlig mineralull.

En økt veggtykkelse bidrar til å redusere antallet kritiske timer og dermed redusere muggindeksen. Dette skjer hovedsakelig på grunn av en forkortet periode med høy relativ fuktighet. Fra resultatene tyder det på at muggindeksen synker med økende veggtykkelse. For det sensitive materialet er muggindeksen stabil ved tykkelse 350 mm og synkende ved 450 mm. Grunnen til at den relative fuktigheten blir påvirket av veggtykkelse kan skyldes den økte mengden kantisolasjon og konsekvensene dette gir. Dette gir en økning (dog svært liten) i kantisolasjonens vanndampmotstand kombinert med at den ekstra kantisolasjonen også har en viss evne til å holde på fuktighet. Større veggtykkelse er derfor fordelaktig for å redusere risikoen for muggvekst i kantbjelken.

### Kantbjelke:

Parameterstudien for endring av kantbjelke skiller seg fra de resterende endringene da det i dette tilfellet også ble utført en endring av typen materialet som ble benyttet i VTT-programmet. Slik det er vist til nå kan det være stor forskjell på ulike materialer, derfor skiller denne parameterendringen seg noe fra de andre. I tilfellene der kantbjelken ble endret, ble også undergulvet endret til samme materiale. Slik det ble observert ved parameterendringen for undergulvet, så har typen undergulv liten innvirkning på fuktforholdene i kantbjelken. Derfor kan det antas at de endringene i fuktforhold som oppstår ved endring av kantbjelke kun skyldes forhold knyttet til kantbjelken og ikke undergulvet.

Fra endringen av kantbjelken sees det at det er OSB-platen som blir den minst fuktige kantbjelken. Men på grunn av at OSB-platen er mer gunstig for muggvekst er det ikke denne som gir den laveste muggindeksen. Det sees at OSB-platen har en svært lav nedgang i ugunstige perioder, men har en noe raskere økning i gunstige perioder. Dette gjør at OSB-platen muligens kan fungere som kantbjelke i kombinasjon med andre tiltak som reduserer risikoen for høy fuktighet i kantbjelken. Sponplaten oppnår en økning i muggindeks som er nesten tilsvarende som for konstruksjonsvirke og kan derfor ikke anbefales som kantbjelke. Dette er med forbehold om at materialet «*Particle board*» fra VTT-databasen er den mest korrekte tilnærmingen for dette materialet. Siden det ikke ligger et eget materiale i databasen for sponplater, så kan resultatene som er oppnådd her gi et feil bilde av sponplatens reelle oppførsel med tanke på muggvekst. Kryssfinérplaten er den platen som gir den laveste og mest stabile muggindeksen av de materialene som er testet som kantbjelke/undergulv. Denne har en høyere topp i relativ fuktighet om våren, så dette viser tydelig at typen materiale som benyttes i modelleringen har stor innvirkning på resultatene. På grunn av kryssfinérplatens større motstandsdyktighet mot muggvekst er det denne som anbefales dersom det skal benyttes et plateprodukt som kantbjelke.

## 6.3 Tiltaksanalysen

Fra tiltaksanalysen kan det sees at de tre tiltakene som er undersøkt i denne oppgaven har gitt en lavere risiko for muggvekst i de fleste tilfeller. Ved alle situasjonene er det ved bruk av tiltak oppnådd en kraftig reduksjon av den fuktige perioden på vinteren og våren. I alle situasjonene, bortsett fra én, er dette nok til at risikoen for muggvekst i kantbjelken reduseres betraktelig. For situasjon C og for sensitivt materiale i situasjon D oppleves det også at det er en akseptabel mengde med muggvekst uten bruk av tiltak.

Spesielt merkbart i situasjonene med tiltak er at det oppnås tilstrekkelig lav relativ fuktighet i kantbjelken før temperaturen begynner å stige om våren. Slik som det ble observert i parameterstudien er det nettopp denne perioden som er den mest kritiske med tanke på rask økning i muggindeksen. Ved bruk av tiltak reduseres toppunktet og varigheten for den relative fuktigheten om vinteren/våren slik at denne raske økningen ikke forekommer annet enn det første året. Det første året er fuktigere i alle situasjonene og med alle tiltakene grunnet byggfukten i materialene. Byggfukten, kombinert med at simuleringen starter om høsten, gjør at det fortsatt oppstår kritiske nivåer for muggindeks i tilfellene med svært sensitivt materiale. I motsetning til i parameterstudien ville nok en redusert mengde byggfukt og simuleringstart om våren vært mer utslagsgivende i disse tilfellene. Siden det etter det første året ikke oppnås det samme nivået av høy relativ fuktighet i kantbjelken er det ingen ytterligere perioder med gunstige betingelser for muggvekst. Dette fører til en jevn reduksjon av muggindeksen. For det sensitive materialet havner de fleste nede på 0 i løpet av to til tre år. For det svært sensitive materialet er

muggindeksen nesten nede på et akseptabelt nivå (under 3) etter samme tidsperiode. Trenden er i disse tilfellene synkende slik at akseptabelt nivå vil nås innen kort tid.

#### Vertikalt sperresjikt:

Bruk av et vertikalt sperresjikt mellom kantisolasjonen og bjelkelagsisolasjonen er et tiltak som ut ifra resultatene synes å være et svært effektivt tiltak for å redusere risikoen for muggvekst i kantbjelken. For samtlige situasjoner fører det vertikale sperresjiktet til en betydelig nedgang i antall kritiske timer og relativ fuktighet, noe som også påvirker muggindeksen.

Ved bruk av et vertikalt sperresjikt vil vandampdiffusjonen fra innvendig side begrenses ut mot kantbjelken. Dette gjør at det oppnås tørre nok perioder etter det første året slik at det videre er ugunstige betingelser for muggvekst. Dermed oppstår en jevn reduksjon av muggindeksen ned mot 0. Dette gjelder i alle tilfeller, bortsett fra situasjon B. Her er toppene i relativ fuktighet likevel høye nok om vinteren og våren til at det forekommer en økning i muggindeksen hvert år. Ved bruk av dampbrems som vertikalt sperresjikt er denne økningen relativt lav. Kombinert med en kraftig nedgang om sommeren gir ikke dette ytterligere høy muggindeks annet enn det første året. Ved bruk av smart dampsperre er den relative fuktigheten i kantbjelken høyere slik at reduksjonen av muggindeksen i ugunstige perioder er lavere og økningen i gunstige perioder noe høyere enn ved bruk av dampbrems. Dette gjør at det ved bruk av smart dampsperre for situasjon B vil være høy muggindeks. Allikevel oppnås det en svak reduksjon av muggindeksens toppunkt hvert år slik at den etter noen år vil havne ned på et akseptabelt nivå.

Situasjon B er den eneste situasjonen hvor det observeres en tydelig forskjell mellom dampbremsen og den smarte dampspennen. Situasjon B er en kombinasjon av ugunstige parametere slik at fuktpåkjenningen for denne situasjonen er større enn hos de andre situasjonene. Slik det observeres i Figur 80 så er den relative fuktigheten inn mot sperresjiktet på rundt 65-80%, noe som tilsvarer en  $s_d$ -verdi på rundt 0,2-3 m (Tabell 18). Dette er mer dampåpent enn dampbremsen, som har en konstant  $s_d$ -verdi på 5 m. Dette tyder på at et noe mer damptett materiale som vertikalt sperresjikt er fordelaktig ved høye fuktpåkjenninger.

For de resterende situasjonene oppfører den relative fuktigheten i kantbjelken seg relativt likt. I disse tilfellene oppnås det samme toppunktet i relativ fuktighet om våren på rundt 87 %. På samme måte som hos situasjon B oppleves en økning i muggindeks det første året, som deretter opplever en konstant reduksjon ned mot 0. I disse situasjonene er det i praksis ingen forskjell mellom dampbrems og smart dampsperre.

Til tross for at bruken av et vertikalt sperresjikt synes å være en velfungerende løsning, vil ikke konstruksjonen i virkeligheten være lik som den som er simulert i denne oppgaven. Simuleringen antar et kontinuerlig og lufttett sperresjikt langs hele trebjelkelagets kant. I virkeligheten vil ikke dette være mulig på grunn av bjelkelaget. Bjelkelaget har opplegg som går helt ut til kantbjelken. Derfor vil bjelkene måtte gå gjennom det vertikale sperresjiktet og dermed sørge for at det vertikale sperresjiktet ikke vil være kontinuerlig. Dersom dette skulle ha blitt utført slik som i simuleringen, måtte det vertikale sperresjiktet ha blitt lagt rundt bjelkene. Samtidig måtte det ha blitt sørget for god tetting i overgangen mellom bjelkene og sperresjiktet, samt øverst mot undergulvet og ned mot ytterveggen. Dette vil være et svært ressurskrevende og vanskelig arbeid. I dette tilfellet vil det også fortsatt være muligheter for fuktigheten å diffundere gjennom selve bjelken og videre utover mot kantbjelken. En mulig løsning på problemet kan være at kantisolasjonen

kommer fra produsenten med et pålimt sperresjikt som skal legges innover mot bjelkelagsisolasjonen. Dette sperresjiktet trenger ikke nødvendigvis og tettes rundt kanten. Dette kan gjøre at det vil oppnås en tilstrekkelig effekt uten at dette laget tettes ytterligere. Det er også muligheter for at andre materialer enn plastfolier fungerer som et vertikalt sperresjikt. For eksempel kan det benyttes innlagte plater av ulike materialer fungere. Dersom det for eksempel benyttes tilsvarende kryssfinérplate som er undersøkt i parameterstudien (22 mm tykkelse, diffusjonsmotstandsfaktor 250) vil denne ha en  $s_d$ -verdi på 5,5 m. Dette er omtrent det samme som dampbremsen som er benyttet i dette tiltaket. I dette tilfellet vil det også være risiko for muggvekst i denne platen, men slik som det sees av tiltaket å flytte kantbjelken lengre inn så er risikoen for muggvekst her svært liten. Derfor burde også dette undersøkes siden dette er en løsning som vil være mindre ressurskrevende.

Bruken av et vertikalt sperresjikt viser seg også å være trygt med tanke på faren for kondens inn mot sperresjiktet. Situasjon B er den situasjonen som opplever den høyeste relative fuktigheten inn mot sperresjiktet, da på 85 %. For de andre situasjonene ligger denne på 45 – 70 %.

#### Kantbjelke lengre inn i konstruksjonen:

Ved å flytte kantbjelken lengre inn i konstruksjonen vil antallet kritiske timer bli kraftig redusert. Det er en noe varierende reduksjon i antall kritiske timer med relativ fuktighet større enn 80 %, mens det kun er situasjon A og C som har timer med relativ fuktighet større enn 90 % ved bruk av dette tiltaket. Ingen av situasjonene har kritiske timer hvor den relative fuktigheten er større enn 95 %.

Flytting av kantbjelken lengre inn i konstruksjonen gir i de fleste tilfeller en lavere relativ fuktighet i kantbjelken enn ved bruk av et vertikalt sperresjikt. Det eneste unntaket fra dette er i situasjon B hvor kurven for relativ fuktighet følger omtrent den samme som for bruk av dampbrems som vertikalt sperresjikt. Ellers ligger toppunktet 5-10 % lavere i relativ fuktighet enn ved bruk av et vertikalt sperresjikt. Dette gjelder ikke for situasjon D. Her ligger den relative fuktigheten en god del lavere. Dette er naturlig siden den økte veggtykkelsen vil føre til at kantbjelken vil ligge en god del lengre inn i konstruksjonen. Dette gir forandrede fukt- og temperaturforhold for kantbjelken.

I likhet som ved bruk av vertikalt sperresjikt, sees det også ved dette tiltaket en tidlig økning av muggindeksen. I dette tilfellet skyldes også dette byggfukten i kantbjelken. Ved dette tiltaket skjer denne økningen det første halve året før den når et toppunkt. Dette toppunktet i muggindeks er noe forskjellig mellom de ulike situasjonene. For situasjon A og D befinner toppunktet seg på et akseptabelt nivå for både svært sensitivt og sensitivt materiale. For situasjon B og for svært sensitivt materiale i situasjon C nås en muggindeks på rundt 4. For alle situasjoner, unntatt situasjon B, skjer det også her en reduksjon slik at muggindeksen synker jevnt nedover mot 0. Dette skyldes også her at den relative fuktigheten er lavere etter det første året, og ikke høy nok til å gi gunstige betingelser for muggvekst. For situasjon B er det en høy nok relativ fuktighet gjennom hele simuleringen til at muggindeksen holdes stabilt på 4. Slik det ble observert i parameterstudien så er sponplaten (som er benyttet som kantbjelke i situasjon B) svært følsom for muggvekst. Det er derfor muligheter for at denne situasjonen hadde hatt en akseptabel muggindeks dersom det var blitt benyttet konstruksjonsvirke.

For de resterende situasjonene sees det at muggindeksen vil holde seg stabilt på 0 når den har kommet ned til dette nivået. Dette nivået nås på noe ulike tidspunkt for de ulike

simuleringene. Det tar lengst tid for situasjon C, noe som skyldes at denne opplever en størst muggindeks det første året. Dette skyldes en noe høyere relativ fuktighet i kantbjelken de første månedene i forhold til situasjon A og D. I situasjon C benyttes det en smart dampspærre i himlingen. Denne vil være mer damptett på alle tidspunkt enn det lufttette sjiktet som er benyttet ved de andre simuleringene. Dette gir en mindre mulighet for uttørking mot inneluft de første månedene for situasjon C. Det er naturlig at større mengder av fuktigheten i kantbjelken vil tørke mot inneluft da kantbjelken ved dette tiltaket vil være nærmere den innvendige overflaten i himlingen.

Flytting av kantbjelken lengre inn synes å være en lovende løsning for å redusere risikoen for muggvekst i kantbjelken. Tiltaket gir i stor grad en reduksjon av kantbjelkens muggindeks og i de fleste tilfeller er denne 0. Allikevel må den praktiske anvendbarheten til tiltaket vurderes. Konstruksjonsdetaljen må fortsatt konstrueres slik at lastene fra ytterveggen i den øverste etasjen blir ført ned i etasjen under. Dette kan bli krevende dersom kantbjelken (og dermed bjelkelaget) flyttes for langt inn. Dette kan spesielt bli et problem ved større veggtykkelser. Siden tiltaket ved å plassere kantbjelken lengre inn hadde en såpass god effekt, er det muligheten for at å flytte kantbjelken en kortere avstand innover i bjelkelaget også kan fungere. I dette tilfellet vil oppleggslengden til bjelkelaget være større enn 70 mm. Dette kan løse eventuelle problemer som måtte oppstå med lastoverføring og vil muligens være nødvendig ved større veggtykkelser.

## 6.4 Resultatenes anvendbarhet

Slik som det observeres av resultatene kan det oppstå svært store forskjeller i muggindeks når materialet endres. Det svært sensitive materialet som er benyttet i denne oppgaven gir en svært høy muggindeks i de fleste tilfeller. Det er ikke trolig at vanlig konstruksjonsvirke, spesielt den som er utsatt for en form for overflatebehandling vil være like utsatt som det svært sensitive materialet. Det er mer sannsynlig at det sensitive materialet gir et mer korrekt bilde for hvordan treverket i kantbjelken reagerer med tanke på muggvekst. Men til tross for dette gir det svært sensitive materialet gode indikasjoner på hvilke forhold som kan oppstå dersom materialet faktisk viser seg å være like sensitivt som det svært sensitive materialet. Forskjellene mellom de ulike parameterne er også lettere å tolke når det benyttes et materiale som er så sensitivt for muggvekst. Slik som det er nevnt tidligere er valg av materialet den største usikkerheten i analyser av muggvekst. Det er derfor slik at resultatene fra denne oppgaven ikke nødvendigvis betyr at kantbjelken er så utsatt som det ser ut til fra resultatene.

Som nevnt er VTT-modellen en empirisk modell som er basert ut ifra observasjoner fra laboratorieundersøkelser. Ifølge Hukka og Viitanen (1999) er modellen basert på antagelsen om at overflatene på materialene som undersøkes er i kontakt med omkringliggende luft. Dette er ikke tilfellet for kantbjelken som er plassert inne i konstruksjonen. Omkringliggende luft inneholder mer næring som er gunstig for muggvekst i tillegg til en økt tilførsel av oksygen. Denne effekten tilsier at modellen fører til en høyere muggvekst enn det som faktisk vil oppstå i en virkelig konstruksjon når det undersøkes overflater som er bygget inn i konstruksjonen. Dette gir at resultatene som er kommet frem til i denne oppgaven er på konservativ side.

Simuleringen som er utført i denne oppgaven vil kun være relevante for konstruksjoner som er bygget opp med samme konstruksjonsprinsipper som simuleringssmodellen. I bygninger med høye energiambisjoner benyttes gjerne større veggtykkelser kombinert med kontinuerlig dampspærre forbi etasjeskilleren. I disse tilfellene vil ikke de samme problemene rundt muggvekst i kantbjelken oppstå.



## 6.5 Usikkerhet og feilkilder

I denne oppgaven er det utført simuleringer i WUFI-2D. Ved bruk av et slikt beregningsprogram er det alltid muligheter for at det kan oppstå usikkerheter. Det er kun oppdaget tydelige numeriske feil ved simulering av luftlekkasjer, men det kan også ha oppstått i andre tilfeller.

I et forsøk på å unngå numeriske problemer i beregningene er det bevisst tatt et valg om å beholde standardverdier fra WUFI-2D for både node-størrelser i modellen og materialparametere. Dette kan gi feil i enkelte tilfeller. Spesielt for mineralull er sorpsjonskurven til standard-materiale i WUFI-databasen noe annerledes enn i virkeligheten. Denne gir mulighet for kapillærkondensasjon i mineralull ved høye verdier for relativ fuktighet, noe som ikke er et realistisk scenario. Sletfjerdings (2019) utførte lignende simuleringer og opplevde problemer i beregningene ved bruk av en annen, mer korrekt sorpsjonskurve. Det ble derfor besluttet å ikke endre sorpsjonskurven for mineralull i dette tilfellet. Enkelte steder i resultatene er det hentet ut resultater fra områder med mineralull. Dette gjelder for resultater for den relative fuktigheten lengre inn i konstruksjonen i parameterstudien og relativ fuktighet på innsiden av sperresjiktene i tiltaksanalysen. På disse stedene er det muligheter for noe urealistiske verdier på grunn av dette.

I tillegg er det usikkerhet knyttet til materialparametere som er benyttet for andre materialer, spesielt for treverket. Her kan det i virkeligheten være store variasjoner mellom ulike typer treverk, og det er ikke sikkert at materialet som er benyttet i simuleringen er en korrekt tilnærming. Spesielt stor forskjell er det mellom bruk av kjerneved og yteved. Kjerneved har en større motstandsdyktighet mot muggvekst enn det yteved har.

Det kunne også ha blitt gjort enkelte endringer på modellen som er benyttet i simuleringene. I modellen er gulvbelegget modellert som vanlig treverk, slik som den som er benyttet ellers i simuleringene. Denne er derfor en del mindre damp tett enn det en gulvkonstruksjon ville ha vært i virkeligheten. I virkeligheten benyttes gjerne et gulvbelegg i kombinasjon med andre gulvmaterialer (f. eks trinnlydsplater eller andre gulvplater). Dette vil til sammen føre til en større damp tetthet for gulvkonstruksjonen enn den som det er simulert med i denne oppgaven. Det ble observert at undergulvets damp tetthet ikke hadde stor innvirkning for muggvekstrisikoen i kantbjelken. Men dersom gulvkonstruksjonens damp tetthet hadde økt kunne det hatt en større påvirkning.



## 7 Videre arbeid

Resultatene fra denne oppgaven har vist at det kan være interessant med nærmere undersøkelser av hvor skadeutsatt kantbjelken er. En generell undersøkelse rettet mot bransjen for å kartlegge kunnskapen rundt muggvekst i kantbjelken kunne ha vært interessant. Her er det også mulig å undersøke hvilke forhåndsregler som utføres for å forhindre at skader oppstår dersom det utføres noen i det hele tatt.

En nærmere undersøkelse av tiltakene som er utført i denne oppgaven kan gjøres for å undersøke hvor gode disse faktisk er. I denne oppgaven er det observert at disse har en effekt, men som nevnt er det noen praktiske utfordringer knyttet til disse. Det er også interessant med en litteraturstudie som undersøker om problematikken er forsket på i andre land og hvilke metoder som eventuelt benyttes for å håndtere dette.

Det kan også gjøres nærmere undersøkelser på tilfeller der det er observert skader på kantbjelken. Hvilke parametere finnes i dette tilfellet? Har fuktpåkjenningen vært høy eller har det vært luftlekkasjer til stede? En slik studie er interessant for å undersøke om funnene fra denne oppgaven stemmer overens med observasjoner fra virkelige konstruksjoner.



## 8 Konklusjon

I denne oppgaven er det utført simuleringer i WUFI-2D for å undersøke hvordan ulike parametere vil påvirke risiko for muggvekst i trebjelkelagets kantbjelke. Det er også undersøkt om bruken av to ulike tiltak kan ha en effekt for å redusere denne risikoen.

Fra parameterstudien er det observert at muggvekst i trebjelkelagets kantbjelke synes å være et problem. Kantbjelken vil, uavhengig av parametere som er benyttet, oppleve en svært høy fuktighet om vinteren og våren. Denne høye fuktigheten, kombinert med økende temperaturer om våren, gjør at kantbjelken opplever en svært rask økning i muggindeksen. Dette tyder på at kantbjelken er en detalj i trebjelkelaget som det muligens burde vies ekstra oppmerksomhet til med tanke på utbedringer og tiltak.

Den relative fuktigheten i kantbjelken er så høy at mengden byggfukt i materialene ikke har noen innvirkning for muggveksten som oppnås på sikt. Det samme gjelder tidspunktet konstruksjonen lukkes. Risikoen for muggvekst blir i liten grad påvirket av damp tettheten til sperresjiktene som benyttes i konstruksjonsdetaljen. Dette innebærer vindsperre, lufttett sjikt i himling og undergulvet. I tillegg synes risikoen for muggvekst å bli lite påvirket av trebjelkelagets høyde. Parameterne som tilfører fukt til konstruksjonen, har en sterk innvirkning på kantbjelkens risiko. Det er derfor fordelaktig med et tørrere klima og lavere fuktpåkjønning fra inneluft for å redusere muggveksten. Luftlekkasjer fra inneluft og utover mot kantbjelken vil gi en større risiko for muggvekst. På grunn av dette burde det fokuseres på tilstrekkelig tetting av overgangen mellom trebjelkelaget og ytterveggen for at risikoen for muggvekst skal reduseres.

Bruken av smart dampspærre som lufttett sjikt i himling gir en akseptabel mengde med muggvekst i kantbjelken for det minst sensitive materialet som er undersøkt. Dette betyr at smart dampspærre kan være et alternativ til det dampåpne sjiktet som vanligvis benyttes som lufttett sjikt i himling mellom oppvarmede rom. Det må gjøres nærmere undersøkelser med tanke på uttørring av byggfukt og eventuell annen fuktighet i etasjeskilleren før dette kan anbefales som en løsning. Bruk av trefiberisolasjon, enten som kantisolasjon eller i hele etasjeskilleren er en parameterendring som gir akseptable mengder med muggvekst i kantbjelken. Det observeres også at risikoen for muggvekst reduseres med økende veggtykkelse. Dersom det skal benyttes kantbjelke i form av et platemateriale anbefales det at det benyttes kryssfinérplater, da denne er mest motstandsdyktig mot muggvekst.

Bruken av et vertikalt sperresjikt mellom kantisolasjonen og bjelkelagsisolasjonen synes å være et tiltak som fungerer svært godt for å redusere risikoen for muggvekst i kantbjelken. Både bruk av dampbrems og smart dampspærre vil fungere, men dampbremsen gir den laveste risikoen for muggvekst ved høye fuktpåkjønninger. Bruken av et slikt vertikalt sperresjikt vil ikke fungere helt slik som den er simulert i denne oppgaven grunnet trebjelkelaget som vil måtte gå gjennom sperresjiktet. Derfor må den praktiske anvendbarheten til denne løsningen undersøkes nærmere.

Ved å flytte kantbjelken lengre inn i konstruksjonen reduseres risikoen for muggvekst betraktelig. Det oppleves noe muggvekst det første året grunnet byggfukt, men denne reduseres raskt. Ved dette tiltaket vil kantbjelken bli bedre skjermet for uteklimaet og vil

oppleve fukt- og temperaturforhold som gjør det mindre gunstig for biologisk aktivitet. Ved bruk av dette tiltaket må det samtidig sørges for at det ikke oppstår ytterligere problemer med tanke på lastoverføringer mellom etasjene.

## 9 Referanser

- Betongelementforeningen (2008) *Betongelementboken - Bind E - Isolasjon, varme og lyd*. 2. utg. Oslo: Betongelementforeningen.
- DiBK (2019) *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/> (Hentet: 06.05.2020).
- Edvardsen, K. I. og Ramstad, T. Ø. (2014) *Trehus*. 10. utg. Oslo: SINTEF akademisk forlag.
- Geving, S. og Thue, J. V. (2002) *Fukt i bygninger*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Geving, S., Holme, J. og Uvsløkk, S. (2010) *Alternative dampsperrer med uttørkingmulighet mot innelufta*. (Prosjektrapport 65-2010). Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Geving, S. og Holme, J. (2012) Mean and diurnal indoor air humidity loads in residential buildings, *Journal of Building Physics*, 35(4), s. 392-421. doi: 10.1177/1744259111423084.
- Geving, S. (2016) *Velkommen til wufi.no*. Tilgjengelig fra: [www.wufi.no](http://www.wufi.no) (Hentet: 21.05.2020).
- 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 (2020a) *Hunton Vindtett™*. Tilgjengelig fra: <https://www.hunton.no/produkter/vegg/hunton-vindtett/> (Hentet: 14.05 2020).
- Hunton (2020b) *Hunton Nativo® Trefiberisolasjon Plater*. Tilgjengelig fra: [https://www.hunton.no/produkter/vegg/hunton-nativo\\_trefiberisolasjon-plater/](https://www.hunton.no/produkter/vegg/hunton-nativo_trefiberisolasjon-plater/) (Hentet: 10.05.2020).
- Mycoteam (2020) *Hva er muggsopp*. Tilgjengelig fra: <https://mycoteam.no/inneklima-mugg/hva-er-muggsopp/> (Hentet: 08.05.2020).
- Nelson, T. B. (2017) *Moisture Safety in Highly Insulated Wood-Frame Wall Constructions*. Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Norsk Trefiberisolering (2020) *Trefiberisolasjon - Transporterer fukt og forhindrer kondens*. Tilgjengelig fra: <https://www.trefiberisolering.no/om-trefiberisolasjon/fordeler/reduserer-kondens/> (Hentet: 15.05.2020).
- Ojanen, T., Viitanen, H. og Peuhkuri, R. (2007) Modelling of mould growth in building envelopes, *IEA-Annex Meeting Porto*.
- Ojanen, T. et al. (2011) Classification of material sensitivity–new approach for mould growth modeling, *9th Nordic symposium on building physics*. Tampere, 29. mai – 2. juni 2011. Tampere: Tampere University of Technology, s. 867-874.

- Relander, T.-O. *et al.* (2011) The influence of structural floors on the airtightness of wood-frame houses, *Energy & Buildings*, 43(2-3), s. 639-652. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.11.005.
- SINTEF (2003) 573.121 *Materialer til luft- og damptetting*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/598/materialer\\_til\\_luft\\_og\\_damptetting](https://www.byggforsk.no/dokument/598/materialer_til_luft_og_damptetting) (Hentet: 14.05.2020).
- SINTEF (2005) 701.401 *Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for inneklimate*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/3231/muggsopp\\_i\\_bygninger\\_forekomst\\_og\\_konsekvenser\\_for\\_inneklimate](https://www.byggforsk.no/dokument/3231/muggsopp_i_bygninger_forekomst_og_konsekvenser_for_inneklimate) (Hentet: 08.05.2020).
- SINTEF (2008) 522.355 *Etasjeskiller med trebjelkelag. Varmeisolering og tetting*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/335/etasjeskiller\\_med\\_trebjelkelag\\_varmeisolering\\_og\\_tetting](https://www.byggforsk.no/dokument/335/etasjeskiller_med_trebjelkelag_varmeisolering_og_tetting) (Hentet: 07.05.2020).
- SINTEF (2011) 522.351 *Trebjelkelag. Dimensjonering og utførelse*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/334/trebjelkelag\\_dimensjonering\\_og\\_utfoerelse](https://www.byggforsk.no/dokument/334/trebjelkelag_dimensjonering_og_utfoerelse) (Hentet: 06.05.2020).
- SINTEF (2012) 472.435 *Passivhus i tre. Eksempler på detaljer for varmeisolering og tetting*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/4036/passivhus\\_i\\_tre\\_eksempler\\_paa\\_detaljer\\_for\\_varmeisolering\\_og\\_tetting](https://www.byggforsk.no/dokument/4036/passivhus_i_tre_eksempler_paa_detaljer_for_varmeisolering_og_tetting) (Hentet: 15.05.2020).
- SINTEF (2018a) 421.132 *Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt\\_i\\_bygninger\\_teorigrunnlag](https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag) (Hentet: 09.05.2020).
- SINTEF (2018b) 525.207 *Kompakte tak*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/387/kompakte\\_tak](https://www.byggforsk.no/dokument/387/kompakte_tak) (Hentet: 15.05.2020).
- Sletfjerding, E. (2019) *Smart vapour barriers in compact timber-framed roofs*. Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Thue, J. V., Oustad, M. og Gustavsen, A. (2007) *WUFI 1D Pro 4.1 Brukermanual*. Tilgjengelig fra: <http://www.wufi.no/WUFI1D-4.1-Bruker-v3.1.pdf> (Hentet: 21.05.2020).
- Thue, J. V. (2016) *Bygningsfysikk: grunnlag*. Bergen: Fagbokforlaget.



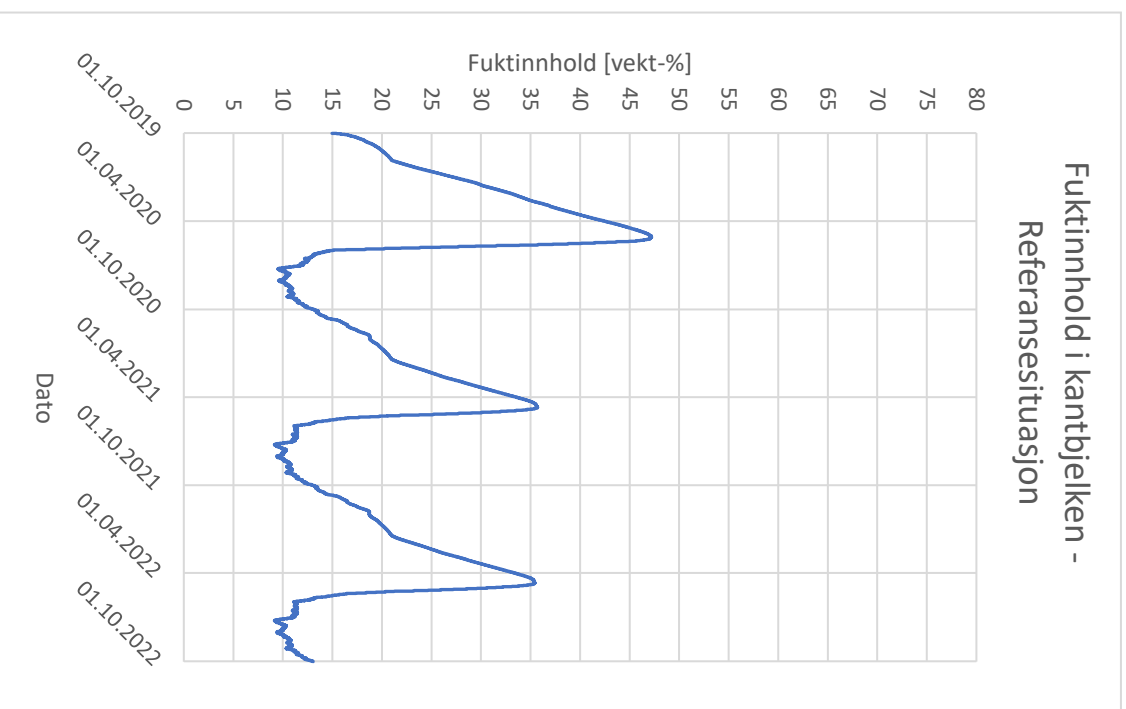
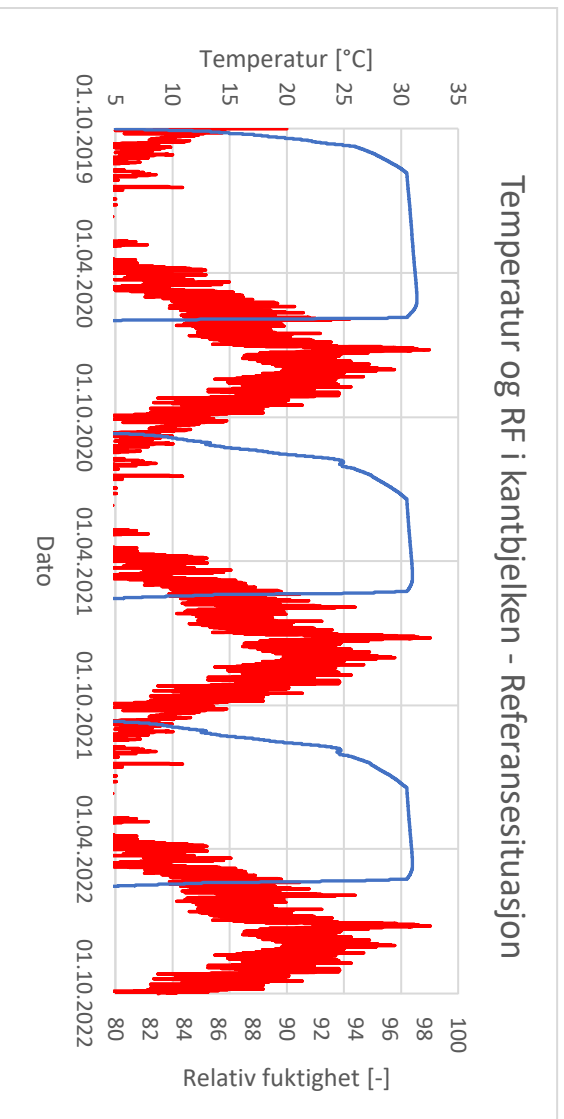
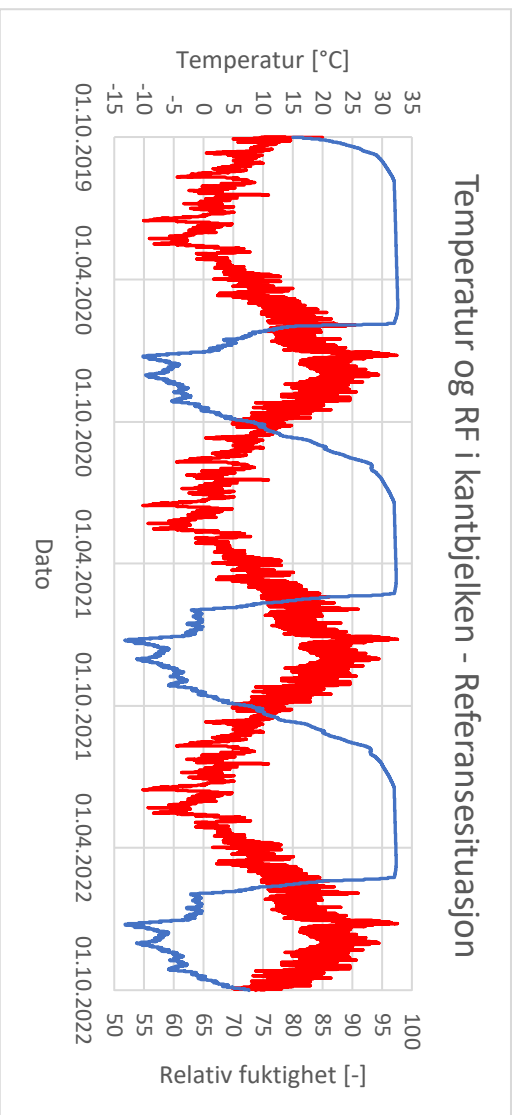
# Vedlegg

## Vedlegg 1: Liste over materialer benyttet i WUFI-2D

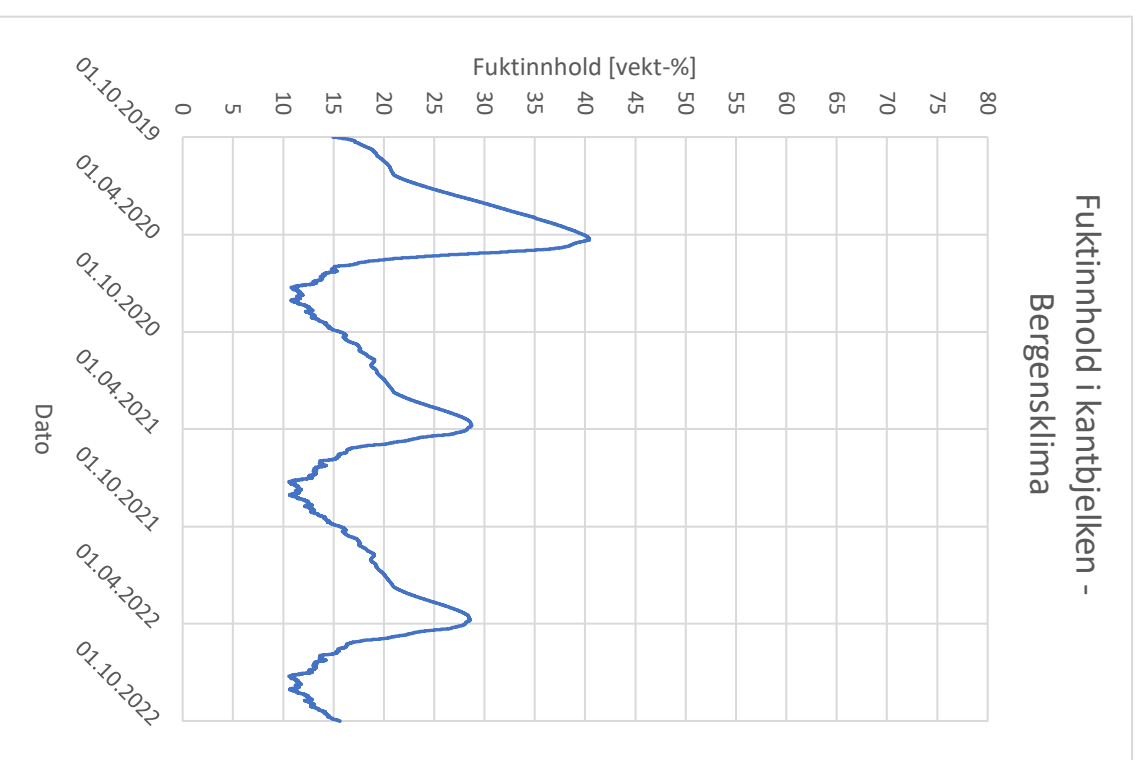
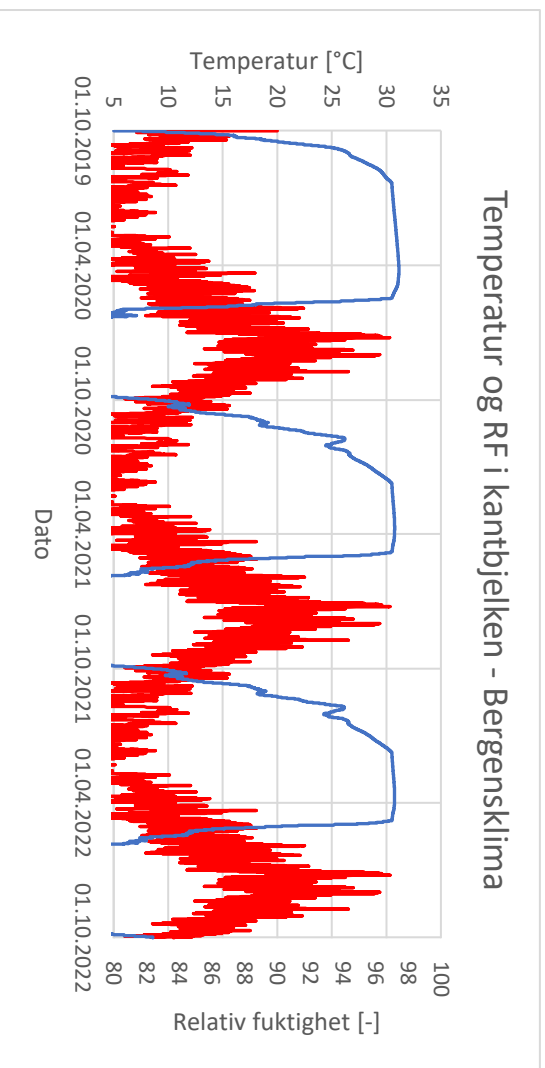
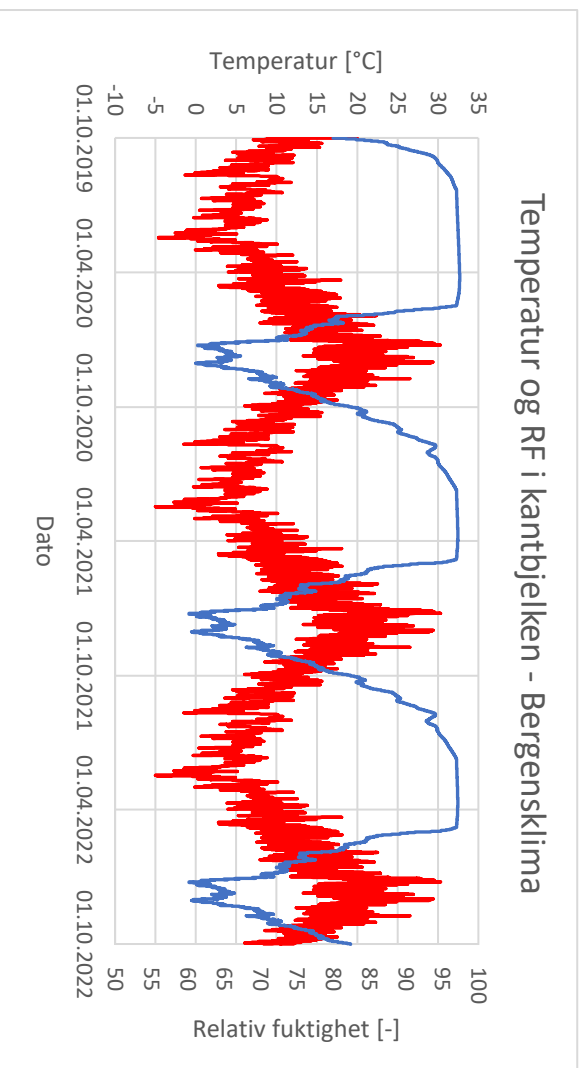
<b>Detalj i konstruksjonen</b>	<b>Materiale benyttet i WUFI-2D</b>
Kantbjelke Bunnsvill Toppsvill Utlekking Kledning Gulvbelegg	Scandinavian spruce transverse direction II
Isolasjon	Mineral Wool (heat cond.: 0,04 W/mK) (Konduktivitet endret til 0,034 W/mK)
Dampsperre	PE-Membrane 0,15 mm (sd = 70 m)
Vindsperre	Membrane of laminated polyetylen and polypropylen
Lufttett sjikt i himling	Membrane of laminated polyetylen and polypropylen
Luftespalte	Air layer 40mm; without additional moisture capacity
Innvendig kledning	Gypsum board, interior
Innvendig himling	Gypsum board, interior
Sponplate	Chipboard
<b>Vindsperre</b>	
Vindsperre sd = 0,2 m	AiF Wood-Fiber Insulation Board WF high density
Vindsperre sd = 0,5 m	Membrane of laminated polyetylen and polypropylene (endret diffusjonsmotstandsfaktor til 500)
<b>Smart dampsperre</b>	
Isola DuPont AirGuard Smart	Intello (according to german approval 2015) (Endret kurve for diffusjonsmotstandsfaktor)
SIGA Majrex	Intello (according to german approval 2015) (Endret kurve for diffusjonsmotstandsfaktor)
<b>Trefiberisolasjon</b>	
Trefiberisolasjon	AiF Flexible Wood-Fiber Insulation WF
<b>Undergulv</b>	
OSB-plater	AiF OSB 3
Kryssfinérplater	Plywood density 600
<b>Materiale i kantbjelken</b>	
Sponplate	Chipboard
OSB-plate	AiF OSB 3
Kryssfinérplate	Plywood density 600

## Vedlegg 2: Temperatur, relativ fuktighet og fuktinnhold fra simuleringene

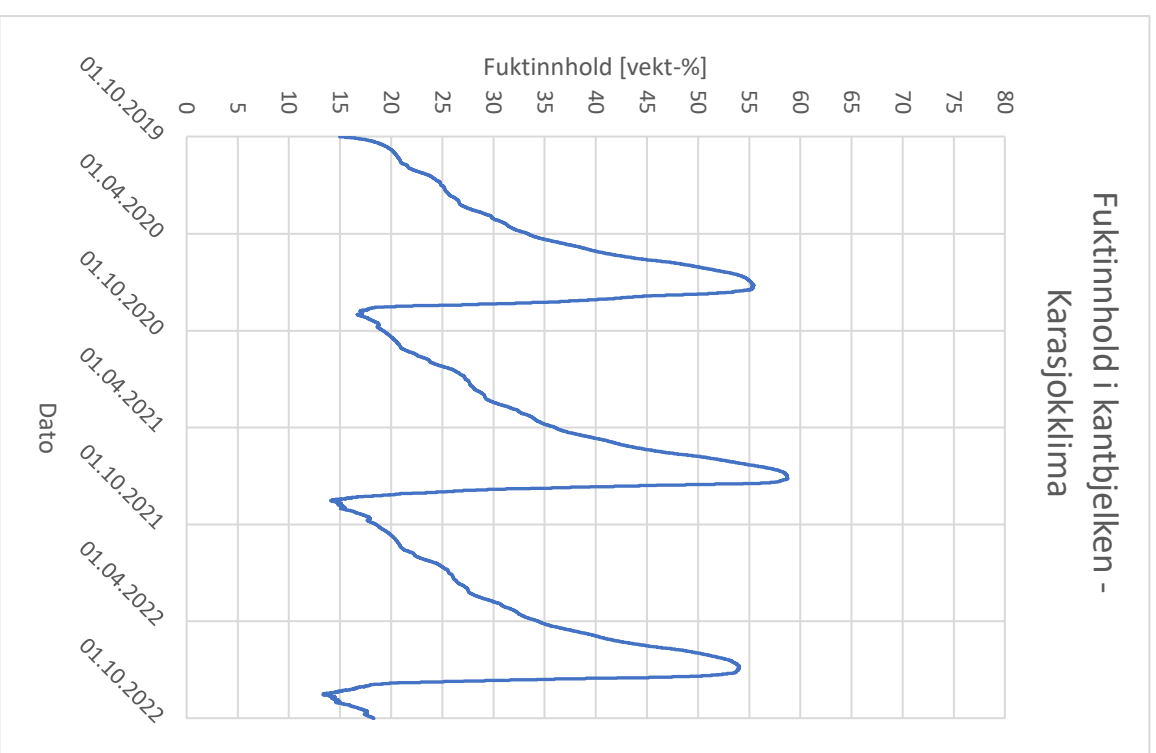
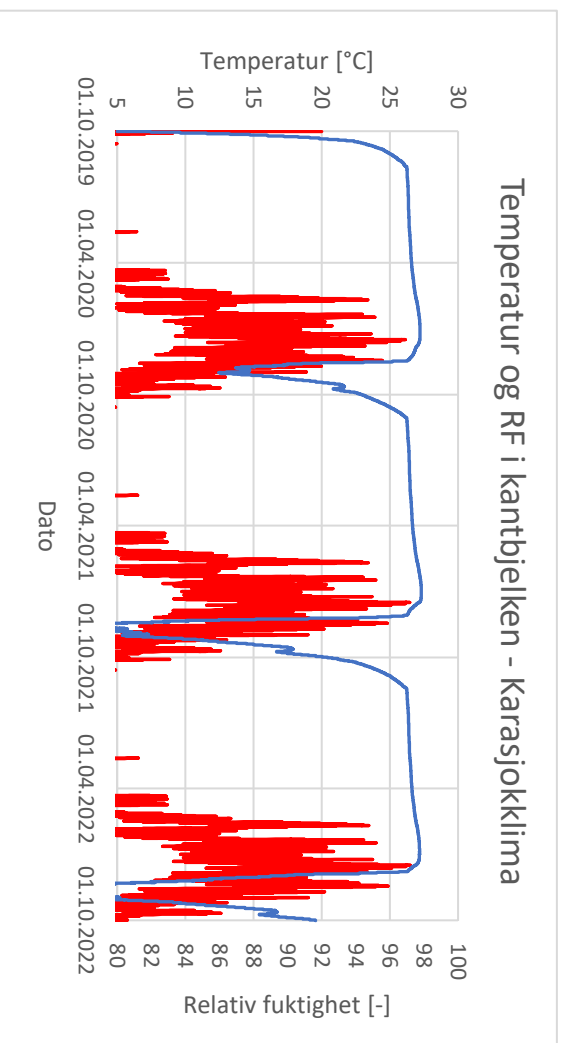
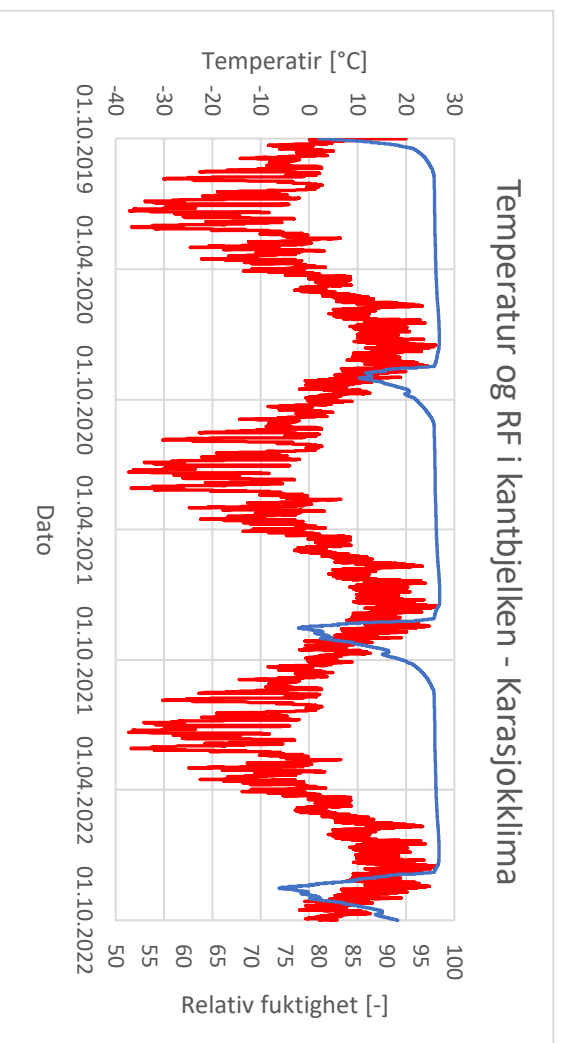
## Referansesituasjon:



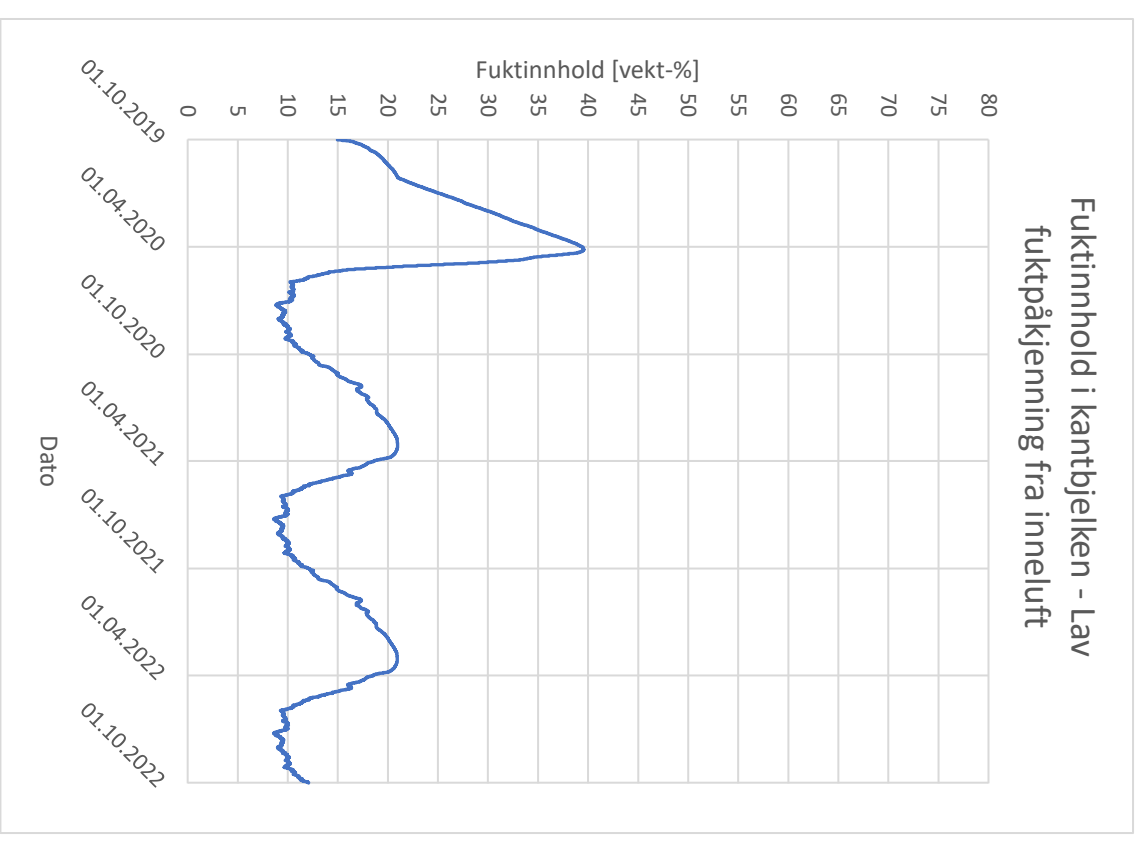
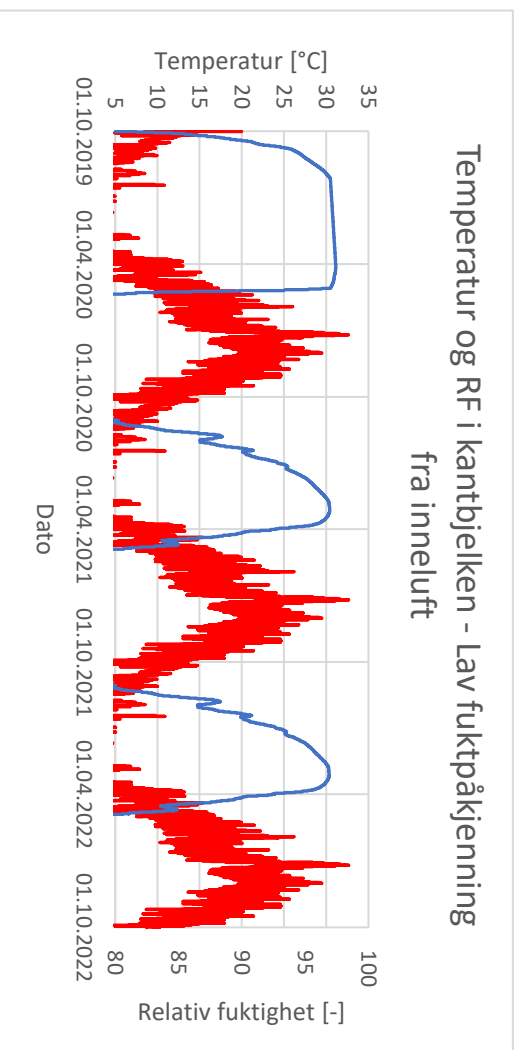
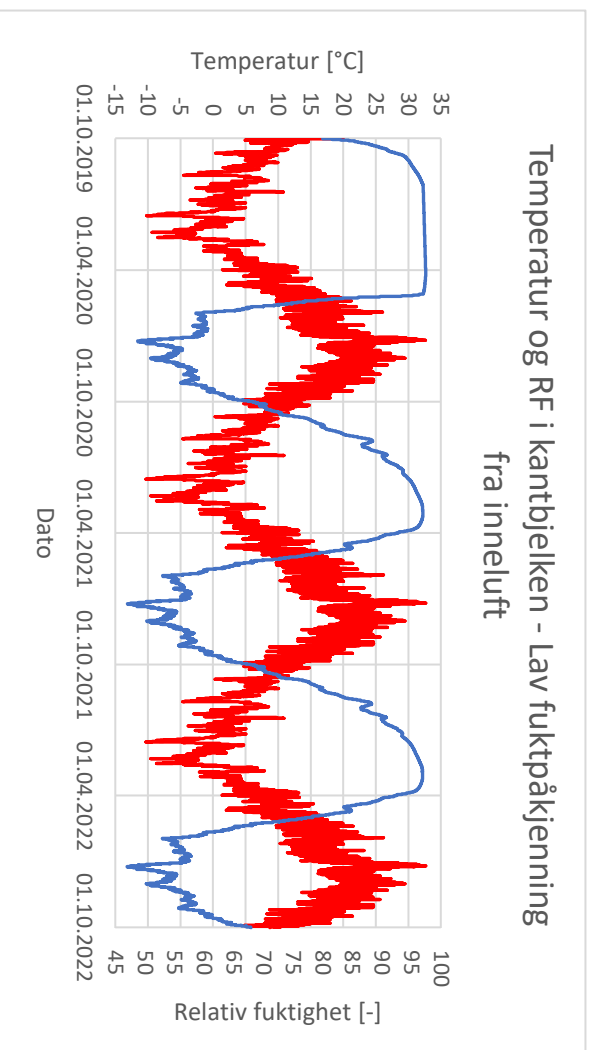
# Klima – Bergen:



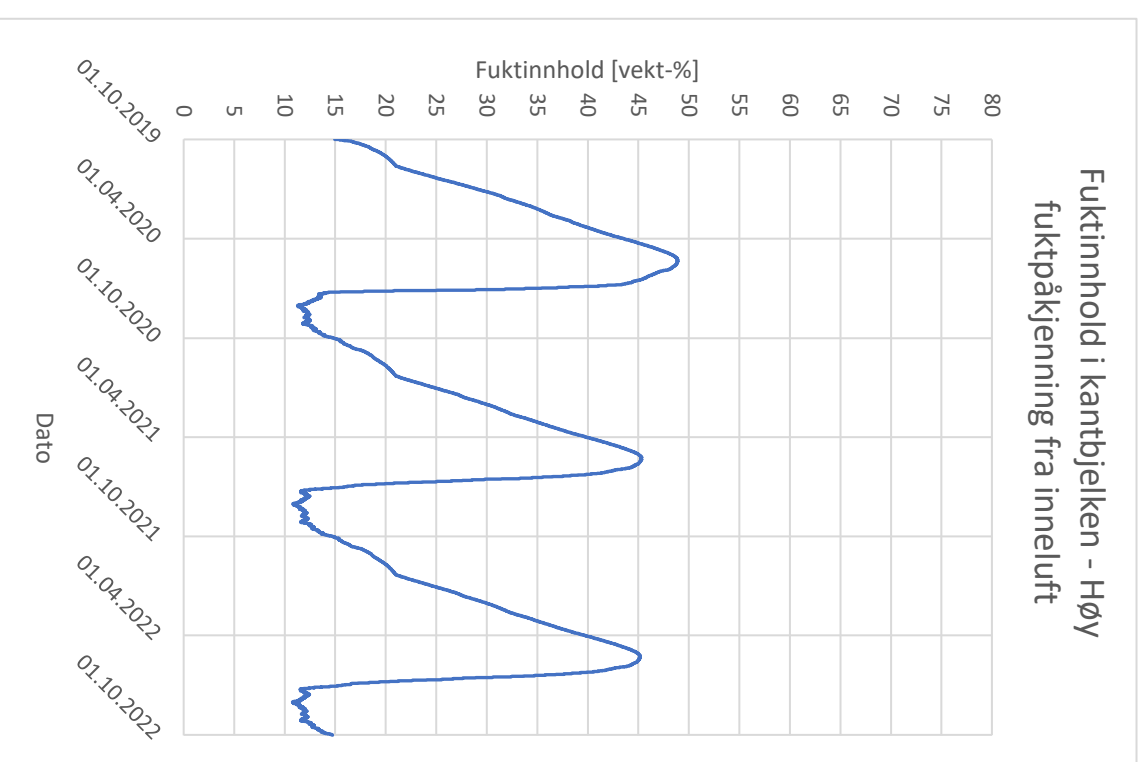
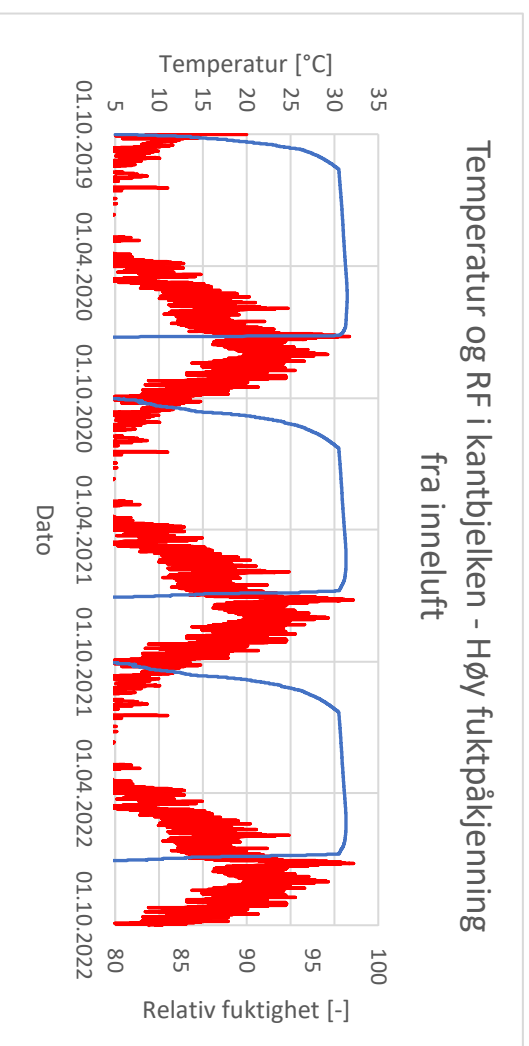
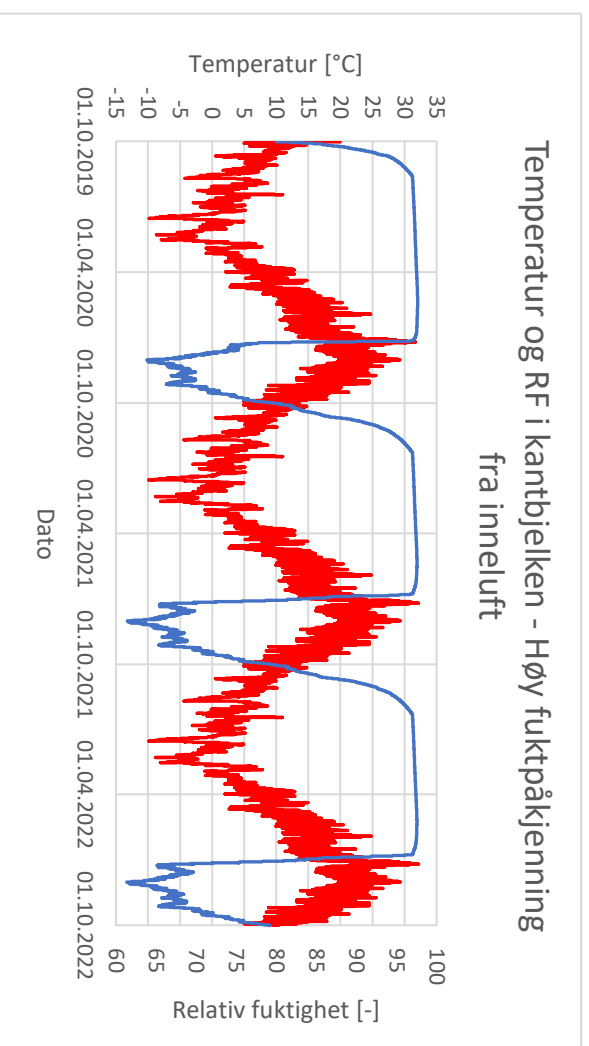
## Klima – Karasjok:



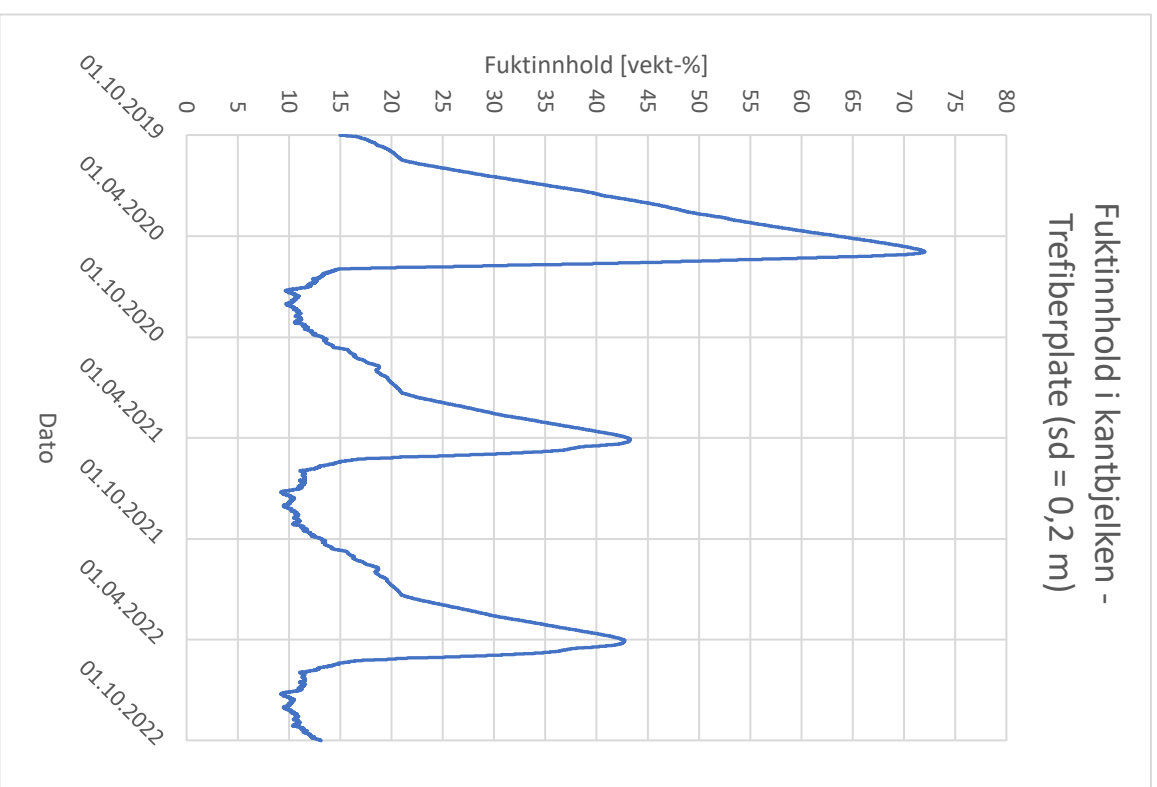
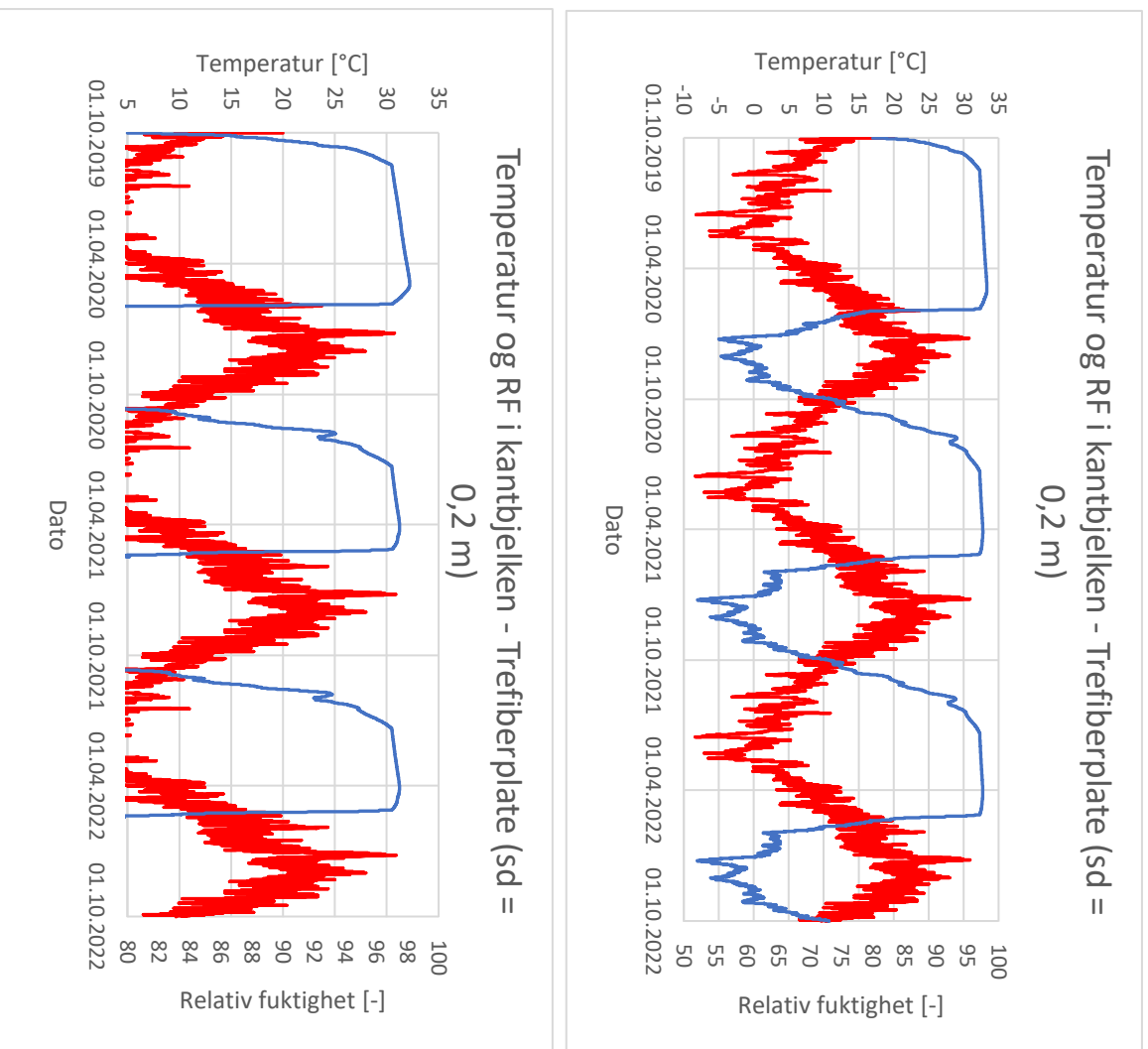
## Endring av fuktpåkjenning - lav



## Endring av fuktpåkjenning – høy



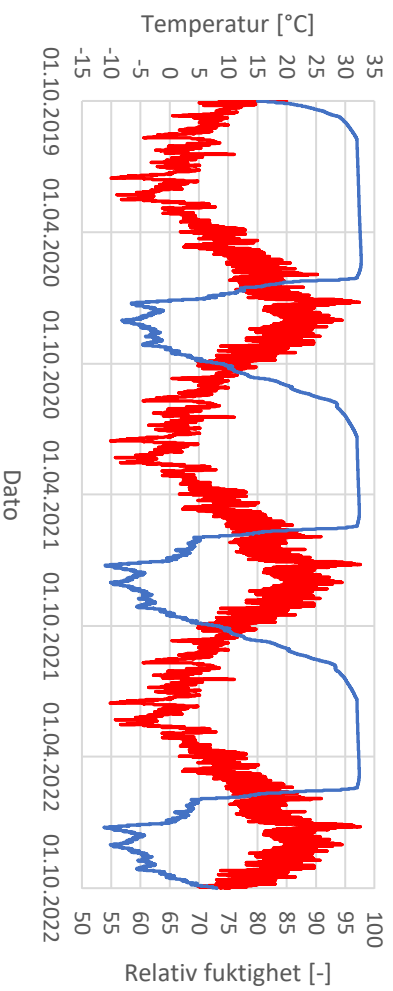
## Endring av vindspærre – Trefiberplate ( $s_d = 0,2 \text{ m}$ )



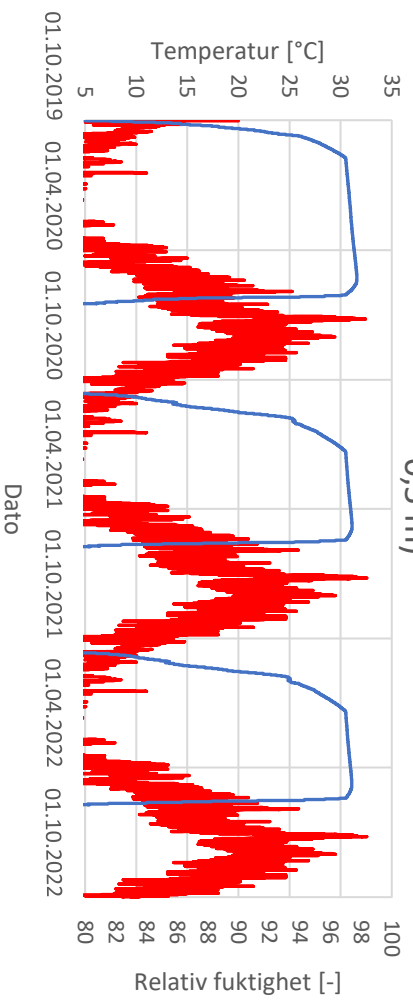


## Endring av vindspærre – Dampnett folie (sd = 0,5 m)

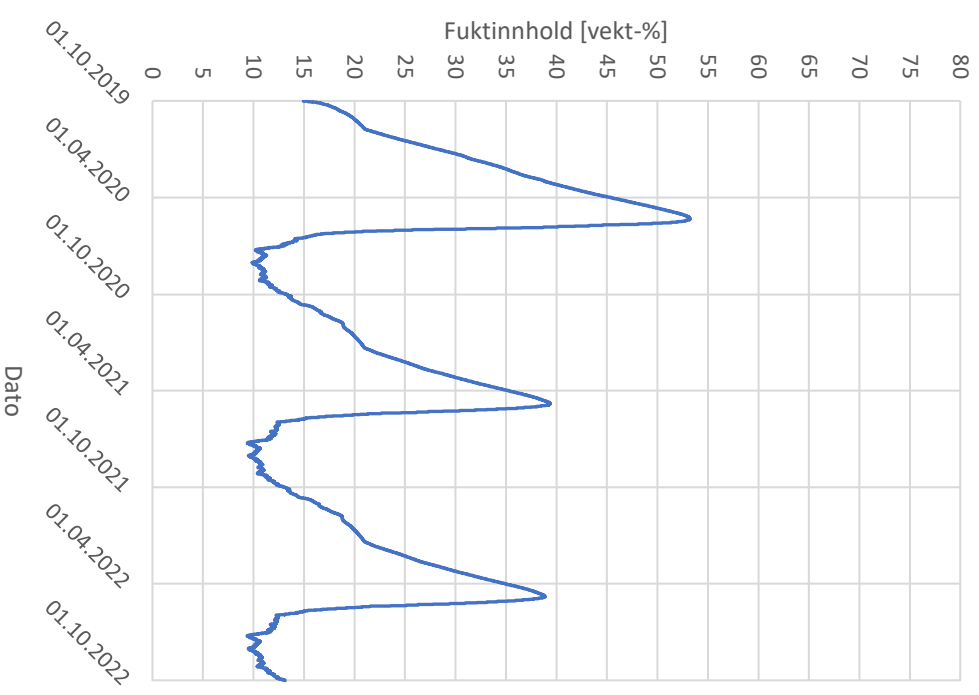
Temperatur og RF i kantbjelken - Dampnett folie (sd = 0,5 m)



Temperatur og RF i kantbjelken - Dampnett folie (sd = 0,5 m)

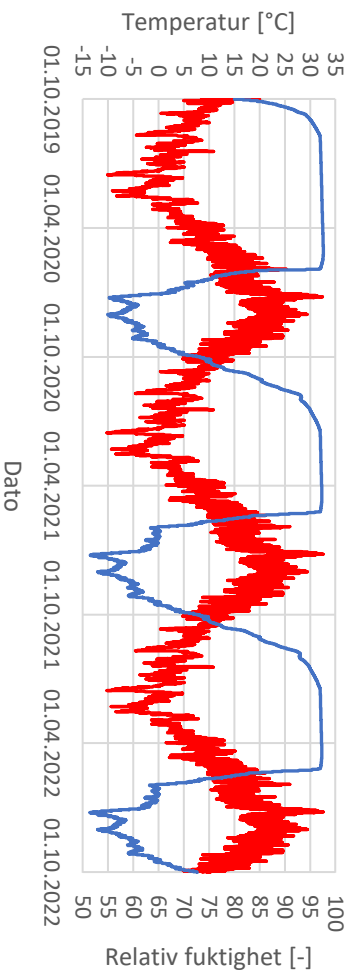


Fukttinnhold i kantbjelken - Dampnett folie (sd = 0,5 m)

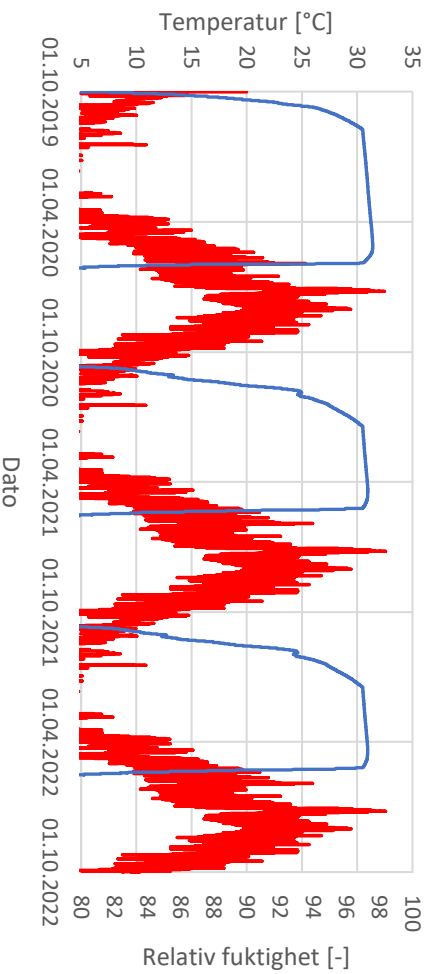


## Endring av damptetthet til lufttett sjikt i himling - $s_d = 0,2$ m

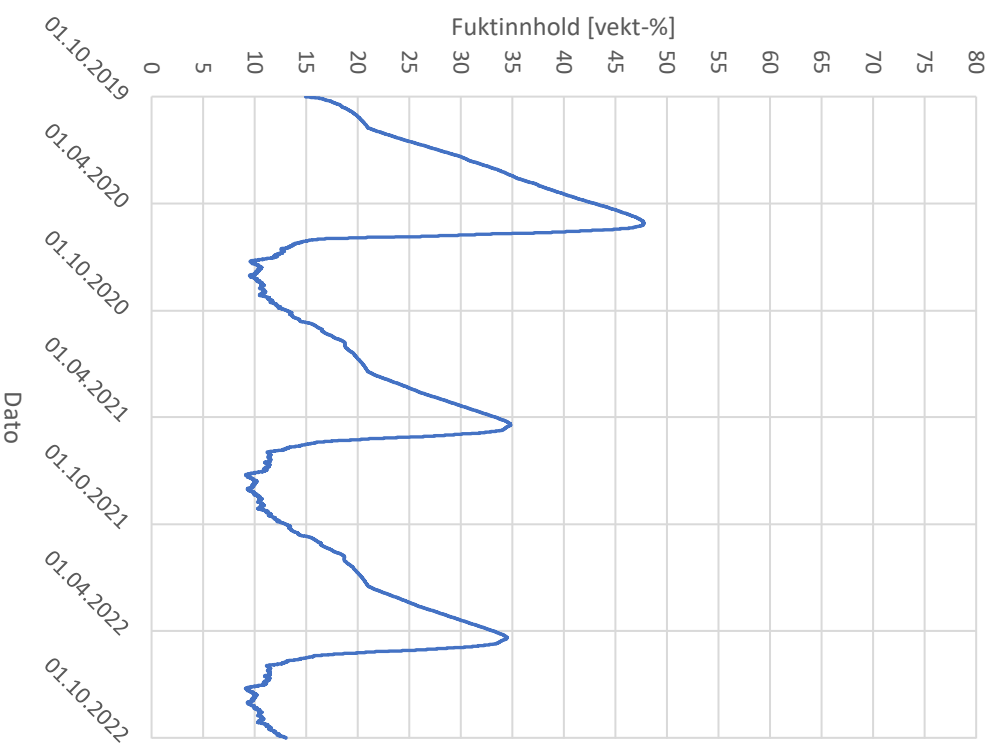
Temperatur og RF i kantbjelken -  $s_d = 0,2$  m i lufttett sjikt i himling



Temperatur og RF i kantbjelken -  $s_d = 0,2$  m i lufttett sjikt himling

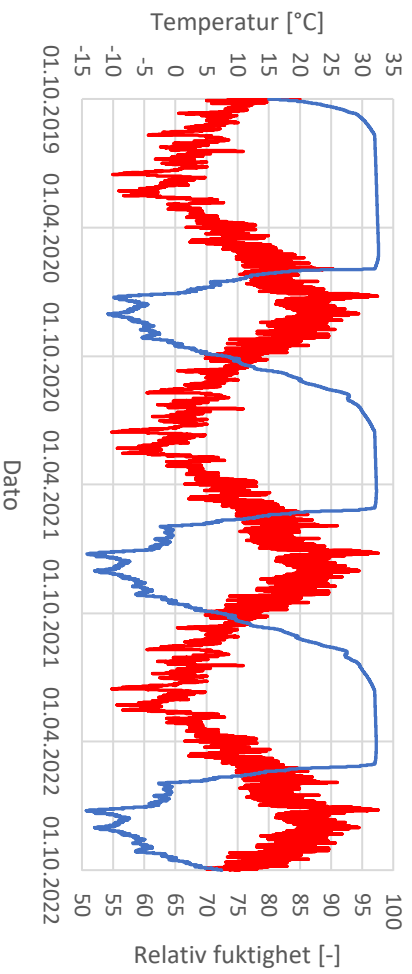


Fukttinnhold i kantbjelken -  $s_d = 0,2$  m i lufttett sjikt i himling

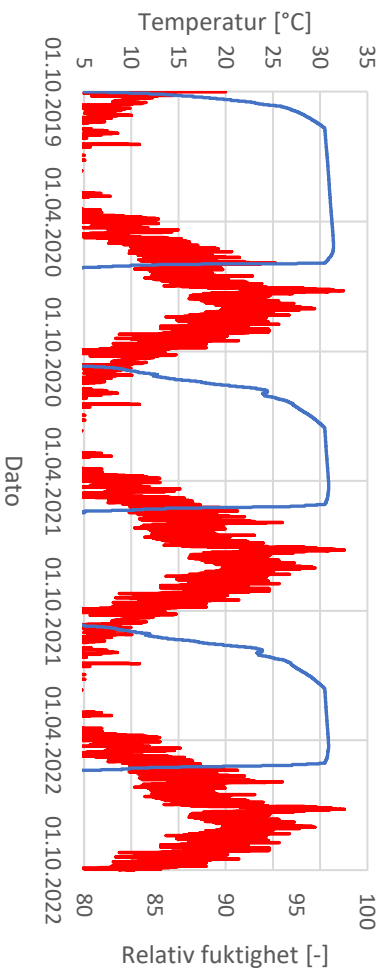


## Endring av damptetthet til lufttett sjikt i himling - $s_d = 0,5$ m

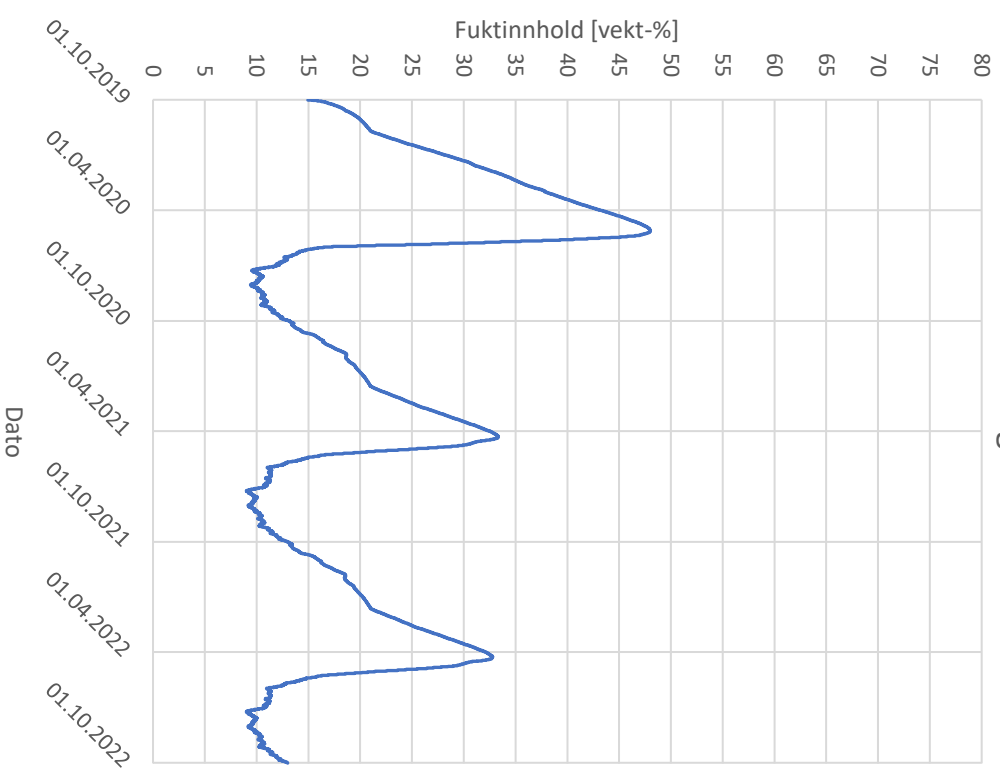
Temperatur og RF i kantbjelken -  $s_d = 0,5$  i lufttett sjikt i himling



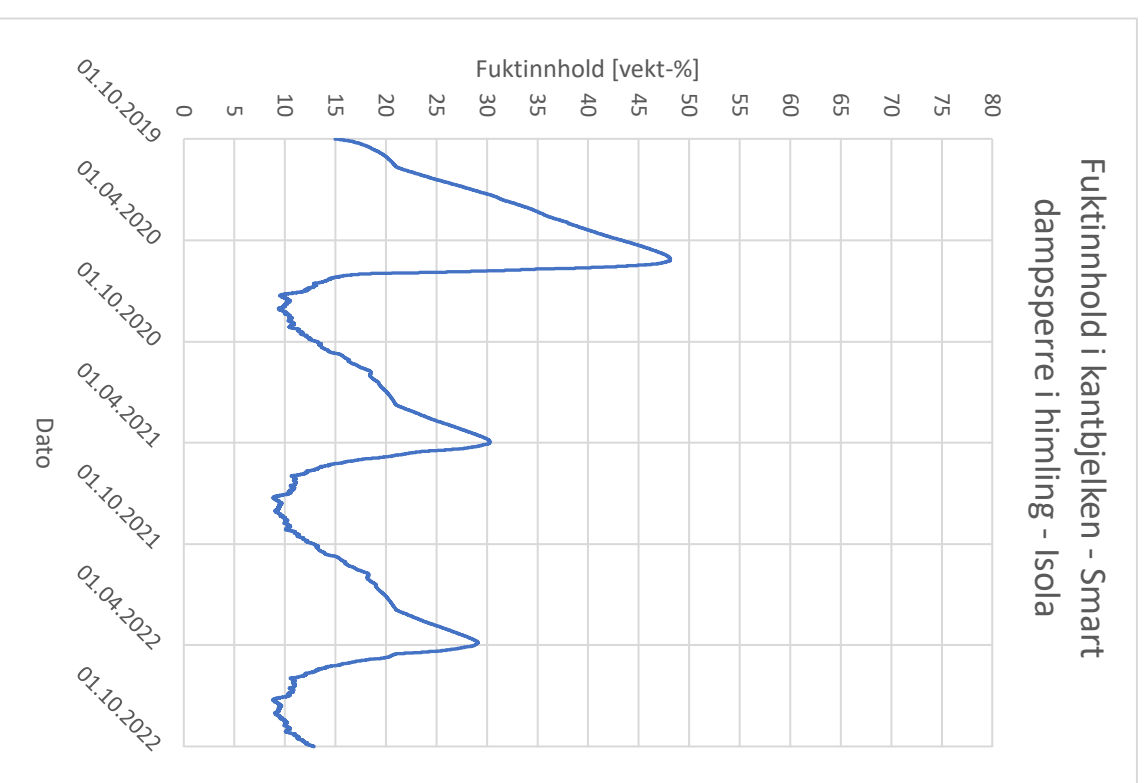
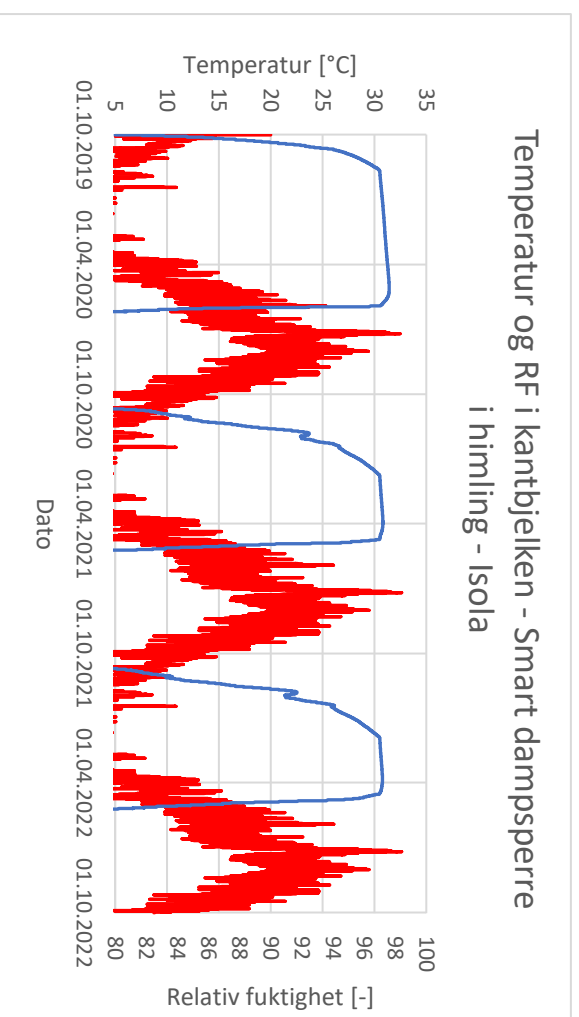
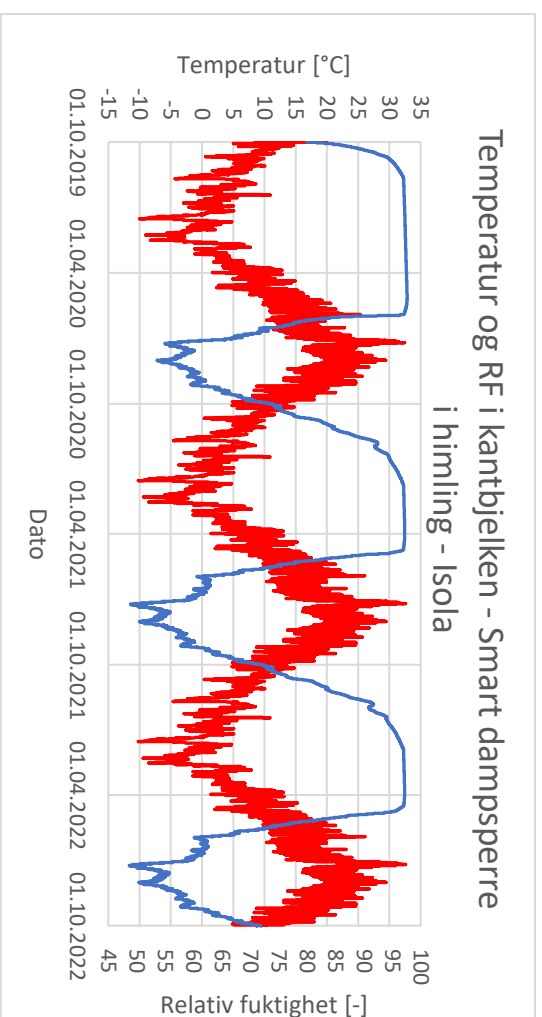
Temperatur og RF i kantbjelken -  $s_d = 0,5$  i lufttett sjikt i himling



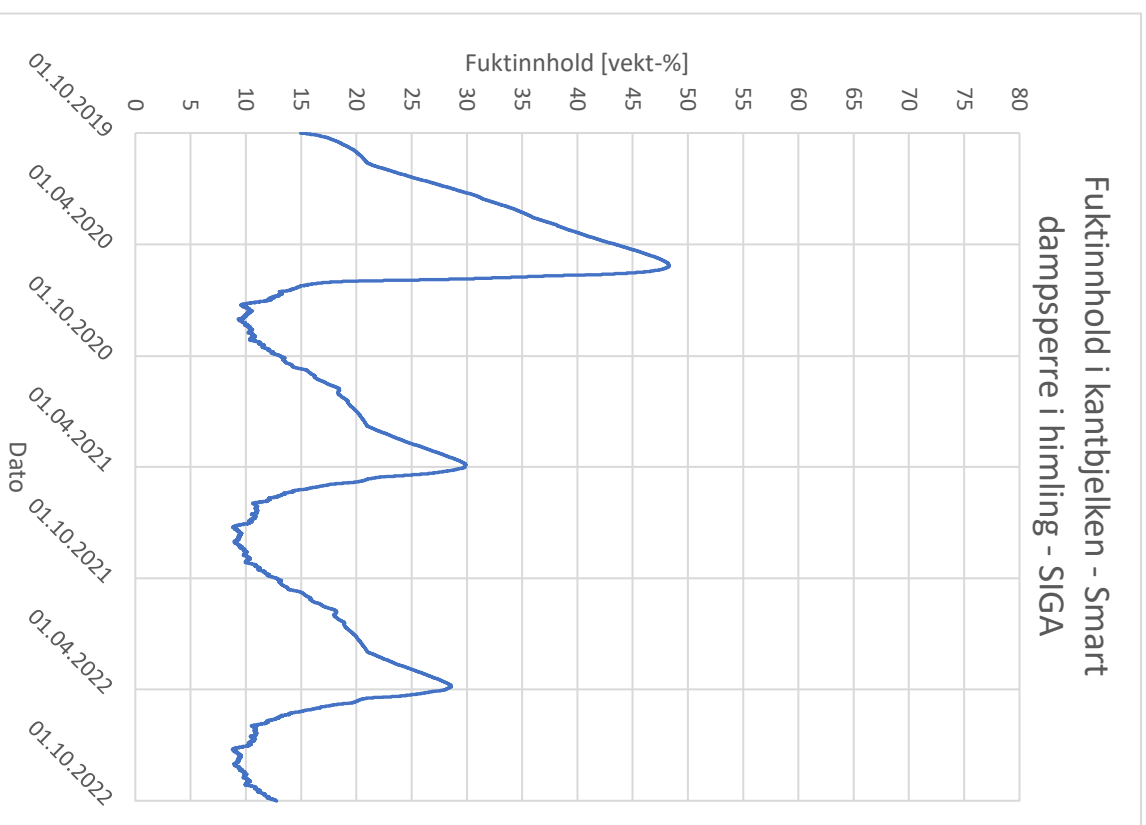
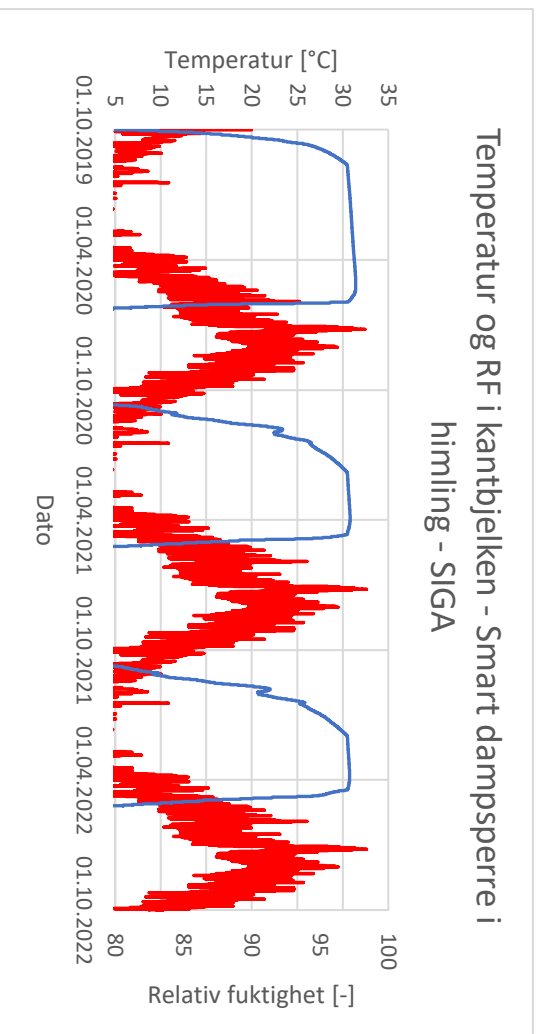
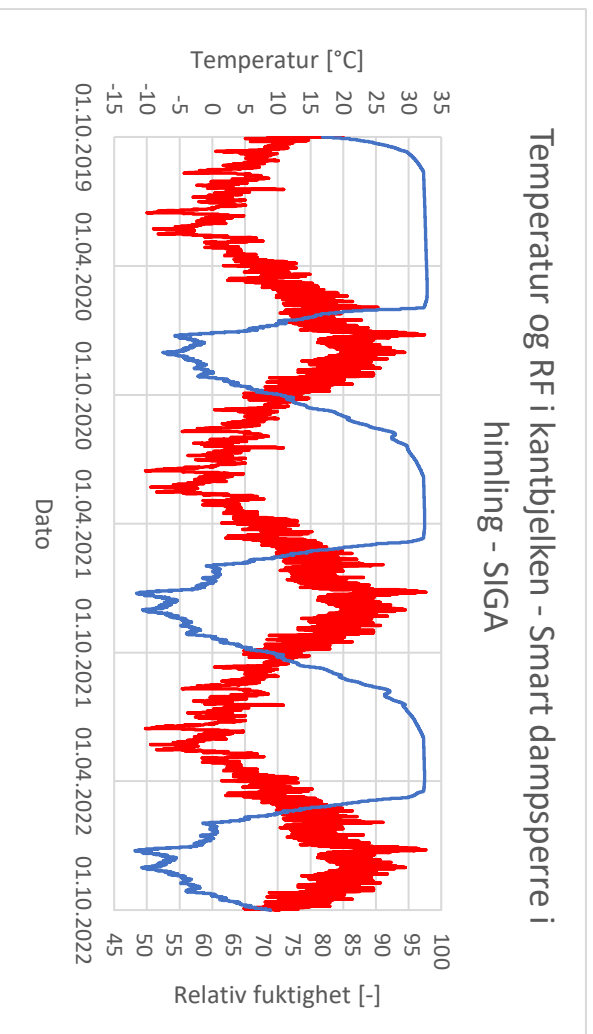
Fukttinnhold i kantbjelken -  $s_d = 0,5$  i himling



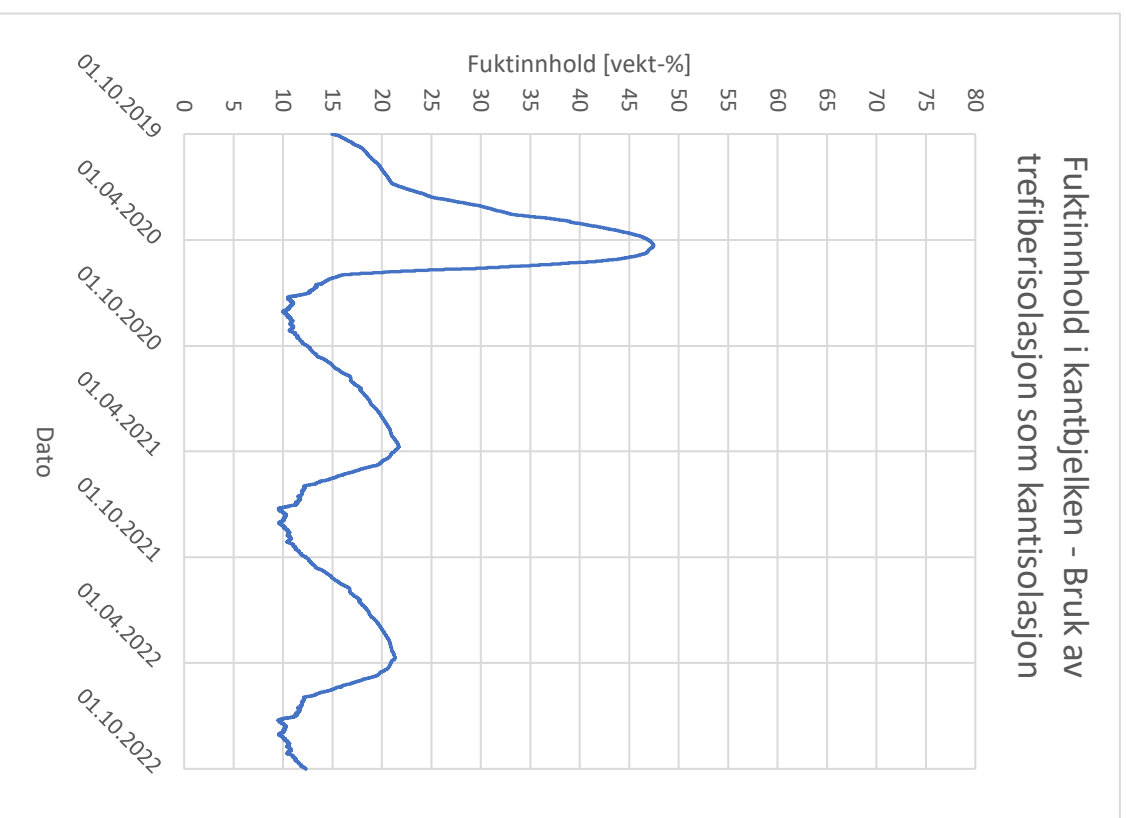
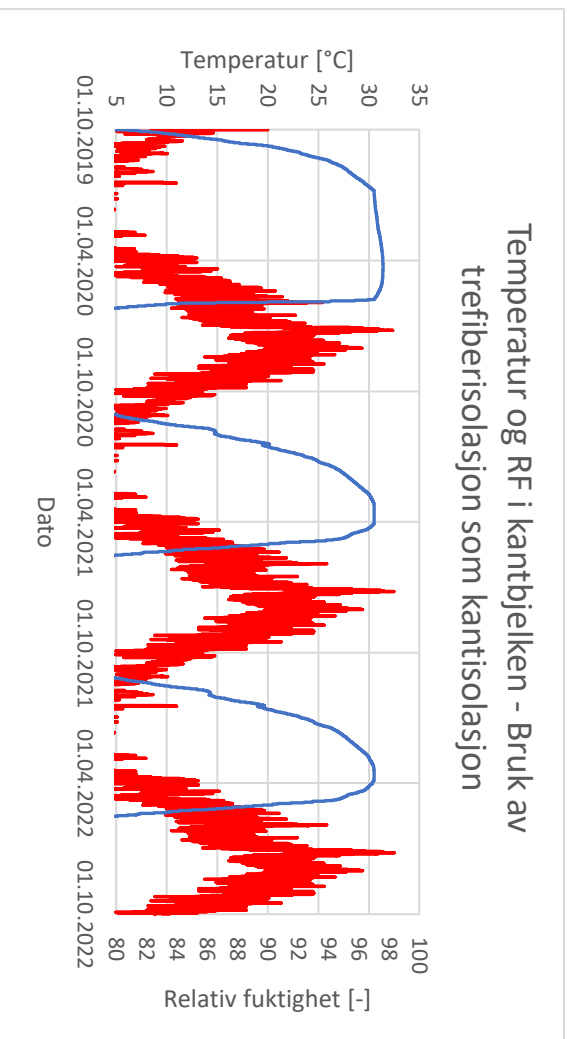
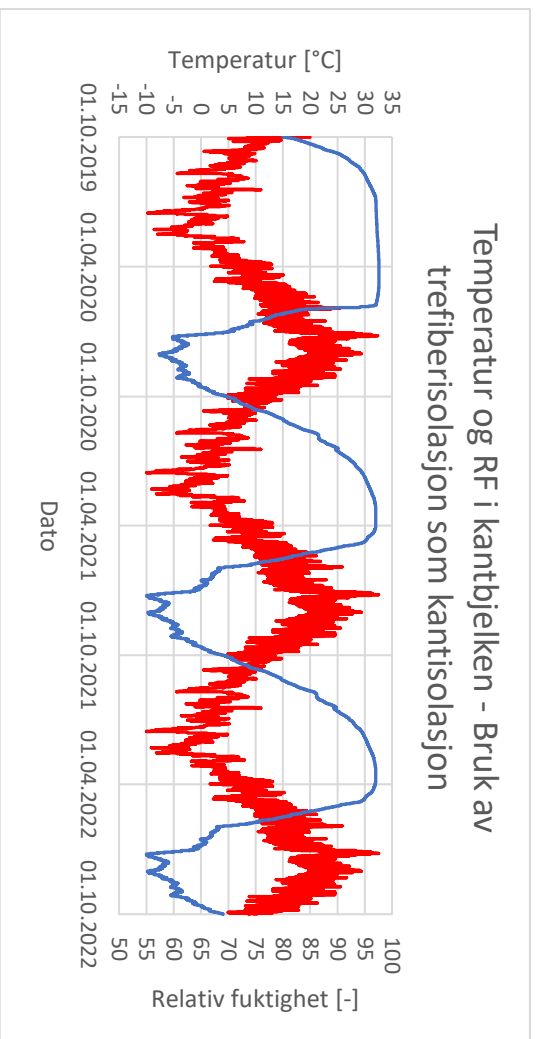
## Bruk av smart dampsperre i himling – Isola



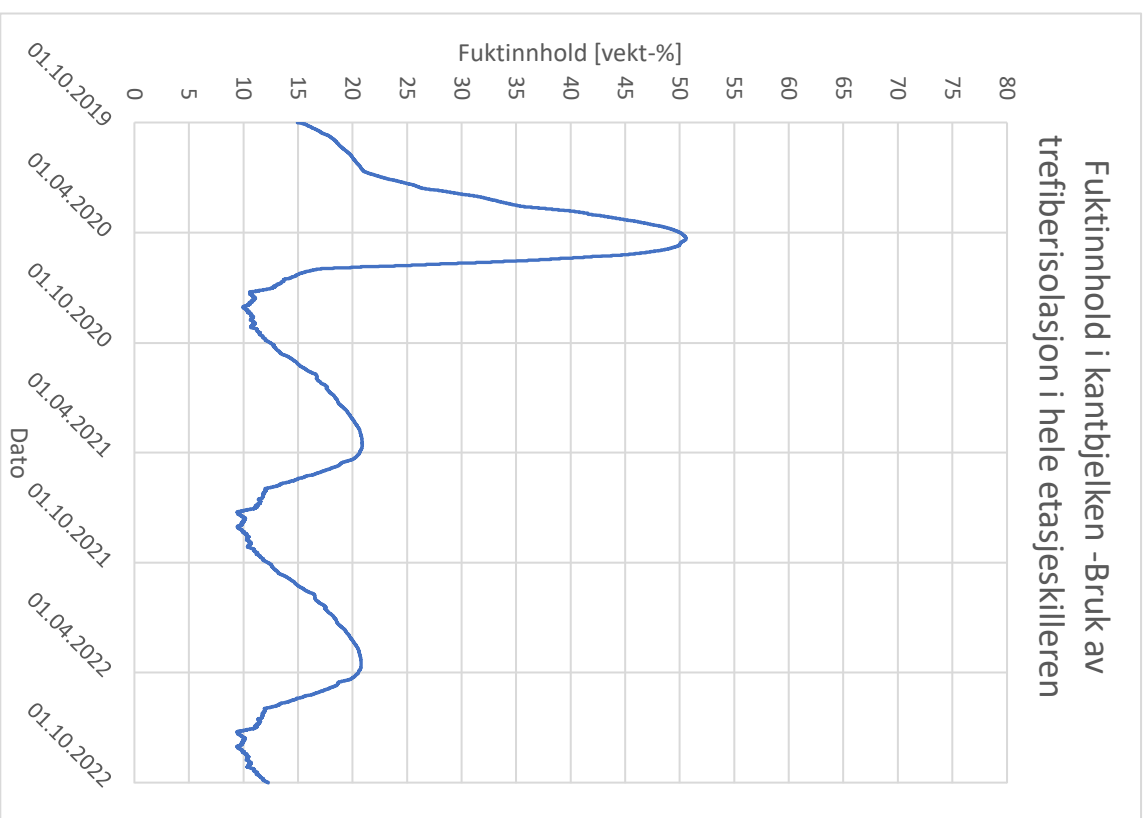
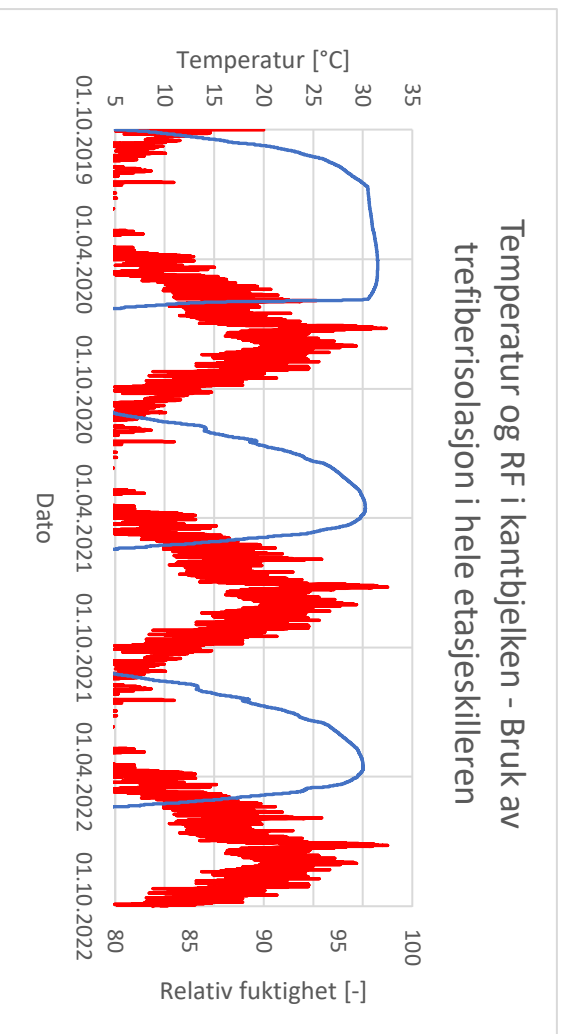
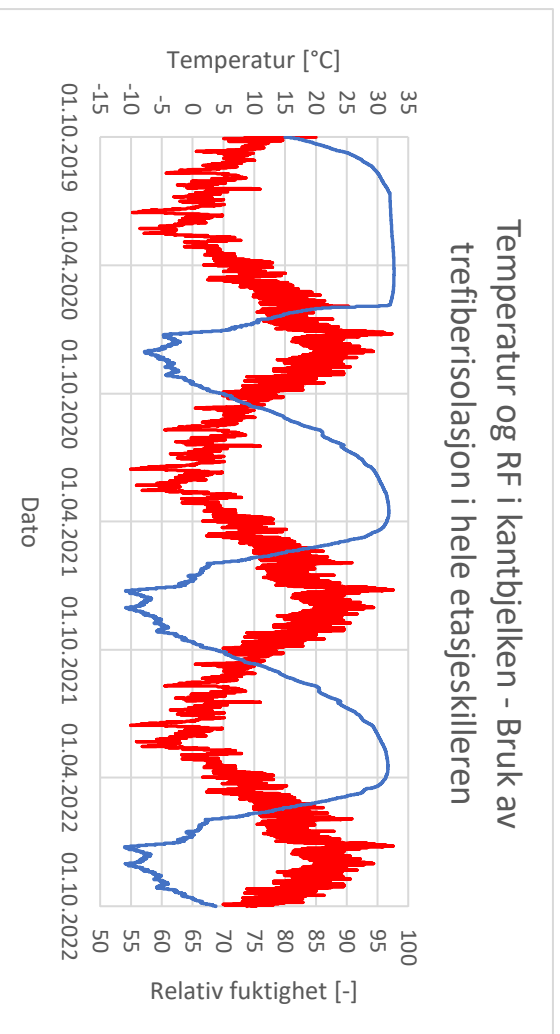
## Bruk av smart dampsperre i himling – SIGA



## Bruk av trefiberisolasjon – Trefiberisolasjon som kantisolasjon

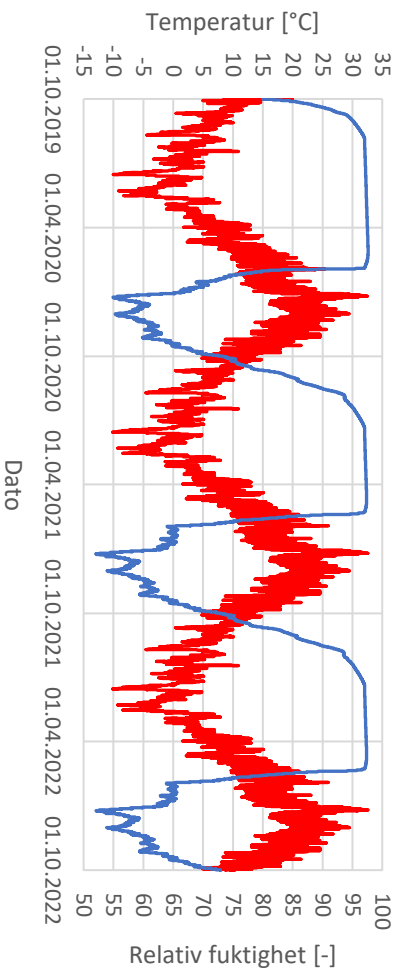


## Bruk av trefiberisolasjon – Trefiberisolasjon i hele etasjeskilleren

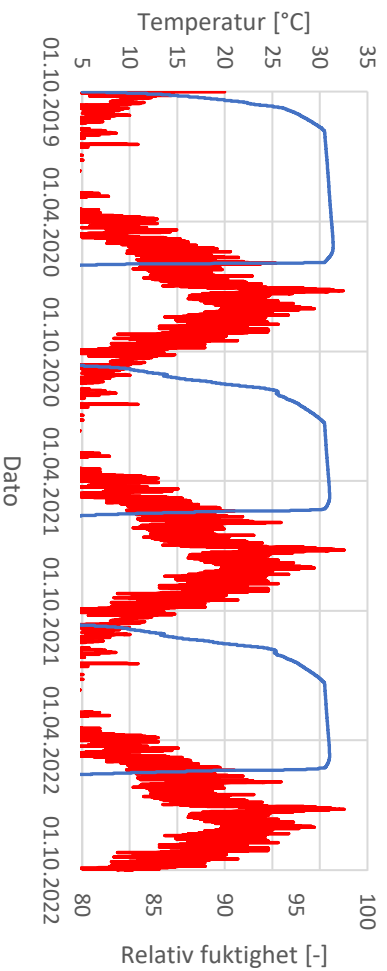


## Endring av undergulv – OSB-plater

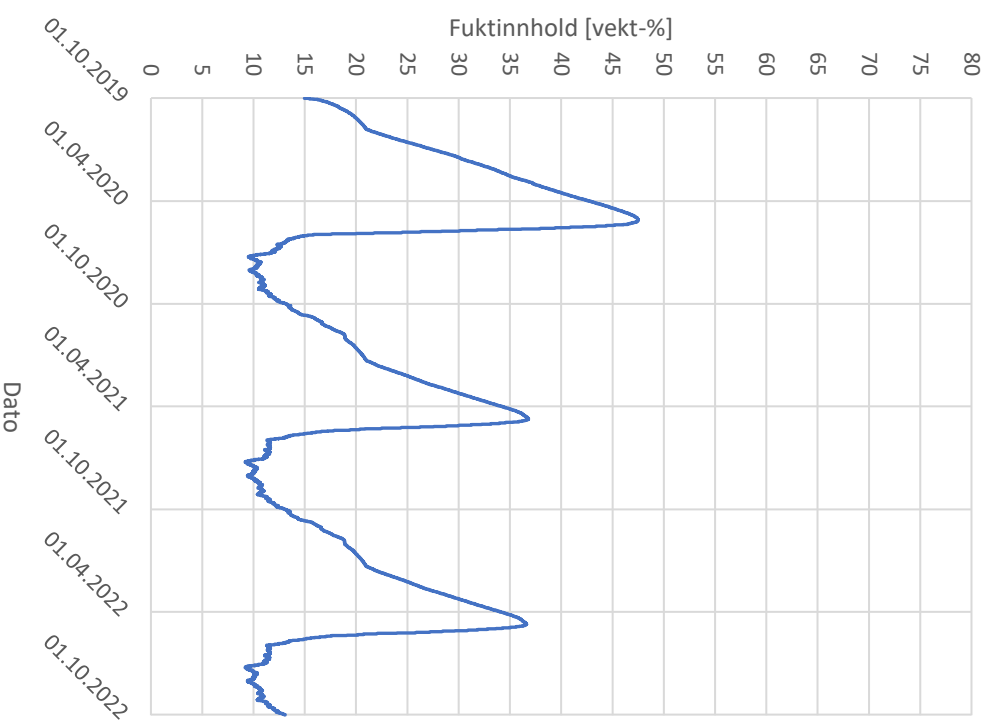
Temperatur og RF i kantbjelken - Bruk av OSB-plater som undergulv



Temperatur og RF i kantbjelken - Bruk av OSB-plater som undergulv

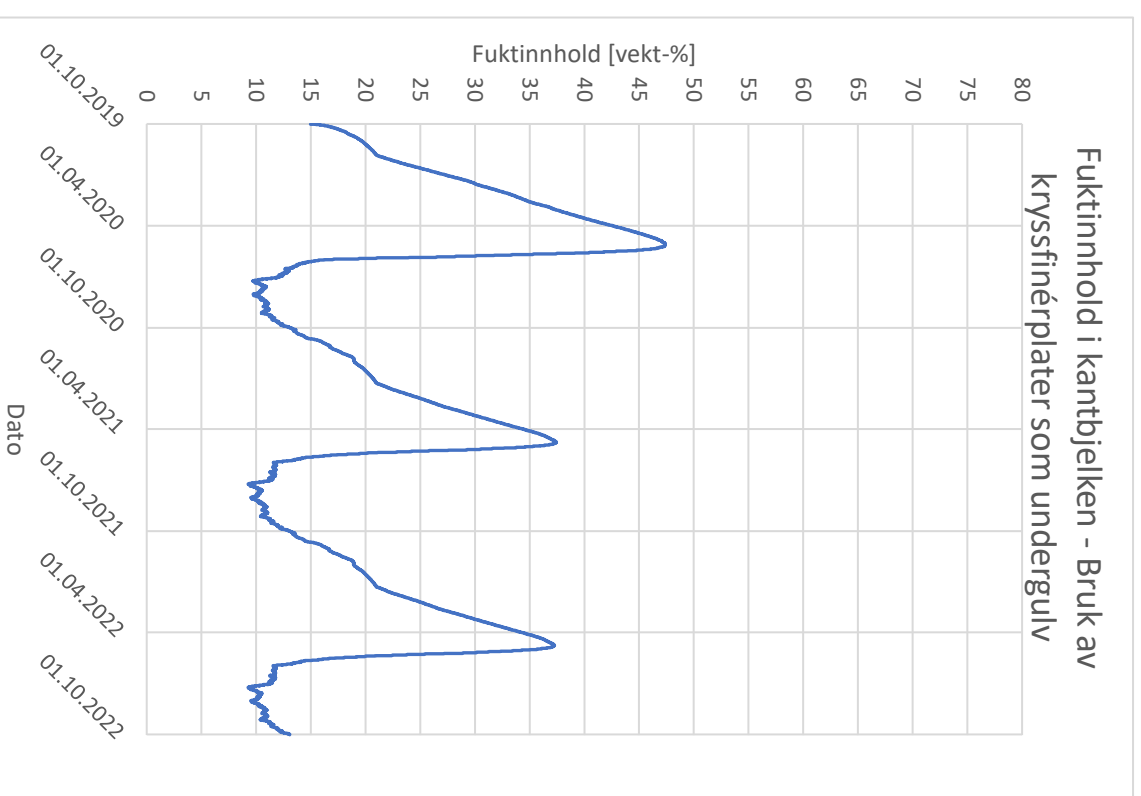
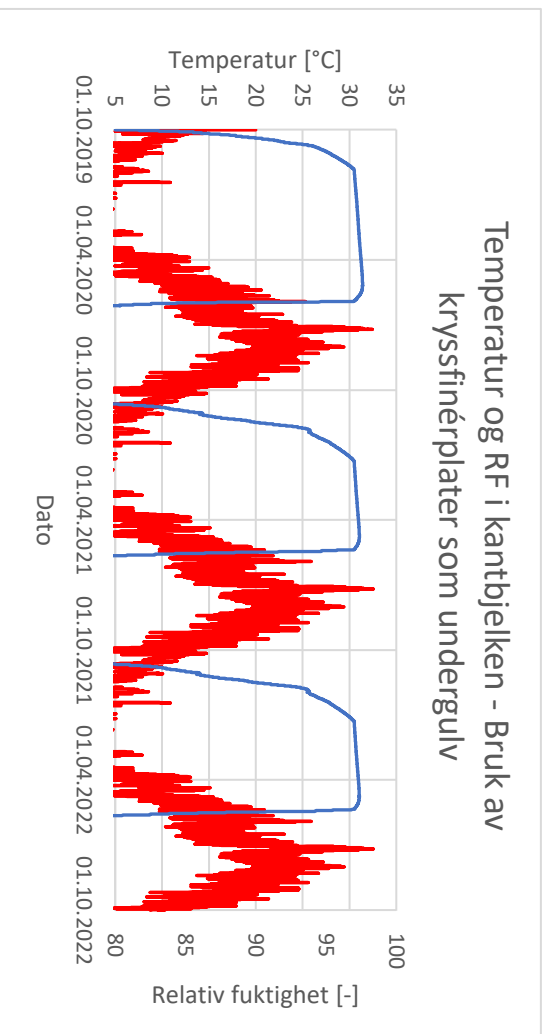
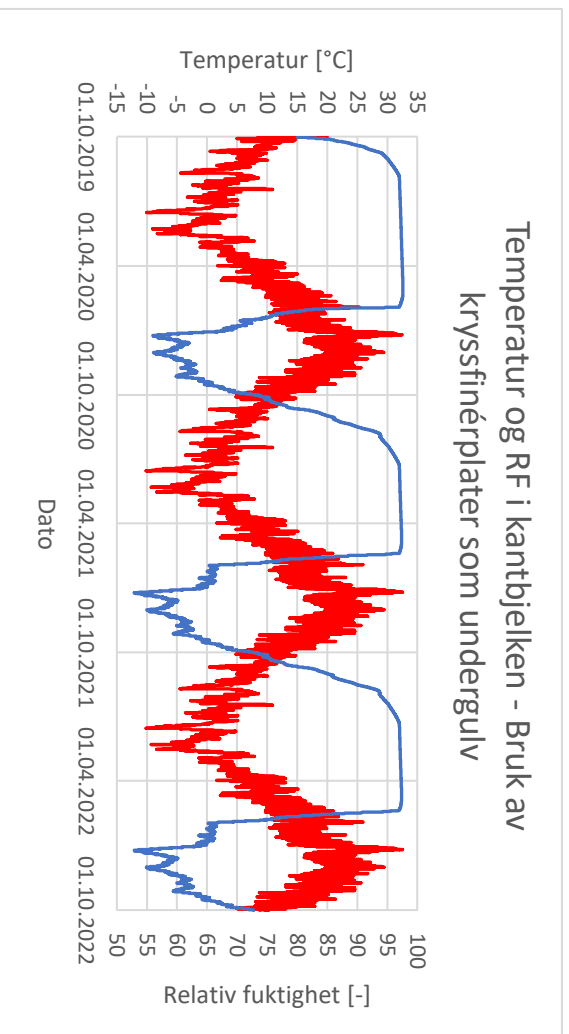


Fukttinnhold i kantbjelken - Bruk av OSB-plater som undergulv



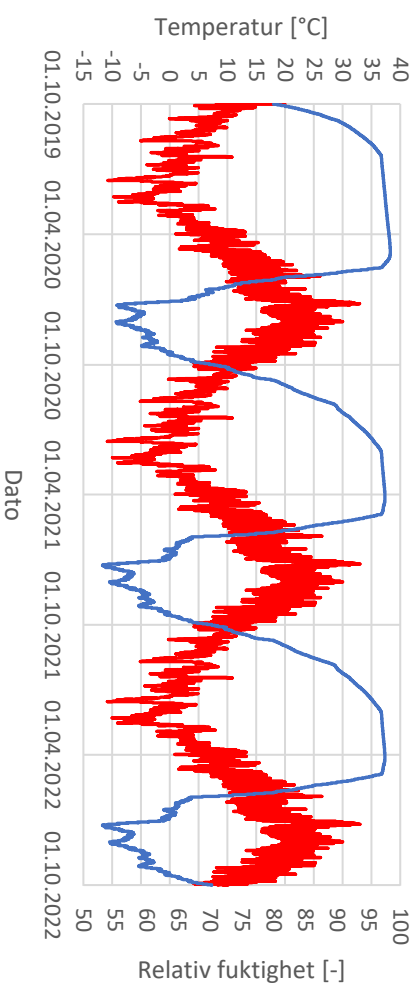


## Endring av undergulv – Kryssfinérplater

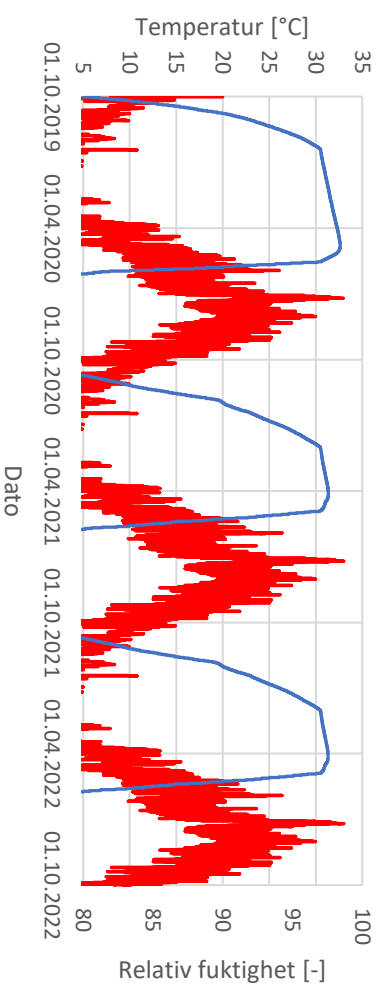


## Endring av kantbjelke – Sponplate

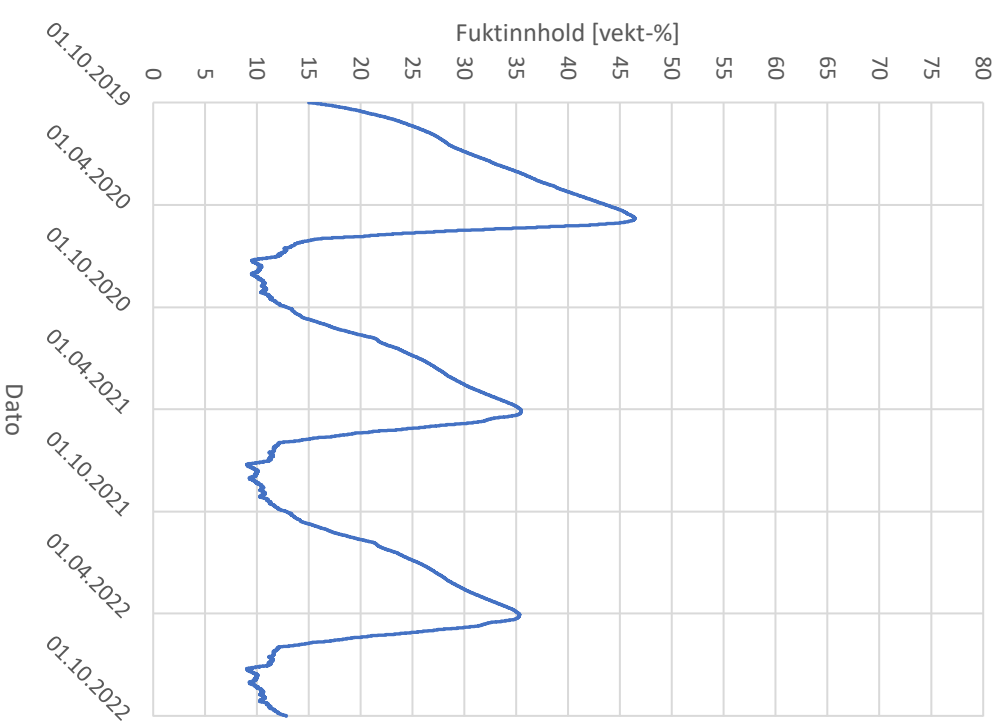
Temperatur og RF i kantbjelken - Kantbjelke av sponplate



Temperatur og RF i kantbjelken - Kantbjelke av sponplate

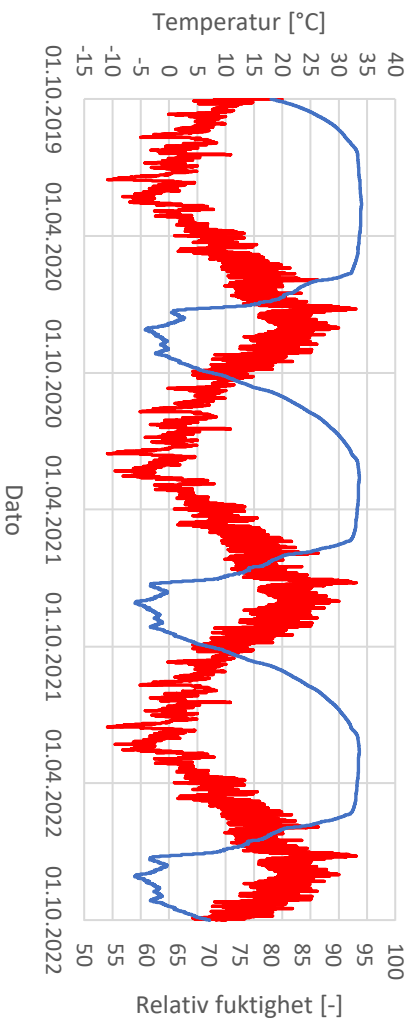


Fukttinnhold i kantbjelken - Kantbjelke av sponplate

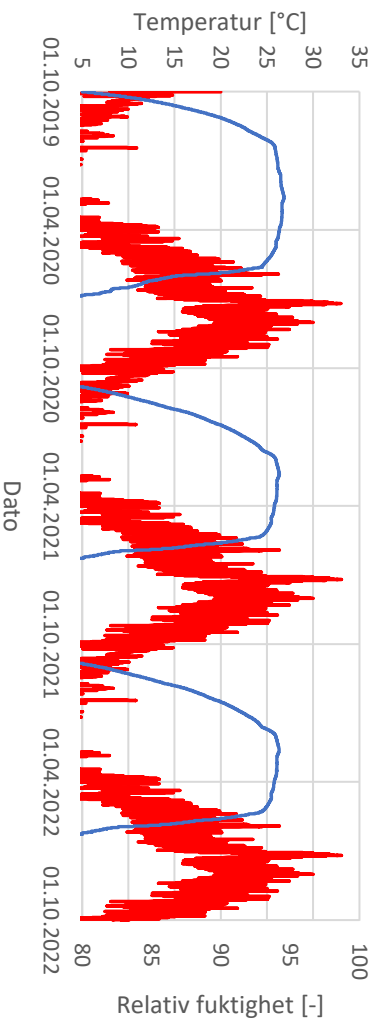


## Endring av kantbjelke – OSB-plate

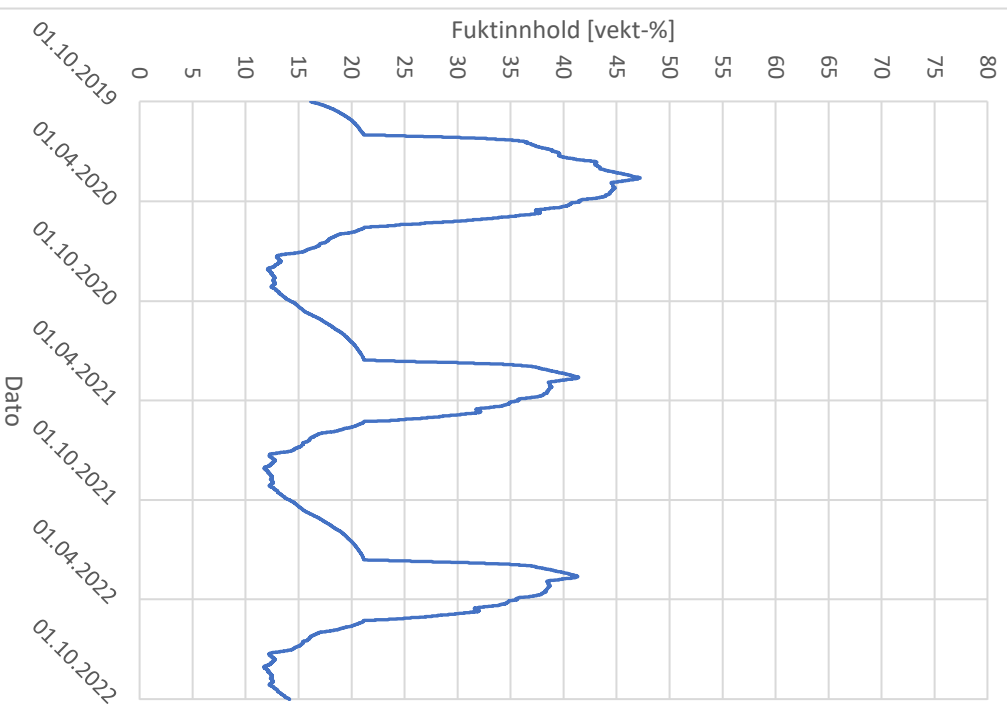
Temperatur og RF i kantbjelken - OSB-plate som kantbjelke



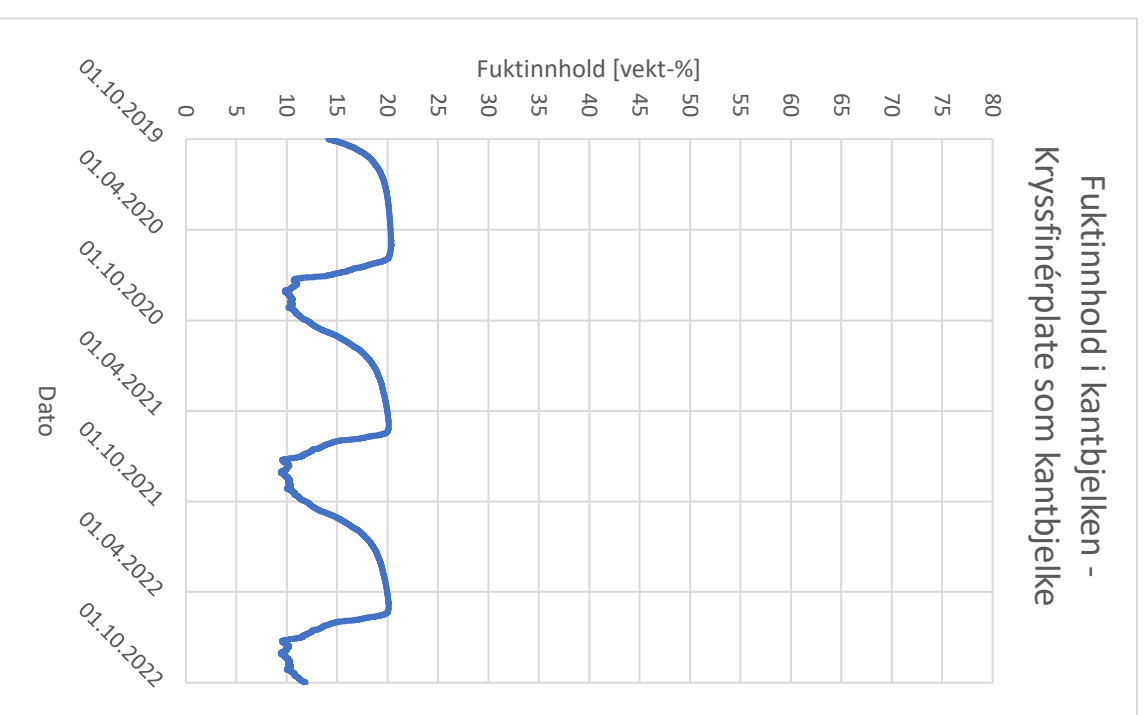
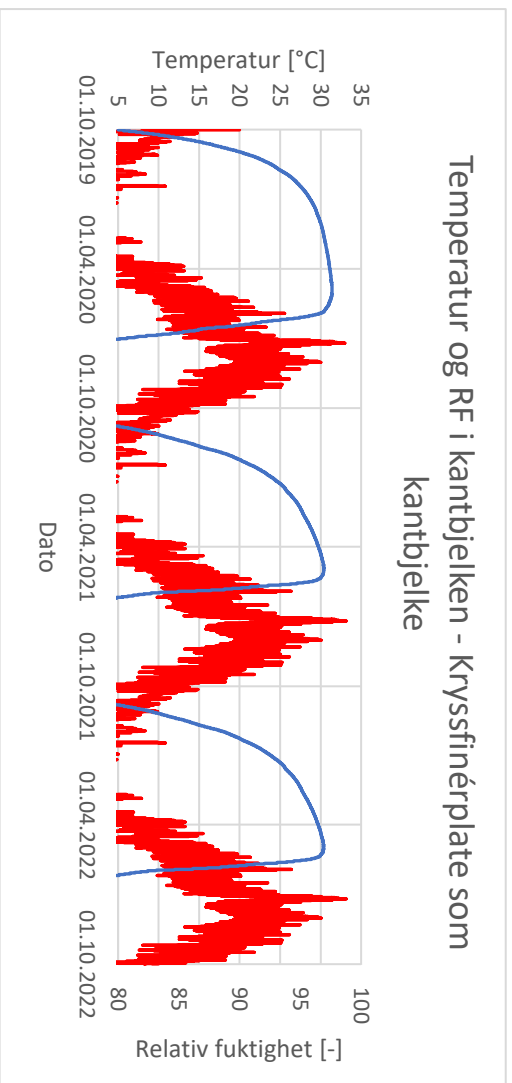
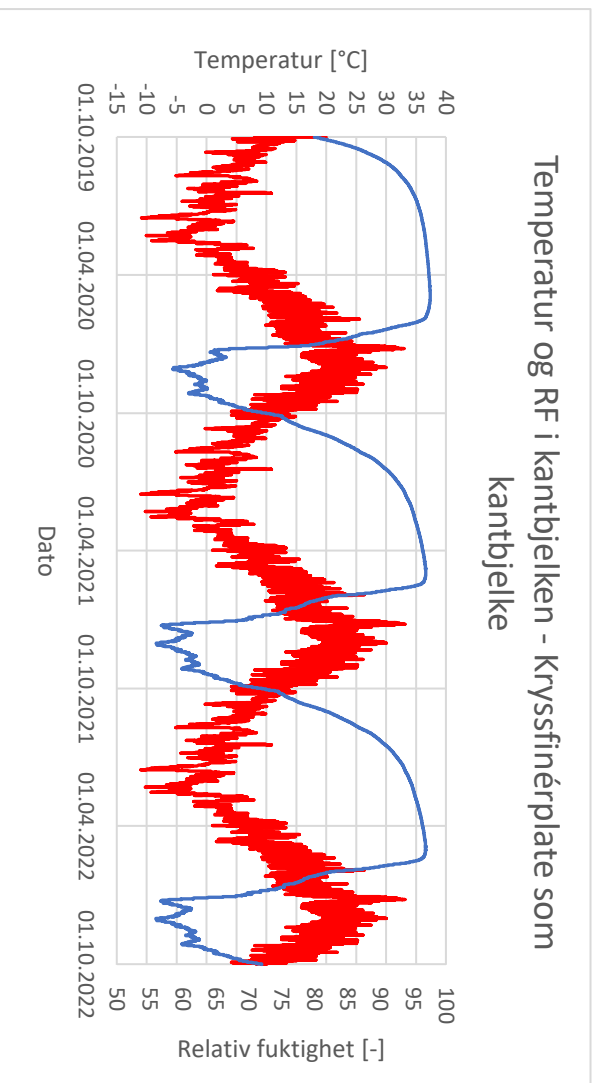
Temperatur og RF i kantbjelken - OSB-plate som kantbjelke



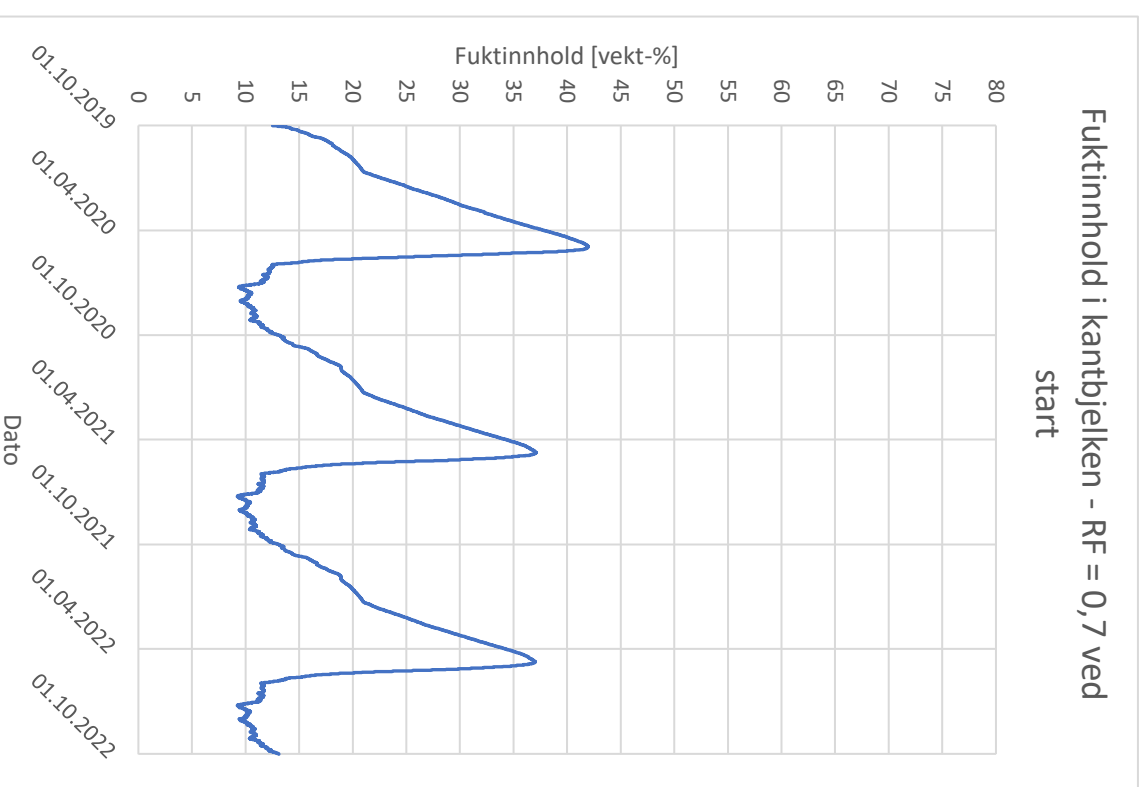
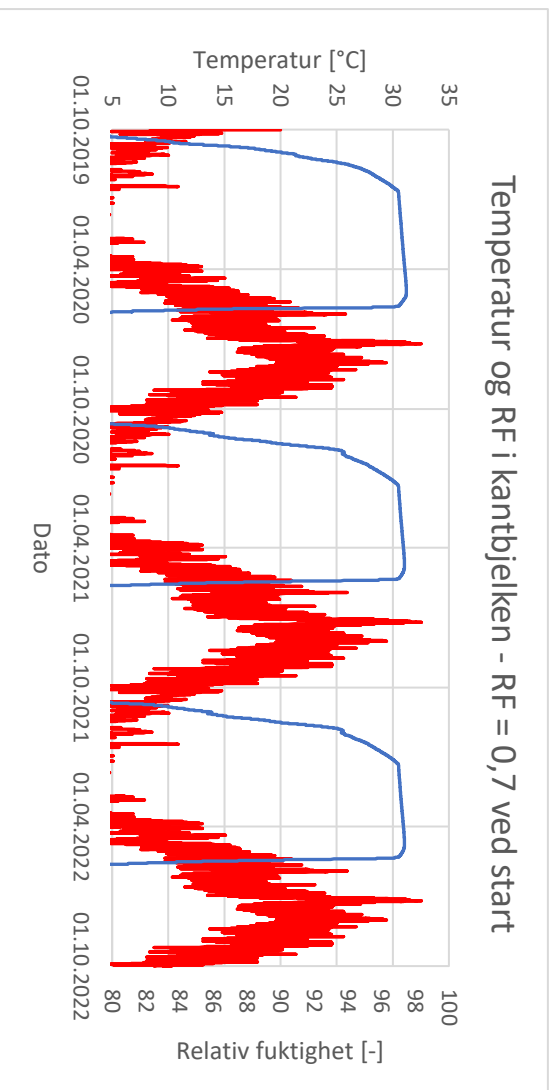
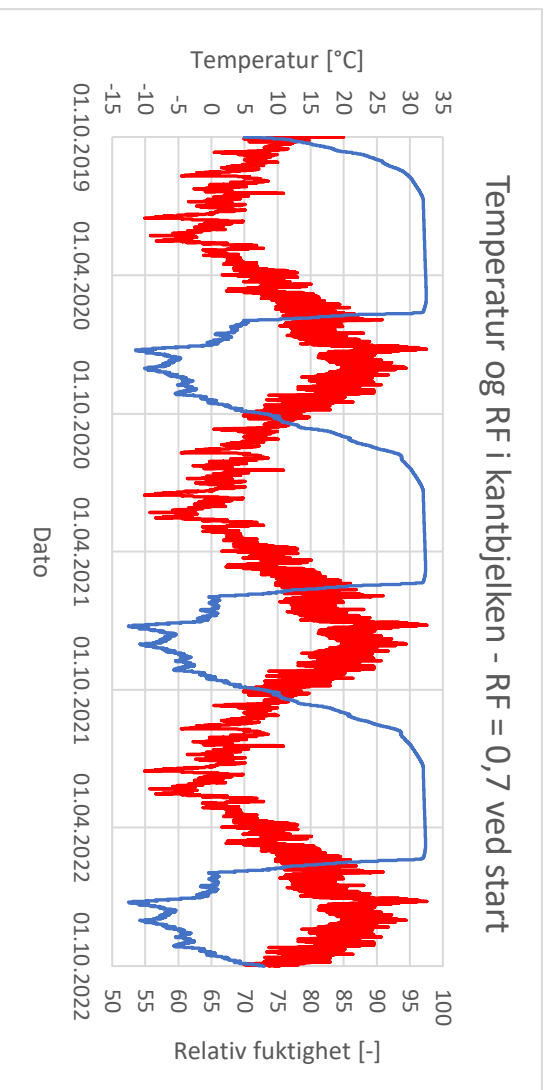
Fukttinnhold i kantbjelken - OSB-plate som kantbjelke



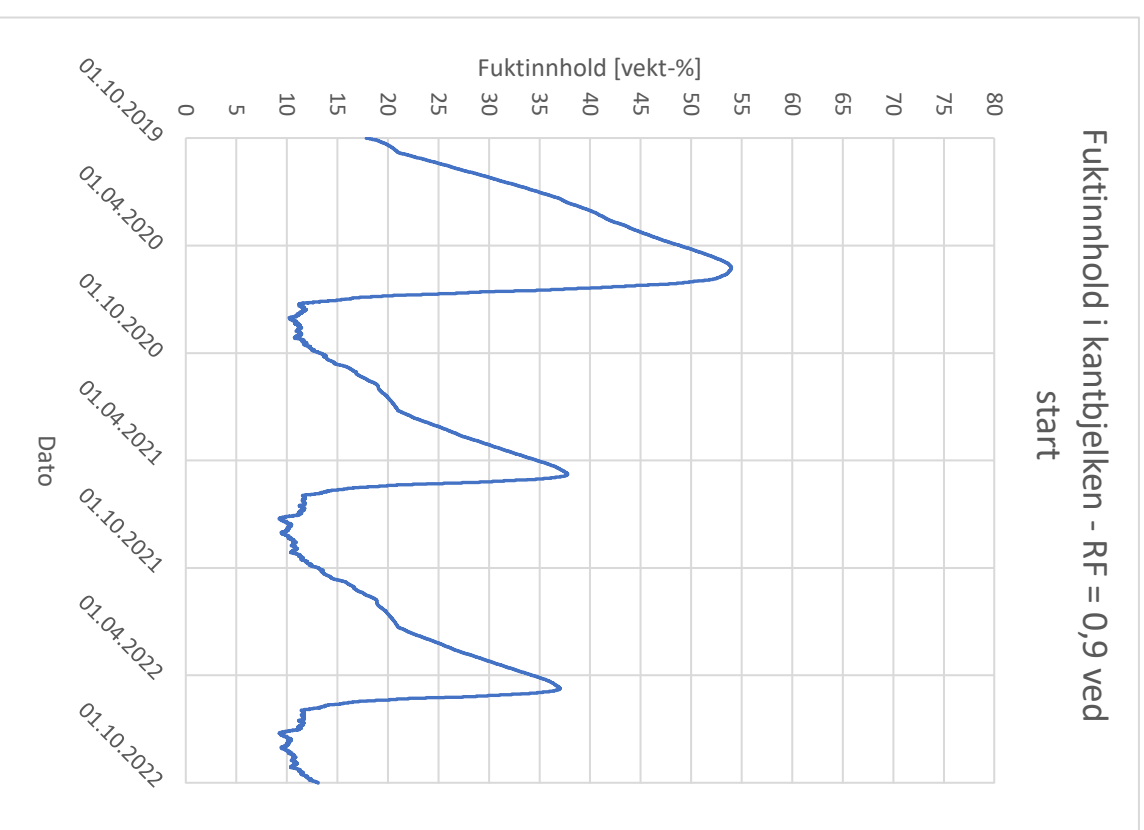
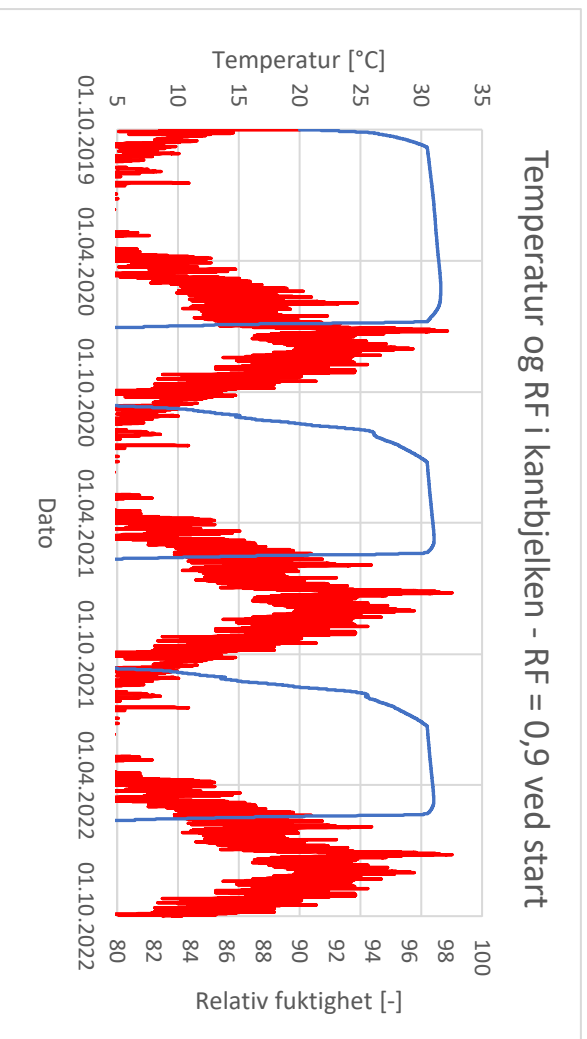
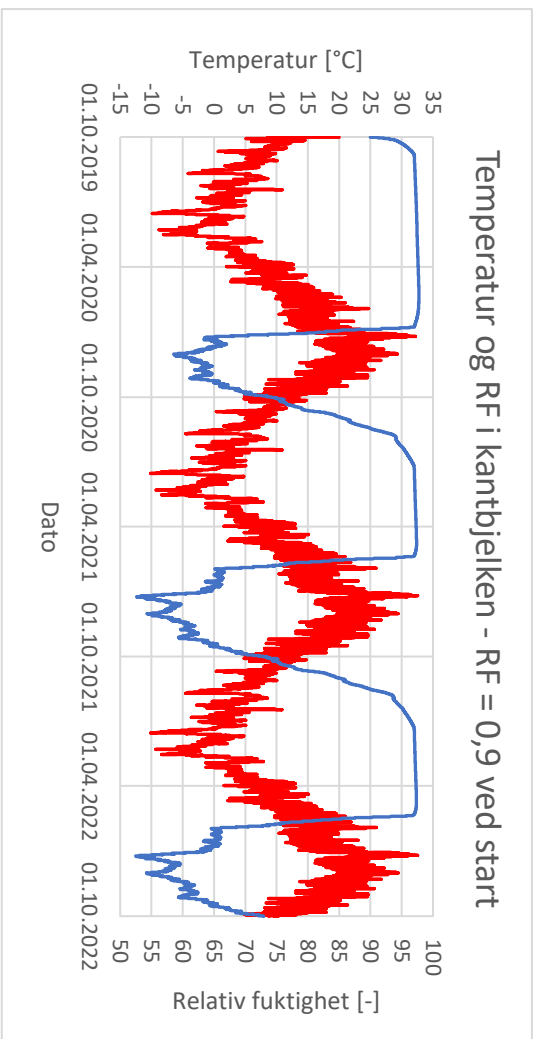
## Endring av kantbjelke – Kryssfinérplate



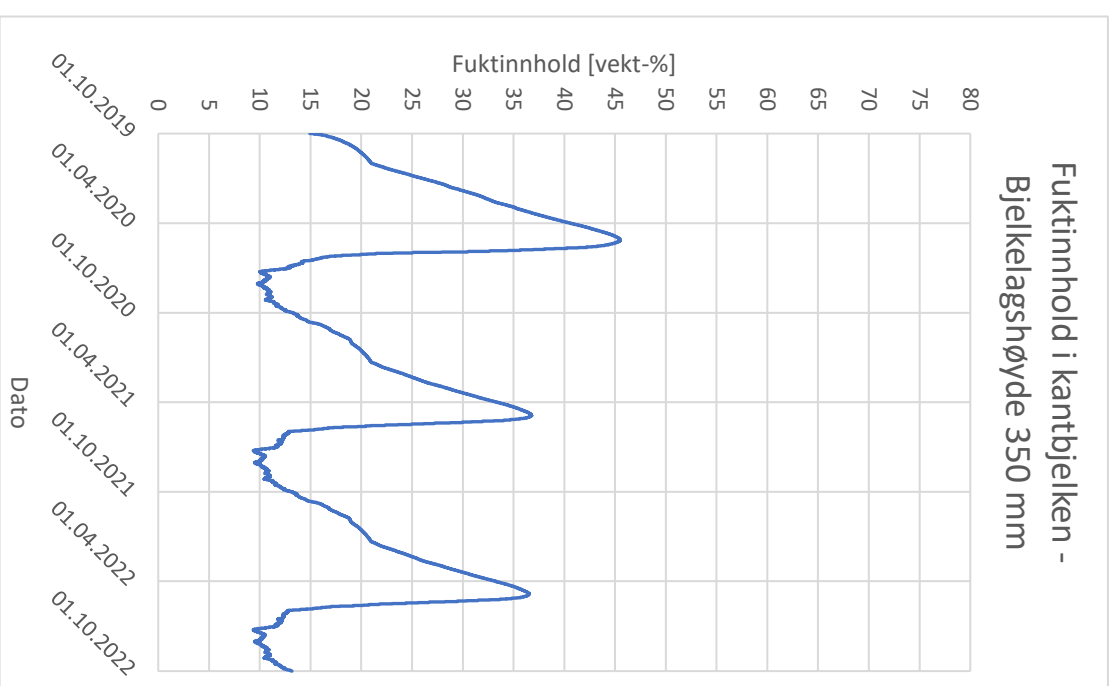
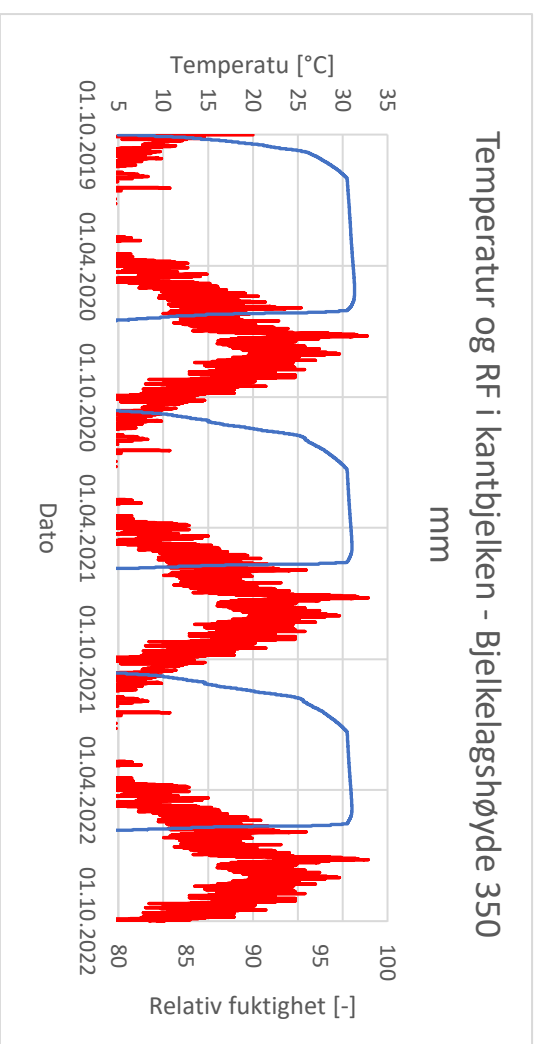
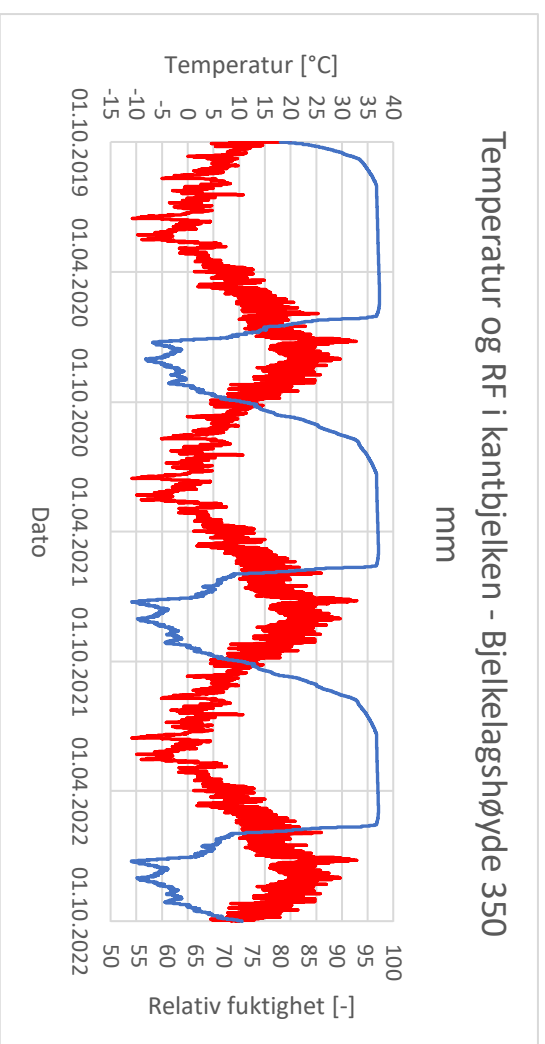
## Endring av byggfukt – RF = 0,7



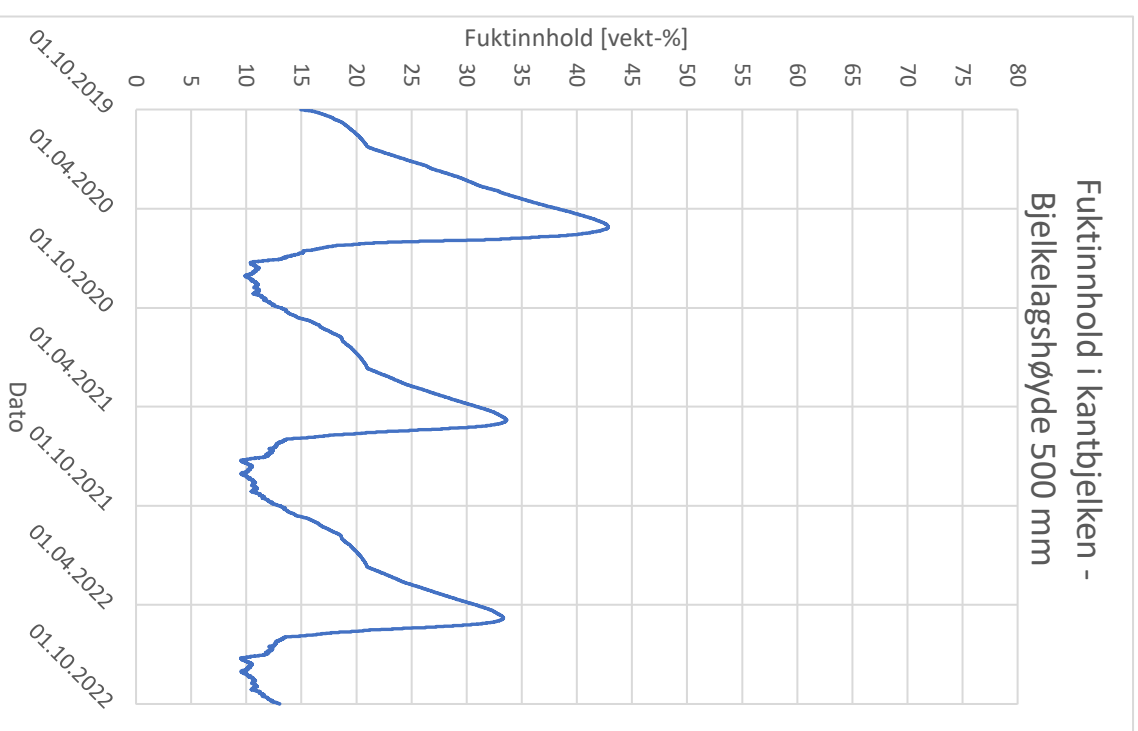
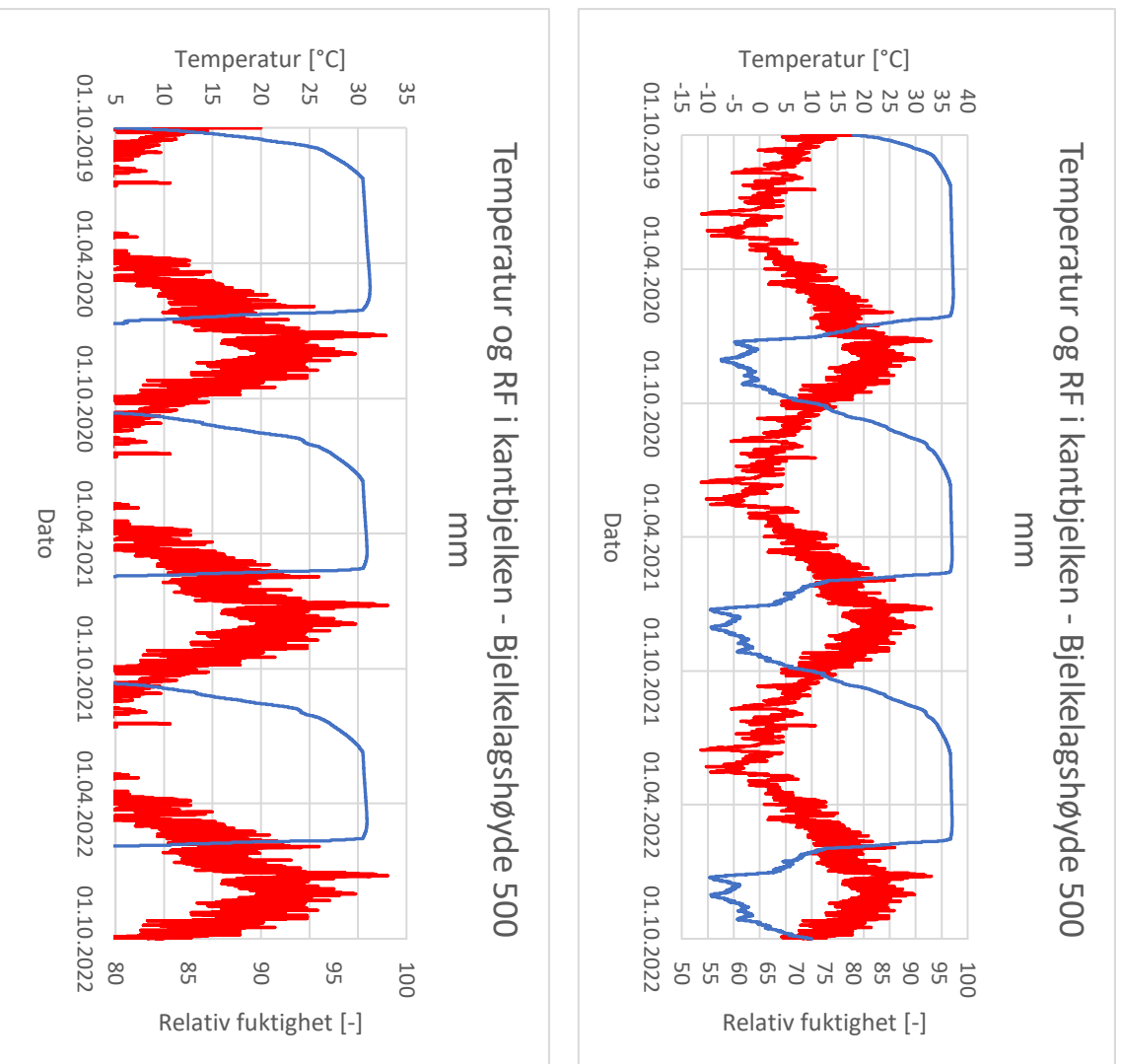
## Endring av byggfukt – RF = 0,9



## Endring av bjelkelagshøyde – Bjelkelagshøyde 350 mm

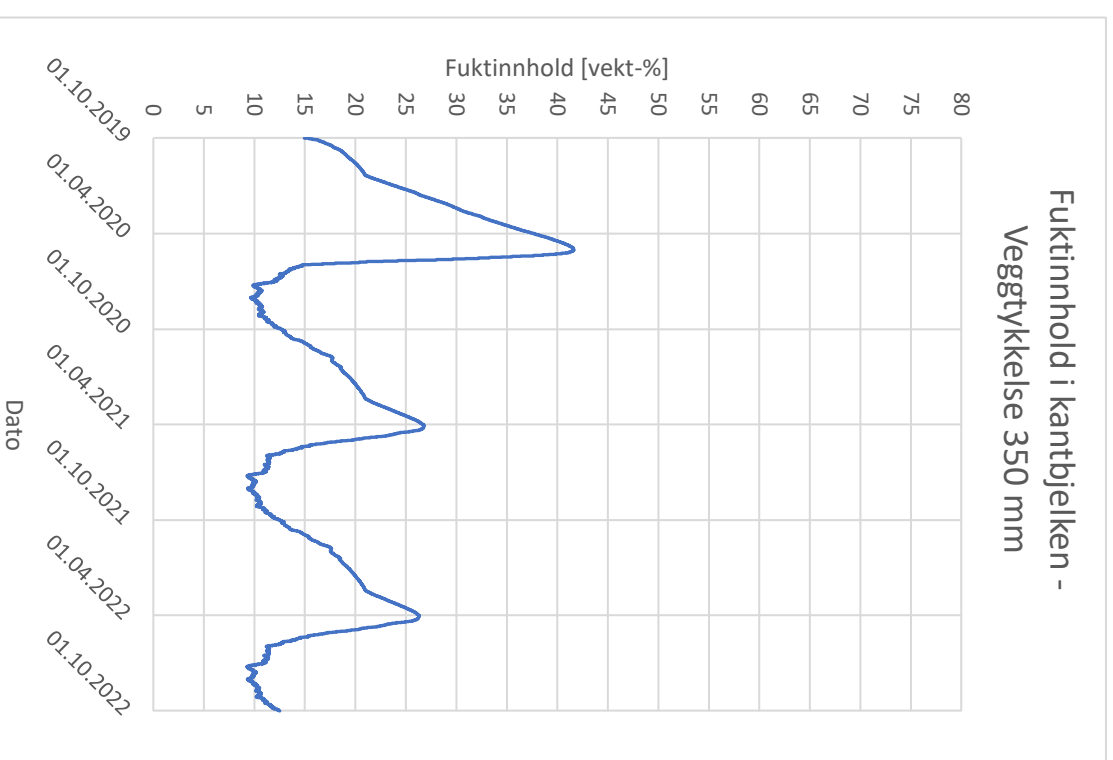
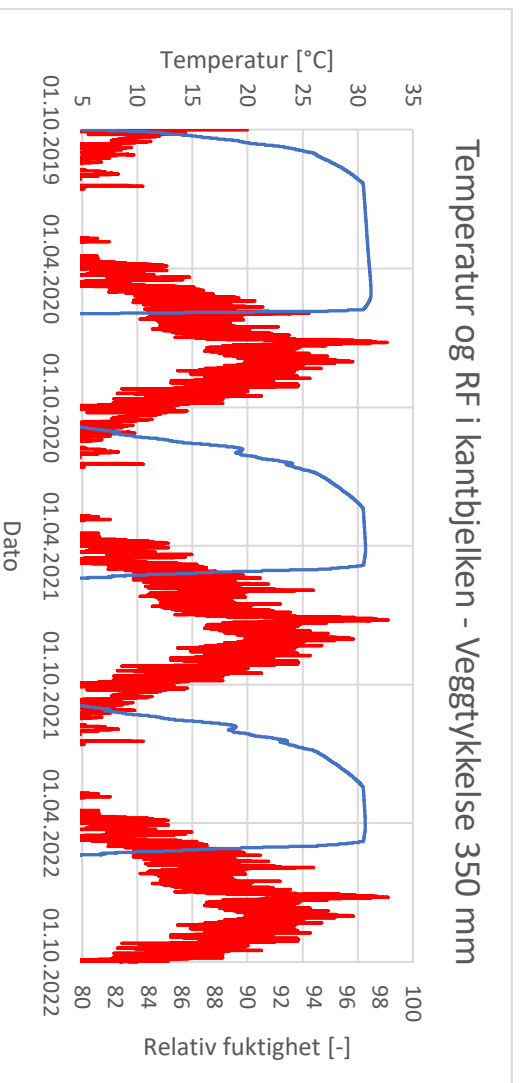
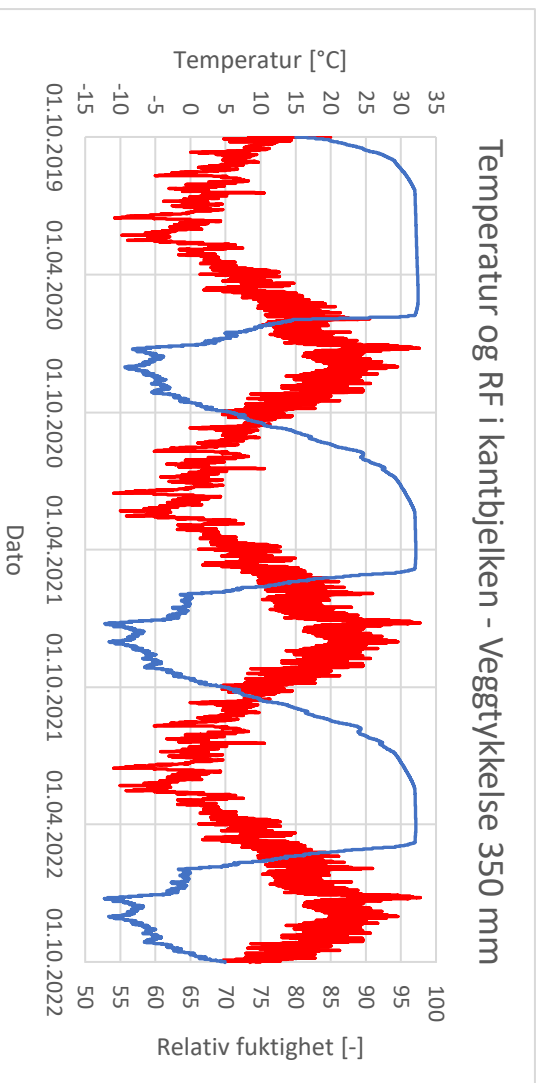


## Endring av bjelkelagshøyde – Bjelkelagshøyde 500 mm

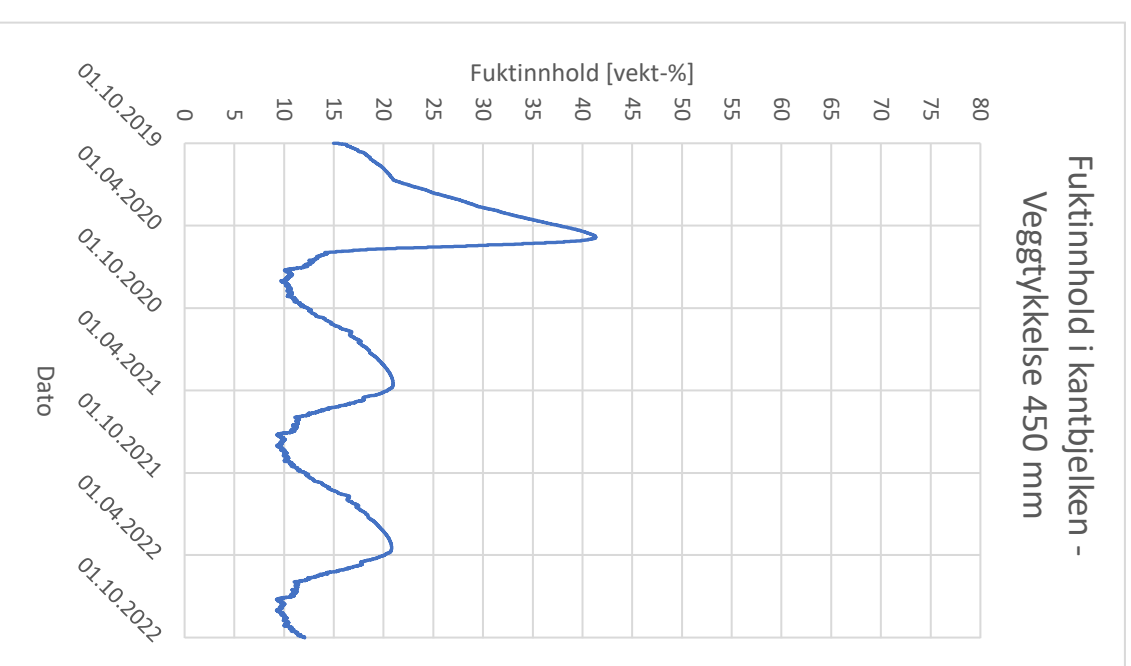
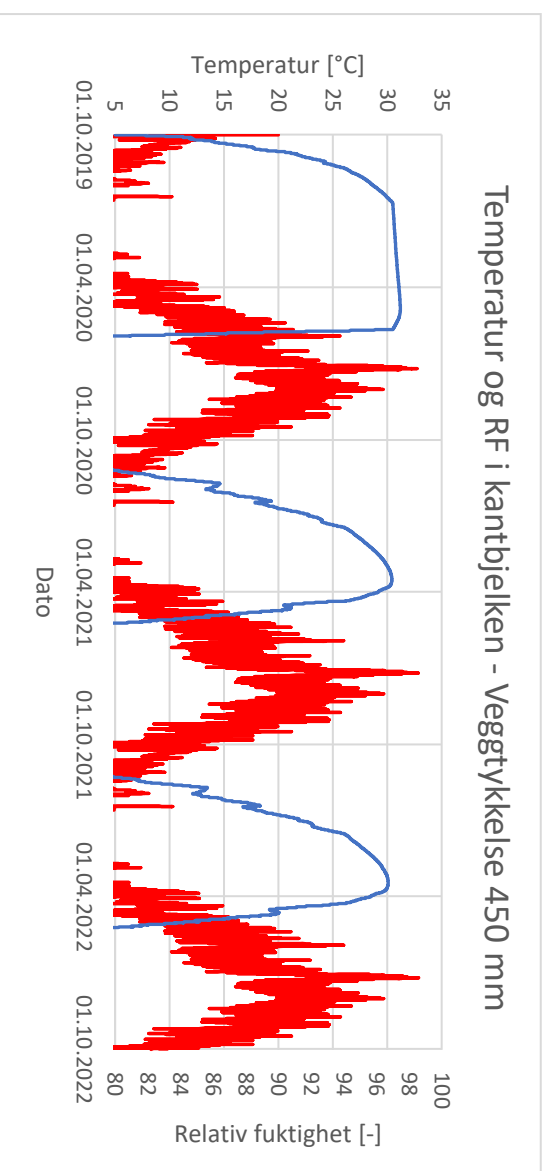
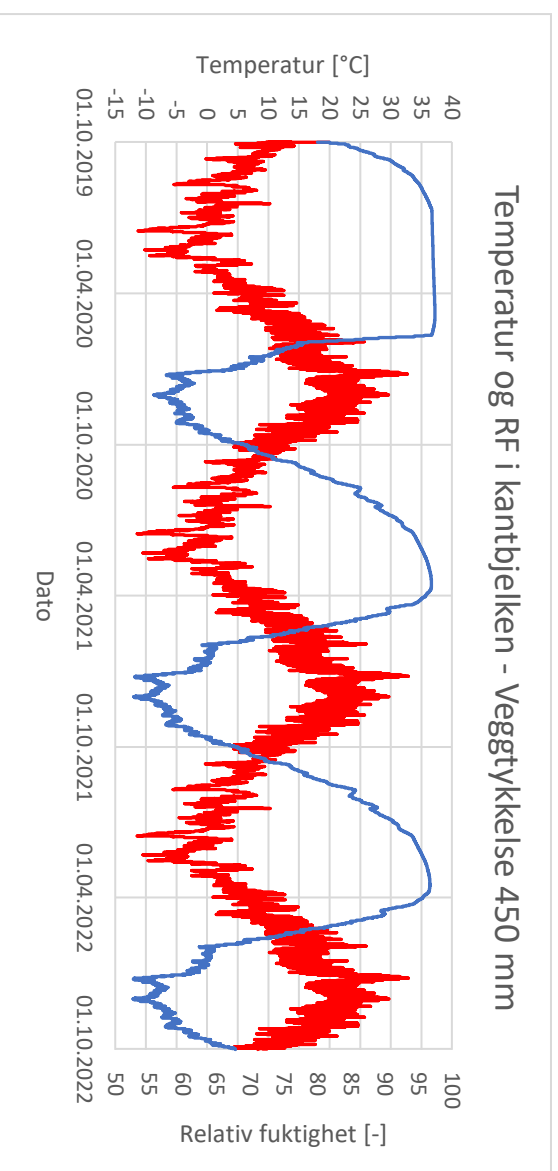




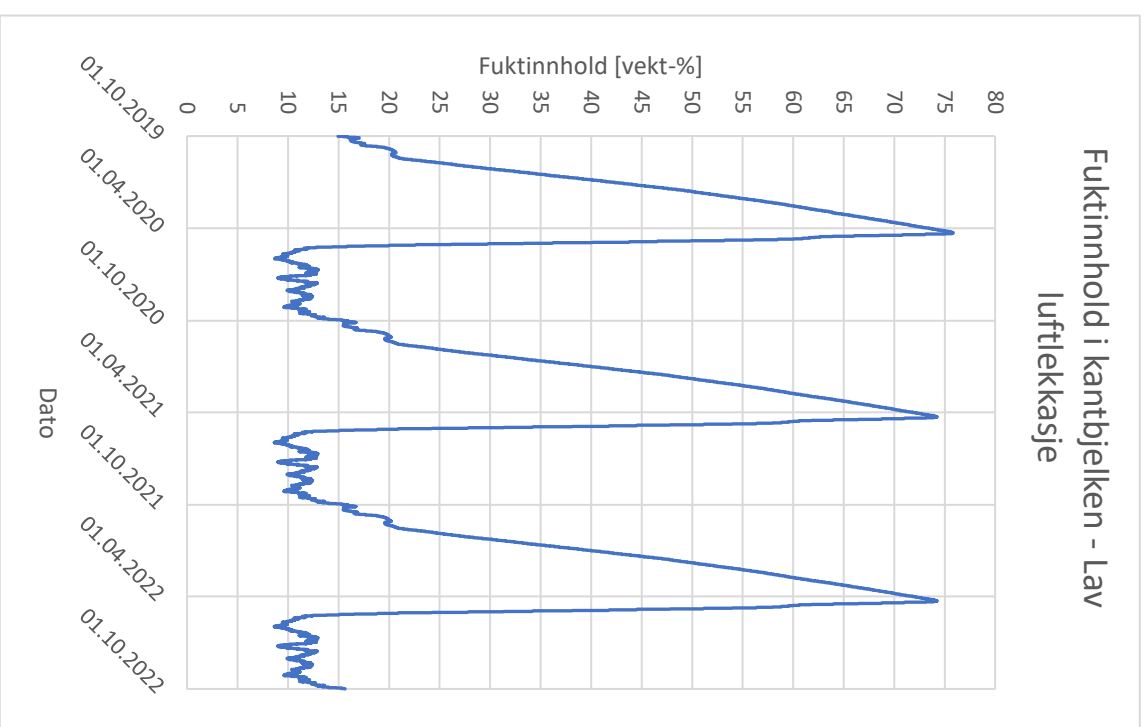
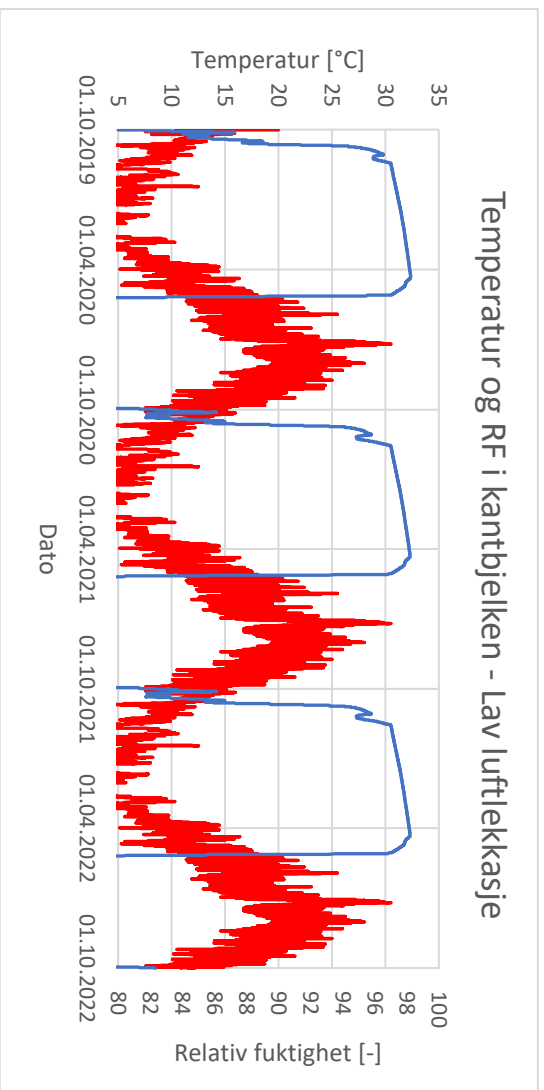
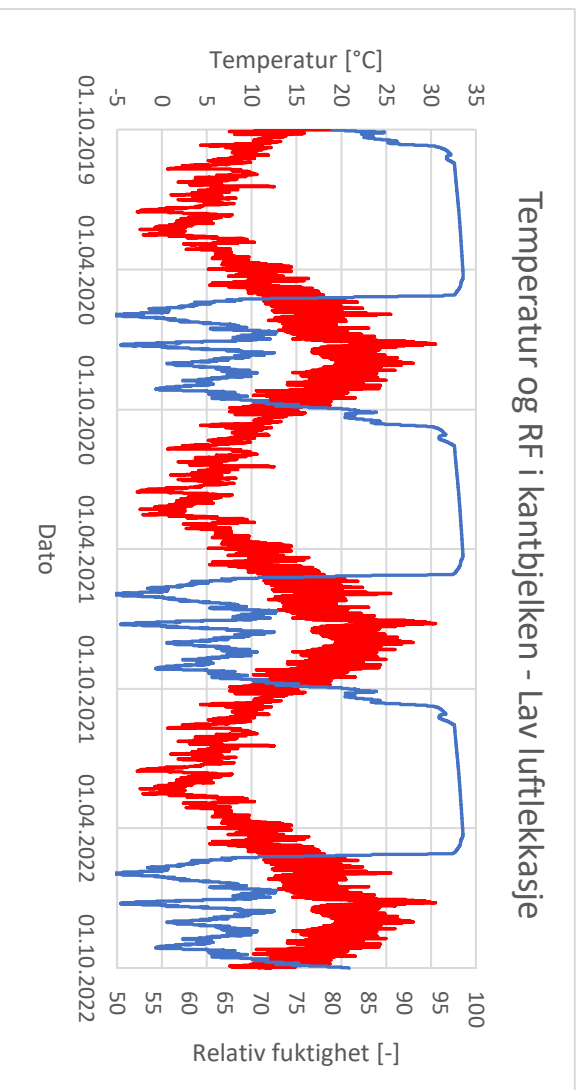
## Endring av veggtykkelse – Veggtykkelse 350 mm



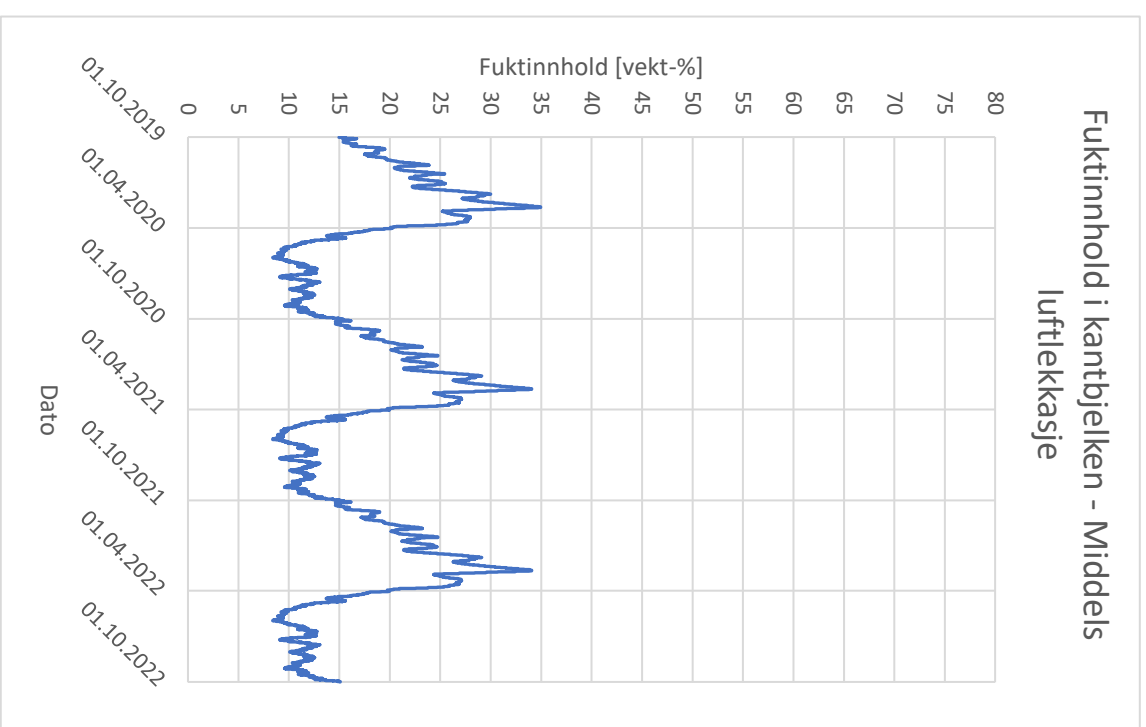
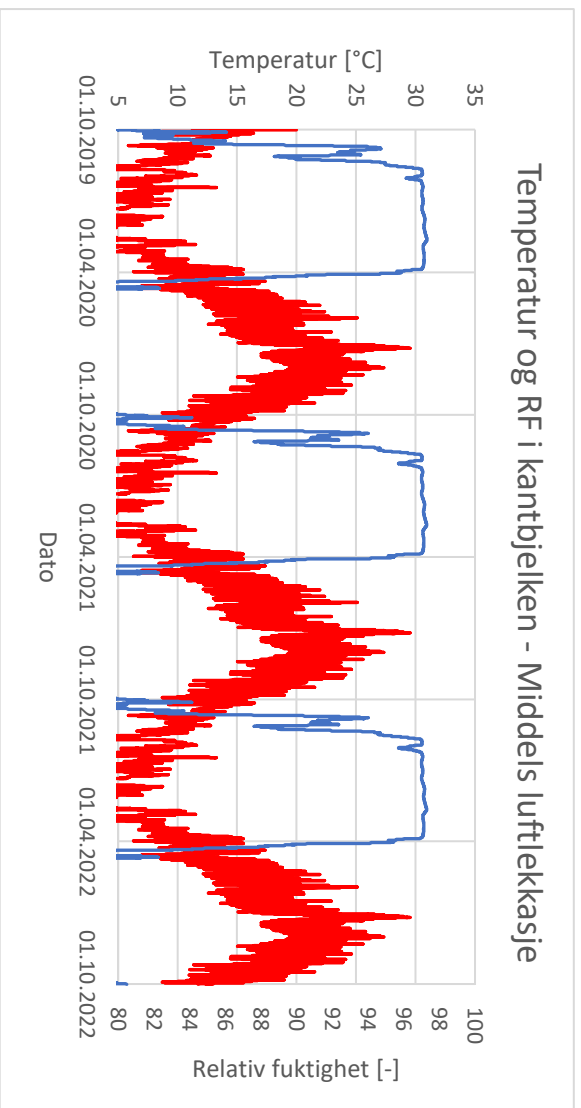
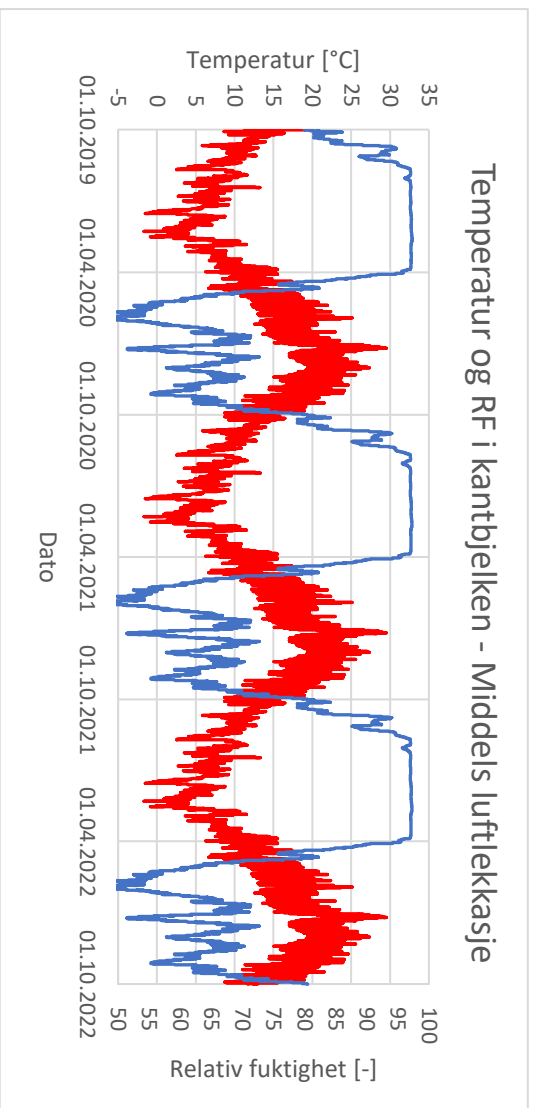
## Endring av veggtykkelse – Veggtykkelse 450 mm



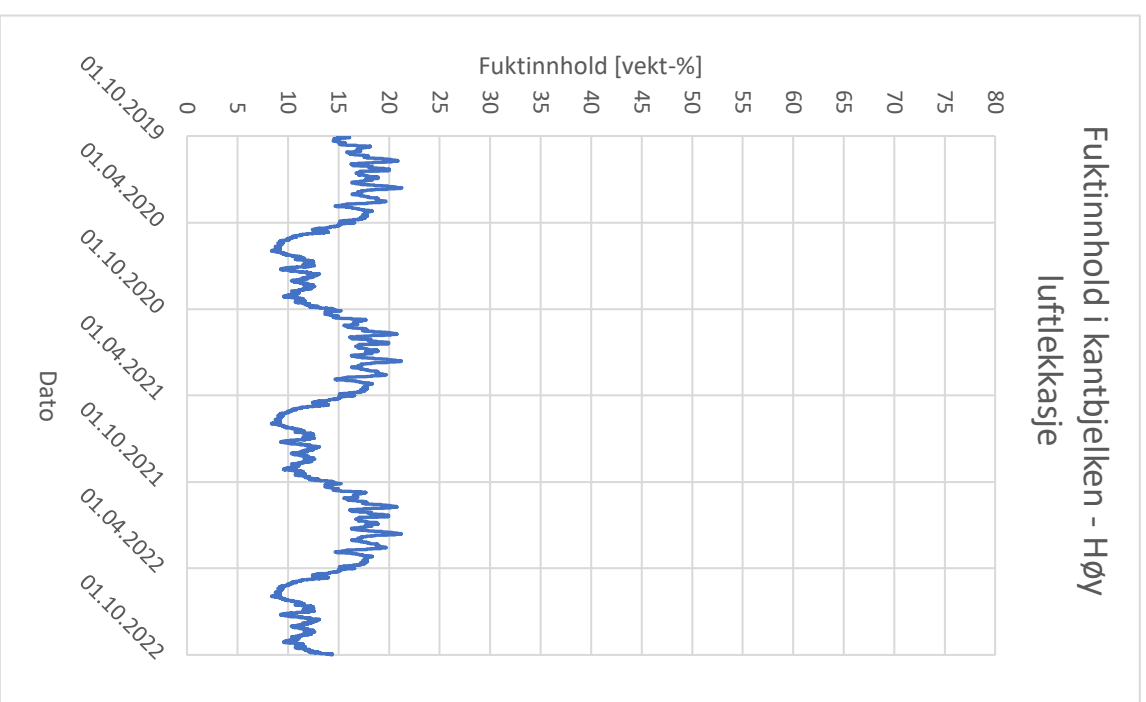
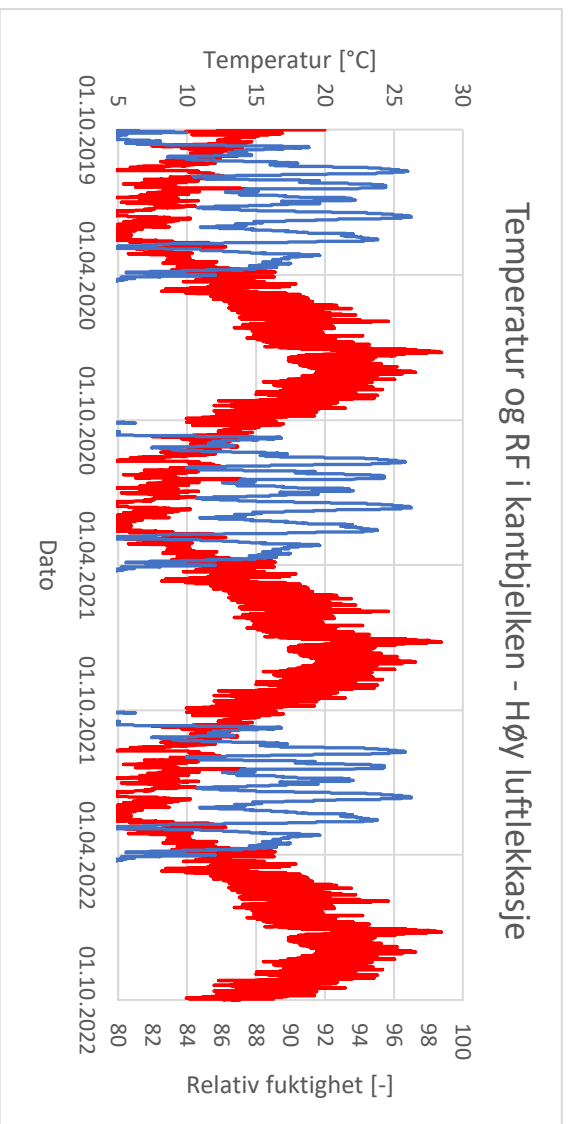
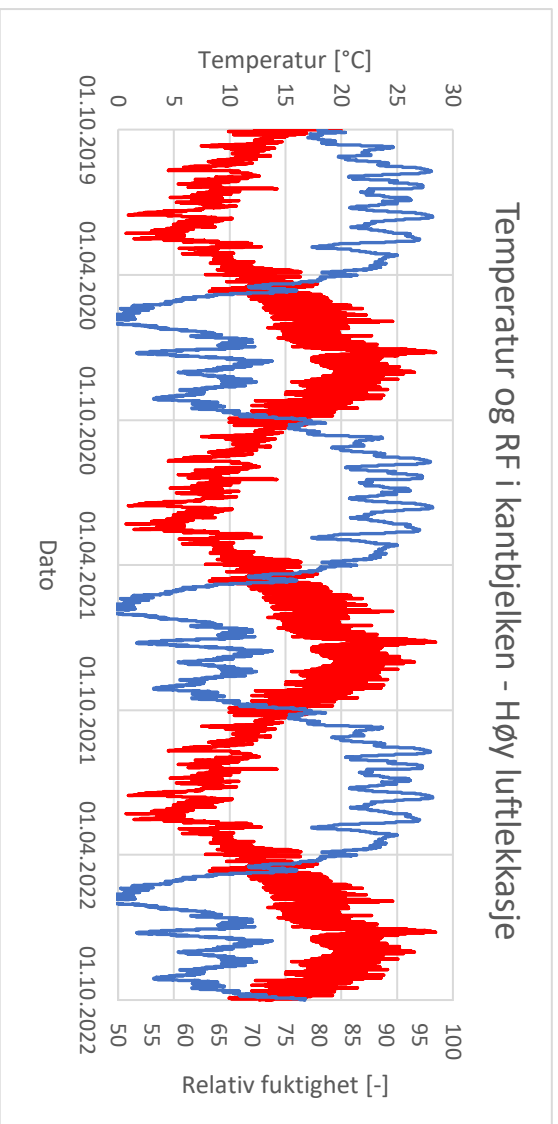
## Simulering med luftlekkasjer – Lav luftlekkasje



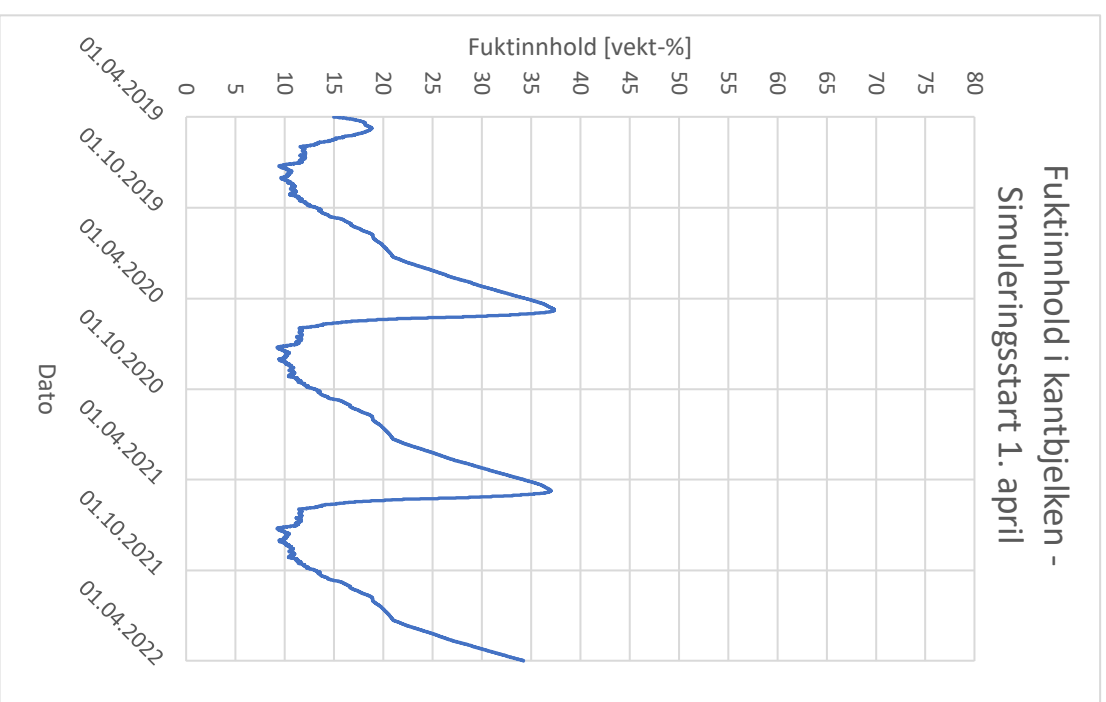
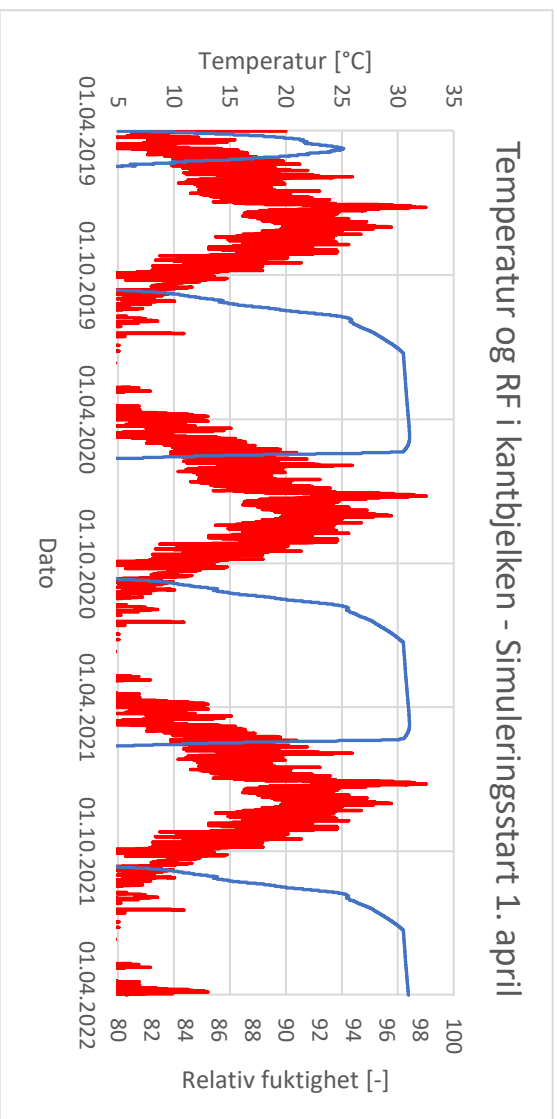
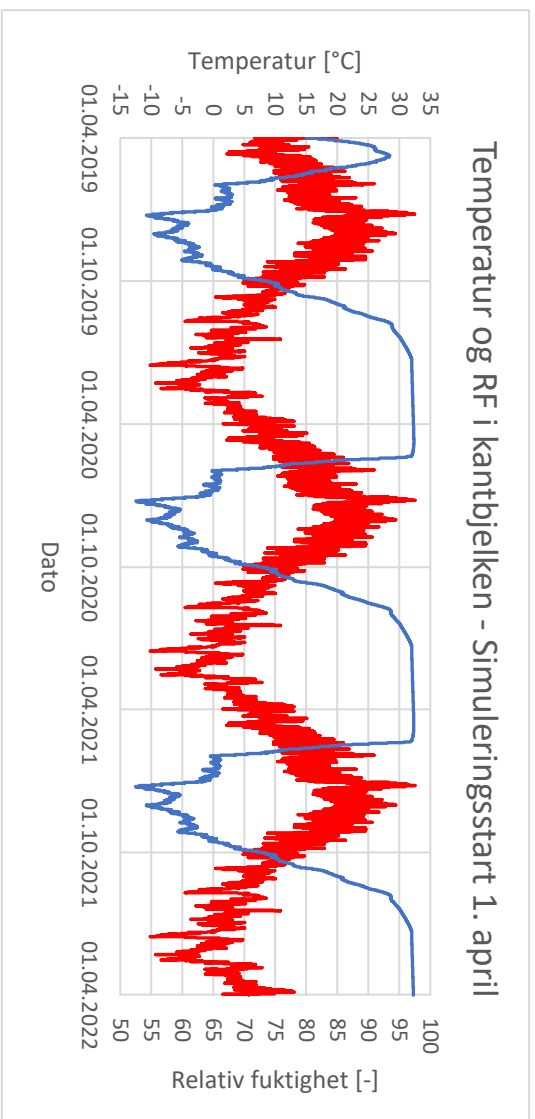
## Simulering med luftlekkasjer – Middels luftlekkasje



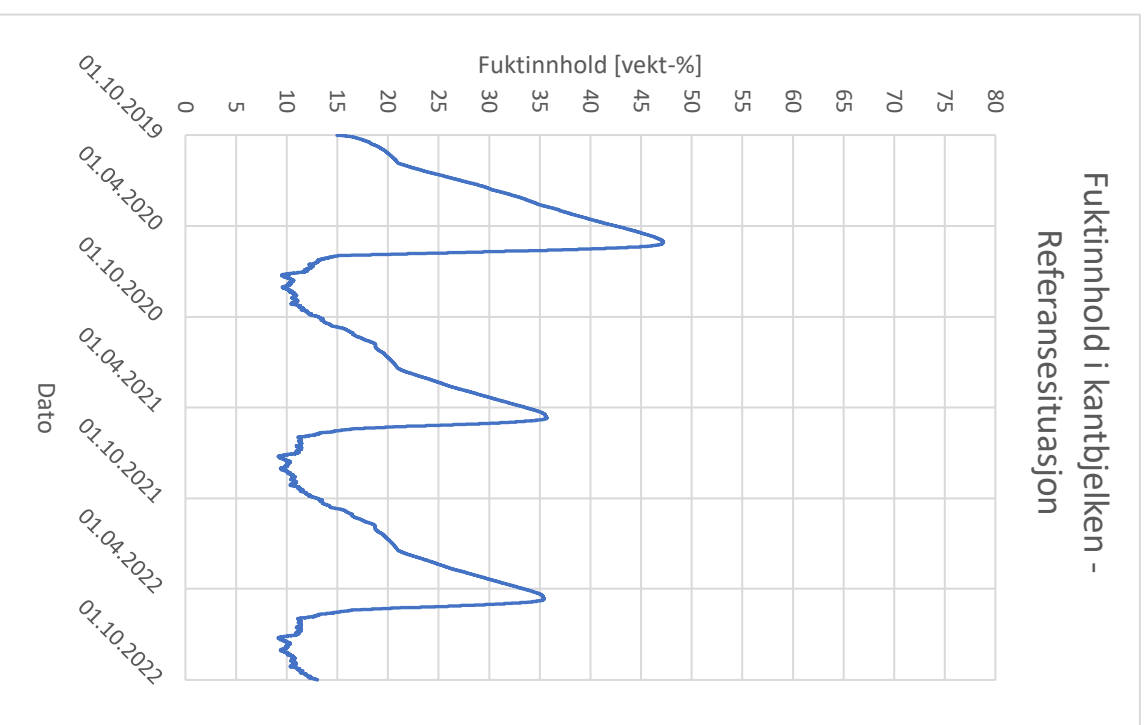
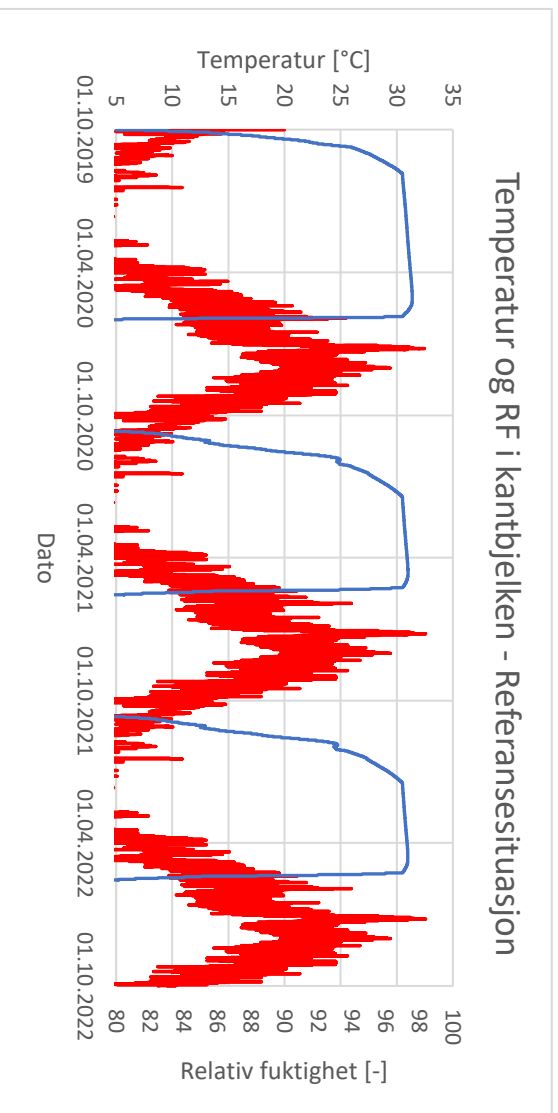
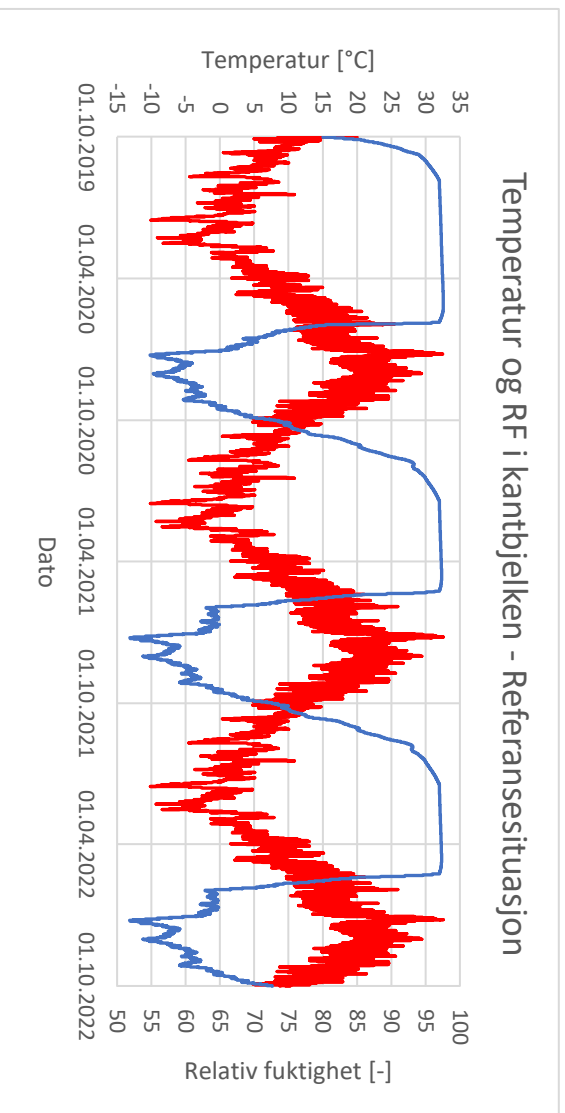
## Simulering med luftlekkasjer – Høy luftlekkasje



## Endring av simuleringssstart – 1. april

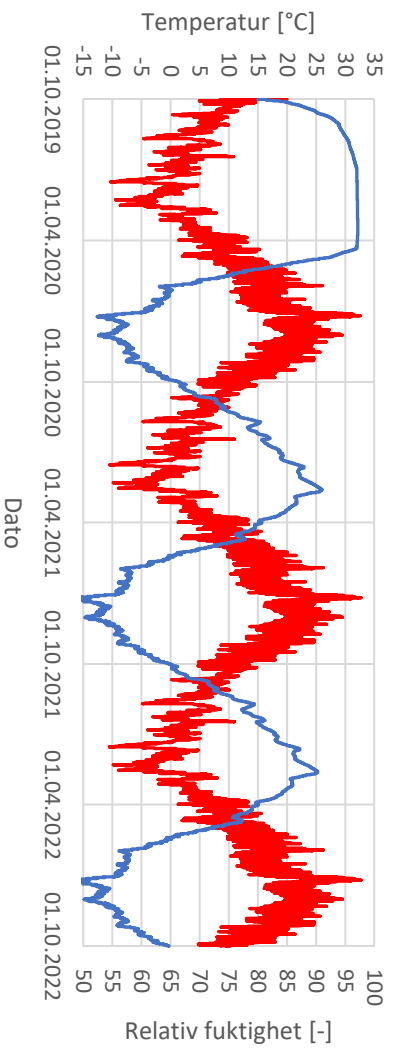


## Situasjon A – Ingen tiltak (Referansesituasjon)

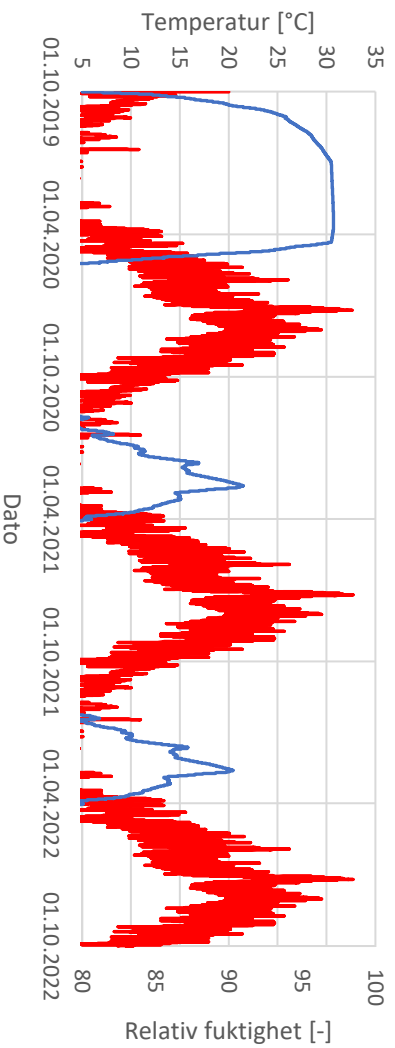


## Situasjon A – Vertikalt sperresjikt, dampbrems

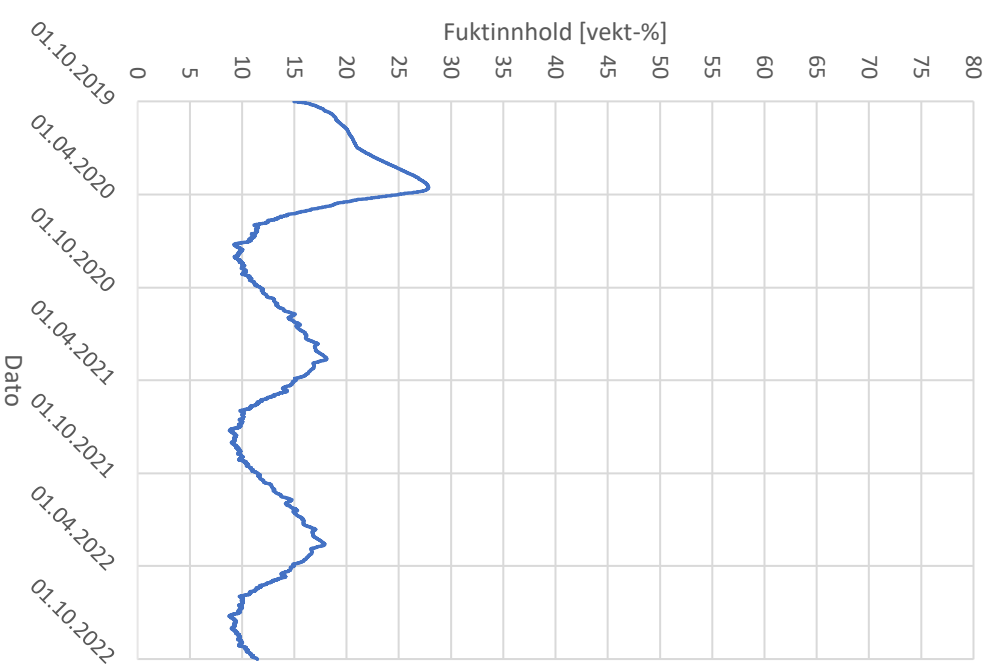
Temperatur og RF i kantbjelken - Situasjon A - Vertikalt sperresjikt, dampbrems



Temperatur og RF i kantbjelken - Situasjon A - Vertikalt sperresjikt, dampbrems

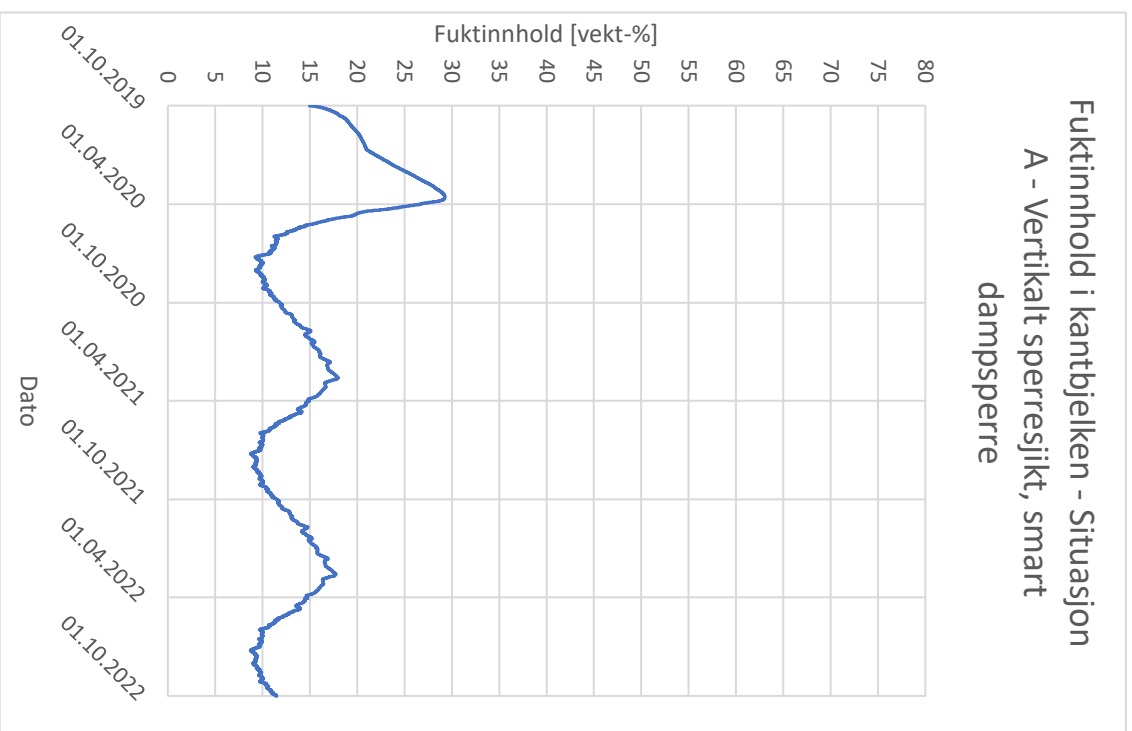
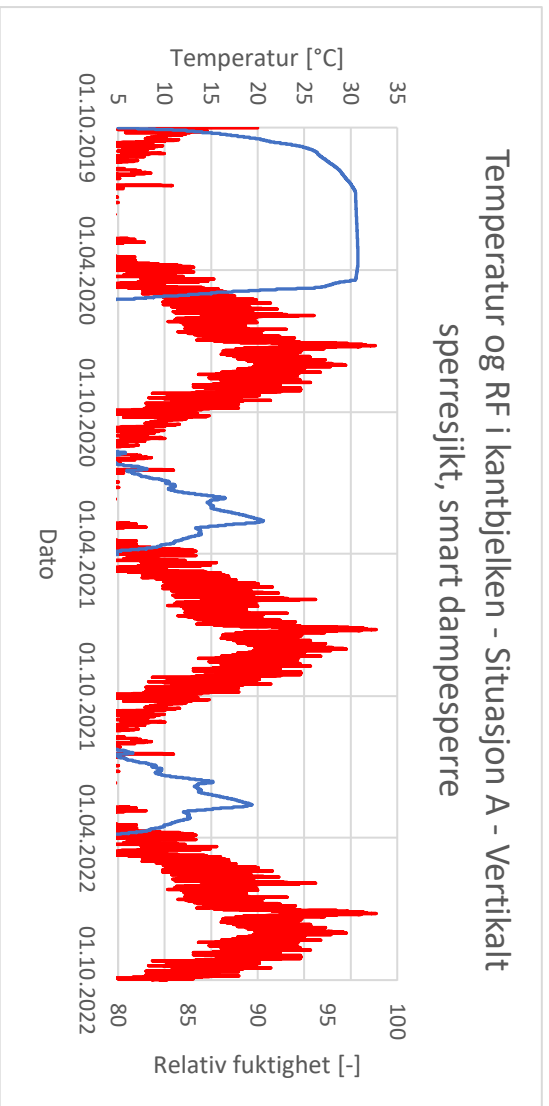
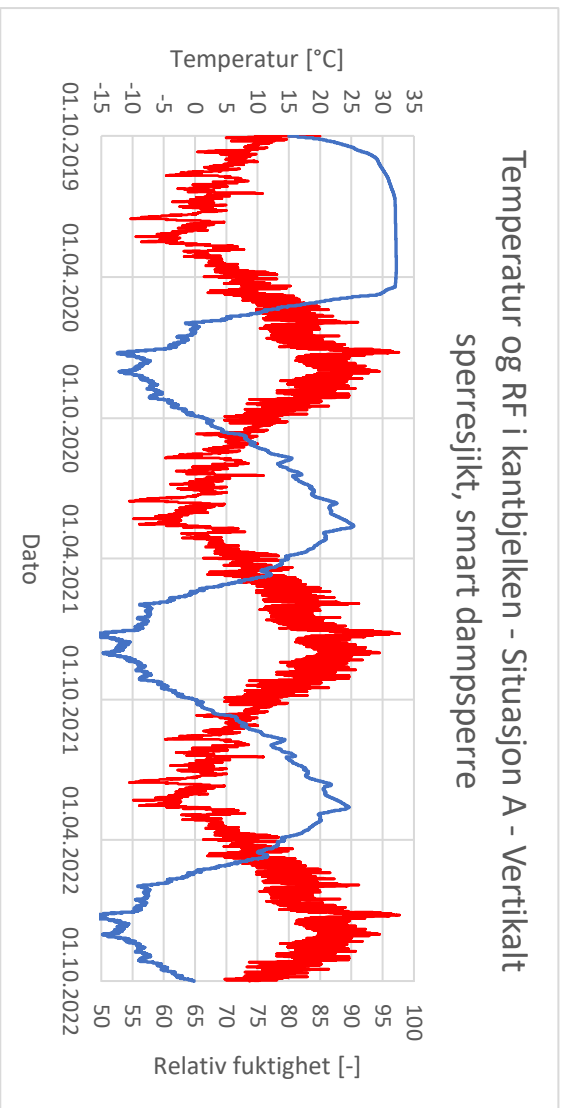


Fukttinnhold i kantbjelken - Situasjon A - Vertikalt sperresjikt, dampbrems

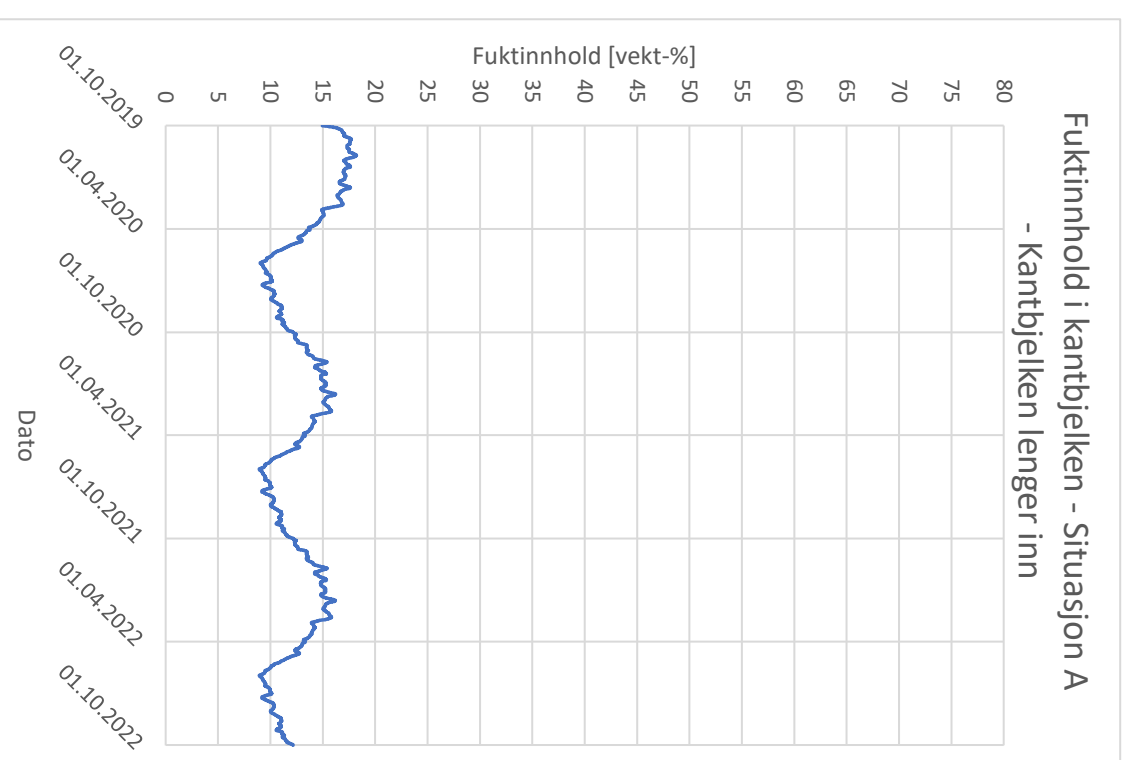
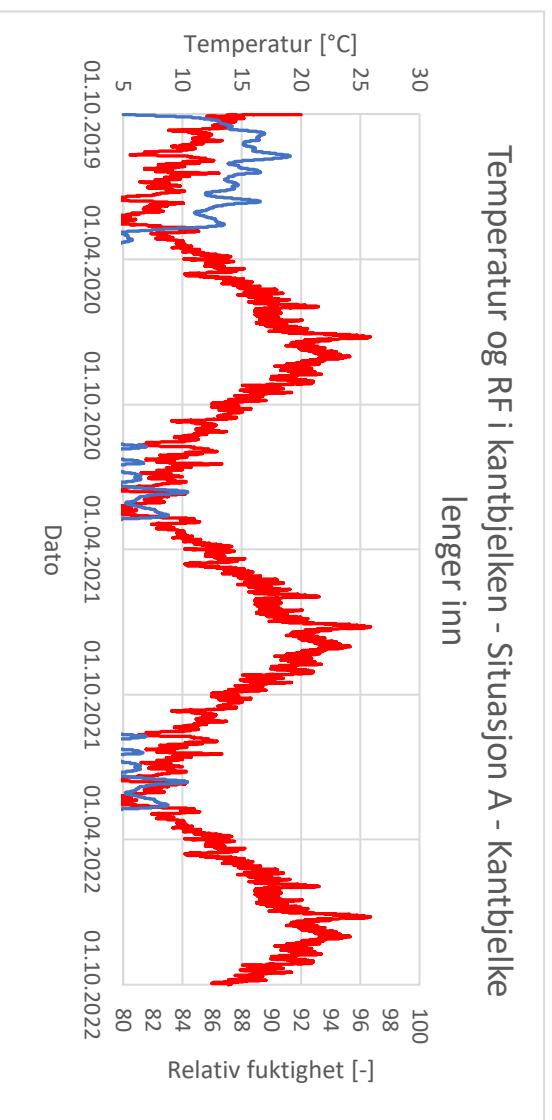
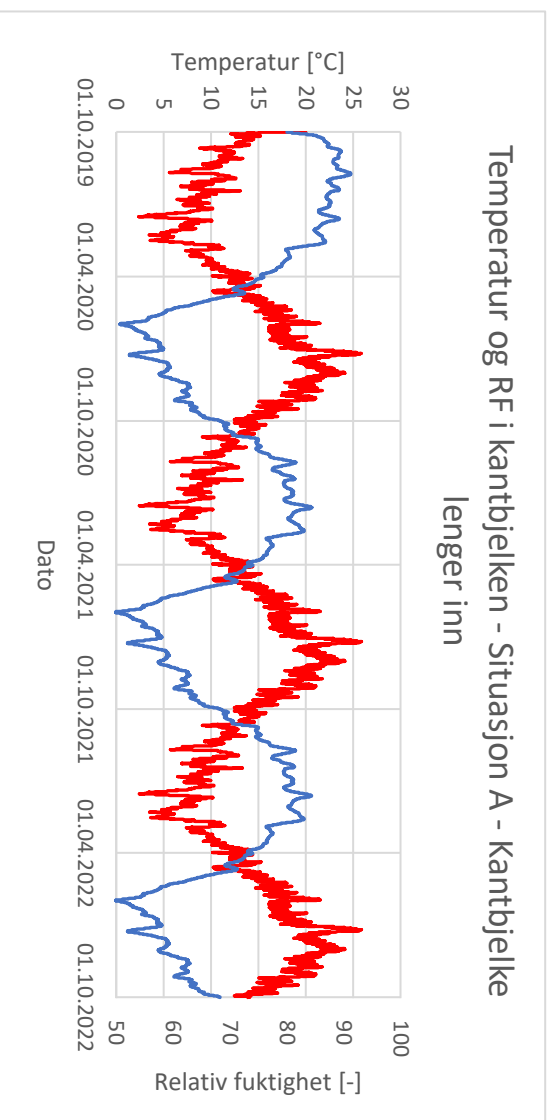




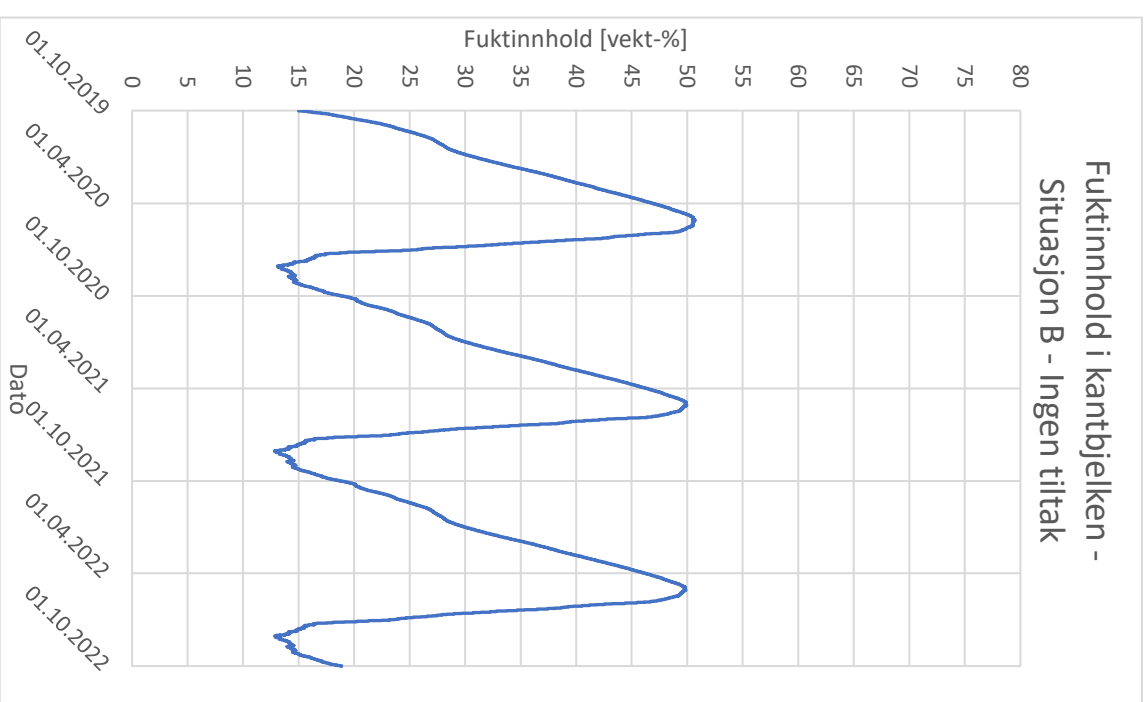
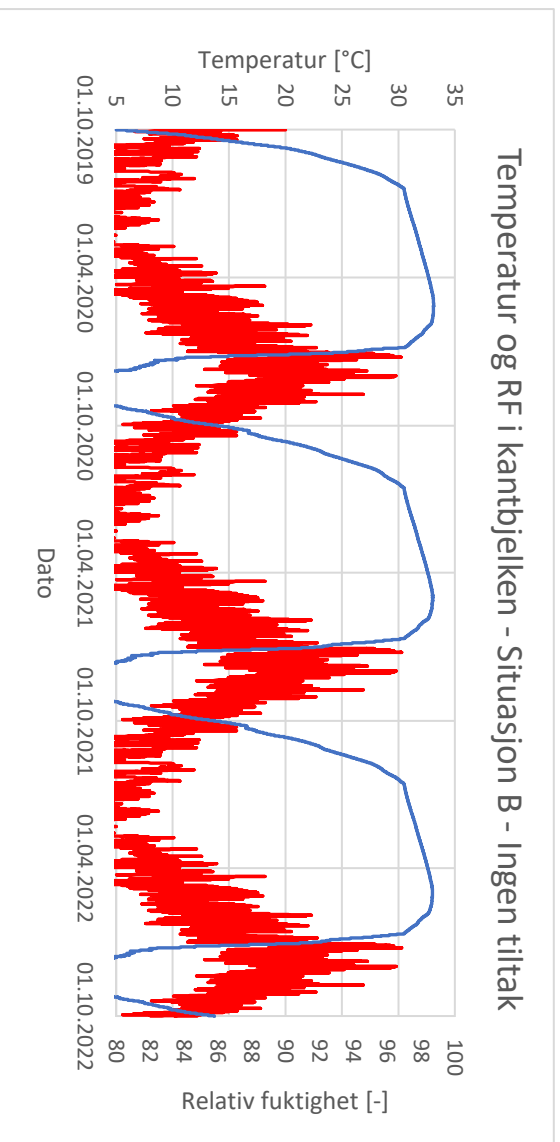
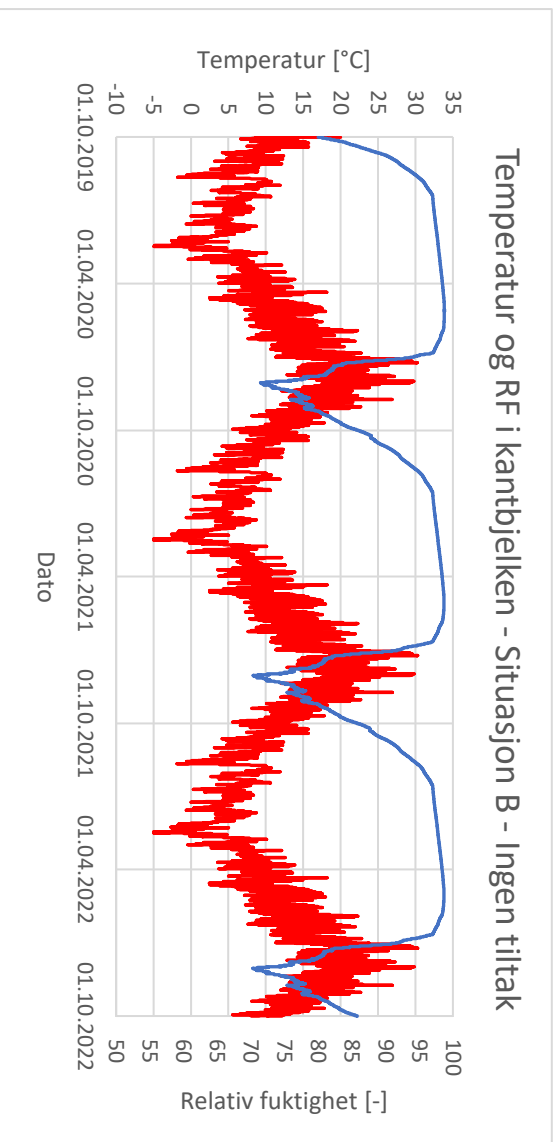
## Situasjon A – Vertikalt sperresjikt, smart dampsperre



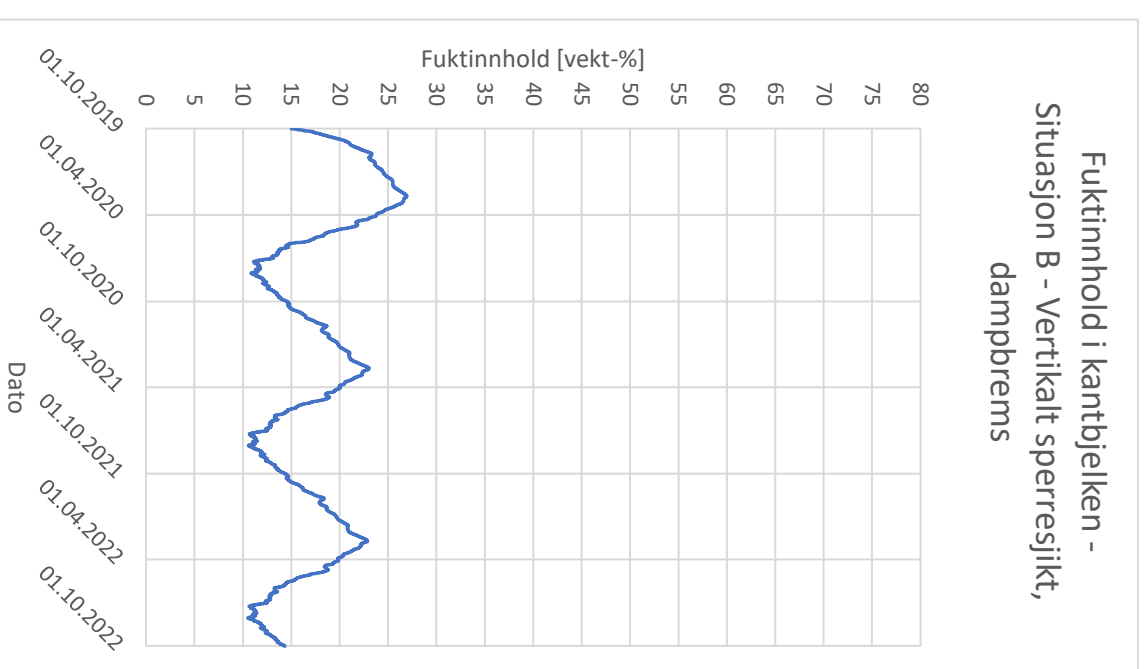
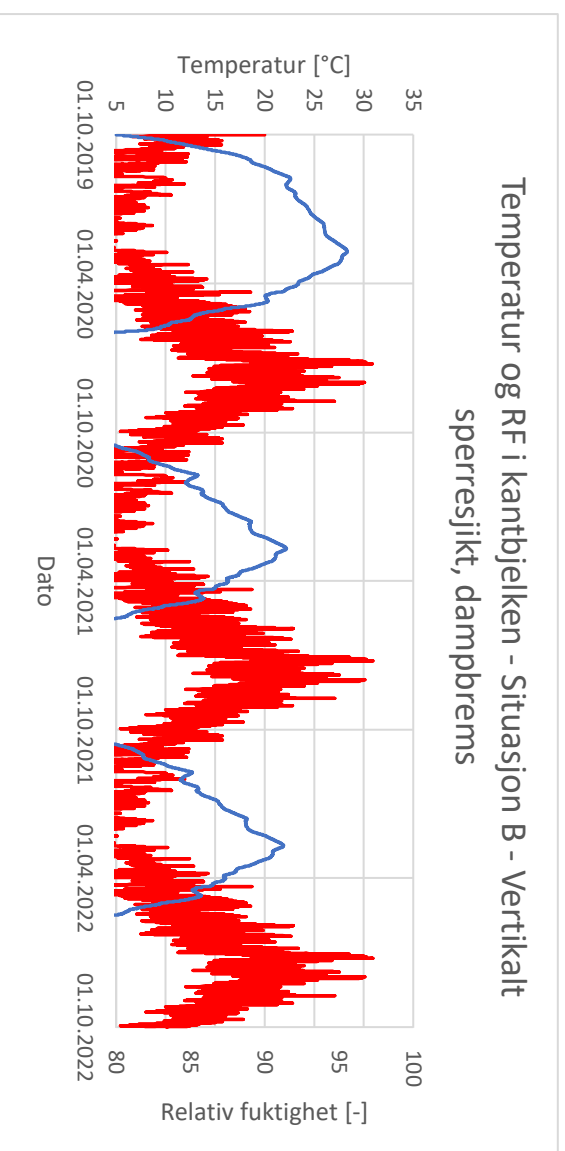
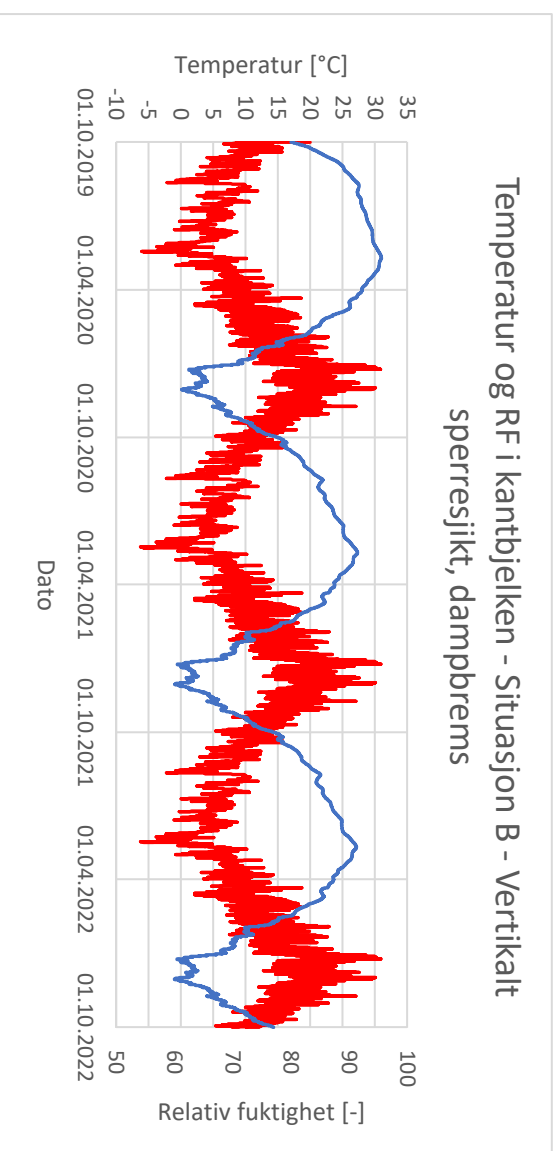
## Situasjon A – Kantbjelken lenger inn i konstruksjonen



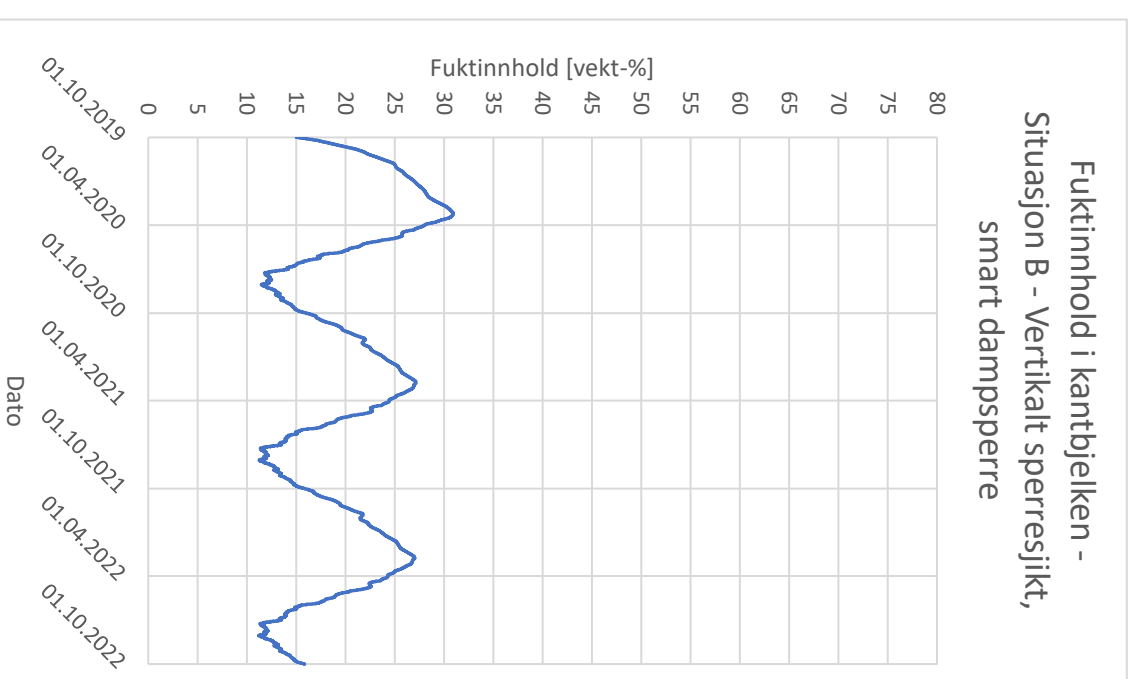
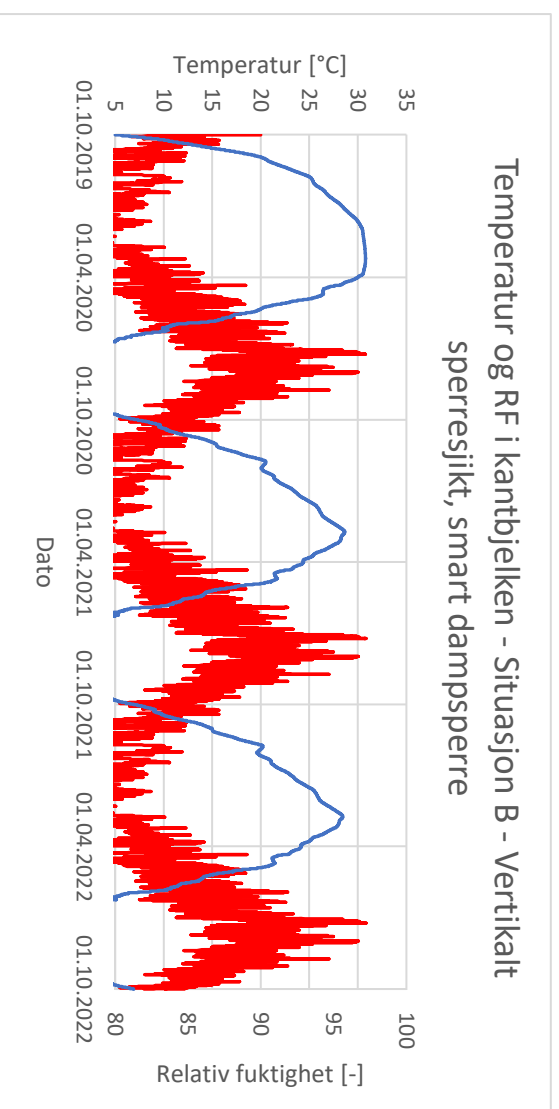
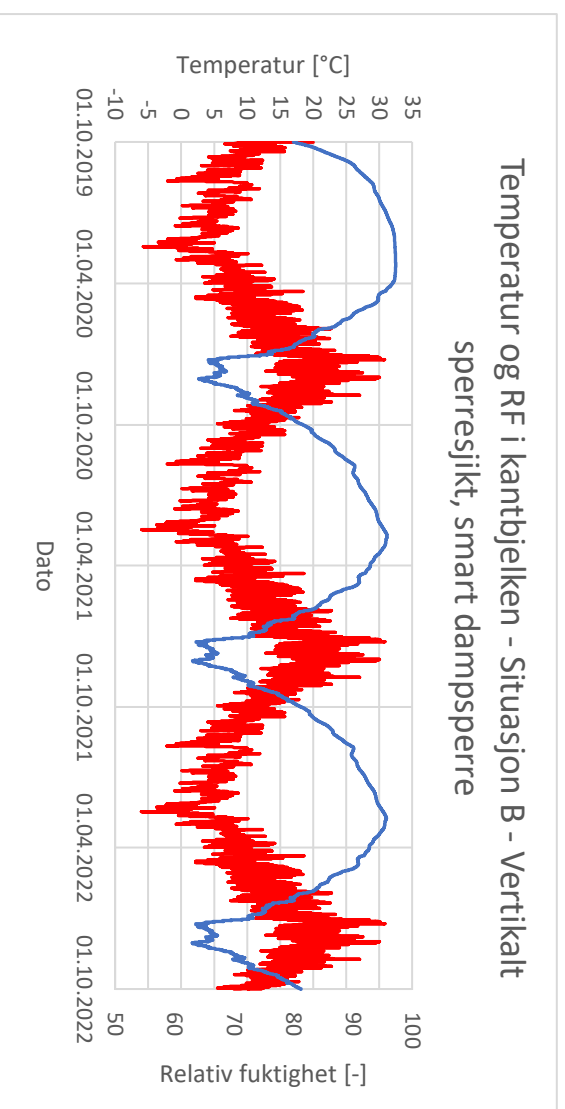
## Situasjon B – Ingen tiltak



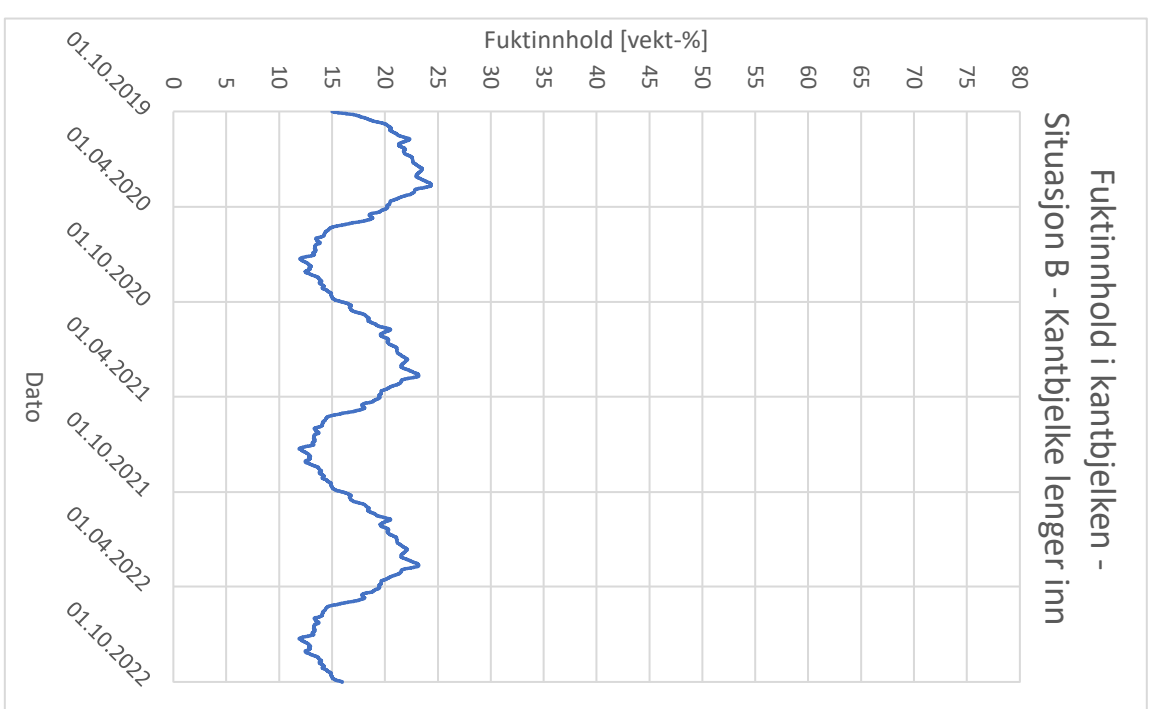
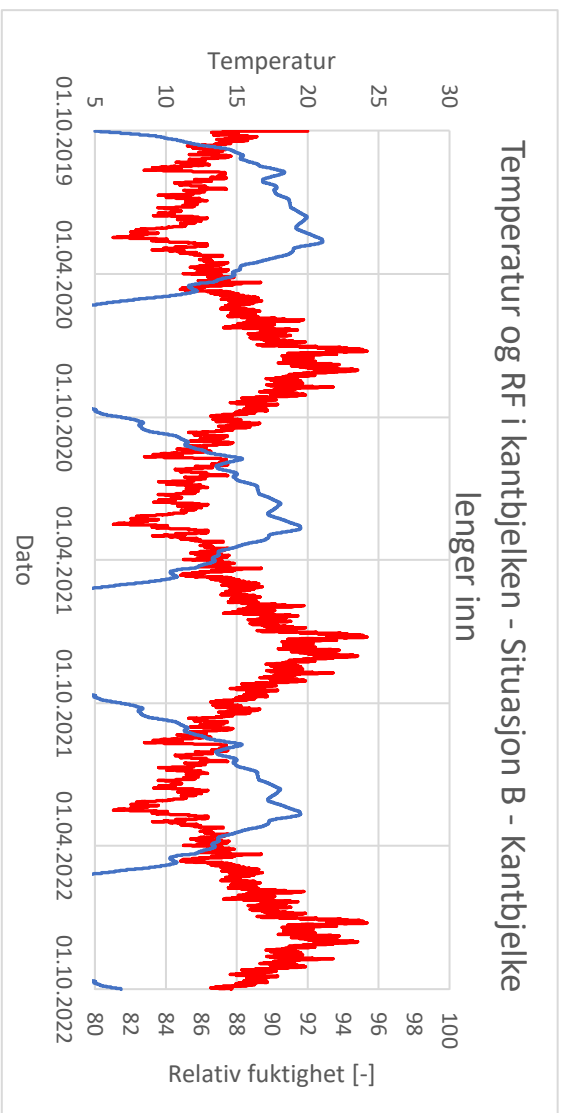
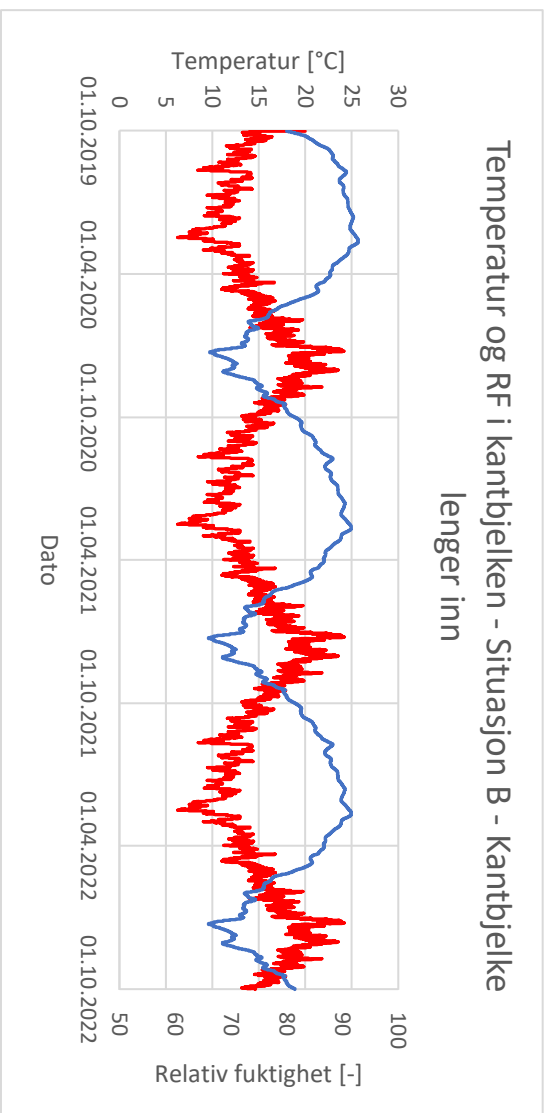
## Situasjon B – Vertikalt sperresjikt, dampbrems



## Simulering B – Vertikalt sperresjikt, smart dampsperre

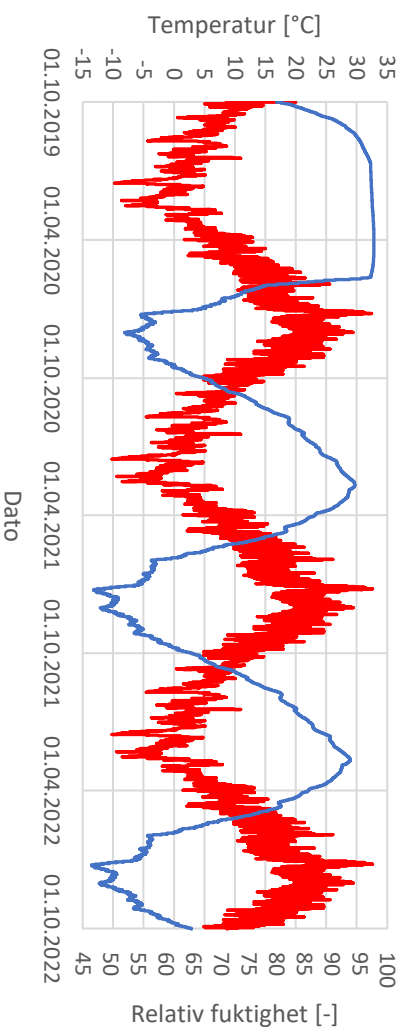


## Situasjon B – Kantbjelken lenger inn i konstruksjonen

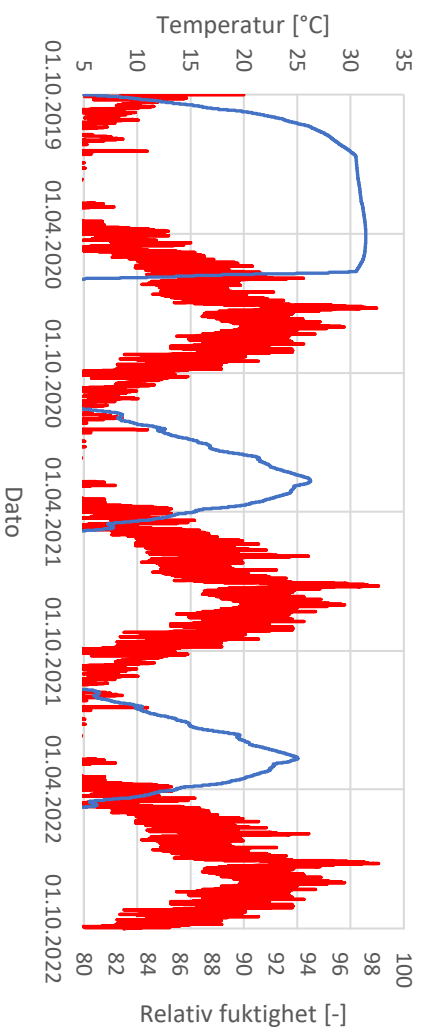


## Situasjon C – Ingen tiltak

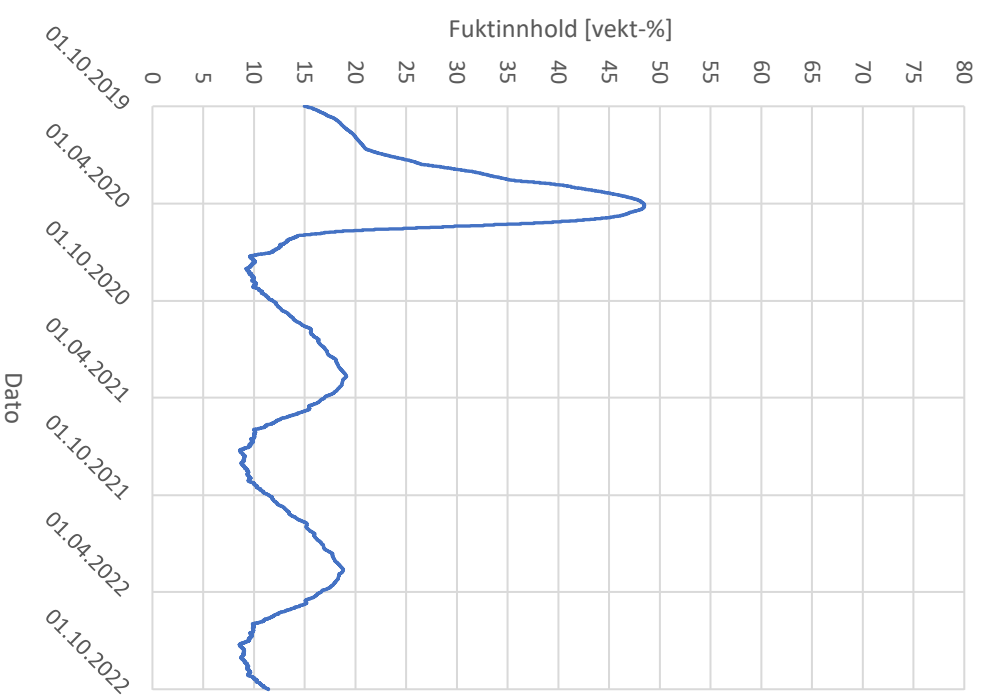
### Temperatur og RF i kantbjelken - Situasjon C - Ingen tiltak



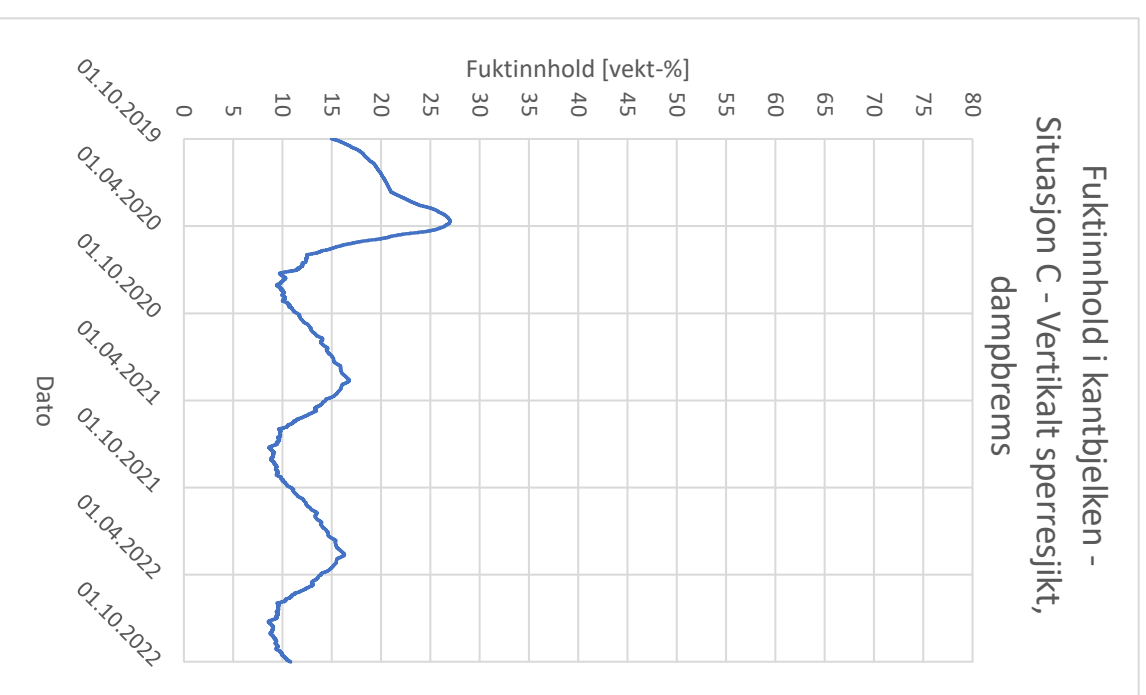
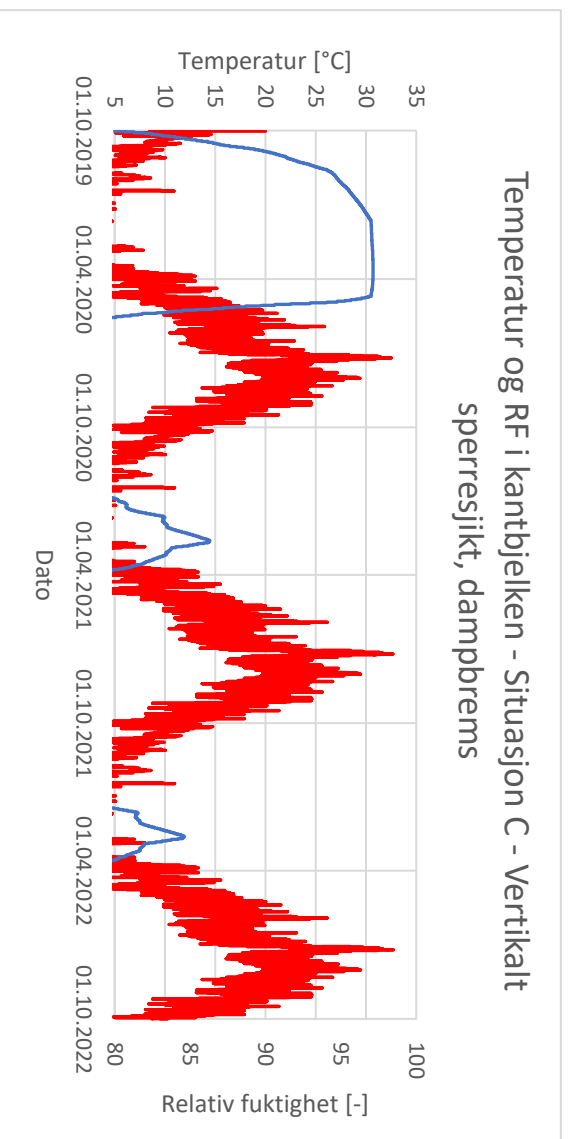
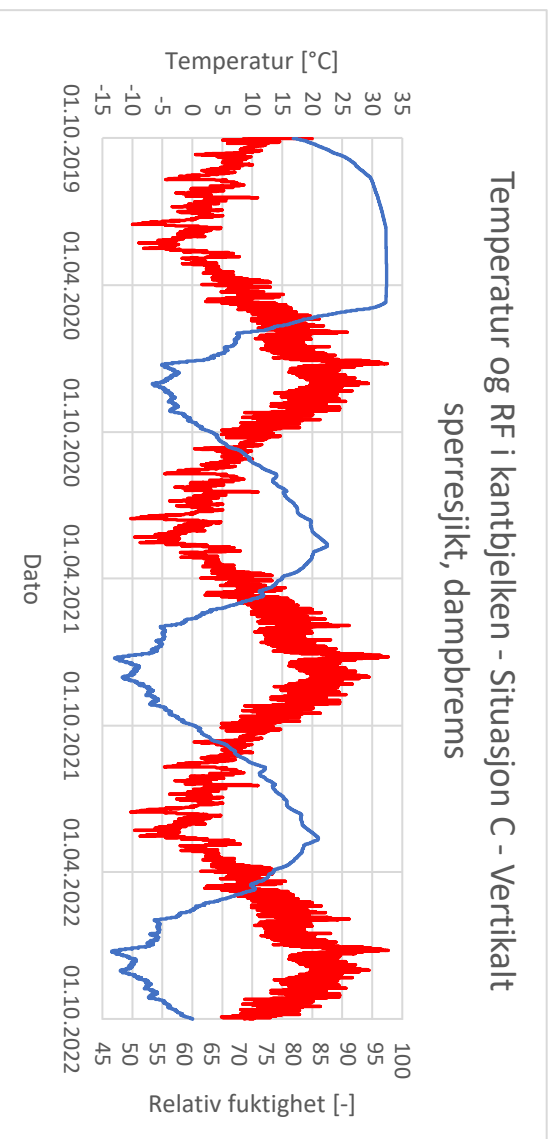
### Temperatur og RF i kantbjelken - Situasjon C - Ingen tiltak



### Fukttinnhold i kantbjelken - Situasjon C - Ingen tiltak

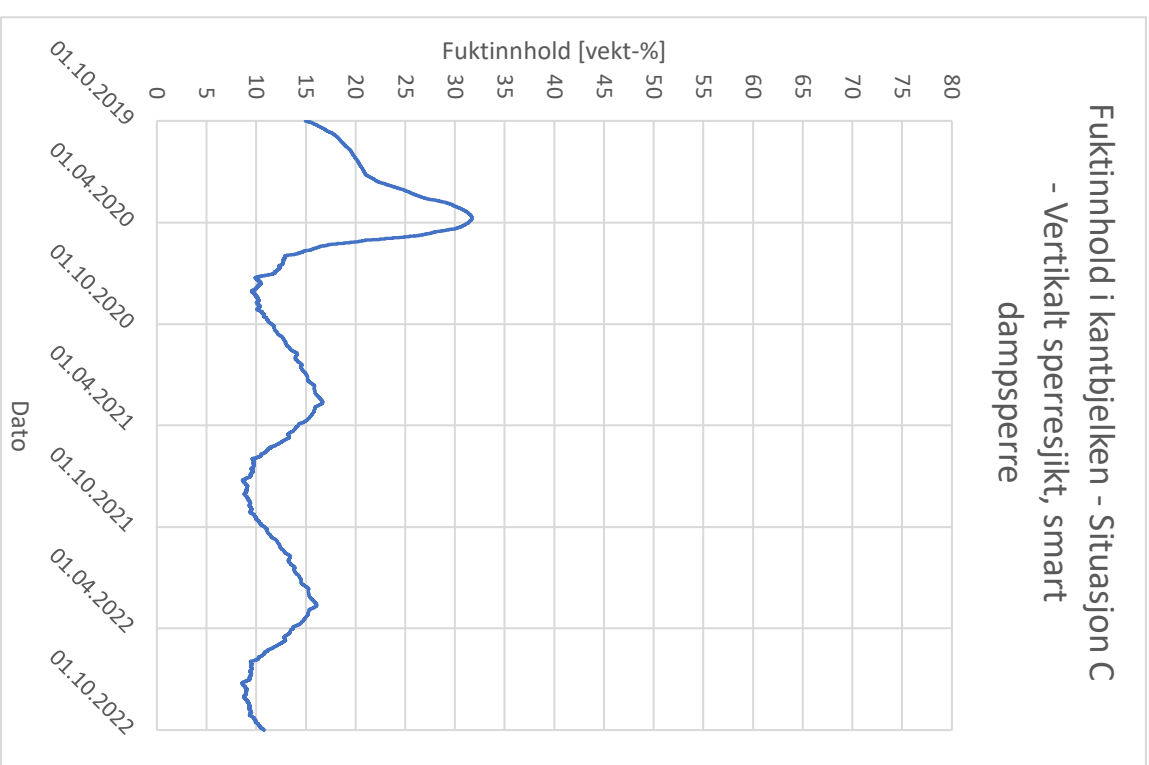
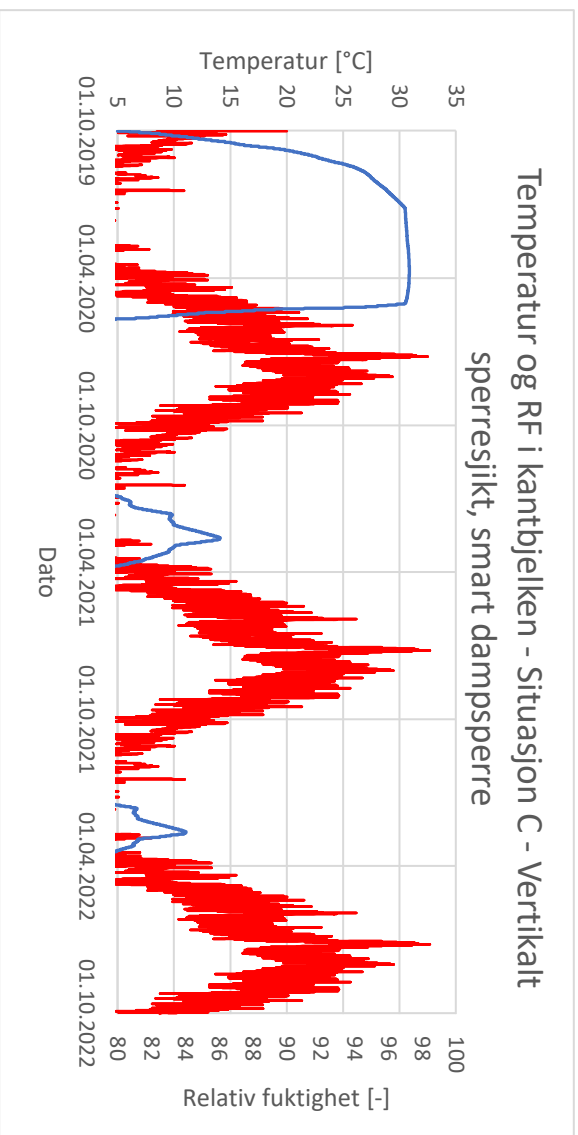
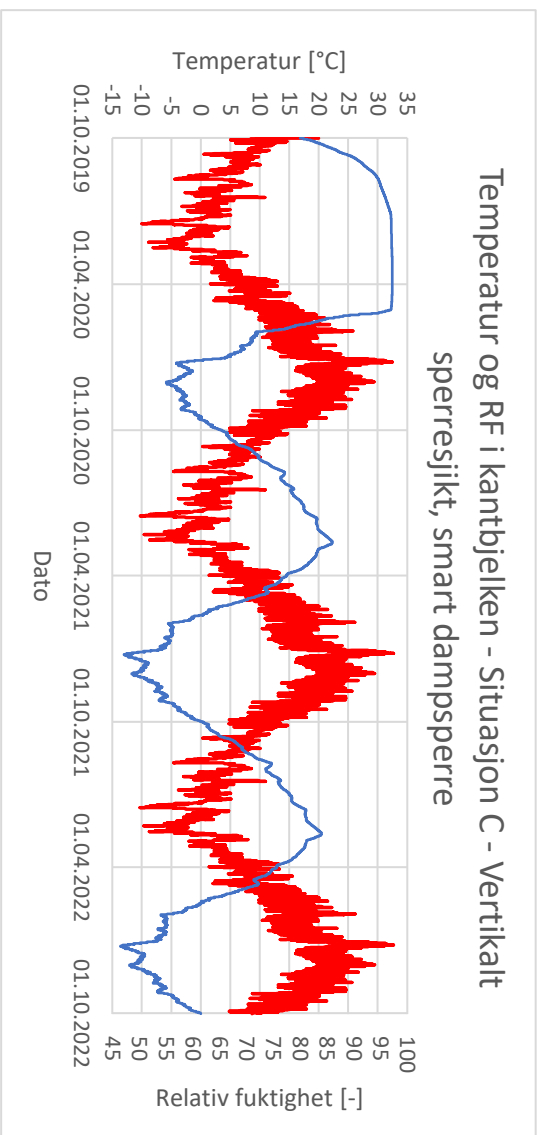


## Situasjon C – Vertikalt sperresjikt, dampbrems

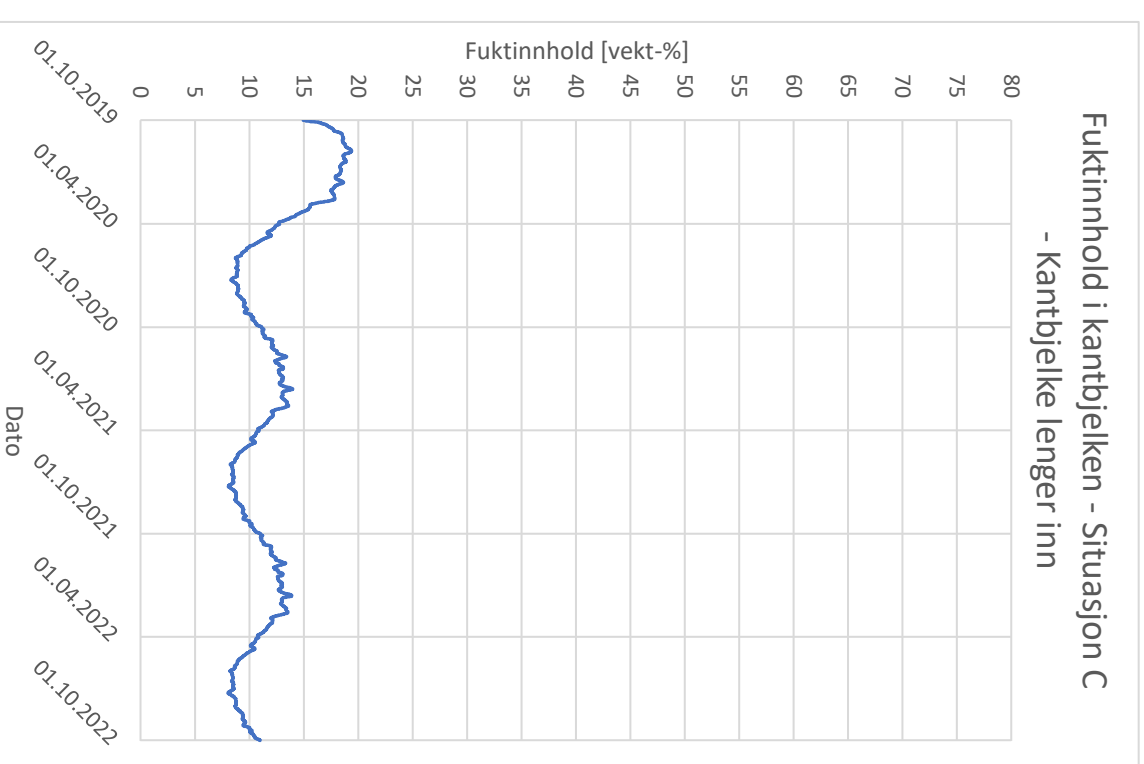
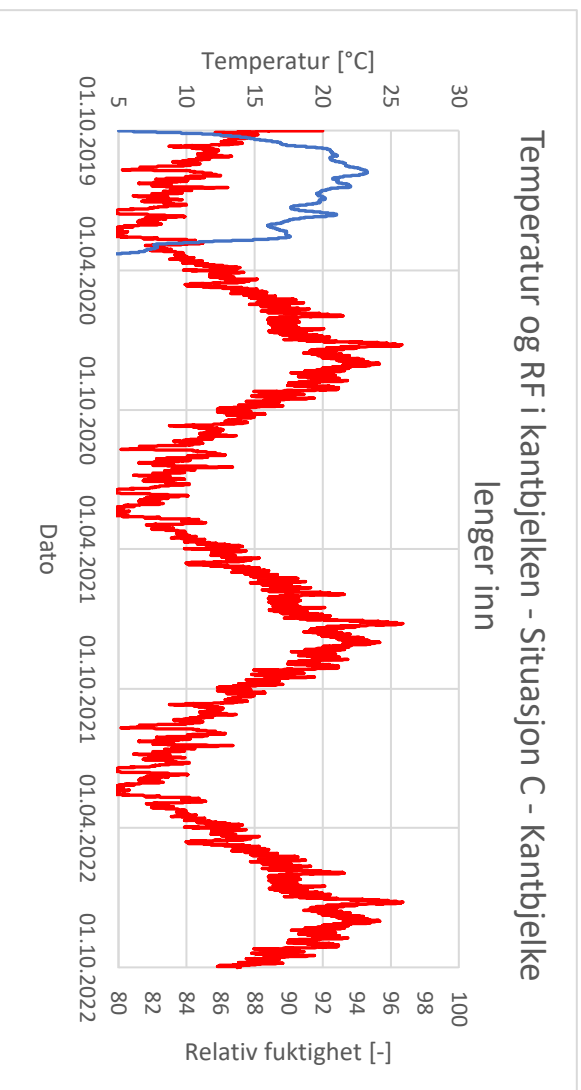
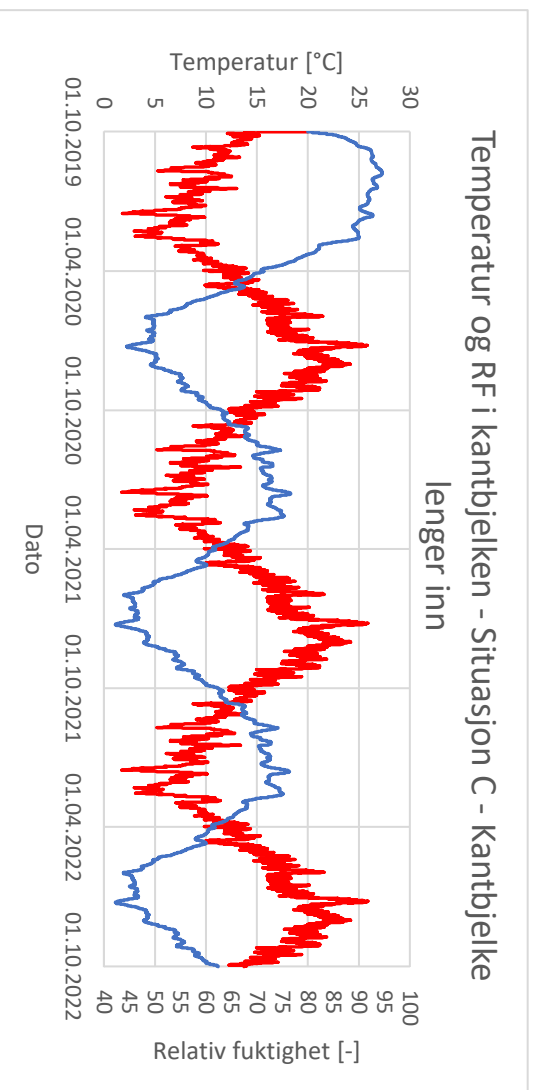




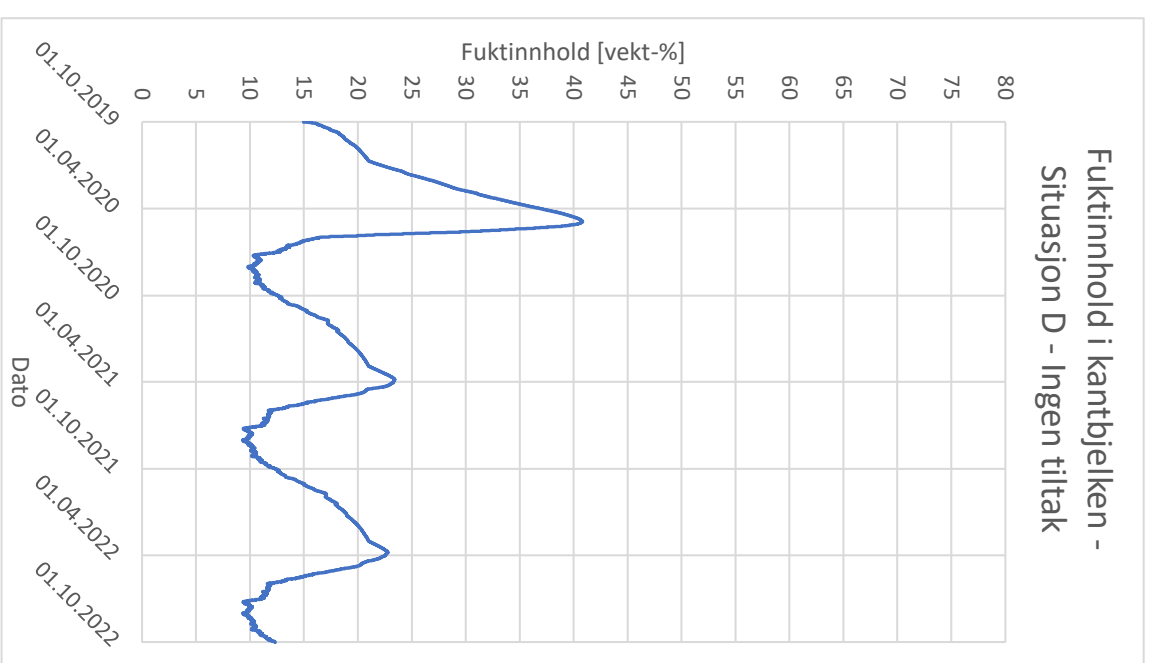
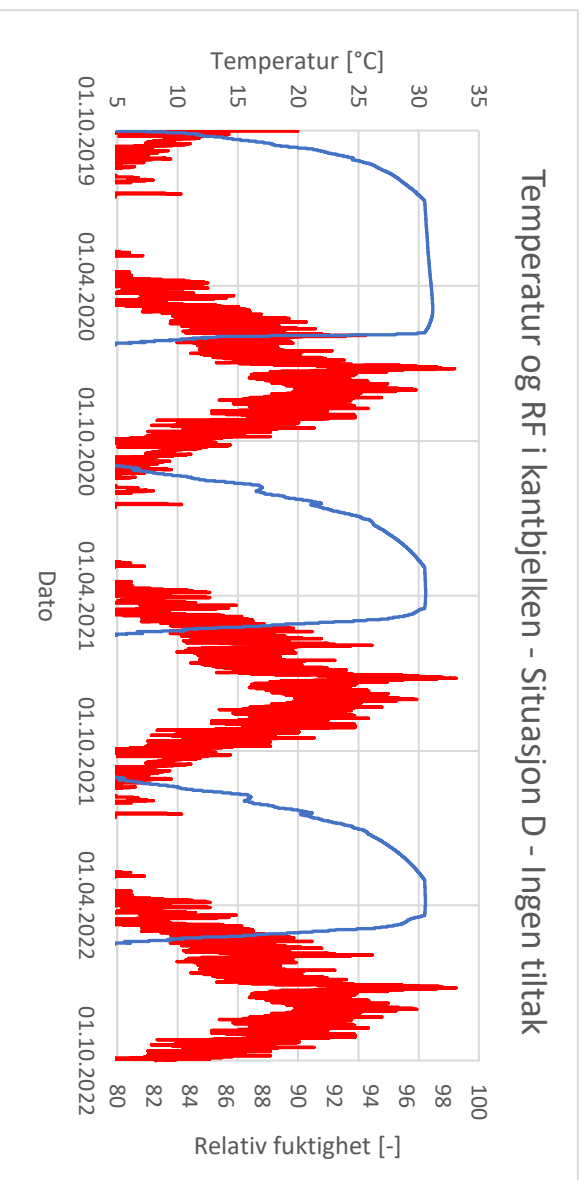
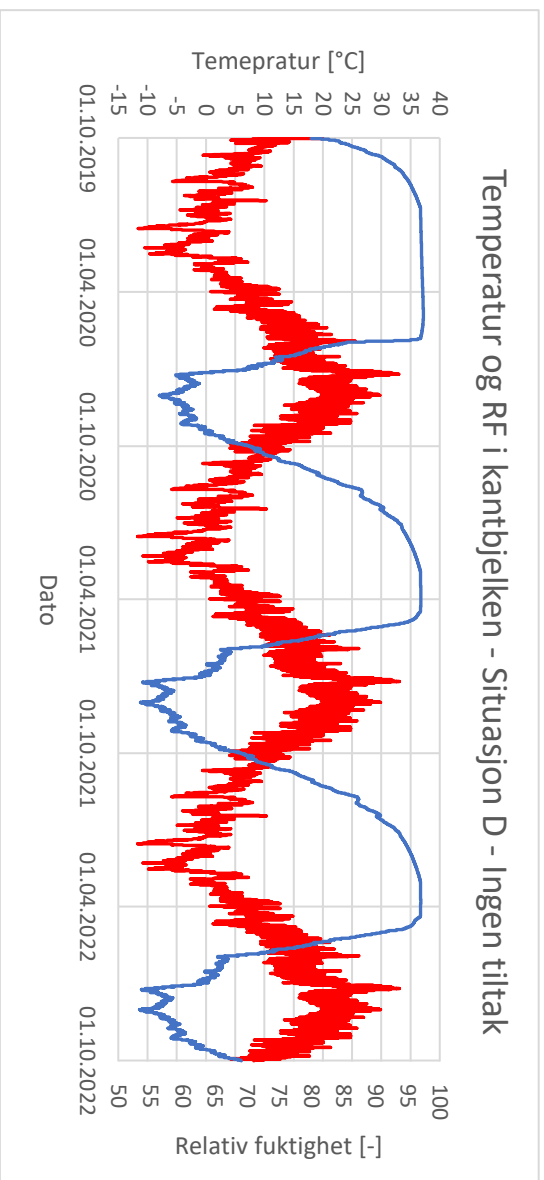
## Situasjon C – Vertikalt sperresjikt, smart dampsperre



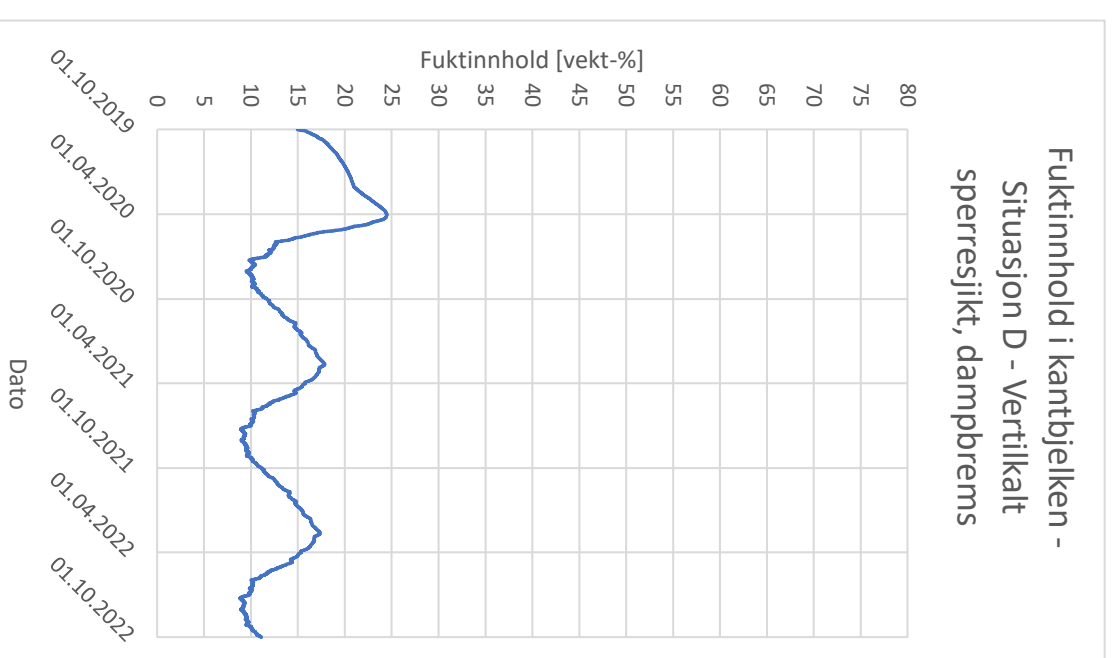
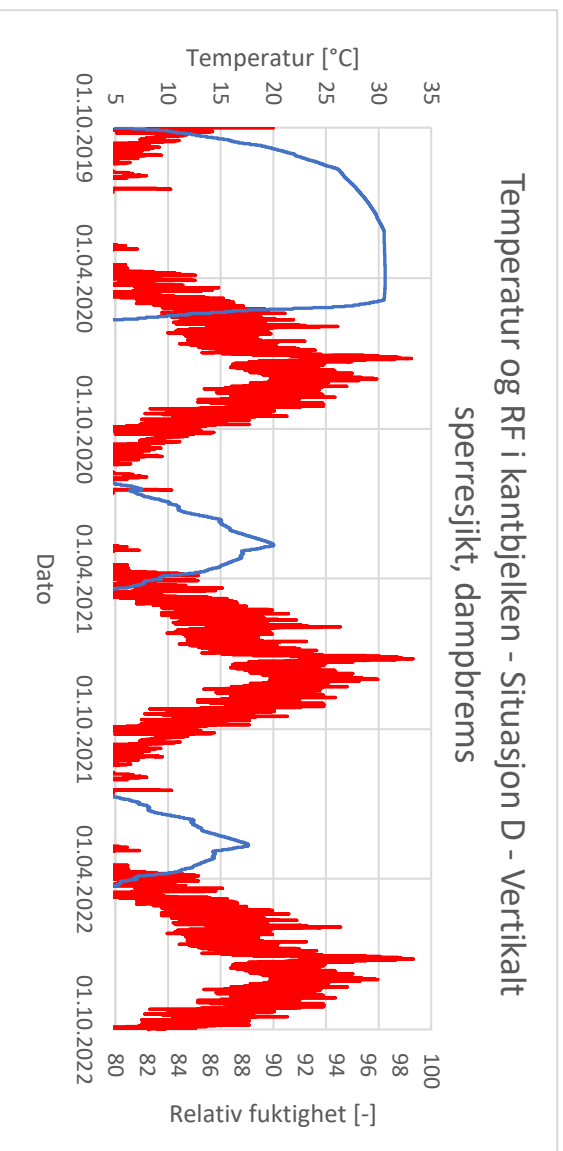
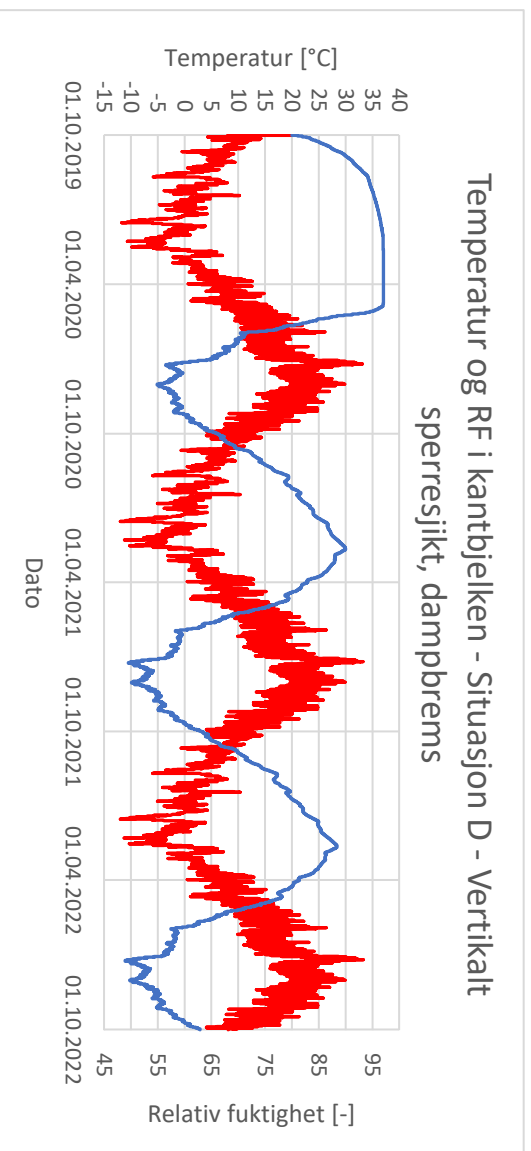
## Situasjon C – Kantbjelken lenger inn i konstruksjonen



## Situasjon D – Ingen tiltak

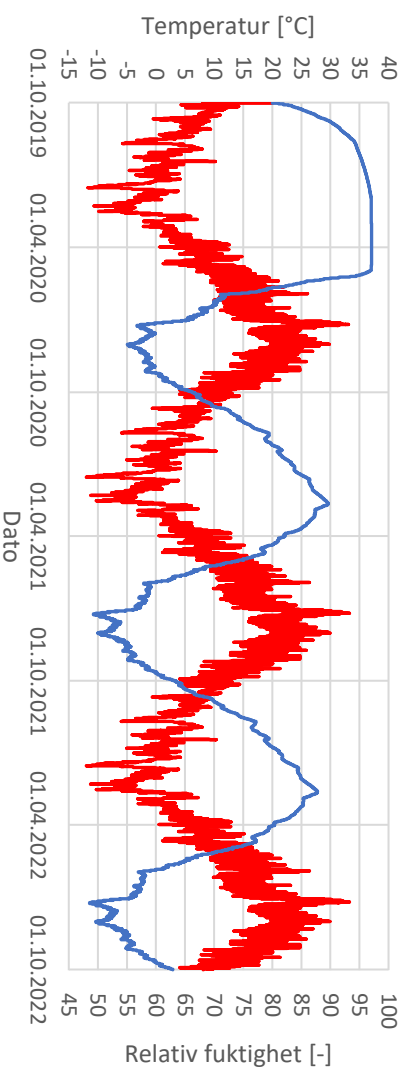


## Situasjon D – Vertikalt sperresjikt, dampbrems

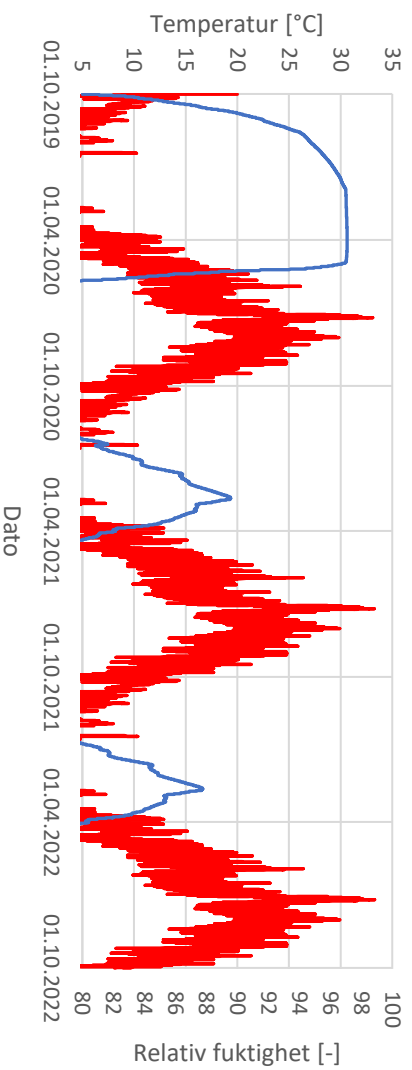


## Situasjon D – Vertikalt sperresjikt, smart dampsperre

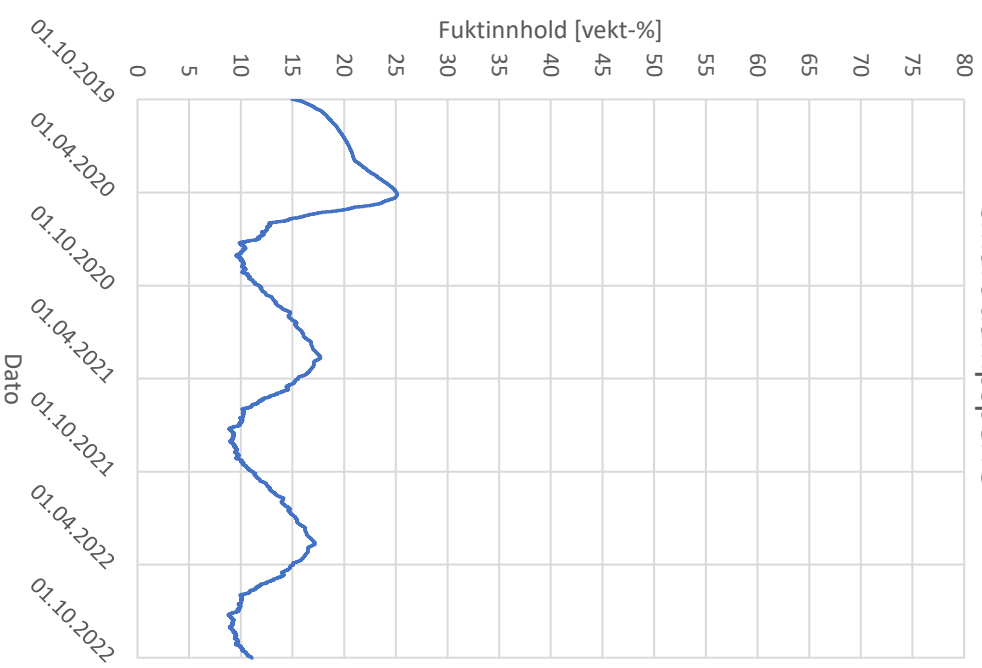
Temperatur og RF i kantbjelken - Situasjon D - Vertikalt sperresjikt, smart dampsperre



Temperatur og RF i kantbjelken - Situasjon D - Vertikalt sperresjikt, smart dampsperre



Fukttinnhold i kantbjelken - Situasjon D - Vertikalt sperresjikt, smart dampsperre



## Situasjon D – Kantbjelken lenger inn i konstruksjon

