

Sara Bredal Ingebretsen

Mikroklima i luftespalter i luftede fasader og skråtak

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Tore Kvande

Juni 2022

Sara Bredal Ingebretsen

Mikroklima i luftespalter i luftede fasader og skråtak

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Tore Kvande

Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for Bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) våren 2022. Omfanget av oppgaven er på 30 studiepoeng, og utgjør det siste semesteret på det femårige studieprogrammet Bygg- og miljøteknikk.

Ønsker å rekke en stor takk til hovedveileder Tore Kvande for veiledning og innspill gjennom hele prosessen med å utarbeide denne masteroppgaven. Vil videre takke Erlend Andenæs for viktig bidrag til artiklene som er skrevet. Ønsker også å rekke en generell takke alle som har vist interesse for arbeidet og bidratt i større eller mindre grad.

Til slutt vil jeg takke min samboeren Marius for svært god hjelp med å effektivisere behandlingen av store datamengder. I tillegg til at han generelt har vært, og fortsatt er, en god støttespiller.

Sara Bredal Ingebretsen

Trondheim, juni 2022

Sammendrag

De tøffe klimaforholdene i Norge forverres av klimaendringene, noe som øker fuktbelastningen på bygningers fasader og tak. Nøyaktige verdier for de klimatiske forholdene i en luftespalte, videre kalt mikroklimaet, er avgjørende når man skal beregne og simulere ytelsen til ventilerte tak og fasader. Den klimatiske belastningen på komponentene og deres mugg- og råtepotensial påvirker takets eller fasadens langsiktige holdbarhet. Nye typer skader observeres i luftespalter i fasader og tak prosjektert og utført etter god byggeskikk. Det er nødvendig med mer kunnskap om mikroklimatiske forhold i luftespalter i fasader og tak, og deres risiko for organisk vekst og biologisk nedbrytning.

En litteraturstudie gjennomføres for å få en oversikt over forskning og vitenskapelig litteratur om mikroklimaet i luftespalter i ventilerte fasader og tak i nordisk klima. Videre samler og presenterer denne studien sensordata som lufttemperatur, overflatetemperatur, luftfuktighet, duggpunktstemperatur og trefukt i luftespalter i tre bygninger i Norge. Målte mikroklimadata sammenlignes med muggvekstkriterier presentert i litteraturen, bygningsfysiske simuleringprogrammer og nasjonale og internasjonale standarder.

Litteratursøket resulterer i 21 vitenskapelige arbeider av vesentlig interesse som har undersøkt tematikken. Deres funn som er av relevans er oppsummert i denne oppgaven. Litteraturstudien viser at kun et begrenset antall studier undersøker luftespaltene mikroklima. Luftespalter i tak omtales i større og mer variert grad enn i fasader og bak solcellepanel. Resultatene kan imidlertid ikke sammenlignes og valideres mot hverandre for å generelt beskrive mikroklimaet til luftespaltene. Dette er fordi den undersøkte litteraturen tilnærmer seg teamet med ulike vinklinger, og gjerne uten kvantitative resultater. De innsamlede sensordataene viser store forskjeller i luftespaltene mikroklima mellom case-bygningene og mellom ulike sensorposisjoner innad i både samme bygg og i samme fasade. Temperaturer i luftespaltene er funnet å være lavere enn utetemperaturer i en betydelig andel av tiden. For høye bygninger påvirker den vertikale plasseringen av sensorene måledataene i større grad enn fasadens orientering. Alle de tre bygningene har sensorposisjoner med både akseptable og kritisk høye nivåer av fukt og høy risiko for muggvekst basert på ulike metoder. De ulike metodene for å beregne forventet muggvekst gir også stor variasjon i beregnet muggvekstrisiko ved samme sensorposisjon.

Det begrensede omfanget av litteratur som undersøker mikroklimaet i luftespalter indikerer en risiko for at beregninger og simuleringer utføres uten å vite om resultatene representerer virkeligheten. Dersom oppbygningen av ventilerte tak og fasader kun utformes basert på erfaring, kan det være vanskelig å være proaktiv og tilpasse seg fremtidige klimaendringer. Analysen av instrumenterte luftespalter viser at det ikke blir riktig å anta at luftespalter holder samme klima som luften utenfor, og at det er svært mange faktorer som spiller inn. Ytterligere studier er nødvendig for å avgjøre hvilke sammenhenger som finnes mellom det utvendige klimaet og mikroklimaet i luftespalter, slik at fremtidige antatte klimapåkjenninger kan brukes til å simulere den langsiktige ytelsen til ventilerte tak og fasader.

Abstract

Harsh climatic conditions in Norway are being worsened by climate change increasing the moisture loads on building façades and roofs. Accurate values for the climatic conditions in an air cavity, hereby called the microclimate, are crucial when calculating and simulating the performance of ventilated roof and façade systems. The climatic stress of their components, and their mould and rot potential, influence the long-term durability of the façade or roof. New types of defects are being observed in air cavities in well-designed and well-built wooden façades and roofs. More knowledge is required on the microclimatic conditions in air cavities, and their implications for organic growth and biological deterioration.

A scoping study is conducted to gain an overview on research and the scientific literature on the microclimate of air cavities in ventilated façades and roof systems in Nordic climates. Furthermore, this thesis collects and presents sensor data from three buildings in Norway. Measured air temperature, air humidity, and wood moisture data are compared to mould growth criteria found in scientific literature, building physics simulation software, and national and international standards.

From the body of the research literature, 21 scientific works were of particular interest, and their findings are summarized. The review shows that only a limited number of studies discuss the microclimate of air cavities. Roofs are discussed to a greater and more varied degree compared to façades and air cavities behind solar panels. However, the results cannot be compared and validated against each other to generally describe the microclimate of air cavities, as the surveyed papers approach the subject differently and often lack quantitative results. The collected sensor data shows great differences in air cavity microclimates between the case buildings and between different sensor positions within the instrumented buildings and façades. Air cavity temperatures are found to be lower than exterior temperatures for a substantial portion of the time. For tall buildings, the vertical positioning of a sensor influences the data more than the orientation of the façade. All three buildings feature monitoring positions with both acceptable and critically high levels of moisture to indicate mould risk. There is great variation in the estimated risk of mould growth according to the different criteria.

The identified knowledge gap indicates a risk that calculations and simulations are performed without knowing whether the results represent reality. If the structure of ventilated roof and façade systems are only designed based on experience, it can be difficult to be proactive and adapt to future climate changes. The analysed sensor data suggests that the air cavity microclimate cannot be assumed to be identical to the exterior climate. Further studies are needed to determine the relation between the exterior climate and the air cavity microclimate, so that future climate predictions can be used to simulate the long-term performance of ventilated roof and façade systems.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formål og omfang	2
1.3 Begrensninger	2
1.4 Oppgavens struktur	3
2 Teoretisk rammeverk	5
2.1 Uteklima og klimapåkjønning	5
2.2 Kondenspotensialet	7
3 Metode	9
3.1 Litteraturstudie	9
3.2 Case-byggene	10
3.3 Klimadata og værstasjoner	15
3.4 Måleutstyr	16
3.5 Instrumentering	18
3.6 Analyse av data	26
3.7 Fuktberegninger i WUFI Pro	27
3.8 Muggvekstanalyse i WUFI Mould Index VTT	31
3.9 Sammenstilling av ulike muggvekstmodeller	36
3.10 Kritisk RF	38
3.11 Konstante grenseverdier for muggvekstrisiko	39
3.12 Kondenspotensialet	40
4 Resultat	45
4.1 Hvordan omtaler forskningslitteraturen mikroklimaet i luftespalter?	45
4.2 Fullstendighet i datasett	46
4.3 Temperaturmålinger	47
4.4 Målt luftfuktighet	54
4.5 Målt trefukt	58
4.6 Temperaturdifferanse over luftespaltens tykkelse	62
4.7 Fuktberegninger i WUFI Pro	66

4.8 Muggvekstanalyse i WUFI Mould Index VTT	69
4.9 Sammenstilling av ulike muggvekstmodeller	74
4.10 Kritisk RF	76
4.11 Konstante grenseverdier for muggvekstrisiko	78
4.12 Kondenspotensialet	83
5 Diskusjon	87
5.1 Målt trefukt sett over måleperiodene	87
5.2 Temperaturdifferanse over luftespaltens tykkelse	88
5.3 Treffsikkerheten til fuktberegninger i WUFI Pro	88
5.4 Følsomhetet til valg av materialparametere i WUFI Mould Index VTT	89
5.5 Ulike metoder for å beregne kondenspotensialet	90
6 Konklusjon	91
7 Videre arbeid	93
7.1 Utvidet sensormåling i luftespalter og i uteklime	93
7.2 Utvidet analyse av simuleringene utført i WUFI Pro	93
7.3 Beregnet muggvekstrisiko sett opp mot faktisk muggvekst	93
Referanseliste	95
Vedlegg	i
A Detaljtegninger av Norgeshus med sensorposisjoneringer i luftespalter	iii
B Detaljtegninger av ZEB-laboratoriet med sensorposisjoneringer i luftespalter	vii
C WUFI Pro - inndata	ix
D Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates	xi
E Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway	xxxix
F Punktmålinger av temperatur og RF sett opp mot sammenstilling av ulike muggvekstmodeller	lvii

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I Norge er uteklimaet svært utfordrende og består av blant annet sterk vind, slagregn, snølast, store og raske temperaturvariasjoner og fryse-tine-sykluser, ofte i ugunstige kombinasjoner (O'Brien, Sygna og Haugen, 2004). Med klimaendringene er det forventet at utfordringene blir større, med økt temperatur og hyppigere og mer intense nedbørsperioder (Hanssen-Bauer mfl., 2015). For å skape robuste klimaskall som beskytter den underliggende konstruksjonen og bygningens innside mot de krevende klimaforholdene er prinsippet om totrinnstetning en mye brukt løsning for fasader og skråtak (Edvardsen og Ramstad, 2018). Løsninger etter dette prinsippet består av en utvendig kledning og en dampåpen vindsperre separert med en luftespalte for drenering og ventilasjon (Svendsen, 1968, Birkeland, 1968).

I den siste tiden er det et økende antall innrapporterte skadesaker forårsaket av nedbør (N. S. Bunkholt mfl., 2021). Mange av skadesakene skyldes utilstrekkelig lufting og ventilering av luftespalter, men det er stadig flere skader i bygninger som er prosjektert og utført riktig etter totrinnsprinsippet (N. Bunkholt, Time og Kvande, 2021). Mikroklimaet i luftespaltene gir trolig materialene annen klimatisk eksponering enn hva som er kjent. Begrepet ”mikroklima” er definert som det klimatiske forholdet i et veldig lite eller avgrenset område, og kan avvike fra klimaet i det omkringliggende området (Lexico Dictionaries, 2022). Luftespalten er ventilert mot uteluften i bunnen og toppen av luftespalten samt skjøter i kledningen, og uteklimaet vil dermed i stor grad påvirke mikroklimaet i luftespalten. Likevel er det ikke nødvendigvis en direkte korrelasjon mellom uteklimaet og klimaet i luftespalten (N. Bunkholt, Gullbrekken og Kvande, 2020). Materialenes holdbarhet påvirkes av at klimaforholdene i økende grad er mer gunstige for organisk vekst (Lisø og Kvande, 2007). Spesielt treverk, som i utgangspunktet er et motstandsdyktig materiale, trenger beskyttelse mot biologisk nedbrytning for å få en lang levetid (H. Viitanen, Vinha, Salminen mfl., 2010, Brischke, Bayerbach og Rapp, 2006).

For å kunne vurdere materialers og konstruksjoners tåleevne mot blant annet fuktpåkjenning og organisk vekst er det essensielt å kjenne til hvilke klimatiske forhold de blir utsatt for gjennom levetiden. For å estimere tåleevnen til materialer som vindsperre, vindsperreteip, lekter, sløyfer og utvendig kledning i luftede fasader og skråtak innebærer dette å ha kjennskap til mikroklimaet i luftespalter. Klimatiske parametere for luftespalter kan blant annet inkludere lufttemperatur, luftfuktighet, lufttrykk, vanninntrengning, luftstrømningskarakteristikker og overflatetemperaturer, og hvordan disse korrelerer med uteklimaet. I tillegg er de mikroklimatiske forholdene svært viktig å kjenne til i forbindelse med prosjektering av solcellepanel, og spesielt solcellepanel innebygd i fasade- og takmaterialer (BIPV) (Gullbrekken, Kvande og Time, 2015). Dette er fordi virkningsgraden til solcellepanel er omvendt proporsjonal med temperaturen til panelene, og solcellene produserer mer elektrisitet ved lavere temperaturer (Byggforskserien 321.231, 2021). Solcellepanel vil også påvirke luftespaltens mikroklimatiske forhold annerledes enn kledning av treverk ved at solcellepanel ikke har kondensopptaksevne (Byggforskserien 525.101, 2021).

1.2 Formål og omfang

Formålet med denne masteroppgaven er å undersøke klimaet i luftespalter i luftede fasader og skråtak i nordisk klima med tanke på risiko for organisk vekst. Dette innebærer innledningsvis å kartlegge omfanget av eksisterende litteratur. Videre inkluderer oppgaven å undersøke faktiske forhold gjennom feltforsøk og hvilke konsekvenser de reelle mikroklimaforholdene i luftespaltene gir med tanke på biologisk nedbrytning. Studien undersøker følgende forsknings-spørsmål:

- Hvordan omtaler forskningslitteraturen mikroklimaet i luftespalter?
- Hvilke temperatur- og fuktforhold kan forventes i luftespalter bak fasadekledning og taktekning?
- Hva er risikoen for muggvekst i en totrinnstetning?

1.3 Begrensninger

I forbindelse med det systematiske litteraturstudien som er gjennomført i flere databaser, er det gjort noen avgrensninger. For å fange opp litteratur som er relevant for norsk klima og byggeskikk, ble det valgt å avgrense søket til litteratur med opphav i land med et nordisk klima og en byggetradisjon for luftede fasader og skråtak sammenlignbart med Norge. I søkedatabasene ble dermed litteratur filtrert til å gi treff fra Norge, Sverige, Finland, Danmark, Island, Storbritannia og Irland. I forbindelse med sensormålinger av faktiske klimaforhold i luftespalter er det bemerkt noen begrensninger. Studien undersøker tre bygg lokalisert i to forskjellige klimasoner i Norge over en periode på ett år for to av byggene og to år for det tredje som fungerer som et referansebygg. Alle tre byggene er enten relativt nye eller har nylig rehabiliterte fasader ved instrumenteringen, slik at eventuell byggfukt i treverket kan spille inn. To av byggene er oppført som eneboliger for vanlig bruk, og ikke som et forskningsprosjekt. Referansebygget er omfattende overvåket ved at bygget i seg selv er et forskningslaboratorium, men benyttes i det daglige som et vanlig kontorbygg. Instrumenteringen av byggene ble gjennomført uten hensyn til at denne studien skulle gjennomføres, og det var dermed ingen mulighet til å påvirke valg av sensorposisjoner i forbindelse med denne oppgaven. Sensorene er instrumentert i treverk av ubehandlet gran, og der byggets egne lekter ikke er av dette materialet er sensorene montert på en kloss av ubehandlet gran som igjen er montert på byggets lekter. Sensorene benyttet til å instrumentere byggene måler luftfuktighet, temperatur og duggpunktet til luften i luftespalten samt trefukt. Andre parametere som luftstrømningskarakteristikker og lufttrykk er ikke målt. Datamålinger for uteklimaet utgjør en usikkerhet da målingene for to av byggene ikke ble gjort på stedet. Isteden benyttes klimadata fra lokale meteorologiske værstasjoner.

1.4 Oppgavens struktur

Masteroppgaven består av to vitenskapelige artikler som utgjør hoveddelen av studien. Artikkelen *Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates* (Ingebretsen, Andenæs og Kvande, 2022) i vedlegg D ble publisert i journalen *Buildings* 19. mai 2022. Artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* er ved innlevering av denne oppgaven klar til å sendes inn til journalen *Buildings*. Utkastet som sendes inn er vedlagt i denne oppgaven i vedlegg E. Artiklene er innrammet i denne kappen som også dekker deler av masteroppgaven som ikke inkluderes i artiklene.

Seksjon 2 Teoretisk rammeverk

Det teoretiske rammeverket for denne studien er i hovedsak presentert i artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* i vedlegg E. Dette inkluderer formålet med og oppbyggingen av luftespalter i fasader og tak og hvilke faktorer som påvirker klimaet i luftespalter. Videre beskrives også hvilke konsekvenser ugunstige klimaforhold i luftespalter kan føre til, som mugg- og råtevekst, samt et utvalg av hvordan litteraturen beregner risikoen for slik organisk vekst. For å supplere dette er en seksjon om det norske klimaet presentert i seksjon 2.1 og beregning av kondenspotensialet presentert i seksjon 2.2.

Seksjon 3 Metode

Beskrivelsen av metoden benyttet i litteraturstudien er i sin helhet beskrevet i artikkelen Ingebretsen, Andenæs og Kvande, 2022 i vedlegg D. Øvrige metoder benyttet i dette prosjektet er i sin helhet beskrevet i seksjon 3. Det inkluderer hvilke metoder som er benyttet for å undersøke faktiske temperatur- og fuktforhold i tre case-bygninger, samt metodene for å analysere hvilken risiko disse case-byggene har for muggvekst i luftespaltene. I artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* i vedlegg E er deler av metoden som er presentert i seksjon 3 kortfattet oppsummert der dette er relevant for artikkelens innhold.

Seksjon 4 Resultater

Resultatene fra litteraturstudien er i sin helhet presentert i artikkelen Ingebretsen, Andenæs og Kvande, 2022 i vedlegg D. Øvrige resultater utarbeidet i dette prosjektet er i sin helhet beskrevet i seksjon 4. I artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* i vedlegg E er deler av resultatene som er presentert i seksjon 4 kortfattet oppsummert der dette er relevant for artikkelens innhold.

Seksjon 5 Diskusjon

Resultatene som presenteres i artiklene vil også bli diskutert i sin helhet i artiklene. I seksjon 5 vil resultatene som ikke presenteres i artiklene bli diskutert.

Seksjon 6 Konklusjon

I seksjon 6 presenteres en sammenfatning av konklusjonene fra artiklene. I tillegg konkluderes

delene av oppgaven som ikke er inkludert i artiklene. Forskningsspørsmålene blir besvart i denne seksjonen.

Seksjon 7 Videre arbeid

I seksjon 7 presenteres forslag til arbeid som bygger videre på denne masteroppgaven for å ytterligere øke kunnskapen om mikroklimaet i luftespalter i luftede fasader og skråtak.

2 Teoretisk rammeverk

I artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* i vedlegg E er hoveddelen av det teoretiske rammeverk beskrevet. Dette inkluderer formålet med og oppbyggingen av luftespalter i fasader og tak og hvilke faktorer som påvirker klimaet i luftespalten. Videre beskrives også hvilke konsekvenser ugunstige klimaforhold i luftespalten kan føre til, som mugg- og råtevekst, samt et utvalg av hvordan litteraturen beregner risikoen for slik organisk vekst. For å supplere det teoretiske rammeverket i *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* er relevant informasjon om uteklimaet i Norge omtalt i seksjon 2.1 og kondenspotensialet presentert i seksjon 2.2.

2.1 Uteklima og klimapåkjenning

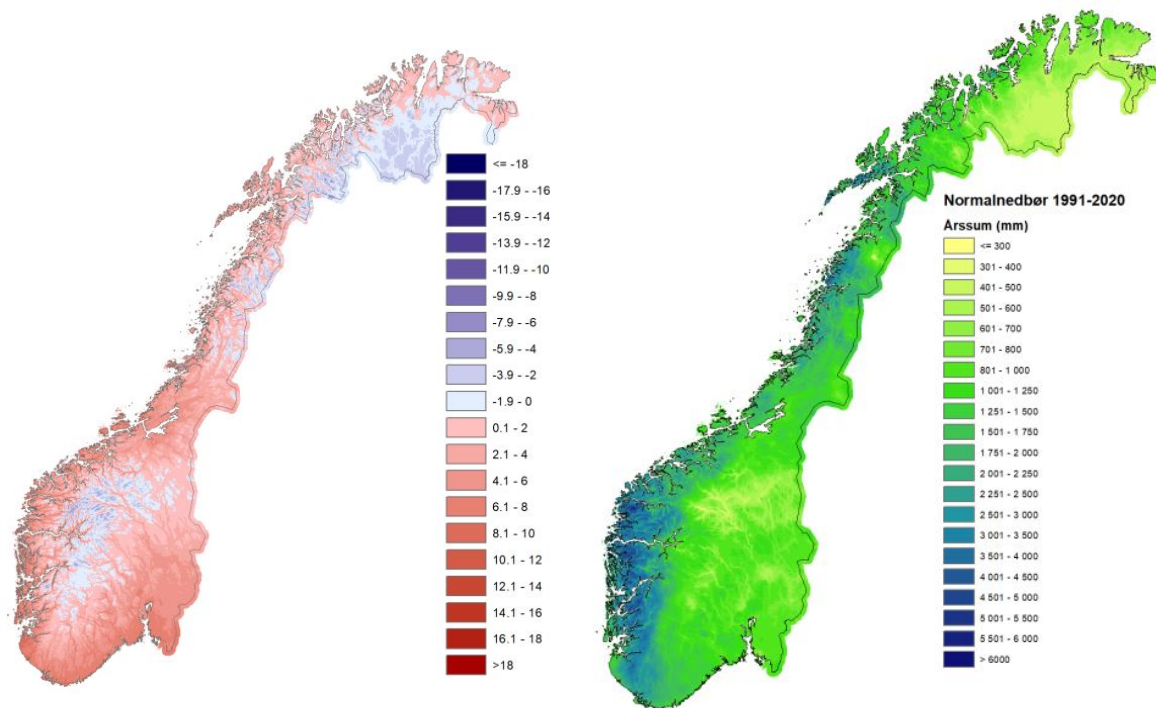
Klimaet i Norge preges av et ekstremt variert klima, der landets topografi medfører store lokale forskjeller og ekstreme årstidsvariasjoner (Gullbrekken, Kvande og Time, 2015). Dette er blant annet kategorisert i ulike klimasoner etter Köppen-Geiger systemet vist i figur 2.1.



Figur 2.1: Klimasoner (Thodesen mfl., 2018).

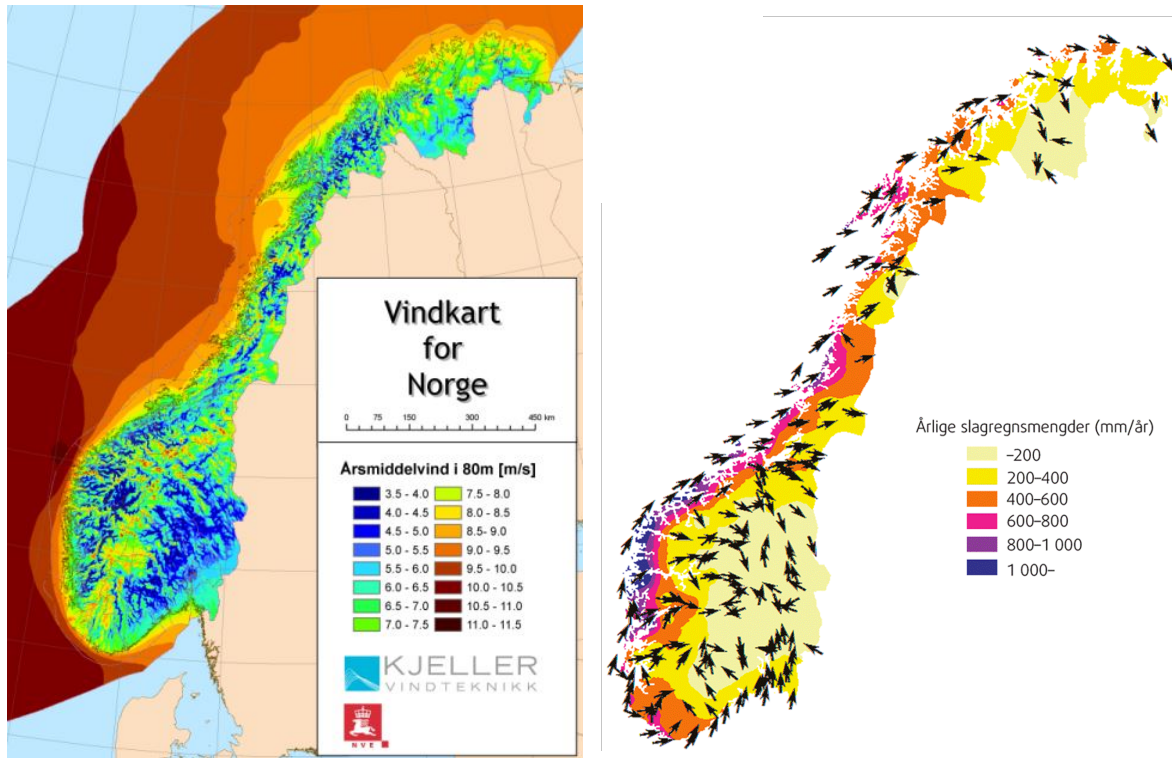
Store endringer i klimaet har allerede skjedd. Fra år 1900 til 2016 har gjennomsnittstemperaturen i Norge økt med $1,1^{\circ}\text{C}$, og nedbørmengden økt med omtrent 20%. Endringshastighet for temperatur og styrtregn er økende utover i perioden. (Miljødirektoratet, 2022) Dersom klimagassutslippene fortsetter å øke frem mot år 2100 etter beregningsmetoden RPC8.5 er det forventet en økning i årsgjennomsnittstemperatur på ca. $4,5^{\circ}\text{C}$, og årsnedbør på ca. 18%. Temperaturen vil øke mest om vinteren, og minst om sommeren. Styrtregneepisodene vil bli kraftigere og hyppigere ved at dager med kraftig nedbør vil doubles og nedbørmengden på dager med kraftig nedbør vil øke med 19%. For intens nedbør med kortere varighet enn ett døgn kan økningen i nedbørmengde antagelig bli 30% for 3-times nedbør med 5 års gjentakintervall. For vind er det kun forventet små endringer. (Hanssen-Bauer mfl., 2015)

For å sikre at samfunnet er godt forberedt for klima- og værpåkjenninger defineres klimareferanseverdier. Referanseverdiene benyttes blant annet til klimaovervåkning, samfunnsplanlegging og estimering av dimensjonerende verdier. Disse verdiene er sammenstilt etter praksis og retningslinjer av Den meteorologiske verdensorganisasjon (WMO) i en klimanormal basert på måledata for perioden 1991-2020. Retninglinjene anbefaler å bruke en 30-årsperiode som referanse slik at datagrunnlaget er stort nok og samtidig unngår påvirkning av kortvarige variasjoner. Fremover vil klimanormalen for en 30-årsperiode oppdateres hvert tiende år. (Tveito, 2021) Årlig gjennomsnittstemperatur og nedbør fra klimanormalen 1991-2020 for Norge er vist i figur 2.2. De høyeste gjennomsnittstemperaturene er målt på Sørvestlandet og langs kysten til grensa mot Sverige via Oslo. Nedbørmengden er størst på hele Vestlandet og på Helgelandskysten. Vindkart over Norge, vist i figur 2.3, viser kraftig årsmiddelvind for store deler av norskekysten. Spesielt på Vestlandet er vindstyrkene høye.



Figur 2.2: Klimanormal 1991-2020: Gjennomsnittlig årlig temperatur (t.v.) og nedbør (t.h.) i Norge (Tveito, 2021).

Når nedbør kombineres med vind, gir dette nedbøren en horisontal, vinddrevet komponent som kalles slagregn. Dette er den mest problematiske og utfordrende klimapåkjenningen for yttervegger (Byggforskserien 540.003, 2013). Hvor mye slagsregn som treffer fasaden avhenger av vindhastighet og -retning, regndråpestørrelse, nedbørsintensitet og -varighet, bygningens størrelse og geometri, fasadens orientering i forhold til vindens dominerende retning og omgivende topografi (Grynning mfl., 2019, N. Bunkholt, Time og Kvande, 2021). Disse faktorene varierer stort over Norge, og følgelig varierer også slagregnpåkjenningen som vist i figur 2.3.



Figur 2.3: Vindkart for Norge (Byrkjedal og Åkervik, 2009) (t.v.). Slagregnskart, der fargeskalaen angir årlige slagregnsmengder, mens pilene viser den hovedretningen som gir mest slagregn (Byggforskserien 451.031, 2013) (t.h.).

2.2 Kondenspotensialet

For enhver lufttemperatur er det en øvre grense for hvor stort innhold av vanndamp det kan være i luften. Denne grensen kalles metningsinnholdet eller metningstrykket, og øker med økt temperatur. Når luft avkjøles til temperaturnivået der metningstrykket er likt vanndamptrykket i luften, vil RF være 100%. Denne temperaturen kalles luftens duggpunktstemperatur. (Thue, 2016) Dersom temperaturen i luften er lavere enn duggpunkttemperaturen vil kondens forekomme (Gullbrekken, Kvande og Time, 2015). Slik fuktavgivelse vil fukte opp materialene og kan bidra til fuktproblematikk som igjen øker muggvekstrisikoen. Dette gjelder spesielt dersom fuktavgivelsen varer over lengre tid.

Dersom det er klar og skyfri nattehimmel kan himmelhvelvingens strålingstemperatur bli svært lav. Dette kan føre til at den langbølgete strålingsbalansen resulterer i en netto av-

kjølingseffekt. Dersom det i tillegg er vindstille kan utstrålingen fra utvendige overflater føre til at overflatetemperaturen synker under både lufttemperaturen og duggpunktstemperaturen. Dette vil resultere i kondens eller rim på overflaten. (Thue, 2016, Uvsløkk, 2008)

Potensialet for kondens i luften, CP_i , avgjøres av luftfuktigheten og temperaturen. Ligningene for metningstrykk, p_{sat} , [Pa] er vist i ligning 2.1, der T er temperaturen [°C] (Geving og Thue, 2002, Hens, 2012). Ligningen for partialtrykket, p_v , [Pa] er vist i ligning 2.2 der v er vanndampkonsentrasjonen [kg/m³] og T er temperaturen [K] (Thue, 2016). Vanndampkonsentrasjonen omtales også som absolutt luftfuktighet (AH), vanndampdensitet og vanndampinnhold. En annen, forenklet ligning for partialtrykket, p_v , [Pa] er vist i ligning 2.3 (Thue, 2016). Ligningen for kondenspotensialet, CP_i , [Pa] er gitt ved ligning 2.4.

$$p_{sat} = \begin{cases} 611 * \exp(82,9 * 10^{-3}T - 288,1 * 10^{-6}T^2 + 4,403 * 10^{-6}T^3) & , -30^{\circ}\text{C} < T \leq 0^{\circ}\text{C} \\ 611 * \exp(72,5 * 10^{-3}T - 288,1 * 10^{-6}T^2 + 0,79 * 10^{-6}T^3) & , 0^{\circ}\text{C} < T \leq 40^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$p_v = 461,4 * T * v \quad (2.2)$$

$$p_v = p_{sat} * \%RF_{luftespalte} \quad (2.3)$$

$$CP_i = p_v - p_{sat} \quad (2.4)$$

3 Metode

For å undersøke hvordan klimaforholdet i luftespalter omtales i litteraturen er det utført et litteraturstudie. Som det forklares i seksjon 3.1 er metoden for litteraturstudien redegjort i sin helhet i artikkelen Ingebretsen, Andenæs og Kvande, 2022 i vedlegg D. For å undersøke hvilket klima luftespalter i fasader og tak holder, er det analysert datamålinger fra fukt- og temperaturmålere instrumentert i luftespalter i tre bygninger i Norge. Målingene er også sett opp mot lokalt uteklima. Redegjørelse av metoden benyttet for å analysere målingene er beskrevet i seksjon 3.2 - 3.6. Utførelsen av fuktregninger i WUFI Pro og undersøkelsen av hvor godt simuleringene av klimaforhold i luftespalter samsvarer med faktiske klimaforhold er beskrevet i seksjon 3.7. Som det omtales i det teoretiske rammeverket i artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* er det svært mange måter å beregne risikoen for organisk vekst som konsekvens av klimaforhold i luftespalter. Siden det ikke er en enighet om hvilken metode som gir mest korrekt antagelse av den potensielle organiske veksten er det i denne oppgaven valgt å undersøke muggvekstrisikoen med flere metoder. Videre er kondenspotensielt beregnet ved bruk av flere metoder, da oppfukning av materialer fra kondensutfelling kan føre til muggvekst. På denne måten analyseres konsekvensene av klimaet i luftespalter på en bredere måte for å øke treffsikkerheten. Redegjørelse av de ulike metodene som analyserer konsekvensene av det målte klimaet er beskrevet i seksjon 3.8 - 3.12. Deler av metoden beskrevet i seksjon 3.2 - 3.12 er kortfattet oppsummert i artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* der dette er relevant for å beskrive hvordan resultatene presentert i artikkelen er fremskaffet.

3.1 Litteraturstudie

For å besvare forskningsspørsmål 1, *Hvordan omtaler forskningslitteraturen mikroklimaet i luftespalter?*, er det gjennomført et litteraturstudie. Metoden er av typen "Scoping study" som baserer seg på rammeverket til Arksey og O'Malley (2005). Søket er gjort i databasene Scopus, ScienceDirect, Google Scholar og Web of Science. Metoden er beskrevet nærmere i artikkelen *Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates* (Ingebretsen, Andenæs og Kvande, 2022) i vedlegg D.

3.2 Case-byggene

I dette prosjektet er det analysert klimadata fra luftespalter i tre bygninger i Norge. De tre case-byggene, Fjogstad-Hus, Norgeshus og ZEB-laboratoriet, er presentert i denne seksjonen.

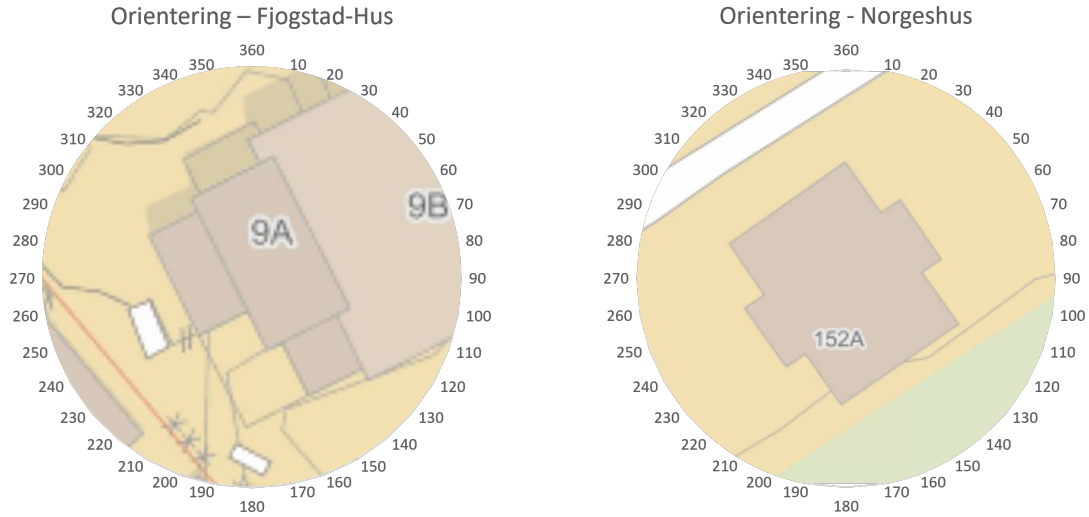
3.2.1 Fjogstad-Hus

Boligbyggerfirmaet Fjogstad-Hus har oppført en enebolig i Midtåkerveien 9A, 4046 Hafrsfjord i Stavanger. Kart med byggets lokasjon er vist i figur 3.1, og orientering i figur 3.2. Som figurene i seksjon 2.1 viser er dette en lokasjon som er utsatt for utfordrende klimatiske forhold, med en kombinasjon av milde temperaturer, mye nedbør og vind. Huset er tegnet fra bunnen i samarbeid mellom eier, Fjogstad-Hus og deres arkitekt, og ble ferdigstilt i 2012. Bygget er utført på en håndverksmessig god måte, og det er ikke å forvente at byggskader skal forekomme. Fasaden består av liggende kledning i 19x148/73 dobbelfalset gran, grunnet med to strøk hvitmaling. Kledningen er festet på stående 23 mm tykke trelekter av uimpregnert gran. Dette danner en luftespalte på 23 mm i den luftede kledningen. Belistning og vannbord er av impregnert furu. Vindsperresjiktet dannes av 12 mm vindsperreplate av asfalt med utenpåliggende rullprodukt fra Isola. (Gullbrekken, Time mfl., 2021) Bygget omtales videre i oppgaven som Fjogstad-Hus.

I bruksfasen ble råteskader observert på trelektene bak kledningen på fasaden mot sør-øst. I 2020 ble dermed kledning og trelekter i denne fasaden skiftet ut med impregnert furu. Det er ikke observert tilsvarende råteskader på resterende fasader, slik at disse beholder eksisterende lekter og kledningsbord. I forbindelse med utskiftningen av kledning og trelekter ble sensorer installert i luftespaltene i fasadene mot sør-øst og sør-vest, som er vurdert som de mest slagregnutsatte fasadene (Gullbrekken, Time mfl., 2021). Det ble observert at lufting av kledningen er godt ivaretatt, og at kledningens bakside fremstår tørr og frisk. Det er også notert at skadene avtar oppover i fasadens høyderetning. Det er heller ikke påpekt mangler med vedlikehold av klimaskallet. Bilder av fasadene er vist i figur 3.3.



Figur 3.1: Lokasjonene til Fjogstad-Hus og Norgeshus. Kartutsnitt fra maps.google.no.



Figur 3.2: Orientering av Fjogstad-Hus (t.v.) og Norgeshus (t.h.). Kartutsnitt fra kart.finn.no.



Figur 3.3: Fasaden til Fjogstad-Hus mot sør-øst (t.v.) og sør-vest (t.h.) (Gullbrekken, Time mfl., 2021).

3.2.2 Norgeshus

Boligbyggerfirmaet Norgeshus, avdeling Varhaug, oppførte i 2021 en større enebolig i Åsevegen 152A, 4343 Orre på Jæren. Byggets lokasjon er vist i figur 3.1. Orienteringen er 45° fra himmelretningene som vist i figur 3.2. Som figurene i seksjon 2.1 viser er dette en lokasjon som er utsatt for utfordrende klimatiske forhold, med en kombinasjon av milde temperaturer, mye nedbør og vind. Eneboligen er av typen "Odel", en av Norgeshus sine egne modeller. Fasadekledningen er av 19×148 mm stående kledningsbord lagt med dobbel fals 60° som er impregnert og grunnet før montering. Vannbordene over vinduene er også av impregnert trevirke. Lektene og sløyfene er av ubehandlet gran lagt i kryss for å danne en luftesplate på totalt 59 mm. Vindsperren er av asfaltplate. Huset har et takutstikk på 43 cm fra lekten til enden av sperren. Bygget er utført på en håndtverksmessig god måte, og det er ikke å forvente at byggskader skal forekomme. Bygget omtales videre i oppgaven som Norgeshus. Bilder av fasadene er vist i figur 3.4.

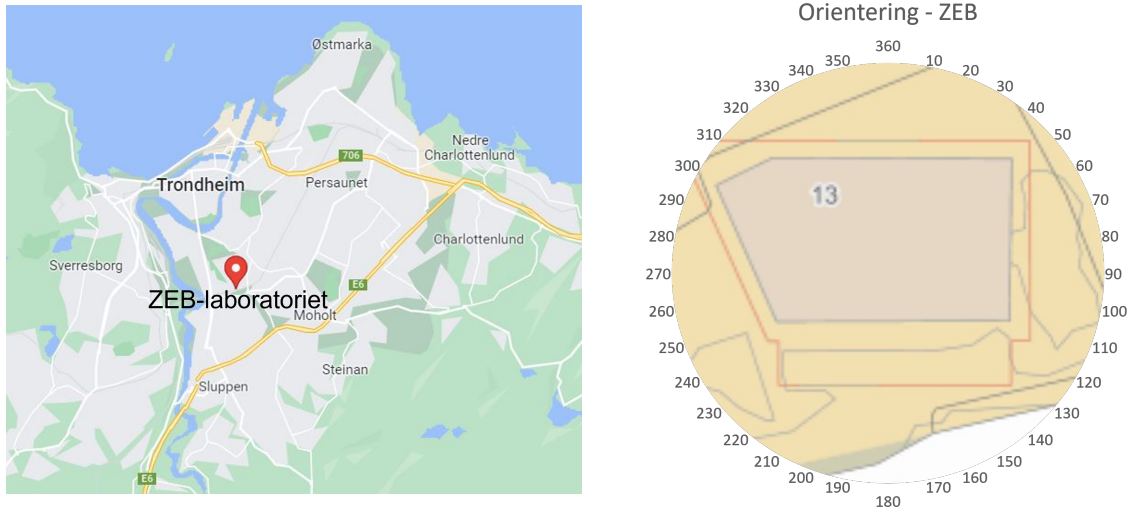


Figur 3.4: Fasaden til Norgeshus mot sør-vest (t.v.) og nord-vest (t.h.) (Gullbrekken, Kvande og Time, 2021).

3.2.3 ZEB-laboratoriet

ZEB-laboratoriet er et 4. etasjers høyt nullutslippsbygg (ZEB - Zero Emission Building) i Høgskoleringen 13, 7034 Trondheim. Se figur 3.5 for lokasjon og orientering og figur 3.6 for illustrasjonbilder. Som figurene i seksjon 2.1 viser, er ikke dette en lokasjon som er særlig utsatt for utfordrende klimatiske forhold. Bygget på totalt ca. 2000 m² ble ferdigstilt våren 2020, og driftes av NTNU og SINTEF. I tillegg til å være et kontorbygg, fungerer bygget som et laboratorium hvor innovative løsninger og materialer utvikles, undersøkes og testes i bruksfase (SINTEF, 2022). Siden dette bygget fungerer som et laboratorium er det godt overvåket, og det fungerer dermed som et referansebygg i dette prosjektet.

Bygget er delvis kledd med bygningsintegrerte solcellepanel (BIPV) og delvis med brent malmfurukledning. BIPV-kledningen har åpne fuger, og dekker hele sør-fasaden og pulttaket, størsteparten av øst- og vest-fasaden og en stripe øverst på nord-fasaden. Luftespaltene dannes ved krysslekting av lekter og sløyfer av ubehandlet gran med en tykkelse på totalt 111 mm i fasadene og 126 mm i taket. Vindsperran er av SIGA Majvest 700 med s_d -verdi på 0,01 m. Deler av konstruksjonsoppbygningen er vist på detaljtegninger i vedlegg B. Bygget er utført på en håndtverksmessig god måte, og det er ikke å forvente at byggskader skal forekomme.



Figur 3.5: ZEB-laboratoriets lokasjon (t.v.) og orientering (t.h.). Kartutsnitt fra maps-google.no og kart.finn.no.



Figur 3.6: ZEB-laboratoriet. Illustrasjon fra LINK Arkitektur.

3.3 Klimadata og værstasjoner

Uteklimatet for case-byggene på Sørvestlandet er målt ved nærliggende meteorologiske klimastasjoner hentet fra Norsk klimaservicesenter (KSS) sine nettsider, seklima.no (Norsk Klimaservicesenter, 2022a). Dette er fordi det ikke er gjort målinger av uteklimatet på stedet. KSS er et samarbeid mellom Meteorologisk institutt, Norges vassdrags- og energidirektorat, NORCE og Bjerknessenteret (Norsk Klimaservicesenter, 2022b). Klimadata for Trondheim er hovedsakelig tilsendt fra SINTEF fra deres egen klimastasjon ved ZEB Test Cell. Datagrunnlaget er supplert med nedbørsmålinger fra seklima.no. For å kompensere for store datamangler for nedbør ved de meteorologiske klimastasjonene i nærheten av ZEB-laboratoriet, er det benyttet datasett fra tre stasjoner og deretter tatt ett gjennomsnitt av verdiene målt hver time.

En oversikt over hvilke målestasjoner som er benyttet i forbindelse med analysen av de ulike byggene er vist i tabell 3.1. Avstandene er hentet fra Finn-kart med koordinater fra seklima.no. Høyden over havet for stasjonene er hentet fra fra seklima.no og for husene fra kart.finn.no. For høydeforskjellen mellom klimastasjonene og byggene tilsvarer positive verdier at klimastasjonene er høyere over havet enn byggene. Avstanden fra ZEB Test Cell til ZEB-laboratoriet er målt på det korteste. For Fjogstad-Hus og Norgeshus er avstandene til klimastasjonene av en vesentlig størrelse. Det vil dermed være en usikkerhet rundt hvor stor påvirkning de stedlige klimavariasjonene vil medføre.

Tabell 3.1: Målestasjoner.

Målestasjon	Tilknyttet case	Avstand i luftlinje	Høydeforskjell	Kilde
Stavanger - Våland	Fjogstad-Hus	5,23 km	31 m	seklima.no ¹ og Finnkart ²
Obrestad fyr	Norgeshus	5,04 km	12 m	seklima.no ¹ og Finnkart ²
ZEB Test Cell	ZEB	ca. 60 m	0 m	SINTEF
Trondheim - Risvollan	ZEB	1,87 km	48 m	seklima.no ¹ og Finnkart ²
Trondheim - Voll Plu	ZEB	2,32 km	91 m	seklima.no ¹ og Finnkart ²
Trondheim - Voll	ZEB	2,34 km	91 m	seklima.no ¹ og Finnkart ²

¹ *Norsk Klimaservicesenter, 2022c*

² *kart.finn.no*

3.4 Måleutstyr

3.4.1 Fuktsensorer

De tre case-byggene er instrumentert med trådløse fuktsensorer i byggenes luftespalter. Illustrasjonsbilde av en fuktsensor er vist i figur 3.8. Slike fuktsensorer skrues fast til treverk på ulike lokasjoner i byggenes luftespalter, og sender målinger til en mobilt og lokalt plassert basestasjon som videre sender informasjonen til Omnisense sine nettsider. Fra nettsiden er datasettene tilgjengelig for nedlasting og videre analyser. Sensorene måler trefukt ved at de to elektrodene som skrues inn i treverket måler den elektriske motstanden mellom seg. Denne elektriske motstanden i materialet er avhengig av fuktinnholdet, der økt fuktinnhold gir økt elektrisk ledningsevne og dermed redusert elektrisk motstand (N. Bunkholt, Time og Kvande, 2022). Fuktsensorene oppgir verdiene for trefukt kalibrert for måling i amerikansk furu (US Douglas Fir) (N. Bunkholt, Time og Kvande, 2022). I tillegg til å måle trefukten, måler sensorene også temperatur, relativ luftfuktighet (RF), duggpunktstemperatur og absolutt luftfuktighet (AH) i luften i luftespaltene. Fjogstad-Hus og Norgeshus er instrumentert med fuktsensorer av typen Hygrotrac (Gullbrekken, Time mfl., 2021, Gullbrekken, Kvande og Time, 2021) Sensorene instrumentert i ZEB-laboratoriet er av typen Omnisense S-160 (Rønningen, 2020).

3.4.2 Måleusikkerhet

Fuktsensorene måler den trefukten som er mellom elektrodene så langt inn i treverket som elektrodene blir skrudd inn. Den måler med andre ord ikke trefuktigheten over hele treverkets tverrsnitt. Det er også viktig å poengtere at treverk er levende materiale, og naturlige variasjoner forekommer. Det vil også være variasjoner i treverket ut ifra hvor treet er hogget. Produsentene av fuktsensorene oppgir en måleusikkerhet på $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ for temperaturen og $\pm 2\%$ for RF (Elma Instruments AS, 2022). Det er anbefalt å benytte metoden kun for trefukt mellom omtrent 7-30 vektprosent, siden trefuktnivåer over fibermetningspunktet gir lav nøyaktighet (N. Bunkholt, Time og Kvande, 2022). Likevel er det erfart at usikkerheten øker ved trefuktinnhold på over omtrent 25 vektprosent. Det er derfor i denne oppgaven valgt å benytte intervallet ”over 25 vektprosent” for fuktnivåer over 25 vektprosent i og med at dette uansett er å anse som høyt fuktinnhold.



Figur 3.8: Illustrasjon av fuktsensor (Elma Instruments AS, 2022).

3.4.3 Termoelementer

I tillegg til fuktsensorene er det i ZEB-laboratoriet også montert termoelementer som måler overflatetemperaturene til overflatene som vender mot luftespaltene samt temperaturen til luften i luftespaltene. Disse termoelementene er montert og driftes av SINTEF. Måledata fra termoelementene er nedlastet og tilsendt fra SINTEF til bruk i denne oppgaven.

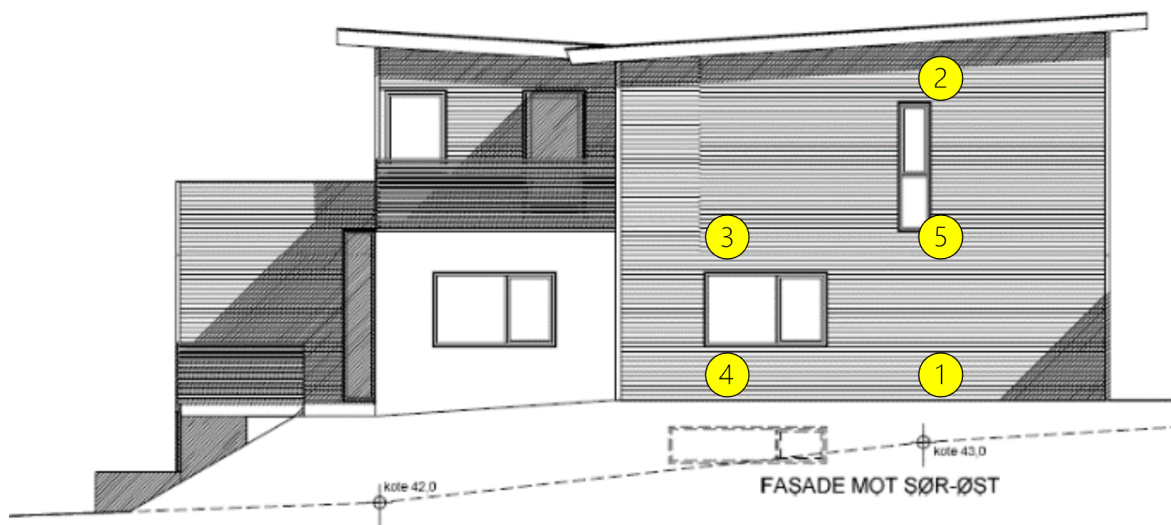
3.5 Instrumentering

3.5.1 Instrumentering av Fjogstad-Hus

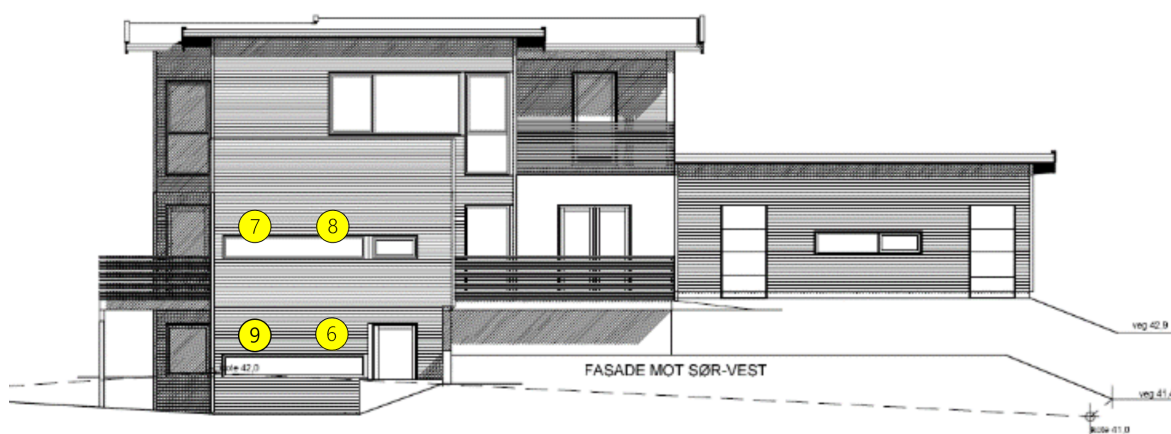
Totalt ni fuktsensorer ble 11.05.2021 montert i luftespalte i fasadene mot sør-øst og sør-vest i Fjogstad-Hus (Gullbrekken, Time mfl., 2021). Informasjon om sensorene og plasseringene i luftespaltene er beskrevet i tabell 3.2, og illustrert i figur 3.9 og figur 3.10. Alle sensorene er montert på skråskjærte klosser av ubehandlet gran som igjen er festet til lektene i luftespaltene. Dette er gjort fordi det er sikrere kalibreringsdata for fuktmålinger i gran enn for impregnert furu som byggets egne lekter består av (Gullbrekken, Time mfl., 2021). Figur 3.11 viser bilde tatt under instrumenteringen. Området med vindsperreplate- og duk rett bak sensorene er fjernet, og vindsperreteip av typen Tyvek er teipet i overgangen mellom den utskjærte vindsperren og sensoren for å opprettholde tettheten i fasaden. Sensorenes navn indikerer om sensoren er montert på fasaden mot sør-øst (*SØ*) eller sør-vest (*SV*). Måledata fra instrumenteringen av Fjogstad-Hus benyttet i denne oppgaven er i timesoppløsning over ett helt år, f.o.m 12.05.2021 kl. 00.00 t.o.m 11.05.2022 kl. 23.59.

Tabell 3.2: Sensorer instrumentert i Fjogstad-Hus (Gullbrekken, Time mfl., 2021).

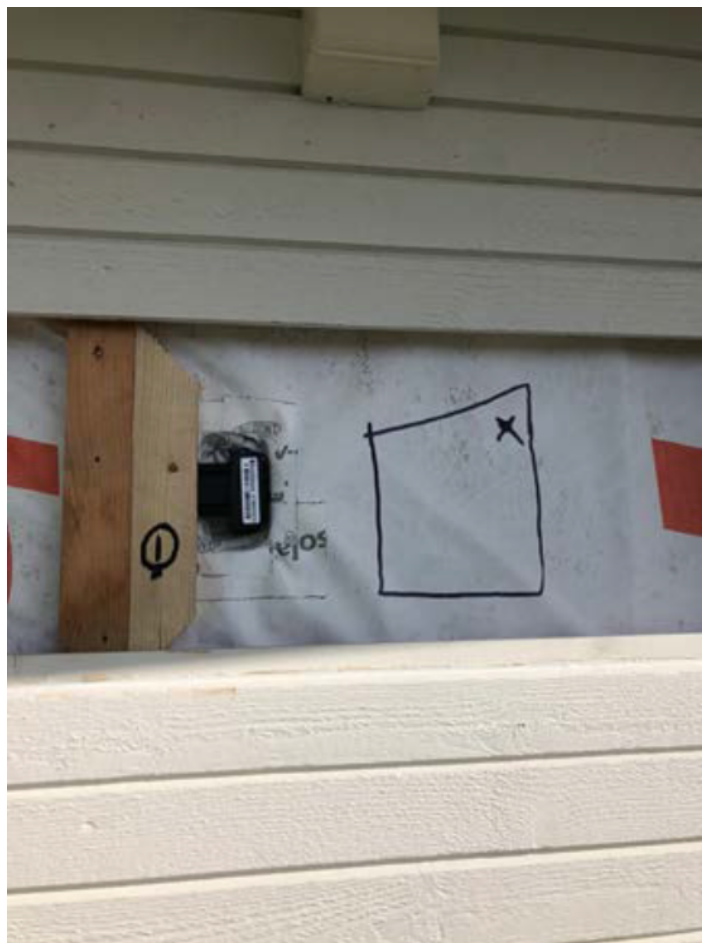
Nr.	Sensor-ID	Navn	Fasade	Plassering
1	28DC002F	SØ-1		560 mm fra hjørne mot øst, 430 mm over underkant nedre kledningsbord.
2	28DC0218	SØ-2	Sør-øst	Øverst, 600 mm fra raft, 540 mm fra hjørne mot øst, 460 mm fra takutstikk.
3	28DC037B	SØ-3		Over vindu, 170 mm fra vannbord, 2820 mm fra hjørne mot øst.
4	28DC038C	SØ-4		Under vindu, omtrent 300 mm fra vannbord, 2250 mm fra hjørne mot øst, 420 mm over underkant nedre kledning.
5	28DC016E	SØ-5		560 mm fra hjørne mot øst, 2950 mm over underkant nedre kledningsbord.
6	28DC00AC	SV-1		Over nedre vindu, omtrent 300 mm over vannbord. Fakkert er stengt oppe og nede av vindu.
7	28DC0277	SV-2	Sør-vest	Over midtre vindu, 230 mm over vannbord, 310 mm fra hjørne mot vest. Fakkert delvis stengt av vindu.
8	28DC035A	SV-3		Over midtre vindu, 250 mm over vannbord, 1720 mm fra hjørne mot vest.
9	28DC02C5	SV-4		Over nedre vindu, 250 mm over vannbord, 320 mm fra hjørne mot vest.



Figur 3.9: Fasade mot sør-øst i Fjogstad-Hus med markeringer av fuktsensorenes plassering. Utarbeidet etter instrumentering av Gullbrekken, Time mfl., 2021 og arbeidstegninger fra Fjogstad-Hus.



Figur 3.10: Fasade mot sør-vest i Fjogstad-Hus med markeringer av fuktsensorenes plassering. Utarbeidet etter instrumentering av Gullbrekken, Time mfl., 2021 og arbeidstegninger fra Fjogstad-Hus.



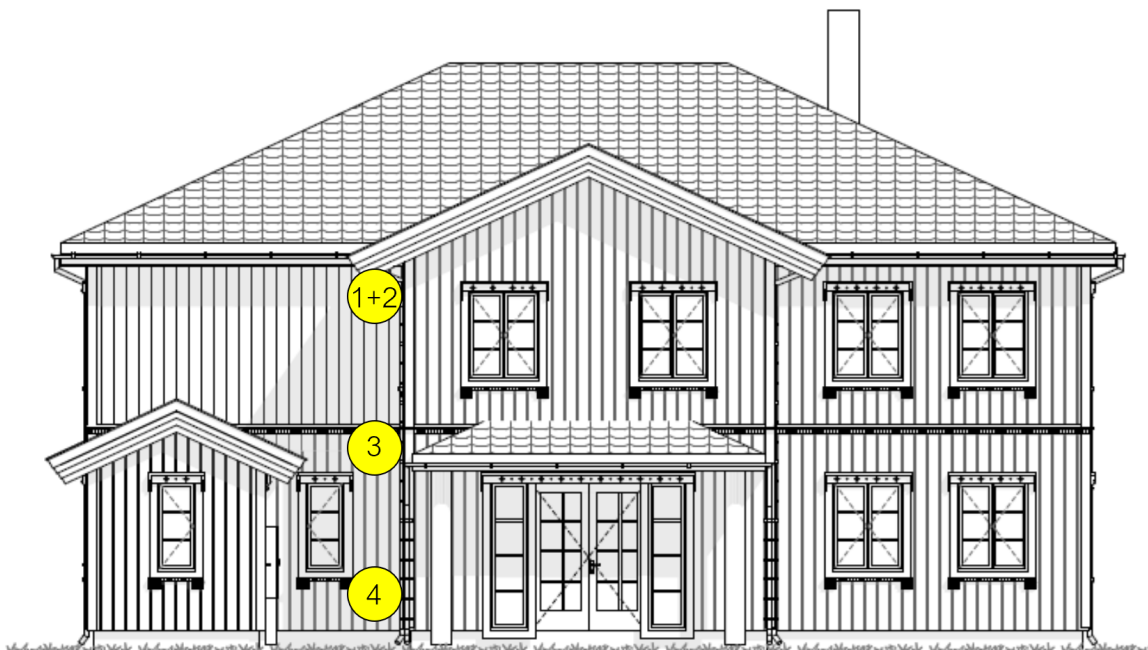
Figur 3.11: Bilde av hvordan sensorene er plassert i luftespalter i fasadene i Fjogstad-Hus (Gullbrekken, Time mfl., 2021).

3.5.2 Instrumentering av Norgeshus

Fire fuktsensorer er montert i ett vertikalt fakk i nord-øst-fasaden og fem fuktsensorer er montert i ett vertikalt fakk i sør-vest-fasaden, som vist i figur 3.12 og figur 3.13. Sensorene er montert i treverket i lektene og sløyfene som vist i figur 3.14. (Gullbrekken, Kvande og Time, 2021) Instrumenteringen av bygget ble gjennomført underveis i oppføringen av bygget, men datasett fra perioden før kledningen ble montert er ikke inkludert i denne oppgaven. En mer detaljert beskrivelse av sensorenes plassering er gitt i tabell 3.3 og illustrert i vedlegg A. Sensorenes navn består av tre bokstaver som beskriver lokasjonen til sensoren. Navnets første bokstav indikerer om sensoren er plassert i fasaden mot nord-øst (*N*) eller mot sør-vest (*S*). Midterste bokstav indikerer om sensoren er montert oppe (*O*), i midten (*M*) eller nede (*N*) i det vertikale fakk. Siste bokstav viser til om sensoren er montert i en vertikal sløyfe (*S*) eller horisontal lekt (*L*). Måledata fra instrumenteringen av Norgeshus benyttet i denne oppgaven er i timesoppløsning over ett helt år, f.o.m 17.02.2021 kl. 00.00 t.o.m 16.02.2022 kl. 29.59.

Tabell 3.3: Sensorer instrumentert i Norgeshus (Gullbrekken, Kvande og Time, 2021).

Nr.	Sensor-ID	Navn	Fasade	Plassering
1	28DC0034	NOS		Sløyfe i toppen av vegg. Måler på 500 mm fra underkant takspærre.
2	28DC03F5	NOL	Nord-øst	Lekt i toppen av vegg. Måler 780 mm fra hjørnet.
3	28DC00AA	NMS		Sløyfe ca. midten av vegghøyden.
4	28DC0389	NNS		Sløyfe i bunn av vegg.
5	28DC03F7	SOS		Sløyfe i toppen av veggen. Måler 4960 mm fra underkant bunnsvill.
6	28DC00B1	SOL	Sør-vest	Lekt i toppen av veggen. Måler 5010 mm fra underkant bunnsvill.
7	28DC02F4	SMS		Sløyfe ca. midten av vegghøyden, 2400 mm fra underkant bunnsvill.
8	28DC02E2	SNS		Sløyfe i bunn av veggen.
9	28DC0128	SNL		Lekt i bunn av veggen. Montert 2400 mm fra hjørnet mot vest. Ca. 500 mm ned til terreng fra underkant svill. Masser var ikke fylt inntil ved måling. 63 mm fra underkant svill.

**Figur 3.12:** Fasade mot nord-øst i Norgeshus med markeringer av fuktsensorenes plassering. Utarbeidet etter instrumentering av Gullbrekken, Kvande og Time, 2021 og arbeidstegninger fra Norgeshus.



Figur 3.13: Fasade mot sør-vest i Norgeshus med markeringer av fuktsensorenes plassering. Utarbeidet etter instrumentering av Gullbrekken, Kvande og Time, 2021 og arbeidstegninger fra Norgeshus.



Figur 3.14: Bilde av hvordan sensorene er plassert i luftespalter i fasadene i Norgeshus (Gullbrekken, Kvande og Time, 2021).

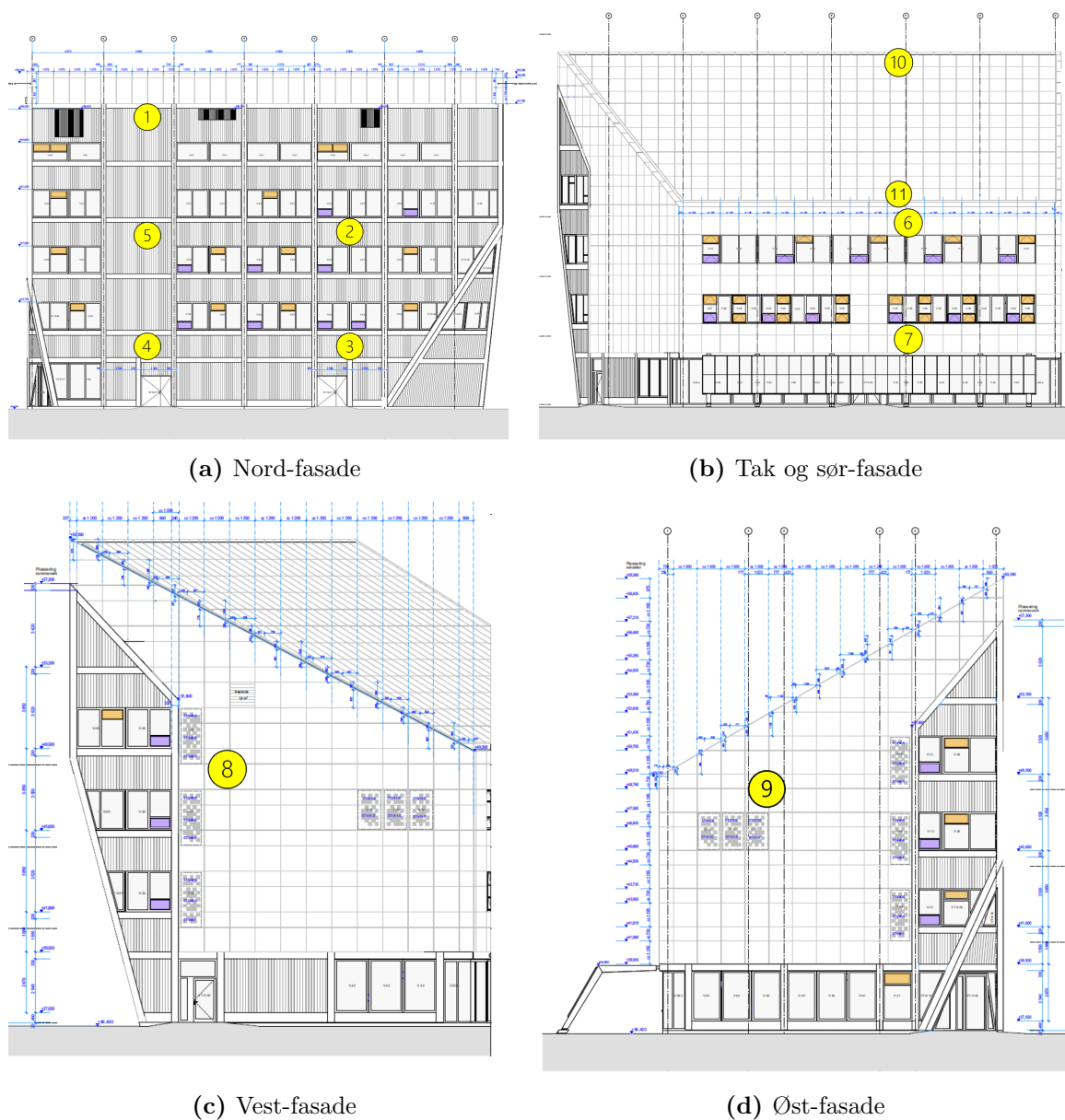
3.5.3 Instrumentering av ZEB-laboratoriet

Instrumentering med fuktsensorer

Instrumentering av ZEB-laboratoriet med fuktsensorer er utført av Erlend Sune Rønningen i forbindelse med sin masteroppgave i 2020 (Rønningen, 2020). 11 trådløse sensorer montert i ZEB-laboratoriets luftespalter har registrert tilstrekkelig mengde måledata. Plasseringene av sensorene i byggets fasader og tak er vist i figur 3.15. Sensorene er montert i lektene nærmest mulig vindspærren i fasadene og nærmest mulig undertaket/asfalttekningen i taket, som vist i figur 3.16. Plasseringene av sensorene skal være valgt ut ifra hvor det antagelig er mest interessante funn, samt jevnt fordelt på bygget (Rønningen, 2020). En mer detaljert beskrivelse av sensorenes plassering er gitt i tabell 3.4 og illustrert i vedlegg B. Den midterste bokstaven i sensorenes navn tilsier om sensoren er plassert i fasaden mot nord (*N*), sør (*S*), øst (*E*), sør-vest (*W*) eller i taket (*R*). Måledata fra instrumenteringen av ZEB-laboratoriet benyttet i denne oppgaven er i timesoppløsning over to fulle år, f.o.m 01.04.2020 kl. 00.00 t.o.m 31.03.2022 kl. 23.59.

Tabell 3.4: Sensorer instrumentert i ZEB-laboratoriet (Rønningen, 2020).

Nr.	Sensor-ID	Navn	Fasade	Plassering
1	26A302F4	MN1		Ca. 300 mm under toppen av veggen, i lekt midt i høyt felt.
2	26A3031D	MN2		Ca. 850 mm under vindusbeslag, i lekt midt i felt.
3	26A301B5	MN3	Nord	Ca. 1250 mm under vindusbeslag, i lekt midt i felt.
4	26A301ED	MN4		Samme høyde som MN3, i lekt midt i høyt felt.
5	26A30402	MN5		Samme høyde som MN2, i lekt midt i høyt felt.
6	26A302FF	MS2	Sør	I lekt ca. 700 mm over vindusbeslag.
7	26A30141	MS3		I lekt ca. 1150 mm over vindusbeslag.
8	26A302D9	MW1	Vest	Ca. 350 mm under vindusbeslag, i lekt ca. 1150 mm sør for endekanten av beslaget.
9	233000C1	ME1	Øst	Ca. 1100 mm over vindusbeslag, i lekt ca. 600 mm sør for endekanten av beslaget.
10	26A301A4	MR2	Tak	I lekt øverst på pulttaket.
11	26A301DA	MR3		I lekt nederst på pulttaket.



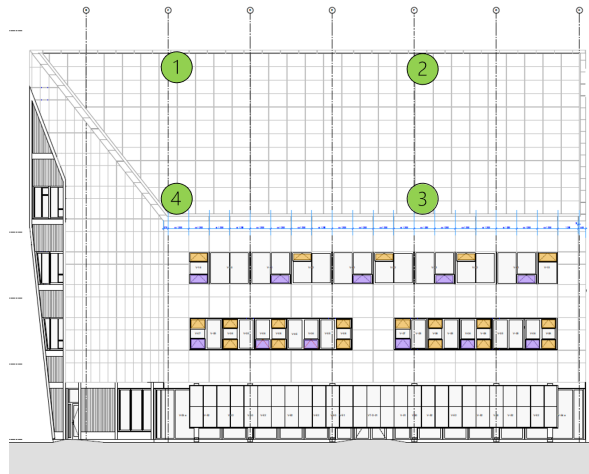
Figur 3.15: Fasader og tak i ZEB-laboratoriet med markeringer av fuktsensorenes plassering. Utarbeidet etter instrumentering av Rønningen, 2020 og arbeidstegninger fra LINK Arkitektur.



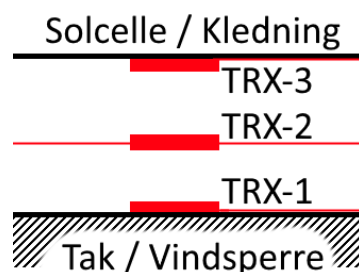
Figur 3.16: Bilde av hvordan sensorene er plassert i luftespalter i fasadene og i taket i ZEB-laboratoriet (Rønningen, 2020).

Instrumentering med termoelementer

I tillegg til fuktsensorer som hoveddelen av denne oppgaven baserer seg på, er det også valgt å undersøke målingene fra termoelementene SINTEF har monter i taket på ZEB-laboratoriet. Som vist i figur 3.17 er termoelementene montert i luftespaltene ved fire ulike steder i taket. For hver av de fire posisjonene er det montert tre termoelementer over luftespaltens tykkelse. Som vist i figur 3.18 er det montert ett termoelement som måler overflatetemperaturen av undertaket/asfalttekningen, ett som måler lufttemperaturen midt i luftespalten og ett som måler overflatetemperaturen på undersiden av kledningen av solcellepanel. For posisjon 4 har det ikke blitt registrert måledata fra termoelementet på undersiden av kledningen av solcellepanel, slik at det for denne posisjonen kun er oversendt målinger fra de to fungerende termoelementer. Som det fremkommer av figur 3.18 er termoelementene navngitt ut ifra hvor på taket elementene er plassert, der "X"-en i navnet byttes ut med numrene 1-4 ut ifra lokasjonen vist i figur 3.17. Nummeret bak bindestreken i navnet indikerer hvor i luftespaltens tykkelse elementet er montert, markert med tallene 1-3 som vist i figur 3.18. Måledata fra termoelementene benyttet i denne oppgaven er i timesoppløsning over ett år f.o.m. 01.09.2020 kl. 00.00 t.o.m. 31.08.2021 kl. 23.59.



Figur 3.17: Posisjonering av termoelementer i luftespalter i taket på ZEB-laboratoriet. Utarbeidet etter informasjon om posisjoneringene fra Johannes Brozovsky i SINTEF og arbeidstegninger fra LINK Arkitektur.



Figur 3.18: Posisjonering av termoelementer i luftespaltens tykkelse. Illustrasjon mottatt fra Johannes Brozovsky i SINTEF.

3.6 Analyse av data

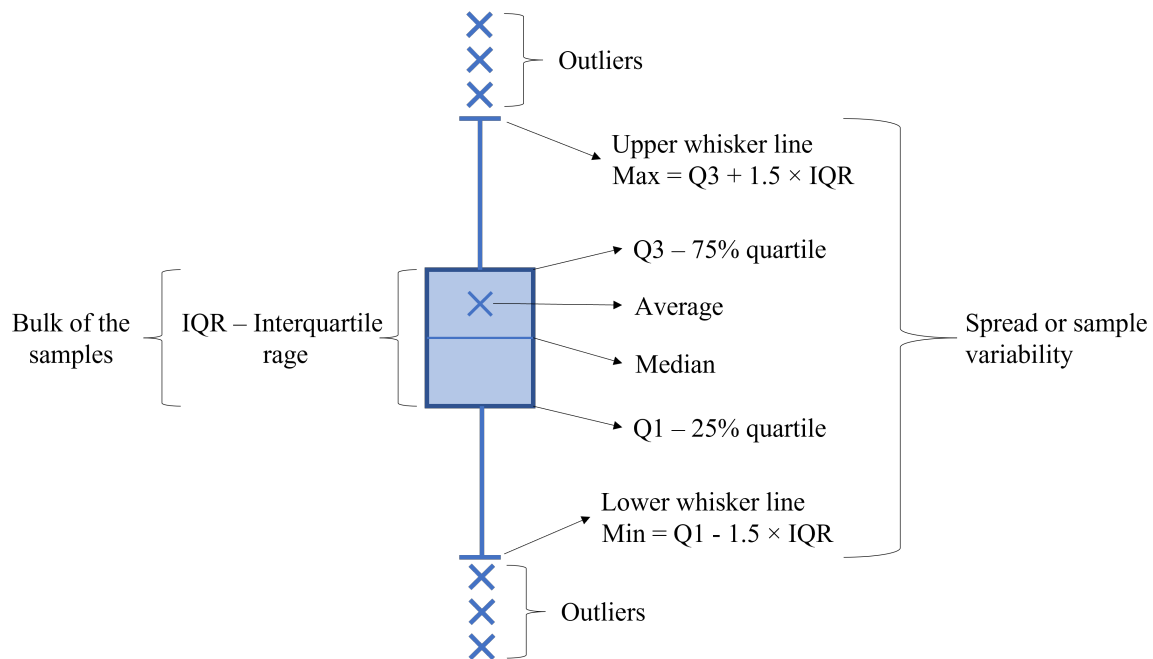
3.6.1 Korrigeringskurver av målt trefukt

For å ta hensyn til ulikheter i fuktnivå i ulike tresorter må målingene av trefukt målt med fuktsensorer korrigeres med korrigeringskurver tilpasset tresorten. Slike kurver baserer seg på sammenligning mellom fuktmålinger utført med fuktsensorer og faktiske fuktinnhold bestemt ved gravimetrisk måling (N. Bunkholt, Time og Kvande, 2022). Korrigeringskurver for omgjøring av sensormålinger målt med fuktsensorer til norsk gran er vist i ligning 3.1 (N. Bunkholt, Time og Kvande, 2022, Østrøm, 2019).

$$\%MC_{Gran} = 11,384 - 0,8737 \cdot \%MC_{m\ddot{a}lt} + 0,1226 \cdot \%MC_{m\ddot{a}lt}^2 - 0,0023 \cdot \%MC_{m\ddot{a}lt}^3 \quad (3.1)$$

3.6.2 Box-diagram

For å presentere store datamengder er det valgt å benytte blant annet *box-diagram*. Dette er et diagram som viser mange statistikkparametere. En klargjøring av hvilken informasjon de ulike delene av et box-diagram gir er vist i figur 3.19.



Figur 3.19: Box-diagram. Utarbeidet med informasjon fra Vignesh mfl., 2017 og Ulrich mfl., 2007.

3.7 Fuktberegninger i WUFI Pro

Simuleringsprogrammet WUFI Pro er benyttet til å gjennomføre fuktsimuleringer av en veggkonstruksjon med luftet kledning. I simuleringene er det benyttet både egenkomponert klimafil og en av WUFI Pro sine innebygde klimafil. Simulert luftespalteklime er sammenlignet med sensormålte klimadata, samt at resultatene fra ulike klimafil er sammenlignet med hverandre. Formålet er å se hvorvidt simulerte- og målte luftespalteklime korrelerer i tilstrekkelig grad. Dette er gjort for å undersøke hvorvidt WUFI Pro kan benyttes til å simulere hvilke temperatur- og fuktforhold som kan forventes i luftespalter bak fasadekledning og taktekning. Dersom dette samsvarer vil det være mulig å benytte uteklime i form av egne klimafil fra ny klimanormal, lokale klimafil og fremtidsgenererte klimafil til fuktberegninger. Resultatene kan videre benyttes til å blant annet vurdere konstruksjonens risiko for organisk vekst.

3.7.1 Beregningsprogrammet WUFI PRO, versjon 6.5

WUFI Pro er et anerkjent standard program som benyttes til å simulere fukt- og varmetransport i bygningers klimaskall. Dette danner grunnlaget for evaluering av komponentenes fukt- og varmekonforhold. Programmet utfører én-dimensjonale hygrotermiske beregninger av tverrsnitt av bygningskomponenter. Ut ifra simuleringssituasjon inkluderes faktorer som innebygd fukt, slagregn, solinnstråling, langbølget stråling, kapillærtransport og sommerkondens. Dette gjør at WUFI oppfyller kravene i *NS-EN 15026:2007 Bygningskomponenters og bygningsdeleres hygrotermiske egenskaper - Bedømmelse av fukttransport ved numerisk simulering*. (Fraunhofer Institute for Building Physics, 2021) En vesentlig begrensning ved programmet er at beregningene utføres i én dimensjon, og simuleringene blir derfor en forenkling av virkeligheten. Dette innebærer blant annet å forenkle sjikt bestående av flere materialer, som for eksempel isolert bindingsverk, til å kun bestå av ett materiale i konstruksjonsoppbyggingen i WUFI. Selv om WUFI har flere egenskaper enn programmer som HAMT og EMPD, er det likevel parametere som ikke inkluderes. Dette er eksempelvis temperaturavhengig fuktlagringskapasitet, gravitasjonsdrevet vanntransport, luftlekkasjer gjennom materialer og stillestående vann på overflaten. (Pallin mfl., 2017)

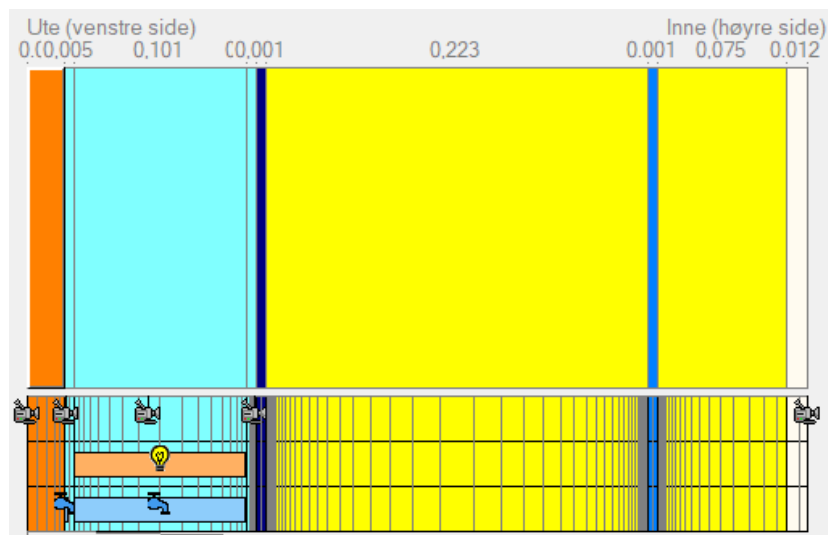
3.7.2 Oppbygging av modellen som simuleres

Oppbyggingen av konstruksjonen for ZEB-laboratoriet er vist i figur 3.20. Materialene valgt for de ulike sjiktene er vist i tabell 3.5. Øvrig informasjon om materialene er vist i vedlegg C. Som omtalt i seksjon 3.7.1 kan et sjikt kun bestå av ett materiale. Dermed er isolert bindingsverk lagt inn som mineralull, da andelen mineralull er vesentlig større enn treandelen. Monitører er lagt inn der det er ønskelig at programmet skal gjengi resultatene, og som det fremkommer i figur 3.20 er monitørene lagt inn ytterst, innerst og i midten av luftespalten. For å at programmet skal kunne håndtere fritt vann og en mest mulig korrekt fuktlagrings-

kapasitet for luft, er luftespalten delt opp i tre sjikt. Midtsjiktet opptar størsteparten av luftespaltens bredde og er lagt inn uten fuktlagringskapasitet, omsluttet av to smalere luftsjikt med ekstra fuktlagringskapasitet. (Mundt Petersen, 2015) Hvordan luftespalten er delt opp er vist i vedlegg C. Siden programmet behandler luftsjiktene som lukkede og uventilerte, er det i det midterste luftsjiktet lagt inn en hygrotermisk kilde for konstant ventilasjon på 20 h^{-1} (luftvekslinger per time) som blandes med uteluften. I overgangen mellom ytterkledningen og det ytterste luftsjiktet er det lagt inn en fuktkilde som skal representere slagregnpåkjenningen. Dette er satt til 1% av slagregnet med begrensning til fri vannmetning. Videre antas det tett dampsperre, og dermed ingen luftlekkasjer fra varm til kald side. Startnivå i konstruksjonen satt til RF på 80% og temperatur på 20°C . Selv om det trolig er lavere fuktighet i konstruksjonen er det valgt konservative verdier. Fuktnivået avhenger blant annet av isolasjonstykkelse og årstid. Øvrige innstillinger benyttet for simuleringene er vist i vedlegg C.

Tabell 3.5: Materialer benyttet i oppbyggingen av konstruksjonen i WUFI Pro (ytterst til innerst).

Sjikt	Materiale
Utvendig kledning	Skandinavisk gran ll vinkelrett fibre
Luftespalte	Luft
Vindsperre	Filtduk av polypropylen på polyetylenfilm - vindsperre/undertak
Isolasjon	Mineralull
Dampsperre	PE-folie
Isolasjon	Mineralull
Innvendig kledning	Gipsplate



Figur 3.20: Oppbygging av konstruksjon for ZEB-laboratoriet brukt i WUFI.

3.7.3 Uteklima

For å gjennomføre fuktberegningene basert på stedlig klima, er det utarbeidet egen klimafil ut ifra klimadata oversendt fra SINTEF sin klimastasjon ved ZEB Test Cell. Informasjon om målestasjonen er presentert i tabell 3.1. For at WUFI Pro skal akseptere klimafilene kan det ikke være hull i datasettet. Mangler på målinger er dermed komplettert manuelt med lineær interpolering av siste måling før og første måling etter datahullet. Dette gir en usikkerhet i simuleringene.

Klimastasjonen ved ZEB Test Cell måler solinnstråling i form av globalstråling, mens WUFI opererer med separate verdier for direkte og diffus solinnstråling. I utarbeidelsen av klimafilene har Johannes Brozovsky i SINTEF splittet måledata for globalstråling til direkte og diffus stråling ut ifra DIRINT-modellen (Yang og Gueymard, 2020). Klimadataene er deretter lagt inn i WUFI sin egen mal som konverterer filer fra Excel til wac med timesintervall. Parametrene er videre markert med parameternavnene ” *Temperature [°C]: Air Temperature*”, ” *Wind Direction [°]: north = 0; clockwise*”, ” *Wind Speed [m/s]: Skalar Average*”, ” *Rain [Ltr/m²h: Normal Rain*”, ” *Radiation [W/m²]: Solar Diffuse Horiz.*” og ” *Radiation [W/m²]: Solar Direct Horiz.*” i konverteringsfilens egne rullgardinmenyer. I tillegg er det gjort en simulering med WUFI Pro sin innebygde klimafil for Trondheim. Dette er gjort for å sammenligne resultatene fra manuelt innlagte klimafilene med programmets egne klimafilene.

3.7.4 Inneklima

For å simulere fukttilskudd til inneluften er det benyttet fukttilskudd fra fuktclasser som funksjon av utetemperaturen. Dette er benyttet fremfor RF i inneluften, da RF ikke er konstant og kan variere med flere faktorer. Det er valgt å *ikke* benytte de innebygde fuktclassene i WUFI Pro som viser kontinuerlig fukttilskudd frem til 0°C før en lineær reduksjon til det igjen blir konstant ved 20°C. Disse innebygde fuktclassene er valgt bort fordi nyere forskning viser at fukttilskuddet er kontinuerlig frem til 5°C og fra 15°C (Geving, Holme og Jenssen, 2008). Egendefinert fukttilskudd er lagt inn basert på typiske fukttilskuddsnivåer (Geving, 2011). Ut ifra tilhørende typiske bygninger for de ulike fukttilskuddklassene er grafen mellom lavt fukttilskudd ment for eksempelvis godt ventilerte boliger med få beboere, kontor og lager og middels fukttilskudd ment for eksempelvis middels ventilerte boliger med middels antall beboere valgt (Geving, 2011). På denne måten blir beregningene passe konservative uten å simuleres med unaturlig høyt fukttilskudd til inneluften. Grafen som er benyttet for fukttilskudd har dermed en verdi på 2,5 g/m³ for temperaturer under 5°C og 0,5 g/m³ for temperaturer over 15°C. Mellom 5°C og 15°C er reduksjonen lineær.

3.7.5 Gjennomføringen

Simuleringene er gjennomført for alle fire orienteringer av ZEB-laboratoriet med klimafilene basert på uteklima fra klimastasjonen ved ZEB Test Cell, samt i to ulike høyder. Dette gir

totalt seks simuleringer for ZEB-laboratoriet med egenkomponert klimafil. For å sammenligne dette med WUFI sin egen klimafil for Trondheim, er det gjennomført to simuleringer med orientering mot nord og mot sør for delen av et høyt bygg som er 10-20 m over bakken. Analysen går ut på å simulere temperatur og RF i luftspalten, og deretter sammenligne korrelasjonen mellom resultatene fra ulike typer klimafil og mellom simulerte klimadata og de sensormålte klimadataene.

Det er valgt å kun gjøre fuktberegninger for ZEB-laboratoriet fordi dette bygget er instrumentert med flest sensorer samt at disse er plassert mer variert både i høyden og for alle fire orienteringer. Klimadata for lokalt uteklima er vesentlig mer presist for ZEB-laboratoriet enn for byggene på Sørvestlandet da klimastasjonen er plassert rett ved siden av bygget samt at det ikke er datamangler for måleperioden. I tillegg er de nærmeste innebygde klimafilene i WUFI Pro for Fjogstad-Hus i Stavanger og Norgeshus på Jæren for Bergen eller Kristiansand. Dette er såpass langt unna at stedlige klimavariasjoner kan spille mye inn, og dermed er det ikke hensiktsmessig å gjennomføre simuleringer med disse klimastedene.

3.8 Muggvekstanalyse i WUFI Mould Index VTT

En av metodene for å analysere hvor stor risiko de sensormålte luftespaltene har for muggvekst, er ved å benytte beregningsprogrammet WUFI Mould Index VTT. Det er gjennomført en muggvekstanalyse der materialparameterene er faste og klimamålingene til de ulike sensorer er variabler. Deretter er det gjennomført det en parameterstudie der materialparameterene er variable. Til denne parameterstudien er klimaet til de to mest kritiske sensorposisjonene for hvert av de tre byggene benyttet.

3.8.1 Beregningsprogrammet WUFI Mould Index VTT, versjon 2.1

WUFI Mould Index VTT, versjon 2.1 er et utvidelsesprogram til WUFI 6, utviklet i samarbeid med det tekniske forskningssenteret i Finland, VTT. Tilleggsprogrammet kan brukes i en kombinasjon med WUFI Pro eller separat. (Fraunhofer Institute for Building Physics, 2018) Programmet baseres på VTT-modellen som er en matematisk empirisk modell utarbeidet etter laboratorieforsøk på muggvekst på nordisk gran og furu (H. Viitanen og Ritschkoff, 1991, H. Viitanen og Bjurman, 1995, H. Viitanen, 1997, Hukka og H.A. Viitanen, 1999). Det er senere videreutviklet til å inkludere flere materialer (H. Viitanen og Ojanen, 2007, Ojanen, H. Viitanen mfl., 2010, Ojanen, Peuhkuri mfl., 2011). Modellen forutser risikoen for muggvekst som en funksjon av overflatematerialet, temperatur, RF og tid. Vurderingen av muggvekstrisikoen gis med en muggindeks. Muggindeksen gjengir sannsynligheten for aktivitet av muggsopp ved en tallverdi fra 0 til 6, der verdien gjenspeiler mengden forventet muggvekst på overflater (H. Viitanen og Ritschkoff, 1991). Tabell 3.6 gir en oversikt over beskrivelsene av de ulike muggvekstverdiene.

Tabell 3.6: Muggindeks (H. Viitanen og Ritschkoff, 1991).

Muggindeks	Beskrivelse
0	Ingen vekst.
1	Noe vekst som kun oppdages i mikroskop (spor).
2	Moderat vekst oppdaget med mikroskop (dekker mer enn 10-25%).
3	Noe vekst oppdaget visuelt (dekker under 10%).
4	Moderat vekst oppdaget visuelt (dekker 10-50%).
5	Rikelig med vekst oppdaget visuelt (dekker over 50%).
6	Veldig kraftig vekst (dekker 100%, veldig tykk vekst).

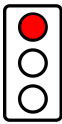
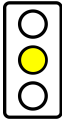
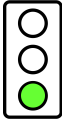
Som det omtales i litteraturstudien til Gradeci mfl., 2017, og vist i artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* i vedlegg E, er det flere muggvekstmodeller som beskriver hvilke klimaforhold som gir fare for muggvekst. Sammenstillingen av disse modellene viser at VTT-modellen ikke er den mest konservative. Det er med andre ord publisert forskning som viser at det er observert mugg-

vekst ved mindre kritiske klimaforhold enn det som omtales som kritiske forhold etter VTT-modellen (Gradeci mfl., 2017). Muggvekstmodeller presenter også risiko ved verste tilfeller, og gir dermed ikke en garanti for at organisk vekst vil forekomme (Gradeci mfl., 2017). Videre ligger det en generell usikkerhet i det faktum at mugg og råte er naturlig, organisk forekomst.

Brukereksponeeringsklasse

Grenseverdiene for hva som er akseptabel muggindeks varierer ut ifra hvor overflaten som analyseres befinner seg, og til hvilken grad brukere av bygget blir eksponert. Tabell 3.7 gjengir trafikklysmodellen som benyttes i WUFI Mould Index VTT for å avgjøre hvorvidt en beregnet muggindeks er akseptabel (grønt lys), behøver ytterligere kriterier eller undersøkelser (gult lys) eller ikke er akseptabel (rødt lys) (H. Viitanen, Ojanen mfl., 2019).

Tabell 3.7: Trafikklysmodell (H. Viitanen, Ojanen mfl., 2019).

Trafikklysfarge	Plassering	Kriterier
	Innvendig overflate	Muggindeks over 2
	Inne i konstruksjonen / utvendig overflate uten direkte kontakt med inneluften	Muggindeks over 3
	ASHRAE 160	Muggindeks over 3
	Innvendig overflate	Muggindeks mellom 1 og 2
	Inne i konstruksjonen / utvendig overflate uten direkte kontakt med inneluften	Muggindeks mellom 2 og 3
	Ingen forventet påvirkning	Muggindeks over 3
ASHRAE 160	Muggindeks mellom 1 og 3	
	Innvendig overflate	Muggindeks opp til 1
	Inne i konstruksjonen / utvendig overflate uten direkte kontakt med inneluften	Muggindeks opp til 2
	Ingen forventet påvirkning	Muggindeks opp til 3
ASHRAE 160	Muggindeks opp til 1	

Materialparametere

Muggvekst er avhengig av hvilket materiale det vokser på, noe som blir tatt hensyn til i beregningsprogrammet ved å definere noen materialparametere (Ojanen, H. Viitanen mfl., 2010). Materialets sensitivitet defineres ut ifra hvor lett angrep av muggvekst kan forekomme. Sensitivitetsklassene og eksempler på hvilke materialer som typisk går under disse klassene er vist i tabell 3.8. For skitne materialoverflater som over lengre perioder er eksponert for ute- eller inneluft er sensitivitetsklassen *Veldig sensitiv* ofte et realistisk valg. Dette fordi muggvekst kan forekomme selv på glassoverflater dersom det er tilgang på tilstrekkelig næring i form av eksempelvis skitt på overflaten. Ved å undersøke muggvekst for overflater som er *Veldig sensitive* dekkes dermed kjerneved av furu og samtidig alle overflater tilskitnet av støv, næring og muggsporer. (H. Viitanen, Ojanen mfl., 2019) I perioder der endringer i temperatur og fuktighet tilsier at vekstforholdene ikke er gunstige for muggvekst kan muggindeksen

reduseres. Tidsfaktoren er i dette tilfellet en vesentlig del av analysen. Reduksjonsfaktoren dekker graden av redusert muggvekst som følge av at vekstforholdene ikke lengre er gunstige. I beregningsprogrammet defineres materialets reduksjonsfaktor, der de alternative klassifiseringene er vist i tabell 3.8 med tilhørende eksempler. (H. Viitanen, Ojanen mfl., 2019) Videre vil definering av overflatetypen som ru fremfor glatt og tresorten løvtre fremfor bartre kunne gi en økt sannsynlighet for muggvekst.

Tabell 3.8: Materialparametere i WUFI Mould Index VTT (H. Viitanen, Krus mfl., 2015, H. Viitanen, Ojanen mfl., 2019).

Parameter	Klasser	Eksempler på materialer
Sensitivitet	Veldig sensitiv	Ubehandlet furu, materialer som inneholder mye næring for biologisk vekst.
	Sensitiv	Limte treplater, PUR med papiroverflate, gran, høvlet tre, papirbelagte produkter, trebaserte plater.
	Medium sensitiv	Betong, luft- og cellebetong, glassull, polyesterull, sement- eller plastbaserte materialer, mineralfiber.
	Motstandsdyktig	PUR, polert overflate, glass- eller metallprodukter, materialer med effektive og beskyttende sammensetningsbehandlinger.
Reduksjonsfaktor	Betydelig reduksjon	Ubehandlet treverk.
	Relevant reduksjon	Lettbetong.
	Relativt liten reduksjon	Betong, laminert tre, PUR, mineralfiber.
	Nesten ingen reduksjon	EPS, polyesterfibre, lettbetong.

Hvorvidt fuktforholdene kategoriseres som kritiske for muggvekst i beregningsprogrammet defineres blant annet ut ifra funksjonen for kritisk RF vist i ligning 3.2 (Hukka og H.A. Viitanen, 1999). Minimum RF er 80%, som er gjeldende for veldig sensitive og sensitive materialer som blant annet treverk. For mer motstandsdyktige materialer kan denne verdien settes til 85%.

$$RH_{kritisk} = \begin{cases} -0,00267 * T^3 + 0,160 * T^2 - 3,13 * T + 100,0 & , T \leq 20^\circ\text{C} \\ 80\% & , T > 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.2)$$

3.8.2 Muggvekstanalyse

For å analysere risikoen de sensormålte luftespaltene har for muggvekst, er det gjennomført muggvekstanalyser i WUFI Mould Index VTT. Det er ønskelig å få frem hvilke eventuelle ulikheter som eksisterer mellom ulike posisjoner i en luftet kledning. Derfor er det valgt å ha faste materialparametere i beregningsprogrammet, som vist i tabell 3.9, med klima fra sensorene som variabler. På denne måten vil klimaet fra de ulike sensorposisjonene bli vurdert

på likt grunnlag. Det er valgt å være konservativ i valg av faste parametere for å undersøke kritiske tilfeller, samt å få frem variasjonen mellom de ulike sensorposisjonene i større grad.

Klimafilene benyttet til analysene er sensormålingene med timesoppløsning, utarbeidet for hver enkelt sensor. Dette er for å fange opp forholdene som vanligvis varierer dynamisk (H. Viitanen, Vinha, Peuhkuri mfl., 2008). Ved gjennomsnittsverdier over lengre tidsperiode som dager, uker eller mer vil trolig ikke risikoen ved de faktiske forholdene, som de høyeste fuktighetsnivåene, gjenspeiles i muggvekstindeksen (H. Viitanen, Vinha, Peuhkuri mfl., 2008). Siden beregningsprogrammet ikke aksepterer for mange mangler i datasettet, er hull i sensormålingene utfylt. I tillegg krever trafikkllysmodellen datasett på minimum ett år for å gjøre en vurdering. Dette er gjort ved å manuelt legge inn gjennomsnittsverdien av siste måling før og første måling etter datasetthullet. Dette vil tilføre en liten usikkerhet i beregningene. Simuleringene med overnevnte materialparametere presentert i tabell 3.9 er gjennomført for alle sensorposisjonene for de tre case-byggene. De simulerte muggvekstindeksene som funksjon av tid er deretter eksportert til Excel for sammenstilling. Overflater i en luftespalte er på kald side av et lufttett sjikt i form av en dampspærre, og vil dermed kategoriseres som *Inne i konstruksjonen / utvendig overflate uten direkte kontakt med inneluften* i trafikkllysmodellen (H. Viitanen, Ojanen mfl., 2019).

Tabell 3.9: Faste materialsparametere for muggvekstanalyse i WUFI Mould Index VTT.

Type parameter	Valgt parameter
Materialkategori	Treverk eller naturlig materiale
Underkategori av materiale	Ubehandlet furu eller gran (kjerneved)
Sensitivitetsklasse	Veldig sensitiv
Reduksjonsfaktor	Nesten ingen reduksjon
Type overflate	Ru
Type treverk	Bartre

3.8.3 Parameterstudie

For å analyse hvor følsom muggvekstanalysen i WUFI Mould Index VTT er til valg av materialparametere, er det gjennomført en parameterstudie. Dette er gjort fordi valg av riktige materialparameterklasser er en av de største feilkildene i muggvekstanalyser ved bruk av WUFI Mould Index VTT (Ojanen, Peuhkuri mfl., 2011). I parameterstudien er klimafilene til de to mest kritiske posisjonene ved hvert av de tre byggene ut ifra muggvekstanalysen i seksjon 3.8.2 benyttet. Deretter er materialparametere variert til både mer og mindre konservative kombinasjoner. De ulike beregningstilfellene med tilhørende valg av parametere er vist i tabell 3.10. Vurdering av resultatene følger trafikkllysmodellen og grenseverdiene basert på at analyserte overflater er *Inne i konstruksjonen / utvendig overflate uten direkte kontakt med inneluften* (H. Viitanen, Ojanen mfl., 2019).

Selv om det er lagt inn materiale som parametere i parameterstudien, er dette kun veiledende for valg av sensitivitetsklasse, reduksjonsfaktor og overflatetype. Når disse valgene overstyres ved å legge inn brukerstyrte kombinasjoner av parameterene, vil de valgte parameterkombinasjonene også kunne representere flere ulike materialer. På denne måten får man i tillegg til å undersøke følsomheten til parameterene, også undersøkt muggvekstindeksen for andre materialer utsatt for de valgte klimaene. Parameterene som er benyttet i WUFI Mould Index VTT samt eksempler på hvilke materialer som passer under de ulike parameterene er beskrevet i seksjon 3.7.1. Det er valgt å benytte parameterkombinasjoner som dekker ubehandlet treverk og vindsperre, da det er disse materialene som utgjør hovedandelen av overflatene i en luftespalte, og dermed er mest utsatt for muggvekst.

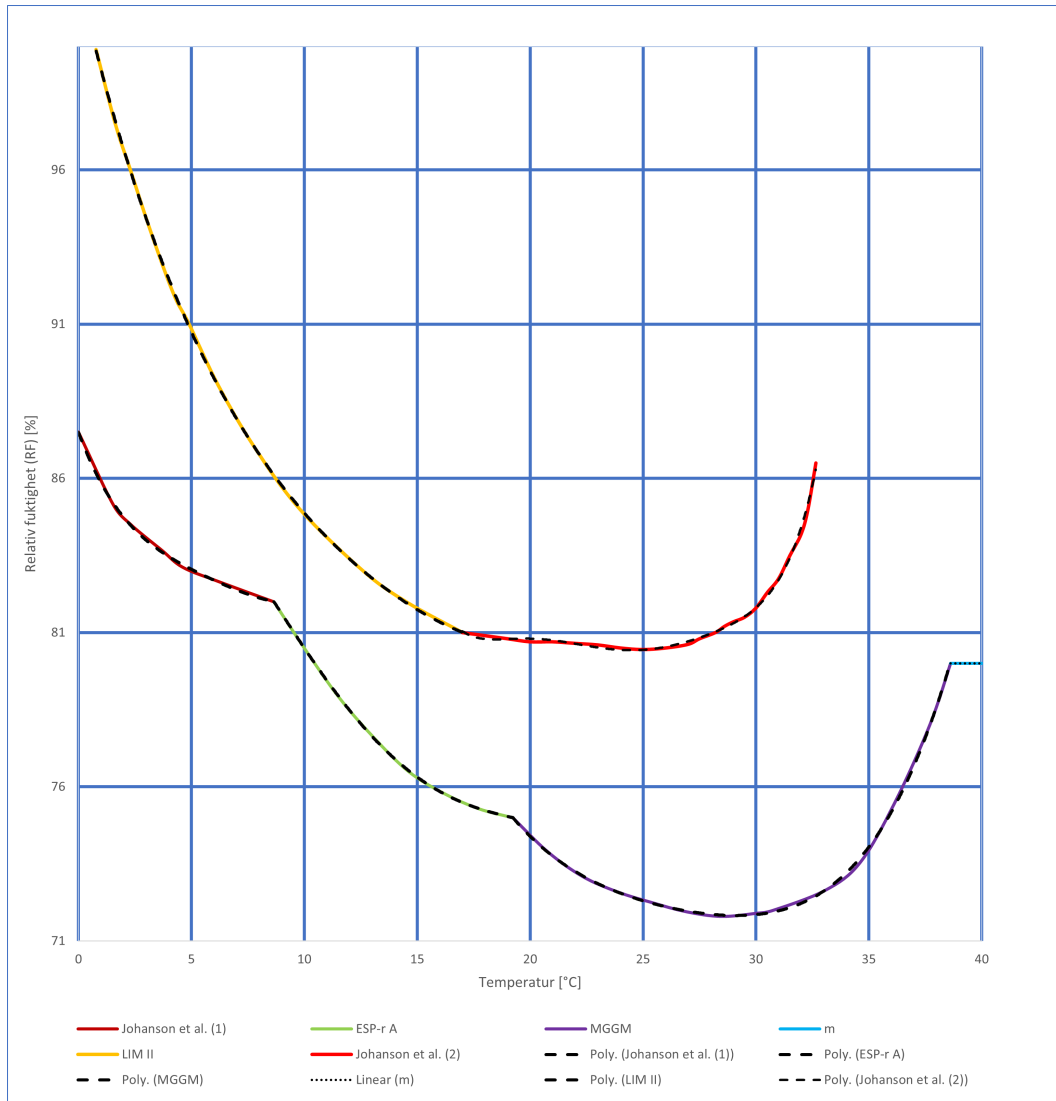
Tabell 3.10: Parameterstudie i WUFI Mould Index VTT.

Parameter		Beregningstilfeller											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sensorposisjon	Sensorposisjon 1	X	X	X				X	X	X			
	Sensorposisjon 2				X	X	X				X	X	X
Materiale	Ubehandlet furu eller gran (kjerneved)	X	X	X	X	X	X						
	Vindsperre							X	X	X	X	X	X
Sensitivitetsklasse	Veldig sensitiv	X			X			X			X		
	Sensitiv		X			X			X			X	
	Medium motstandsdyktig			X			X			X			X
	Motstandsdyktig												
Reduksjonsfaktor	Betydelig reduksjon			X			X			X			X
	Relevant reduksjon		X			X			X			X	
	Relativt lite reduksjon	X			X			X			X		
	Nesten ingen reduksjon												
Overflatetype	Glatt			X			X						
	Ru		X			X							
	Ren									X			X
	Skitten								X			X	
	Faktor 2	X			X			X			X		
Type treverk	Bartre	X	X	X	X	X	X						
	Løvtre												

3.9 Sammenstilling av ulike muggvekstmodeller

Basert på diagrammet til Gradeci mfl., 2017 som presenterer ulike muggvekstmodeller, omtalt i det teoretiske rammeverket i artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* i vedlegg E, er det laget to kurvesammenstillinger, som vist i figur 3.21. Den nedre kurven er basert på de mest konservative delene av muggvekstmodellene, slik at det for enhver temperatur er kurven som viser lavest krav til RF. Kurven er dermed en kombinasjon av kurven til Johanson et al. (Johansson, Wadsö og Sandin, 2010) ved de laveste temperaturene, kurven til ESP-r A (Clarke mfl., 1999) ved de middels høye temperaturene, kurven til Mould Germination Graph (MGGM) (Ayerst, 1969, Smith og Hill, 1982, Moon og Augenbroe, 2004) ved ytterligere temperaturøkning, og m-modellen (Togerö, Tengberg og Bengtsson, 2011) ved de høyeste temperaturene innenfor temperaturgrenseverdiene. Den øvre kuren er mer risikofylt og basert på kurven LIM II (biogrogro-thermal) (Sedlbauer, 2001, Sedlbauer, 2002) ved nedre delen av grenseverditemperaturene, og kurven til Johanson et al. (Johansson, Wadsö og Sandin, 2010) ved den øvre delen. Ved å benytte både en mer konservativ og en mer risikofylt kurvesammenstilling blir muggvekstrisikoen analysert ut ifra ytterpunktene av de ulike muggvekstmodellene.

I Excel er det laget trendlinjer til de seks delkurvene som til sammen danner de to kurvesammenstillingene, vist i figur 3.21. Trendlinjene er av 4. gradspolynom for de ikke-lineære kurvene og lineær for m-modellen, slik at trendlinjene stemmer godt overens med kurvesammenstillingene. Videre er funksjonsligningene til trendlinjene benyttet som to sett med grenseverdier for å beregne hvor stor andel av tiden sensorene måler kritiske fukt- og temperaturforhold. For å illustrere dette er alle målingene fra sensorene plottet inn i hvert sitt diagram som funksjon av temperatur og RF. Deretter er der utformet en trendlinje for sensormålingene i 4. gradspolynom, for å vise vekten av målingene. Videre er begge kurvesammenstillingene lagt inn i samme diagram. Dette er gjort for å grafisk fremstille hvor stor del av tiden sensorene måler kritiske muggvekstforhold.



Figur 3.21: Kurvetilpassning av utvalgte grafer for muggvekstkriterier basert på *Fig.3.*
Comparison of the minimum requirement for the onset of mould growth for different mould models. i Gradeci mfl., 2017.

3.10 Kritisk RF

Funksjonen for kritisk RF, $RH_{kritisk}$, er vist i ligning 3.2 i seksjon 3.8. I tillegg til å benyttes i beregningsprogrammet WUFI Mould Growth Index VTT, omtalt i seksjon 3.8.1, er den også benyttet til en videre analyse av de sensormålte fukt- og temperaturforholdene. Dette er gjort for å kunne illustrere resultatet av ligningen på ulike metoder, samt å kunne gjøre vurderinger basert på den beregnede kritiske RF uten innvirkning fra de andre parameterene i beregningsprogrammet. Ligningen for kritisk RF er utviklet etter eksperimenter utført i temperaturer på 5-40°C (Hukka og H.A. Viitanen, 1999). Det er dermed en usikkerhet rundt bruken av denne ligningen, da målte spaltetemperaturer spenner utenfor dette. Ligning 3.2 viser en minimum RF på 80%, som er gjeldende for veldig sensitive og sensitive materialer som blant annet treverk. For mer motstandsdyktige materialer kan denne verdien settes til 85%.

3.11 Konstante grenseverdier for muggvekstrisiko

I og med at det er vanskelig å fastslå hva som er minimumskriteriet for muggvekst, er det også valgt å gjøre en analyse av hvor stor andel av tiden RF og temperatur møter ulike konstante kriterier for kritiske fukt- og temperaturforhold. Dette er ikke kriterier der RF og temperatur er en funksjon av hverandre, men faste minimumskrav. Disse kriteriene vil blant annet dekke flere av minimumskriteriene omtalt i *Table 5* og *Table 6* i Gradeci mfl., 2017. I tillegg dekker dette nasjonale og internasjonale standardkriterier for muggvekst vist i *Table 8* i Gradeci mfl., 2017. Dette inkluderer blant annet det norske kriteriet satt til at muggvekst kan forekomme dersom det over tid er klimaforhold med RF over 80% og temperatur over 0°C (Byggforskeren 421.132, 2018). Benyttede kriterier i denne analysen er vist i tabell 3.11. Alle er basert på RF, og noen har i tillegg temperatur som et kriterium.

Tabell 3.11: Grenseverdier for RF og temperatur.

Grenseverdier	
Kombinasjon av RF og temperatur	RF
Temperatur $\geq 0^{\circ}\text{C}$ og RF 80-85%	RF $\geq 70\%$
Temperatur $\geq 0^{\circ}\text{C}$ og RF 85-90%	RF $\geq 75\%$
Temperatur $\geq 0^{\circ}\text{C}$ og RF 90-95%	RF $\geq 80\%$
Temperatur $\geq 0^{\circ}\text{C}$ og RF 95-100%	RF $\geq 85\%$
Temperatur $\geq 5^{\circ}\text{C}$ og RF 80-85%	RF $\geq 90\%$
Temperatur $\geq 5^{\circ}\text{C}$ og RF 85-90%	RF $\geq 95\%$
Temperatur $\geq 5^{\circ}\text{C}$ og RF 90-95%	
Temperatur $\geq 5^{\circ}\text{C}$ og RF 95-100%	

3.12 Kondenspotensialet

Kondens kan, som omtalt i seksjon 2.2 føre til oppfukning av materialer som igjen øker muggvekstrisikoen. I litteraturen er det benyttet flere ulike metoder for å beregne dette, og det gjøres flere antagelser. Det er derfor i denne oppgaven valgt å undersøke kondenspotensialet i luftespalter ved bruk av flere metoder. Risikoen for muggvekst grunnet oppfukning fra kondens analyseres dermed på en bredere måte. Samtidig er det undersøkt hvorvidt de ulike metodene gir det samme resultatet.

3.12.1 Temperaturdifferanser over luftespaltens tykkelse i tak

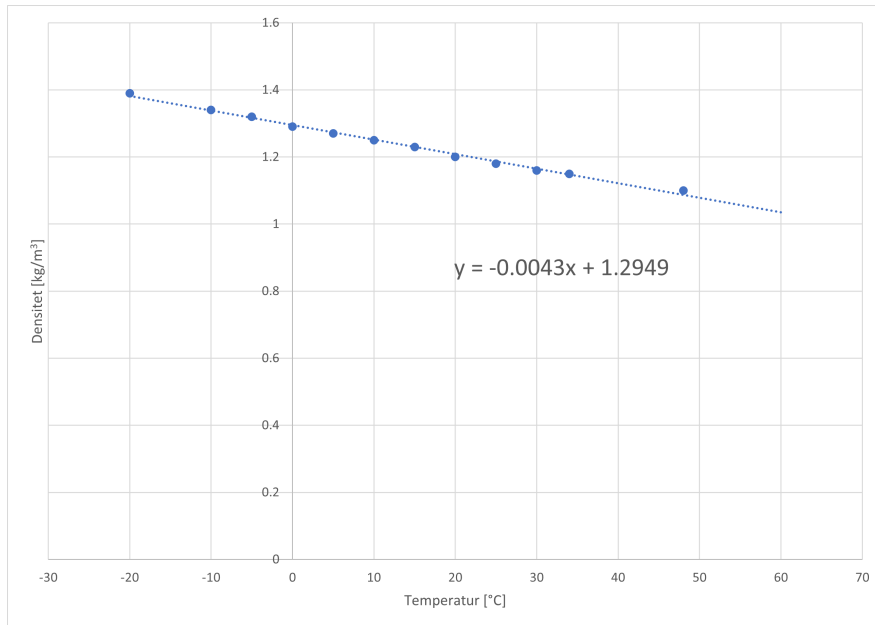
For å undersøke betydningen av temperaturmålerens plassering i luftespalten, er det sett på hvordan temperaturen i luftespaltene i taket varierer over luftespaltens tykkelse. Til denne undersøkelsen er SINTEF sine termoelementer som er montert i luftespaltene i taket på ZEB-laboratoriet omtalt i seksjon 3.5.3 benyttet. Formålet med denne undersøkelsen er å gi en større forståelse av hvordan temperaturforholdene varierer over luftespaltens tykkelse. Dette kan være svært relevant informasjon ved videre installasjoner av klimasensorer i luftespalter, samt ved sammenligning av resultater fra sensorer ved ulike plasseringer. Videre er det viktig å kjenne til temperaturvariasjonene ved videre analyse av eksempelvis kondenspotensialet i luftespaltene, samt hvilke temperaturpåkjenninger materialer som vindsperre, vindsperreteip og kledning må tåle. For sammenligningen mellom målinger utført med termoelementene og målingene utført med fuktsensorene er målinger ved TR1 og TR2 sammenlignet med målinger fra MR3, og målinger fra TR3 og TR4 sammenlignet med målinger fra MR2.

3.12.2 Sammenligning av AH i luftespalte og AH i uteluften

For å undersøke om det er mulig å benytte absolutt luftfuktighet (AH) i uteluften til å anta AH i luftespalten er det undersøkt hvor godt disse verdiene korrelerer. Dersom dette korrelerer godt, er det mulig å bruke AH i uteluften til å beregne kondenspotensialet i luftespalten dersom man kun kjenner til luftespaltens temperatur. Det er valgt å undersøke korrelasjonen for ZEB-laboratoriet, siden klimastasjonen som måler AH i uteluften er lokalisert veldig nærme bygget. Innvirkningen av stedlige klimavariasjoner vil dermed minimeres.

Klimastasjonen ved ZEB Test Cell måler AH i $[g/m^3]$ og fuktsensorene i luftespaltene måler AH i $[g/kg]$. For å gjøre målingene sammenlignbare er det nødvendig med en omgjøringsformel mellom de to benevningene. Det har ikke blitt funnet en entydig konverteringsformel mellom benevningene, slik at det har vært nødvendig å lage en kurvetilpasning basert på kjente omgjøring for faste temperaturer. Kurvetilpasning for luftens densitet samt tilhørende funksjonen er vist i figur 3.22. Denne er utviklet med en antagelse om at endring i luftens densitet i forhold til temperatur er konstant også utenfor de kjente målepunktene. I og med at dette er en kurvetilpasning vil det ligge noe usikkerhet i beregningene.

I Excel blir de sensormålte verdiene av AH i luftespaltene regnet om med funksjonen vist i figur 3.22, og deretter sammenlignet med AH for uteluften. Sammenligningen mellom sensormålt AH i luftespaltene og AH i uteluften består av en grafisk sammenstilling av differansene mellom verdier for luftespaltene og for uteluften. Det blir også gjort en vurdering på differansene mellom sensorene og uteluften opp mot sensorenes plassering. I tillegg blir det undersøkt korrelasjonen mellom AH i luftespaltene og i uteluften gitt som en tallverdi mellom -1 og 1.



Figur 3.22: Kurvetilpasning av luftens densitet.

3.12.3 Kondenspotensialet, CP_i

Som en del av analysen av klimaforholdene i luftespaltene og hvilken risiko de har for muggvekst er faren for fuktavgivelse fra luften i luftespalten undersøkt. Det har vært observert flere metoder for å beregne kondenspotensialet i litteraturen. Dette skyldes ofte begrensninger i tilgjengelig måledata. For å bredere analysere kondenspotensialet i luftespalter, samt å undersøke hvorvidt ulike metoder gir samme resultat er det valgt å beregne kondenspotensialet med flere ulike metoder.

Det er valgt at undersøkelsen av kondenspotensialet skal fokusere på ZEB-laboratoriet, da det er mulighet til å benytte flere metoder til å beregne kondenspotensialet for dette bygget enn for byggene på Sørvestlandet. ZEB-laboratoriet er instrumentert med sensorer plassert mer variert over byggets fasader enn byggene på Sørvestlandet har, i tillegg til å være det eneste bygget med sensorer i luftespalter i taket. Videre vil det for byggene på Sørvestlandet trolig være større usikkerhet i klimadataene for uteklima enn det er for ZEB-laboratoriet. Det er også kun ZEB-laboratoriet som er instrumentert med termoelementer som måler overflatetemperaturer i luftespaltene.

Det er gjennomført totalt seks ulike metoder. Hver metode er utført med to ulike varianter, én variant med temperaturmålinger fra fuktsensorene, vist i tabell 3.12, og én variant med temperaturmålingene fra termoelementer montert på undersiden av kledningen av solcellepanel på taket, vist i tabell 3.13. Det er valgt å benytte termoelementene på undersiden av solcellekledningen fordi det er antatt at temperaturene på undersiden av solcellepanelkledningen gir større fare for fuktavgivelser enn temperaturen målt lengre inn i luften nærmere undertaket/asfalttekingen fordi solcellepanelene har størst potensial til å sende varmestråling mot himmelen på kalde og klare netter som omtalt i seksjon 2.2.

Tabell 3.12: Metoder for å beregne potensialet for kondens med temperaturmålinger fra fuktsensorer.

Metode	Beskrivelse
1.1 $T \leq T_{ext}$	Andelen av tiden der luftespaltetemperaturen målt med fuktsensorer, T , er lavere enn utetemperaturen, T_{ext} .
2.1 $T \leq T_{D,ext}$	Andelen av tiden der luftespaltetemperaturen målt med fuktsensorer, T , er lavere enn uteluftens duggpunkttemperatur, $T_{D,ext}$.
3.1 $T \leq T_D$	Andelen av tiden der luftespaltetemperaturen målt med fuktsensorer, T , er lavere enn luftespaltens duggpunkttemperatur målt med fuktsensorer, T_D .
4.1 $CP_{i,forenklet}$	Andelen av tiden der beregnet CP_i , som vist ved ligning 2.4, er lik null og dermed indikerer et kondenspotensial. Partialtrykket er beregnet med forenklet metode, som vist ved ligning 2.3, basert på målte verdier for RF i luftespaltene. Metningstrykket er beregnet med temperaturer målt med fuktsensorer.
5.1 $CP_{i,AH,ext}$	Andelen av tiden der beregnet CP_i , som vist ved ligning 2.4, er større eller lik null og dermed indikerer et kondenspotensial. Vanndampkonsentrasjonen, vist ved ligning 2.2, er beregnet med AH fra uteluften målt ved klimastasjonen ved ZEB Test cell. Dette vil dermed være med en antagelse om at AH ute er tilsvarende AH i luftespaltene, samt at stedlige variasjon ikke spiller inn. Metningstrykket, vist ved ligning 2.1 er antatt å kunne benyttes for luftespaltetemperaturer høyere enn 40°C siden det ved slike temperaturer med stor sannsynlighet er høyere spaltetemperaturer enn utetemperaturer og dermed ikke fuktavgivelse. Metningstrykket og vanndampkonsentrasjonen er beregnet med temperaturer målt med fuktsensorer.
6.1 $CP_{i,AH}$	Andelen av tiden der beregnet CP_i , som vist ved ligning 2.4, er større eller lik null og dermed indikerer et kondenspotensial. Vanndampkonsentrasjonen, vist ved ligning 2.2, er beregnet med AH målt i luftespaltene oppgitt i g/kg omregnet til kg/m ³ med omgjøringsformelen omtalt i seksjon 3.12.2. Det vil likevel være en tilnærming å benytte den lineære kurvetilpasningen av densiteten til tørr luft som en funksjon av temperaturen. Metningstrykket og vanndampkonsentrasjonen er beregnet med temperaturer målt med fuktsensorer.

Tabell 3.13: Metoder for å beregne potensialet for kondens med temperaturmålinger fra termoelementer.

Metode	Beskrivelse
1.2 $T \leq T_{ext}$	Andelen av tiden der overflatetemperaturen på undersiden av solcellepanelkledningen målt med termoelementer er lavere enn utetemperatur.
2.2 $T \leq T_{D,ext}$	Andelen av tiden der overflatetemperaturen på undersiden av solcellepanelkledningen målt med termoelementene er lavere enn uteluftens duggpunkttemperatur.
3.2 $T \leq T_D$	Andelen av tiden der overflatetemperaturen på undersiden av solcellepanelkledningen målt med termoelementene er lavere enn luftespaltens duggpunkttemperatur målt med fuktsensorer.
4.2 $CP_{i,forenklet}$	Andelen av tiden der beregnet CP_i , som vist ved ligning 2.4, er lik null og dermed indikerer et kondenspotensial. Partialtrykket er beregnet med forenklet metode, som vist ved ligning 2.3, basert på målte verdier for RF i luftespaltene. Metningstrykket, vist ved ligning 2.1 er beregnet med temperaturer målt med termoelementene på undersiden av solcellepanelkledningen.
5.2 $CP_{i,AH,ext}$	Andelen av tiden der beregnet CP_i , som vist ved ligning 2.4, er større eller lik null og dermed indikerer et kondenspotensial. Vanndampkonsentrasjonen, vist ved ligning 2.2, er beregnet med AH fra uteluften målt ved klimastasjonen ved ZEB Test cell. Dette vil dermed være med en antagelse om at AH ute er tilsvarende AH i luftespaltene, samt at stedlige variasjon ikke spiller inn. Metningstrykket, vist ved ligning 2.1 er antatt å kunne benyttes for luftspaltetemperaturer høyere enn 40°C siden det ved slike temperaturer med stor sannsynlighet er høyere spaltetemperaturer enn utetemperaturer og dermed ikke fuktavgivelse. Metningstrykket og vanndampkonsentrasjonen er beregnet med temperaturer målt med termoelementene på undersiden av solcellepanelkledningen.
6.2 $CP_{i,AH}$	Andelen av tiden der beregnet CP_i , som vist ved ligning 2.4, er større eller lik null og dermed indikerer et kondenspotensial. Vanndampkonsentrasjonen, vist ved ligning 2.2, er beregnet med AH målt i luftespaltene oppgitt i g/kg omregnet til kg/m ³ med omgjøringsformelen omtalt i seksjon 3.12.2. Det vil likevel være en tilnærming å benytte den lineære kurvetilpasningen av densiteten til tørr luft som en funksjon av temperaturen. Metningstrykket og vanndampkonsentrasjonen er beregnet med temperaturer målt med termoelementene på undersiden av solcellepanelkledningen.

4 Resultat

Resultatene fra litteraturstudie er som informert i seksjon 4.1, beskrevet i sin helhet i den vitenskapelige artikkelen Ingebretsen, Andenæs og Kvande, 2022 i vedlegg D. Øvrige resultater er presentert i sin helhet i seksjon 4.2 - 4.12. En kortfattet oppsummering av deler av resultatene er i tillegg presentert i den vitenskapelige artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* i vedlegg E.

4.1 Hvordan omtaler forskningslitteraturen mikroklimaet i luftespalter?

Resultatene fra litteraturstudien er i sin helhet presentert i artikkelen *Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates* (Ingebretsen, Andenæs og Kvande, 2022) i vedlegg D.

4.2 Fullstendighet i datasett

Til analysene av klimaet i luftespartene og hvilken risiko luftespartene har for muggvekst er det valgt å benytte sensormålte datasett med timesoppløsning. Fra nettsiden til Omnisene er det lastet ned datasett med timesoppløsning som et gjennomsnitt av et usystematisk antall punktmålinger gjort i løpet av en time. Eksempelvis vil måleverdiene markert med klokkeslettet 00:00 være gjennomsnittet av punktmålingene fra og med 00:00 og frem til 01:00. Datasettene er relativt komplette, men det er likevel noen hull. Andelen datamålinger som mangler er vist i tabell 4.1 for Fjogstad-Hus, tabell 4.2 for Norgeshus og tabell 4.3 for ZEB-laboratoriet. Basert med mengden datamålinger som mangler for SV-1 og SV-4 ved Fjogstad-Hus vil ikke disse sensorene inkluderes videre i oppgaven.

Tabell 4.1: Andelen datamålinger som mangler i datasettet til de ulike senorene ved Fjogstad-Hus.

SØ-1	SØ-2	SØ-3	SØ-4	SØ-5	SV-1	SV-2	SV-3	SV-4	Totalt
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	55,07%	0,00%	4,90%	100,00%	17,77%

Tabell 4.2: Andelen datamålinger som mangler i datasettet til de ulike senorene ved Norgeshus.

NOS	NOL	NMS	NNS	SOS	SOL	SMS	SNS	SNL	Totalt
0,42%	0,41%	0,23%	0,31%	0,02%	0,18%	0,57%	0,33%	0,23%	0,41%

Tabell 4.3: Andelen datamålinger som mangler i datasettet til de ulike senorene ved ZEB-laboratoriet.

MN1	MN2	MN3	MN4	MN5	MS2	MS3	MW1	ME1	MR2	MR3	Totalt
0,14%	0,27%	1,35%	1,52%	0,31%	0,14%	0,14%	0,23%	0,12%	0,14%	0,22%	0,42%

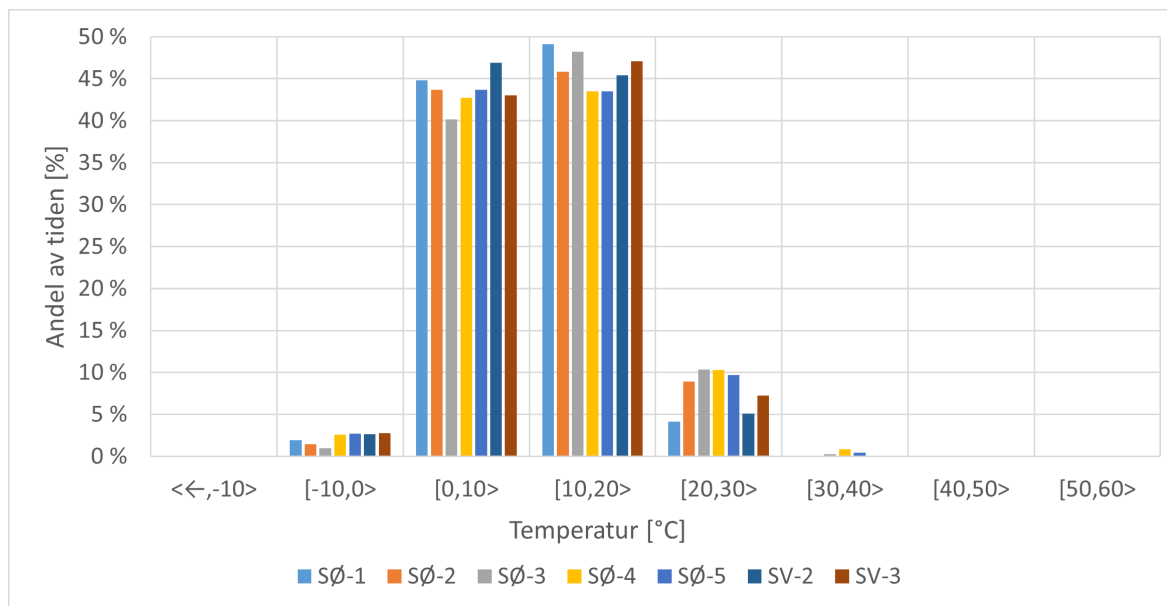
4.3 Temperaturmålinger

4.3.1 Fjogstad-Hus

Målte verdier

En oversikt over hvor stor andel av tiden luftespaltene i Fjogstad-Hus holder ulike lufttemperaturer er vist i figur 4.1. Resultatene viser at luften i luftespaltene hovedsakelig har en temperatur på 0-20°C, men at det også er gjort en god del målinger med både høyere og lavere temperatur. En oversikt over den maksimale og minimale temperaturen målt med de ulike sensorene i luftespaltene er vist i tabell 4.4. Tabellen viser også den høyeste og laveste temperaturen målt i uteluften ved klimastasjonen, samt hvilke datoer alle ekstremalverdiene er målt.

Målingene viser også at det ved samme tidspunkt kan være svært forskjellige temperaturer ved de ulike sensorposisjonene. Temperaturdifferansen mellom de ulike sensorene i luftespalten i fasadene innad i samme måletidspunkt er i gjennomsnitt 2,6°C. Også innad i luftespaltene i samme fasade er temperaturforskjellen til enhver tid i gjennomsnitt 1,9°C for sør-øst-fasadene og 0,4°C for sør-vest-fasadene. Største temperaturforskjell målt ved de ulike sensorene på samme tidspunkt er på 20,3°C, og største forskjellen målt ved de ulike sensorene i samme fasade ved samme tidspunkt er på 12,1°C for sør-øst-fasadene og 3,4°C for sør-vest-fasadene. Differansene er minst om vinteren, men dette varierer stort gjennom året.



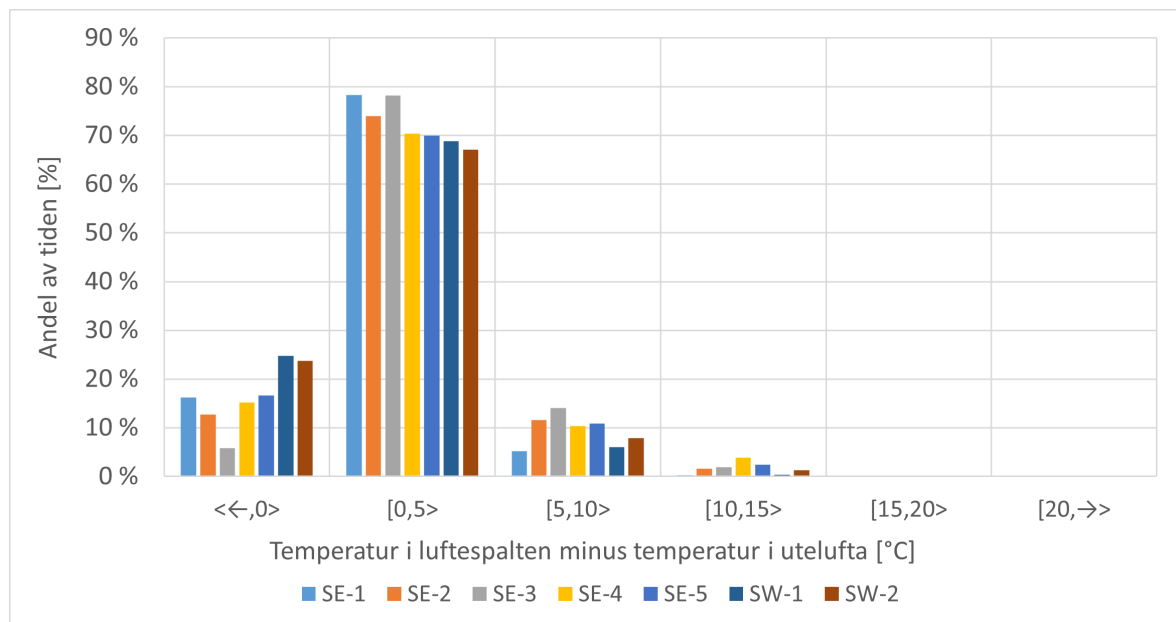
Figur 4.1: Målte temperaturer i luftespaltene i Fjogstad-Hus.

Tabell 4.4: Ekstremalverdier for temperaturmålinger i luftespaltene i Fjogstad-Hus.

	Temperatur			
	Maksimum		Minimum	
	Verdi [°C]	Dato	Verdi [°C]	Dato
SØ-1	26.6	25.07.2021	-3.6	25.12.2021
SØ-2	32.5	25.07.2021	-3.2	25.12.2021
SØ-3	32.7	01.07.2021	-2.9	25.12.2021
SØ-4	35.3	01.07.2021	-5.0	24.12.2021
SØ-5	34.4	25.07.2021	-5.1	25.12.2021
SV-2	28.1	08.09.2021	-5.4	25.12.2021
SV-3	29.8	08.09.2021	-5.8	24.12.2021
Ute	26.7	25.07.2021	-4.5	24.12.2021

Temperatur i luftespaltene sammenlignet med utetemperaturen

En oversikt over temperaturdifferansene mellom målte temperaturer i luftespaltene i Fjogstad-Hus og utetemperaturen er vist i figur 4.2. Figuren viser andelen av tiden der temperaturen i luftespaltene minus utetemperaturen gir verdier innenfor ulike intervaller.



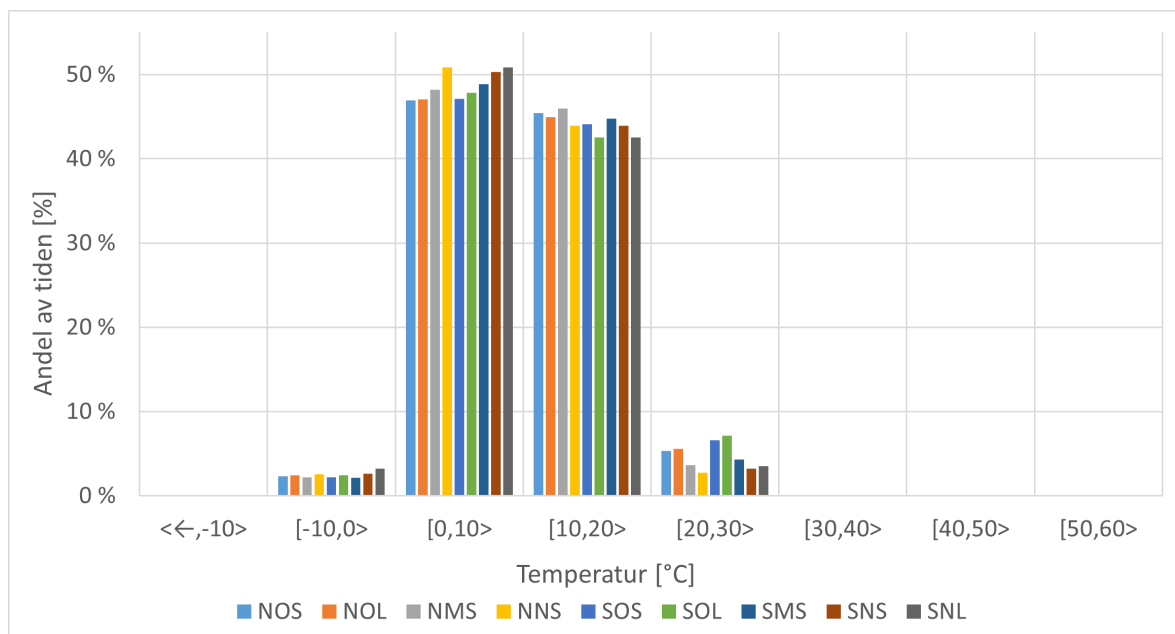
Figur 4.2: Temperaturer i luftespaltene i Fjogstad-Hus minus utetemperaturen.

4.3.2 Norgeshus

Målte verdier

En oversikt over hvor stor andel av tiden luftespaltene i Norgeshus holder ulike lufttemperaturer er vist i figur 4.3. Resultatene viser at luften i luftespaltene hovedsakelig har en temperatur på 0-20°C, men at det også er gjort en god del målinger med både høyere og lavere temperatur. En oversikt over den maksimale og minimale temperaturen målt med de ulike sensorene i luftespaltene i Norgeshus er vist i tabell 4.5. Tabellen viser også den høyeste og laveste temperaturen målt i uteluften ved klimastasjonen, samt hvilke datoer alle ekstremalverdiene er målt.

Resultatene viser at det ved samme tidspunkt kan være svært forskjellige temperaturer ved de ulike sensorposisjonene. Temperaturdifferansen mellom de ulike sensorene i luftespalten i fasadene innad i samme måletidspunkt er i gjennomsnitt 2,3°C. Også innad i luftespaltene i samme fasade er temperaturforskjellen til enhver tid i gjennomsnitt 1,0°C for nord-øst-fasadene og 1,2°C for sør-vest-fasadene. Største temperaturforskjell målt ved de ulike sensorene på samme tidspunkt er på 18,4°C, og største forskjellen målt ved de ulike sensorene i samme fasade ved samme tidspunkt er på 8,3°C for nord-øst-fasadene og 9,2°C for sør-vest-fasadene. Differansene er minst om vinteren, men dette varierer stort gjennom året.



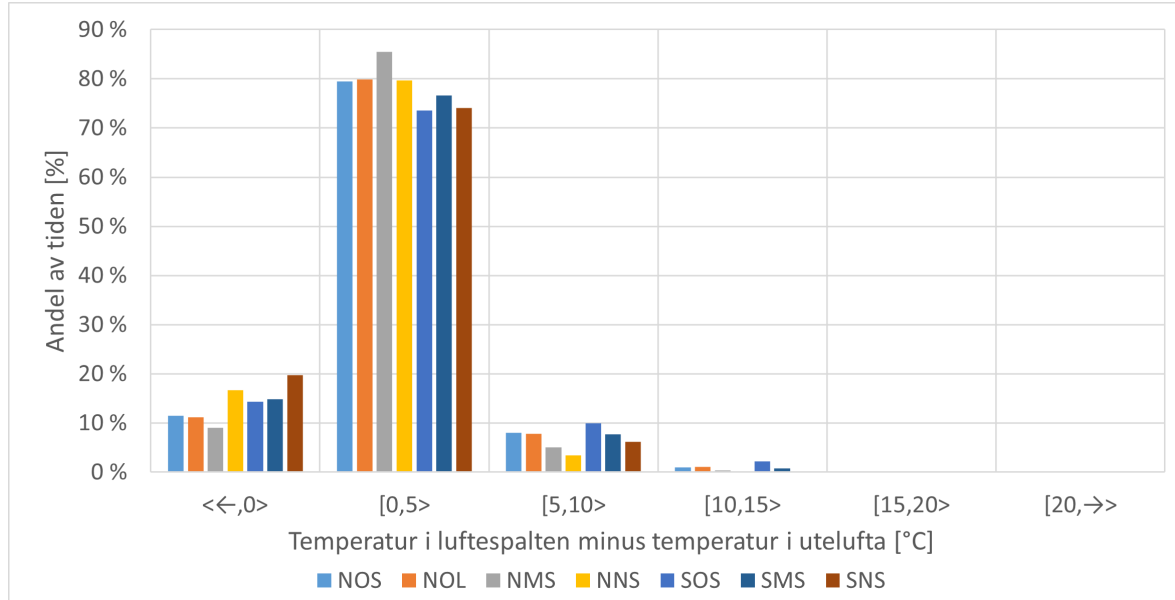
Figur 4.3: Målte temperaturer i luftespaltene i Norgeshus.

Tabell 4.5: Ekstremalverdier for temperaturmålinger i luftespaltene i Norgeshus.

	Temperatur			
	Maksimum		Minimum	
	Verdi [°C]	Dato	Verdi [°C]	Dato
NOS	33.2	01.07.2021	-6.6	24.12.2021
NOL	33.5	01.07.2021	-6.9	24.12.2021
NMS	30.9	01.07.2021	-6.3	24.12.2021
NNS	28.6	01.07.2021	-6.9	24.12.2021
SOS	31.7	24.07.2021	-7.0	24.12.2021
SOL	32.8	24.07.2021	-7.9	24.12.2021
SMS	29.1	24.07.2021	-7.6	24.12.2021
SNS	27.5	24.07.2021	-8.1	24.12.2021
SNL	28.3	24.07.2021	-8.8	24.12.2021
Ute	22.8	25.07.2021	-8.4	24.12.2021

Temperatur i luftespaltene sammenlignet med utetemperaturen

En oversikt over temperaturdifferansene mellom målte temperaturer i luftespaltene i Norgeshus og utetemperaturen er vist i figur 4.4. Figuren viser andelen av tiden der temperaturen i luftespaltene minus utetemperaturen gir verdier innenfor ulike intervaller.



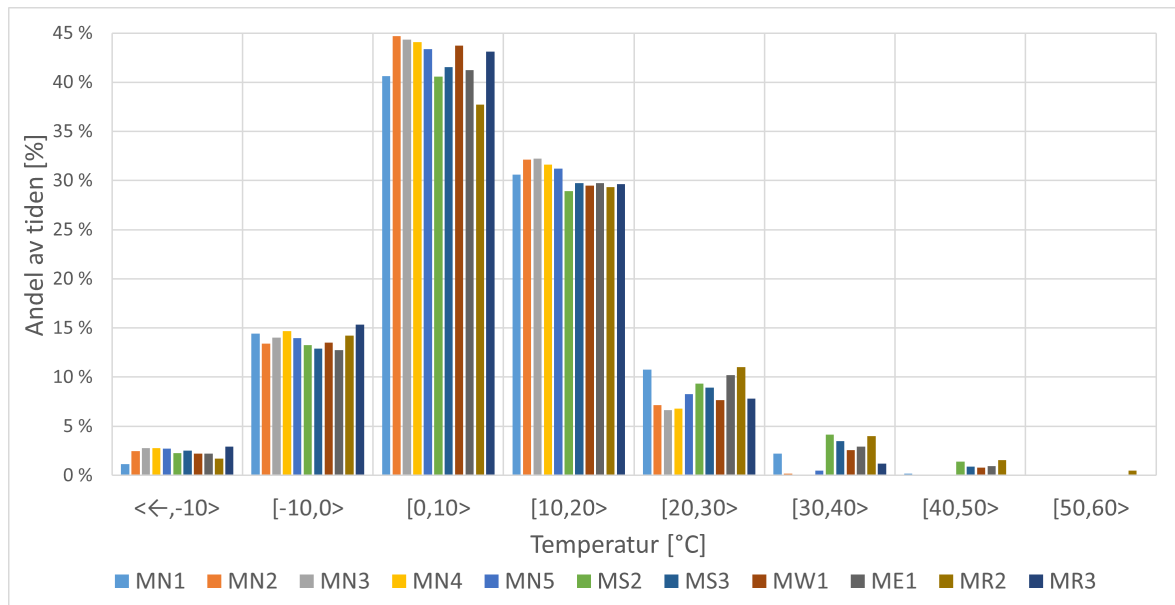
Figur 4.4: Temperaturer i luftespaltene i Norgeshus minus utetemperaturen.

4.3.3 ZEB-laboratoriet

Målte verdier

En oversikt over hvor stor andel av tiden luftespaltene i ZEB-laboratoriet holder ulike lufttemperaturer er vist i figur 4.5. Resultatene viser at luften i luftespaltene har en temperatur på 0-20°C omtrent 70% av tiden. Det er også en vesentlig andel av tiden der lufttemperaturen i luftespaltene er mellom -10°C og 0°C og mellom 20°C og 30°C. Det er også gjort en god del målinger med både høyere og lavere temperatur. En oversikt over den maksimale og minimale temperaturen målt med de ulike sensorene i luftespaltene i ZEB-laboratoriet er vist i tabell 4.6. Tabellen viser også den høyeste og laveste temperaturen målt i uteluften ved klimastasjonen, samt hvilke datoer alle ekstremalverdiene er målt.

Resultatene viser at det ved samme tidspunkt kan være svært forskjellige temperaturer ved de ulike sensorposisjonene. Temperaturdifferansen mellom de ulike sensorene i luftespaltene i fasadene innad i samme måletidspunkt er i gjennomsnitt 4,7°C. Dersom sensorene for luftespaltene i taket også inkluderes er temperaturdifferansene til en hver tid i gjennomsnittet 5,6°C. Også innad i luftespalten i nord-fasaden er temperaturforskjellen til enhver tid i gjennomsnitt 2,2 °C. Største temperaturforskjell målt ved de ulike sensorene på samme tidspunkt er på 35,4°C, og største forskjellen målt ved de ulike sensorene i nord-fasaden ved samme tidspunkt er på 22,7°C. Differansene er vesentlig større om sommeren enn om vinteren.



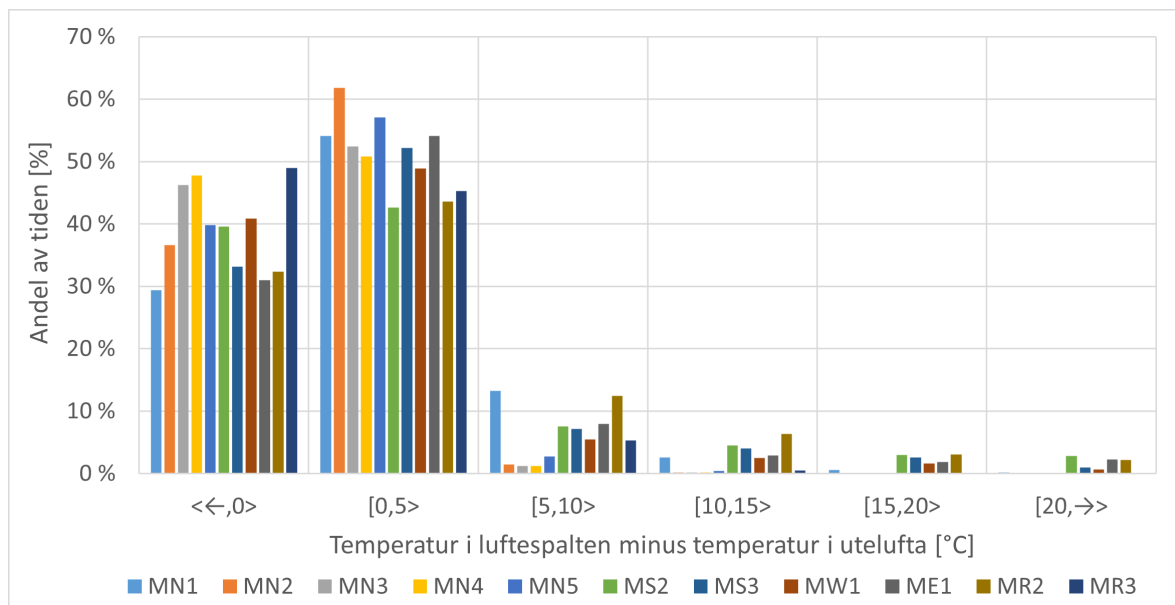
Figur 4.5: Målte temperaturer i luftespaltene i ZEB-laboratoriet.

Tabell 4.6: Ekstremalverdier for temperaturmålinger i luftespaltene i ZEB-laboratoriet.

	Temperatur			
	Maksimum		Minimum	
	Verdi [°C]	Dato	Verdi [°C]	Dato
MN1	50,7	20.06.2020	-16.0	11.02.2021
MN2	32,1	28.06.2020	-18.4	11.02.2021
MN3	30,7	28.06.2020	-18.6	11.02.2021
MN4	31,8	04.07.2021	-18.3	11.02.2021
MN5	33,6	04.07.2021	-19.0	11.02.2021
MS2	51,7	03.07.2021	-18.6	11.02.2021
MS3	50,2	03.07.2021	-18.9	11.02.2021
MW1	50,2	03.07.2021	-18.1	11.02.2021
ME1	51,0	21.08.2020	-18.0	11.02.2021
MR2	58,0	20.06.2020	-16.9	03.02.2021
MR3	38,0	27.06.2020	-18.5	11.02.2021
Ute	31,0	20.06.2020	-18.8	11.02.2021

Temperatur i luftespaltene sammenlignet med utetemperaturen

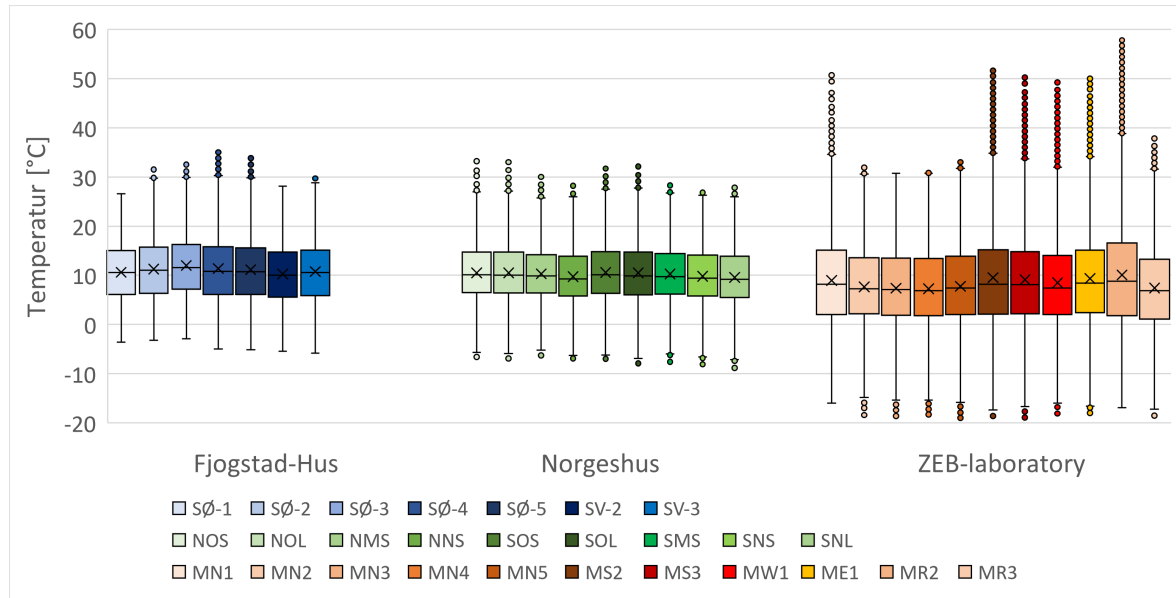
En oversikt over temperaturdifferansene mellom målte temperaturer i luftespaltene i ZEB-laboratoriet og utetemperaturen er vist i figur 4.6. Figuren viser andelen av tiden der temperaturen i luftespaltene minus utetemperaturen gir verdier innenfor ulike intervaller.



Figur 4.6: Temperaturer i luftespaltene i ZEB-laboratoriet minus utetemperaturen.

4.3.4 Sammenstilling av temperaturmålinger

Temperaturmålingene fra luftespaltene i Fjogstad-Hus, Norgeshus og ZEB-laboratoriet er sammenstilt i et box-diagram i figur 4.7. Fremstillingen av box-diagrammet følger beskrivelsen vist i seksjon 3.6.2.

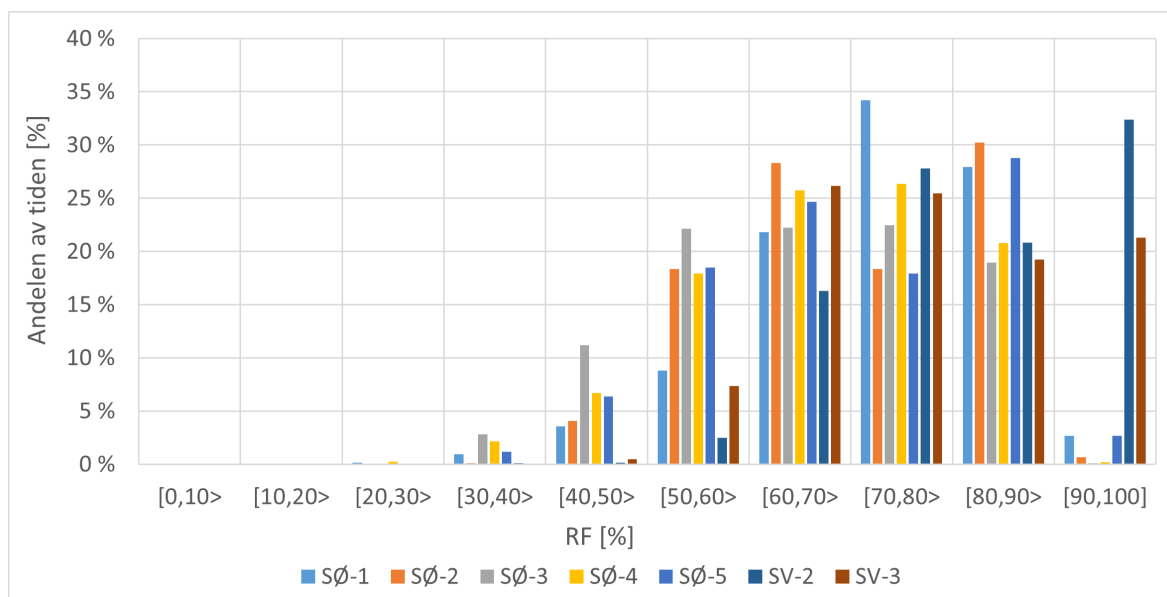


Figur 4.7: Temperaturmålingene i luftespaltene for Fjogstad-Hus, Norgeshus og ZEB-laboratoriet sammenstilt i et box-diagram.

4.4 Målt luftfuktighet

4.4.1 Fjogstad-Hus

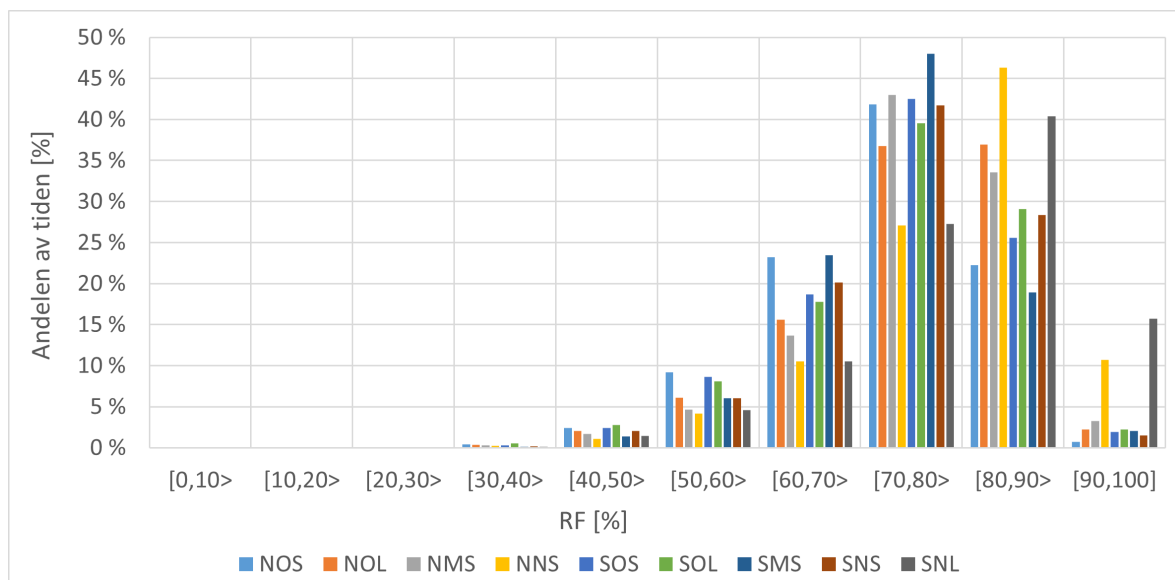
En oversikt over hvor stor andel av tiden luftespaltene i Fjogstad-Hus holder ulike verdier for RF er vist i figur 4.3. Resultatene viser at RF i luftespaltene varierer stort over året. Videre viser figuren at luftespaltene i sør-vest-fasaden inneholder luft med svært høy RF mellom 21-33% av tiden. Dette er til forskjell fra fasaden mot sør-øst som nesten ikke gir målinger med RF over 90%. Målingene viser også at det ved samme tidspunkt kan være svært forskjellig RF ved de ulike sensorposisjonene. Differansen i RF for de ulike sensorene i luftespaltene innad i samme måletidspunkt er i gjennomsnitt 17,6 prosentpoeng. Også innad i luftespaltene i samme fasade er differansen til enhver tid i gjennomsnitt 10,7 prosentpoeng for sør-øst-fasaden og 3,8 prosentpoeng for sør-vest-fasaden. Største differanse målt ved de ulike sensorene på samme tidspunkt er på 60,6 prosentpoeng, og største forskjellen målt ved de ulike sensorene i samme fasade ved samme tidspunkt er på 33,7 prosentpoeng for sør-øst-fasaden og 23,9 prosentpoeng for sør-vest-fasaden. Differansene er størst om våren, men dette varierer stort gjennom året.



Figur 4.8: Målte verdier for RF i luftespaltene i Fjogstad-Hus.

4.4.2 Norgeshus

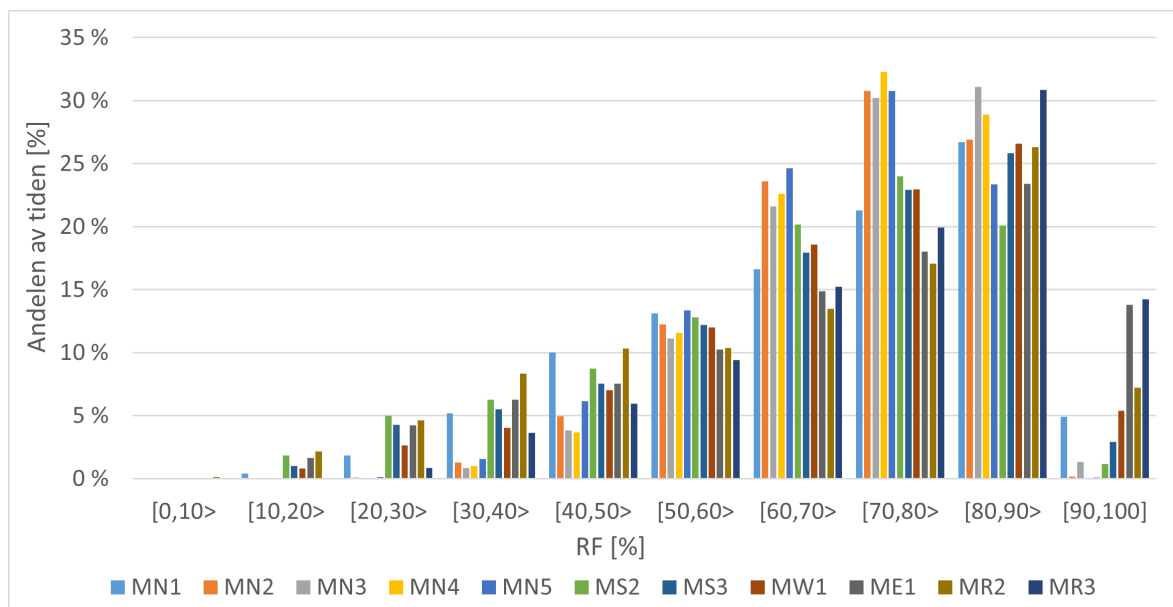
En oversikt over hvor stor andel av tiden luftespaltene i Norgeshus holder ulike verdier for RF er vist i figur 4.9. Resultatene viser at RF i luftespaltene varierer stort over året. Videre viser figuren at sensorene plassert nederst i sløyfen i fasaden mot nord-øst og nederst i lekten i fasaden mot sør-vest skiller seg ut fra resterende sensorposisjoner med en vesentlig andelen av tiden der RF er over 90%. Målingene viser også at det ved samme tidspunkt kan være svært forskjellig RF ved de ulike sensorposisjonene. Differansen i RF for de ulike sensorene i luftespaltene innad i samme måletidspunkt er i gjennomsnitt 12,9 prosentpoeng. Også innad i luftespaltene i samme fasade er differansen til enhver tid i gjennomsnitt 8,4 prosentpoeng for nord-øst-fasaden og 8,5 prosentpoeng for sør-vest-fasaden. Største differanse målt ved de ulike sensorene på samme tidspunkt er på 47,1 prosentpoeng, og største forskjellen målt ved de ulike sensorene i samme fasade ved samme tidspunkt er på 21,0 prosentpoeng for nord-øst-fasaden og 42,6 prosentpoeng for sør-vest-fasaden. Differansene er minst om vinteren, men dette varierer stort gjennom året.



Figur 4.9: Målte verdier for RF i luftespaltene i Norgeshus.

4.4.3 ZEB-laboratoriet

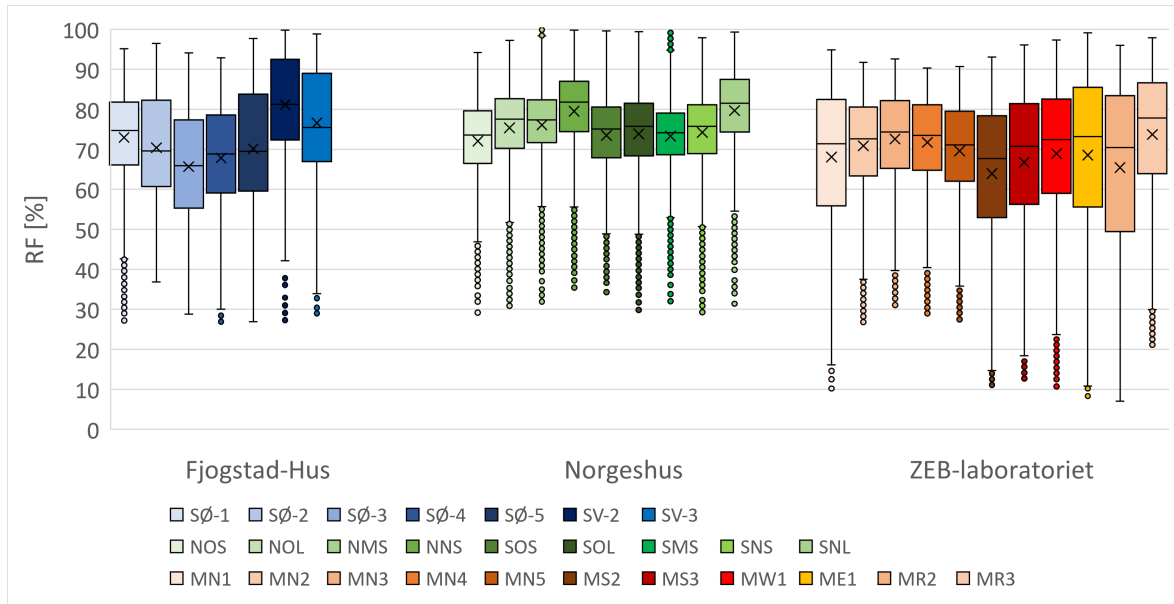
En oversikt over hvor stor andel av tiden luftespaltene i ZEB-laboratoriet holder ulike verdier for RF er vist i figur 4.10. Resultatene viser at RF i luftespaltene varierer stort over året, fra veldig lave verdier av RF til veldig høye. Videre viser figuren at sensoren i fasaden mot øst og sensoren plassert nederst i pulttaket skiller seg ut fra resterende sensorposisjoner med en vesentlig andelen av tiden der RF er over 90%. Målingene viser også at det ved samme tidspunkt kan være svært forskjellig RF ved de ulike sensorposisjonene. Differansen i RF for de ulike sensorene i luftespaltene innad i samme måletidspunkt er i gjennomsnitt 15,6 prosentpoeng. Dersom sensorene for luftespalten i taket også inkluderes er differansen til en hver tid i gjennomsnittet 18,5 prosentpoeng. Også innad i luftespaltene i nord-fasaden er differansen i RF til enhver tid i gjennomsnitt 7,6 prosentpoeng. Største differanse i RF målt ved de ulike sensorene på samme tidspunkt er på 71,5 prosentpoeng, og største forskjellen målt ved de ulike sensorene i nord-fasaden ved samme tidspunkt er på 39,8 prosentpoeng. Differansene er vesentlig større om sommeren enn om vinteren.



Figur 4.10: Målte verdier for RF i luftespaltene i ZEB-laboratoriet.

4.4.4 Sammenstilling av målinger av RF

Målingene av RF i luftespaltene i Fjogstad-Hus, Norgeshus og ZEB-laboratoriet er sammenstilt i et box-diagram i figur 4.11. Fremstillingen av box-diagrammet følger beskrivelsen vist i seksjon 3.6.2.



Figur 4.11: Målingene av RF i luftespaltene for Fjogstad-Hus, Norgeshus og ZEB-laboratoriet sammenstilt i et box-diagram.

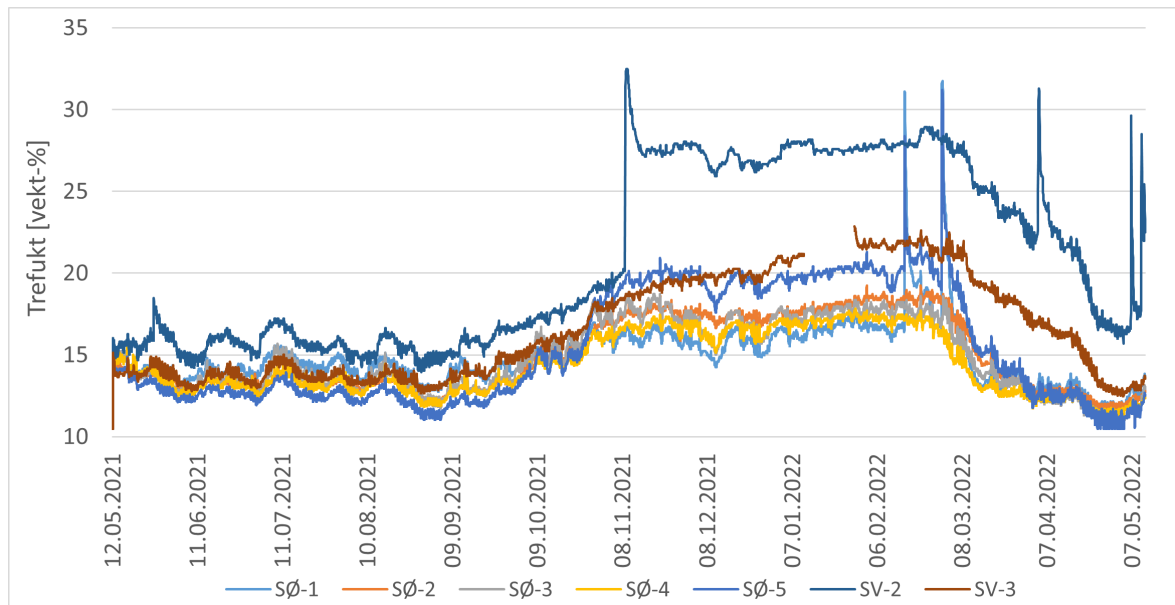
4.5 Målt trefukt

4.5.1 Fjogstad-Hus

En oversikt over hvor stor andelen av tiden målingene av trefukt gjort i luftespaltene i Fjogstad-Hus har gitt verdier innenfor ulike intervaller er vist i tabell 4.7. Figur 4.12 illustrerer hvordan trevirkets fuktinnhold varierer over måleperioden. Målingene viser at sensorposisjonen SV-2 skiller seg tydelig fra resterende sensorposisjoner hva gjelder høye målinger for trefukt. Sensorposisjonene SØ-5 og SV-3 måler også trefuktnivåer som i perioder overstiger 20 vektprosent. Verdiene for trefukt er generelt sett høyere om vinteren enn om sommeren.

Tabell 4.7: Andelen av tiden målingene av trefukt gjort i luftespaltene i Fjogstad-Hus har gitt verdier innenfor ulike intervaller.

Trefukt [vekt-%]	SØ-1	SØ-2	SØ-3	SØ-4	SØ-5	SV-2	SV-3
$[\leftarrow, 15 >$	58%	58%	56%	63%	59%	6%	47%
$[15, 20 >$	40%	42%	44%	37%	27%	48%	35%
$[20, 25 >$	1%	0%	0%	0%	14%	10%	18%
$[25, \rightarrow >$	0%	0%	0%	0%	0%	36%	0%



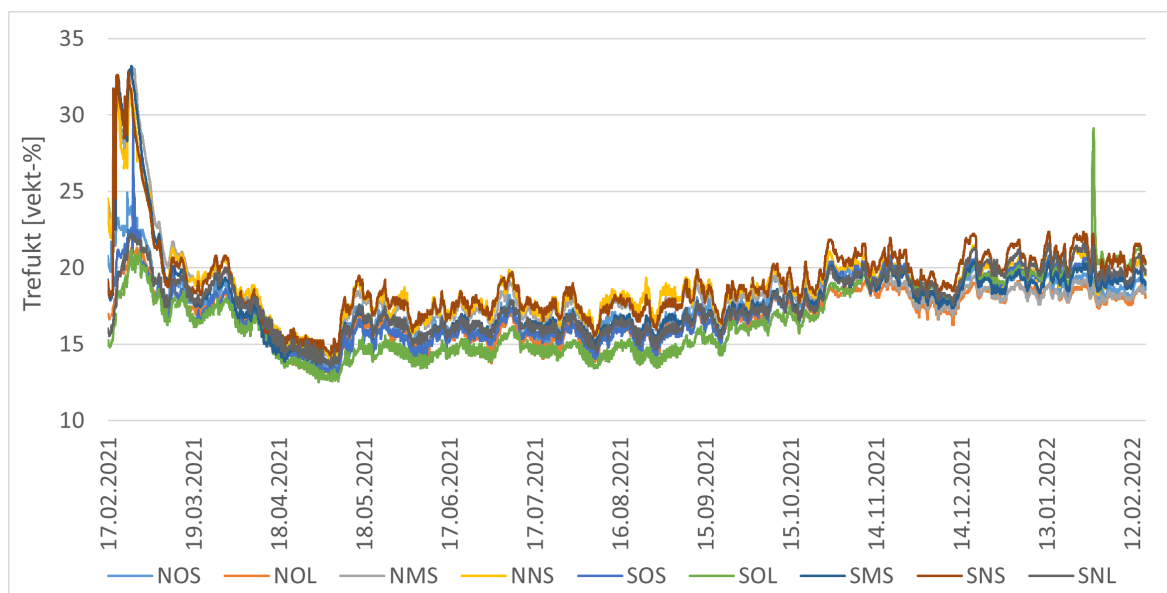
Figur 4.12: Målte verdier for trefukt i luftespalter i Fjogstad-Hus.

4.5.2 Norgeshus

En oversikt over hvor stor andelen av tiden målingene av trefukt gjort i luftespaltene i Norgeshus har gitt verdier innenfor ulike intervaller er vist i tabell 4.8. Figur 4.13 illustrerer hvordan trevirkets fuktinnhold varierer over måleperioden. Målingene viser at flere av sensorposisjonen måler trefuktnivåer som i perioder overstiger 20 vektprosent om vinteren.

Tabell 4.8: Andelen av tiden målingene av trefukt gjort i luftespaltene i Norgeshus har gitt verdier innenfor ulike intervaller.

Trefukt [vekt-%]	NOS	NOL	NMS	NNS	SOS	SOL	SMS	SNS	SNL
[←,15>	8%	13%	5%	4%	12%	35%	7%	3%	6%
[15,20>	86%	84%	87%	76%	77%	57%	86%	66%	80%
[20,25>	6%	2%	4%	16%	11%	9%	5%	28%	14%
[25,→>	0%	0%	4%	4%	0%	0%	3%	3%	0%



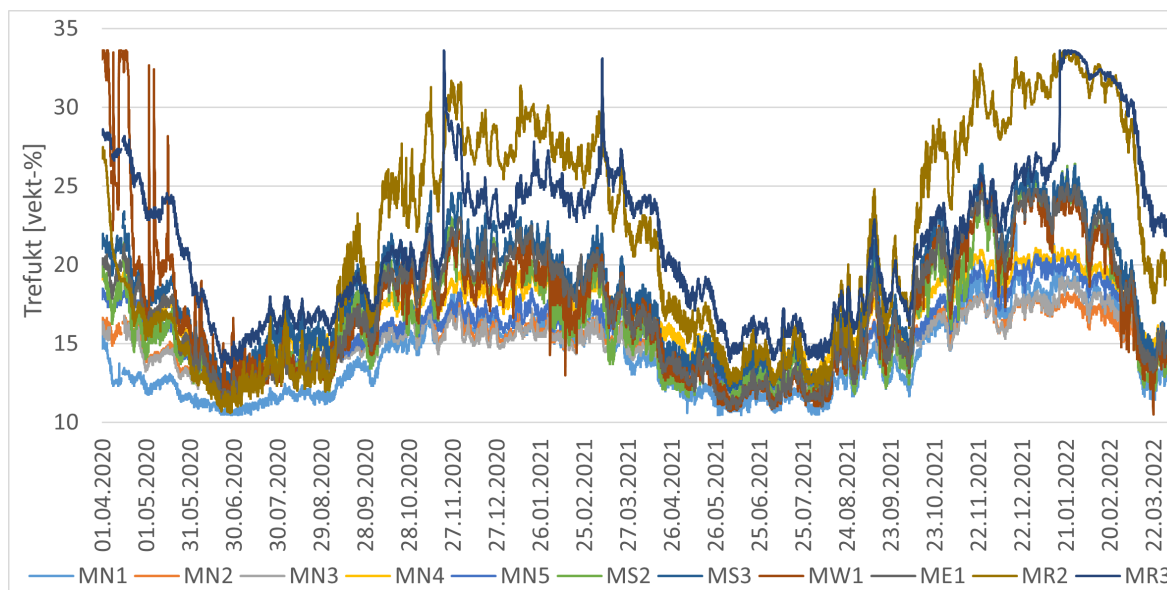
Figur 4.13: Målte verdier for trefukt i luftespalter i Norgeshus.

4.5.3 ZEB-laboratoriet

En oversikt over andelen av tiden målingene av trefukt gjort i luftespaltene i ZEB-laboratoriet har gitt verdier innenfor ulike intervaller er vist i tabell 4.9. Figur 4.14 illustrerer hvordan trevirkets fuktinnhold varierer over måleperioden. Målingene viser store forskjeller mellom trefuktnivåene om sommeren og om vinteren. Sensorene i taket, MR2 og MR3, skiller seg tydelig fra de andre sensorposisjonene hva gjelder høye målinger for trefukt i periodene utenom om sommeren. Sensorene i luftespaltene i fasadene mot øst, vest og sør måler også høye trefuktverdier, spesielt under måleperiodens andre vinter. Målingene fra nord-fasadene viser de laveste verdiene for trefukt, selv om det også her er målt trefuktverdier på rundt 20% om vinteren for noen av sensoren.

Tabell 4.9: Andelen av tiden målingene av trefukt gjort i luftespaltene i ZEB-laboratoriet har gitt verdier innenfor ulike intervaller.

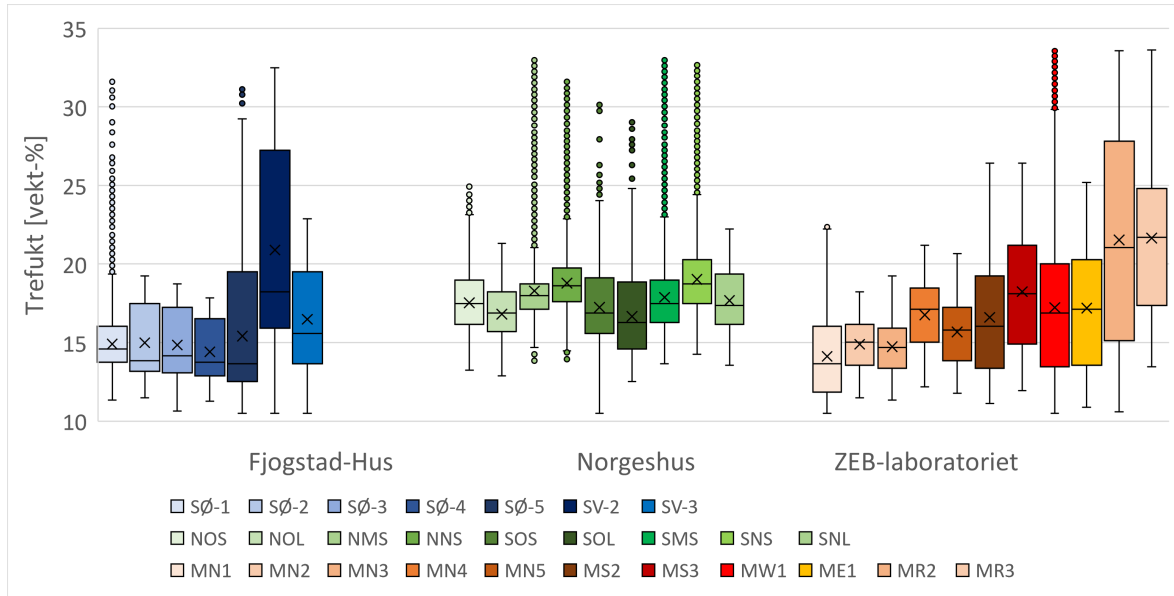
Trefukt [vekt-%]	MN1	MN2	MN3	MN4	MN5	MS2	MS3	MW1	ME1	MR2	MR3
[←,15>	61%	49%	55%	24%	41%	41%	26%	37%	37%	24%	6%
[15,20>	39%	51%	45%	69%	57%	41%	38%	37%	35%	23%	34%
[20,25>	0%	0%	0%	8%	3%	16%	33%	22%	28%	14%	35%
[25,→>	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	3%	0%	39%	24%



Figur 4.14: Målte verdier for trefukt i luftespalter i ZEB-laboratoriet.

4.5.4 Sammenstilling av målt trefukt

Målingene av trefukt målt i Fjogstad-Hus, Norgeshus og ZEB-laboratoriet er sammenstilt i et box-diagram i figur 4.15. Fremstillingen av box-diagrammet følger beskrivelsen vist i seksjon 3.6.2.



Figur 4.15: Målingene av trefukt i luftespaltene for Fjogstad-Hus, Norgeshus og ZEB-laboratoriet sammenstilt i et box-diagram.

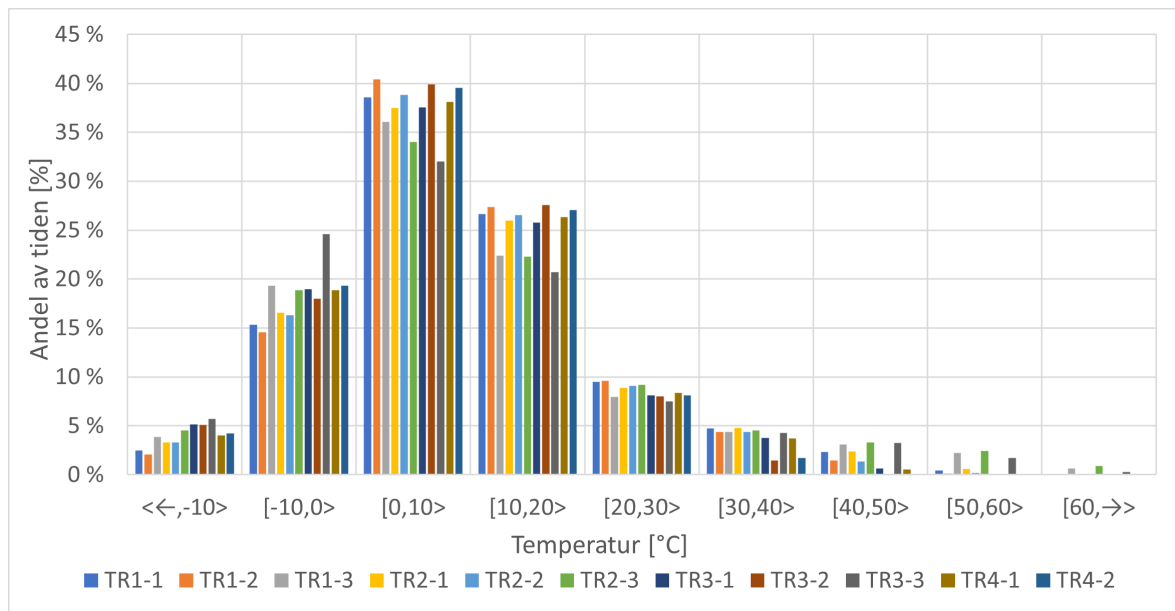
4.6 Temperaturdifferanse over luftespaltenes tykkelse

4.6.1 Målte verdier

En oversikt over hvor stor andelen av tiden termoelementene gjort over luftespaltenes tykkelse i ZEB-laboratoriet gir verdier innenfor ulike intervaller er vist i tabell 4.10 og illustrert i figur 4.16.

Tabell 4.10: Andelen av tiden der termoelementer måler temperaturer innenfor ulike intervaller.

Temperatur [°C]	TR1			TR2			TR3			TR4	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
<←, -10 >	2%	2%	4%	3%	3%	5%	5%	5%	6%	4%	4%
[-10, 0 >	15%	15%	19%	17%	16%	19%	19%	18%	25%	19%	19%
[0, 10 >	39%	40%	36%	38%	39%	34%	38%	40%	32%	38%	40%
[10, 20 >	27%	27%	22%	26%	27%	22%	26%	28%	21%	26%	27%
[20, 30 >	9%	10%	8%	9%	9%	9%	8%	8%	7%	8%	8%
[30, 40 >	5%	4%	4%	5%	4%	5%	4%	1%	4%	4%	2%
[40, 50 >	2%	1%	3%	2%	1%	3%	1%	0%	3%	1%	0%
[50, 60 >	0%	0%	2%	1%	0%	2%	0%	0%	2%	0%	0%
[60, →>	0%	0%	1%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%



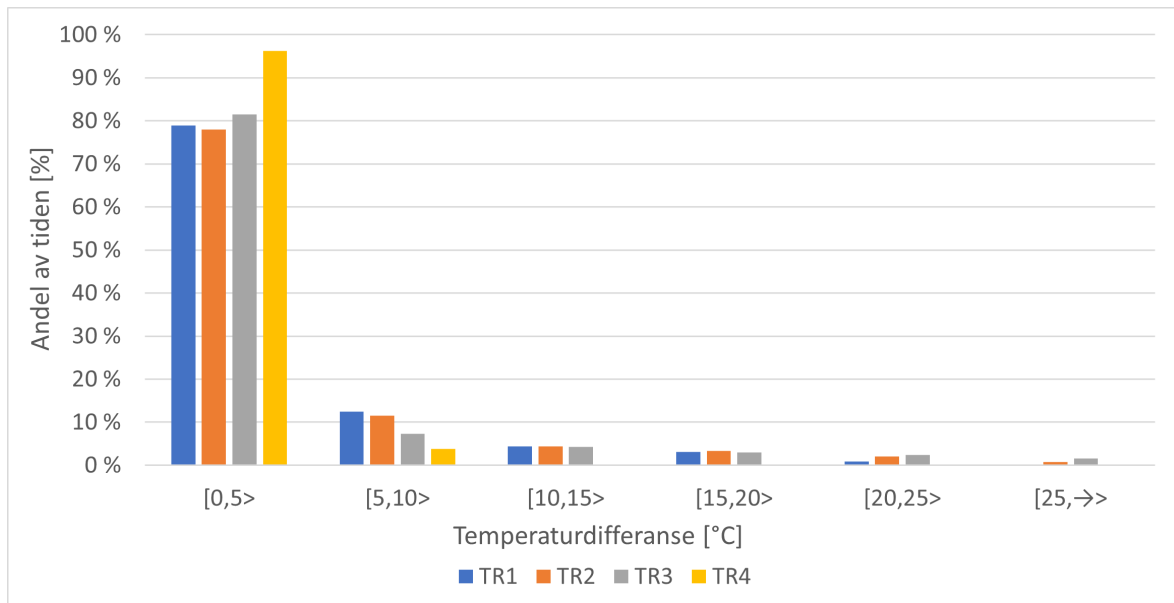
Figur 4.16: Andelen av tiden termoelementene måler temperaturer innenfor ulike intervaller.

Samtlige av termoelementene har registrert sine maksimale temperaturmålinger 03.07.2021 kl. 13.00-14.00 eller 14.00-15.00. Ved denne tiden er utetemperaturen 26,7°C - 29,4°C. Høyeste temperaturmåling for undersiden av kledningen er 72,6°C målt ved TR2-3 og 71,6°C ved TR1-3. Det vil si 45°C høyere enn utetemperaturen. For sensoren nederst på taket, TR3-3, viser målingene 65,9°C, som vil si 6,7°C lavere enn i toppen. For termoelementene som måler luften midt i luftespaltene er de maksimale temperaturene denne datoen 55,5°C for TR1-2 og 55,4°C for TR2-2 som er plassert i toppen av taket, og 40,3°C for TR3-2 og 40,8°C for TR4-2 i bunnen. Det er med andre ord omtrent 15°C forskjell i lufttemperaturen i midten av luftespaltens tykkelse mellom toppen og bunnen av taket. For overflaten av undertaket viser målingene i toppen av taket 58,0°C for TR1-1 og 59,3°C for TR2-1. Tilsvarende i bunnen av taket er det målt 48,4°C ved TR3-1 og 47,5°C ved TR4-1, omtrent 10°C kaldere enn ved toppen av taket. Differansen i maksimumstemperaturer er 32,3°C, der undersiden av kledningen øverst på taket har høyeste maksimumstemperaturen og luften i midten av luftespalten nederst på taket har den laveste maksimumstemperaturen. Høyeste temperatur for uteluften er målt dagen etter, 04.07.2021, med 29,6°C i gjennomsnitt mellom kl. 15:00 og 16:00.

Termoelementenes laveste temperaturmålinger er registrert 03.02.2021 mellom kl 08:00 og 10:00 når utetemperaturen er mellom -16,9°C og -17,1°C eller 11.02.2021 mellom kl. 07:00 og 10:00 når utetemperaturen er mellom -18,6 og -18,8°C. Sistnevnte temperatur er også uteluftens laveste måling over måleperioden. For undersiden av kledningen er minimumstemperaturene målt til -20,8°C og -21,5°C for TR1-3 og TR2-3 i toppen av taket, og -18,7°C for TR3-3 i bunnen. For termoelementene som måler lufttemperaturen i midten av luftespaltens tykkelse viser målingene -16,6°C og -18,3°C for TR1-2 og TR2-2 i toppen av taket og -19,4°C og -18,4°C for TR3-2 og TR4-2 i bunnen. Overflatetemperaturen på undertaket er på sitt kaldeste målt til -17,2°C og -18,4°C ved TR1-1 og TR2-1 i toppen av taket og -18,5°C og -17,3°C ved TR3-1 og TR4-1 ved bunnen. Temperaturdifferansene mellom toppen og bunnen er vesentlig mindre for minimumstemperaturene enn for maksimumstemperaturene. Videre er differansen i minimumstemperaturer bare 4,9°C mellom luften midt i luftespalten på toppen av taket som har den varmeste minimumstemperaturen og undersiden av kledningen i toppen av taket som har den kaldeste minimumstemperaturen. I tillegg viser målingene at undersiden av kledningen i toppen av taket samt i luften i midten av luftespalten ved TR3-2 minimumstemperaturer lavere enn utetemperaturens minimumstemperatur. Resterende termoelementer har målinger av minimumstemperaturen inntil 2,2°C varmere enn utetemperaturens kaldeste måling.

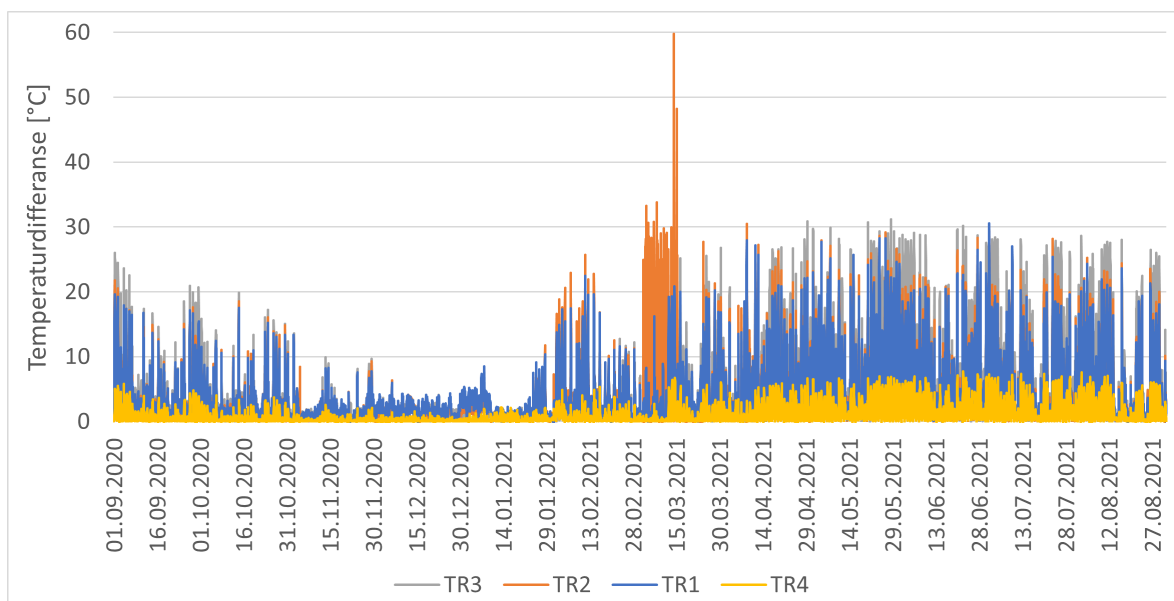
4.6.2 Variasjonsbredde over luftespaltens tykkelse

Temperaturdifferansen målt over luftespaltens tykkelse er basert på målinger fra termoelementer på overflatene som venter mot luftespaltene samt i luften i midten av luftespaltene, som beskrevet i seksjon 3.12.1. Figur 4.17 viser hvor stor andel av tiden temperaturdifferansene over luftespaltens tykkelse innad i samme posisjon i taket gir verdier innenfor ulike intervaller.



Figur 4.17: Andelen av tiden temperaturdifferansen over luftespaltens tykkese gir verdier innenfor ulike intervaller.

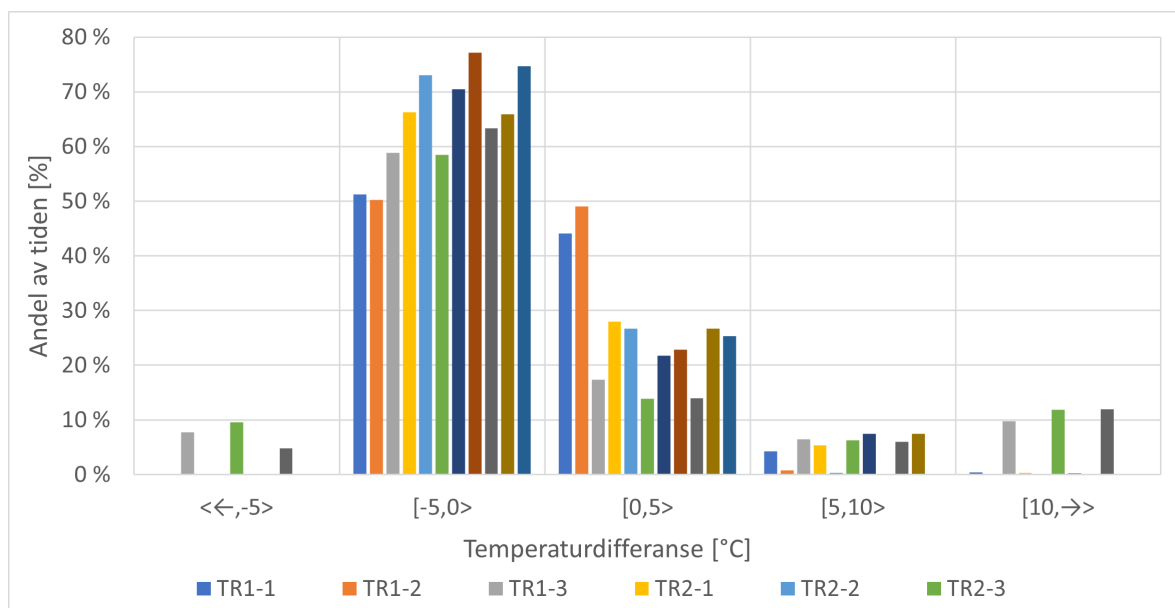
Den største temperaturdifferansen målt over de tre termoelementene er 30,6°C målt 01.07.2021 kl. 13:00-14:00 ved posisjon TR1, 59,8°C målt 14.03.2021 kl. 06:00-07:00 ved posisjon TR2, 31,2°C målt 28.05.2021 kl. 11:00-12:00 ved posisjon TR3 og 7,7°C målt 22.06.2021 kl. 13:00-14:00 ved posisjon TR4. Til tross for høye ekstremalverdier er gjennomsnittlig differanse målt ved henholdsvis TR1, TR2, TR3 og TR4 på 3,8°C, 4,0°C, 3,9°C og 1,0°C. Figur 4.18 illustrerer hvordan temperaturdifferansen over luftespaltens tykkelse varierer over måleperioden. Det fremkommer av figuren at temperaturdifferansene i perioden november til januar er vesentlig mindre enn temperaturdifferansene for øvrige måneder.



Figur 4.18: Temperaturdifferanse over luftespaltens tykkese over måleperioden.

4.6.3 Differansen mellom målinger utført med fuktmålere og termoelementer

Differansen mellom målinger utført med termoelementene og fuktmålerene er vist i figur 4.19. Positive verdier for differansen tilsier at temperaturene målt med fuktsensorer er høyere enn temperaturene målt med termoelementer. Som det fremkommer i figuren er det termoelementene montert på undersiden av taktekningen av solcellepanel som måler de største differansene med både positiv og negativ verdi. Resultatene viser at største målte differanse der termoelementene viser høyere temperatur enn fuktmålerene er 57,4°C, målt ved TR2-3 14.03.2021 kl. 06:00-07:00. Største differanse der termoelementene viser lavere temperatur enn fuktsensorene er på -11,2°C, målt ved TR3-3 11.04.2021. Termoelementet som måler temperaturen til luften midt i luftespalten kan forventes at måler temperaturer nærmest målingene til fuktsensoren som også måler luften og ikke overflatetemperaturer. Likevel er det målt lufttemperaturer opp til 10°C varmere med termoelementet enn med fuktsensoren, og opp til 6,7°C kaldere.

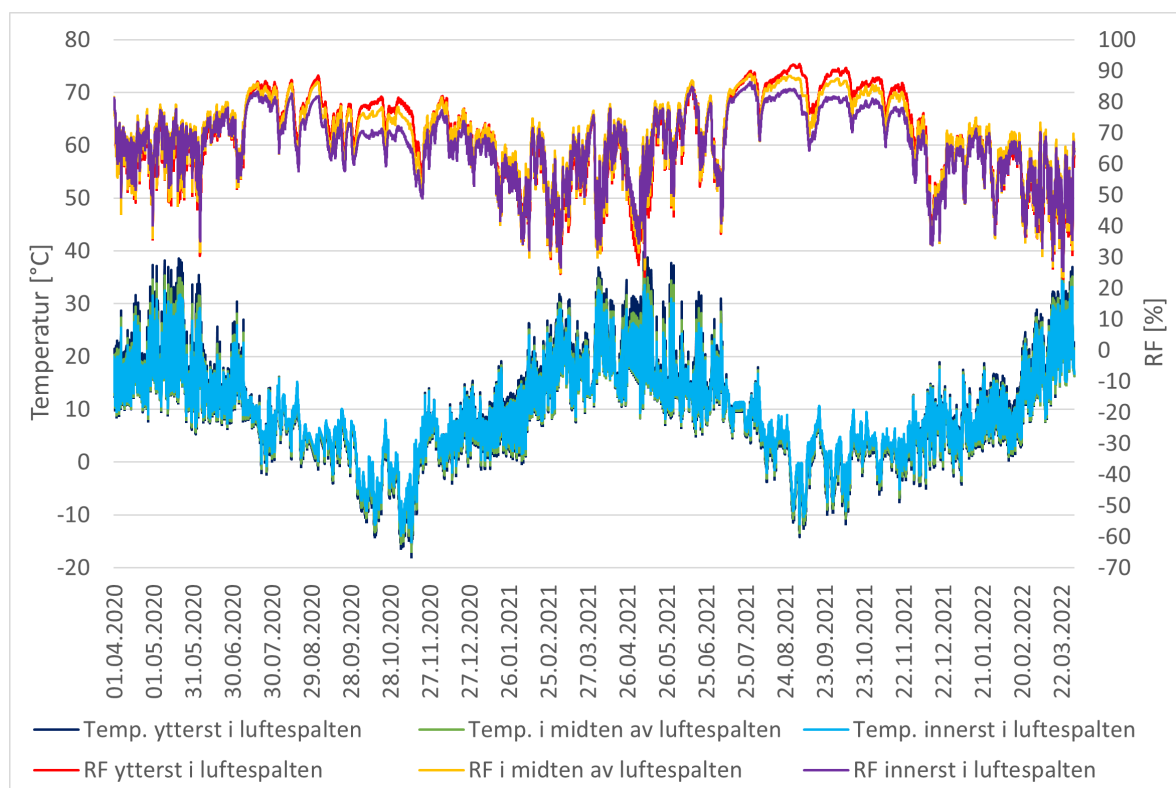


Figur 4.19: Differansene mellom temperaturer målt med termoelementer og fuktsensorer.

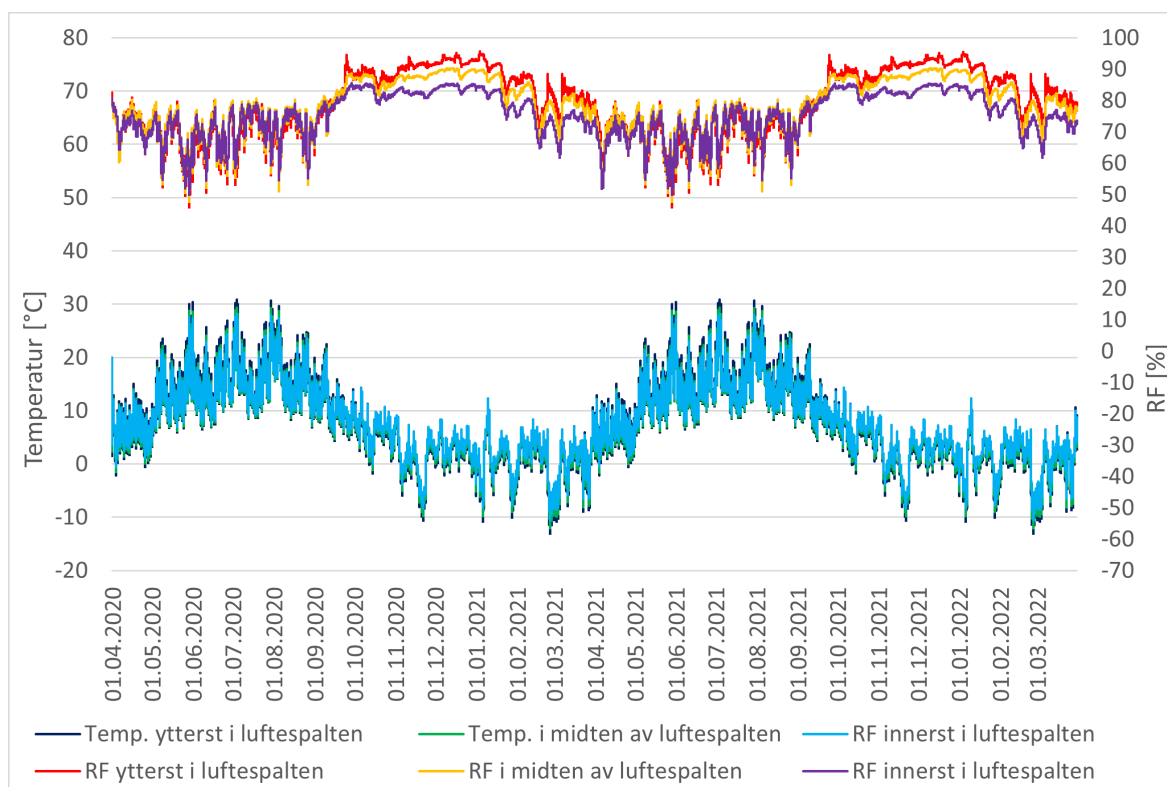
4.7 Fuktberregninger i WUFI Pro

4.7.1 Korrelasjon mellom simulert klima over luftespaltens tykkelse

Resultatene viser at luftespaltens temperatur og RF beregnet med WUFI Pro for innerste, midtre og ytterste del av luftespaltene ved samme posisjon i fasadene korrelerer 0,96-1,00 både for klimafilene fra ZEB Test Cell og for WUFI Pro sitt innebygde klima for Trondheim. Det vil si at kurveutviklingen over luftespaltens tykkelse i samme posisjon i veggen følger hverandre tett over måleperioden når det er benyttet samme klimafil i beregningene. Likevel beregner programmet tidvis ulike verdier over luftespaltens tykkelse både når det er benyttet egenkomponert klimafil og WUFI sin innebygde klimafil. Resultatene fra simuleringene av nord-fasaden med egenkomponert klimafil, vist i figur 4.20, og med WUFI sin innebygde klimafil, vist i figur 4.21, illustrere dette.



Figur 4.20: Simulert RF og temperatur over luftespaltens tykkelse i nord-fasaden på ZEB-laboratoriet med egenkomponert klimafil.



Figur 4.21: Simulert RF og temperatur over luftespaltens tykkelse i nord-fasaden på ZEB-laboratoriet med WUFI sin innebygde klimafil.

4.7.2 Korrelasjon mellom ulike orienteringer og den vertikale høyden i luftespalten

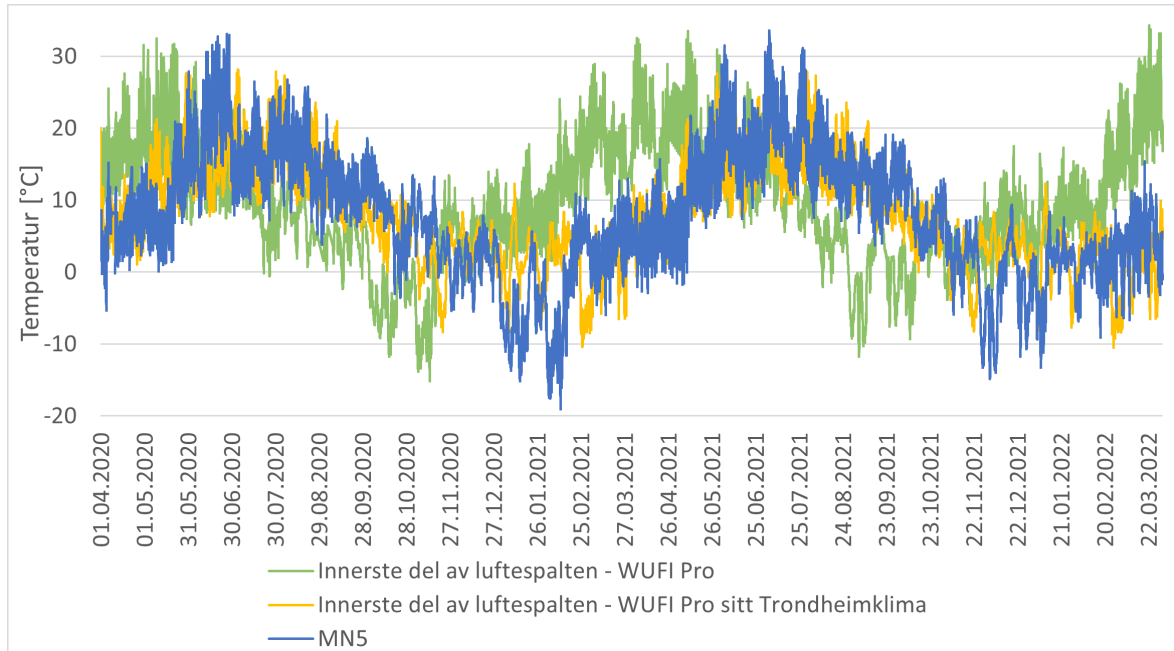
Resultatene fra simuleringer med egenkomponert klimafil fra ZEB Test Cell viser at nedre del av veggen opp til 10 m og øvre del av veggen mellom 10-20 m over bakken har en korrelasjon på 1,00. Beregningene med WUFI Pro viser med andre ord tilnærmet identiske klimaforhold i luftespaltene ved nedre og øvre del av fasadene. Resultatene viser en korrelasjon mellom de fire fasadene på 0,94-1,00 for den egenkomponerte klimafil basert på klimadata fra ZEB Test Cell. Korrelasjonen mellom sør- og nord-fasaden beregnet med WUFI Pro sitt innebygde klima for Trondheim er på 0,94-0,97.

4.7.3 Korrelasjon mellom simulert klima og klima målt med fuktsensorer

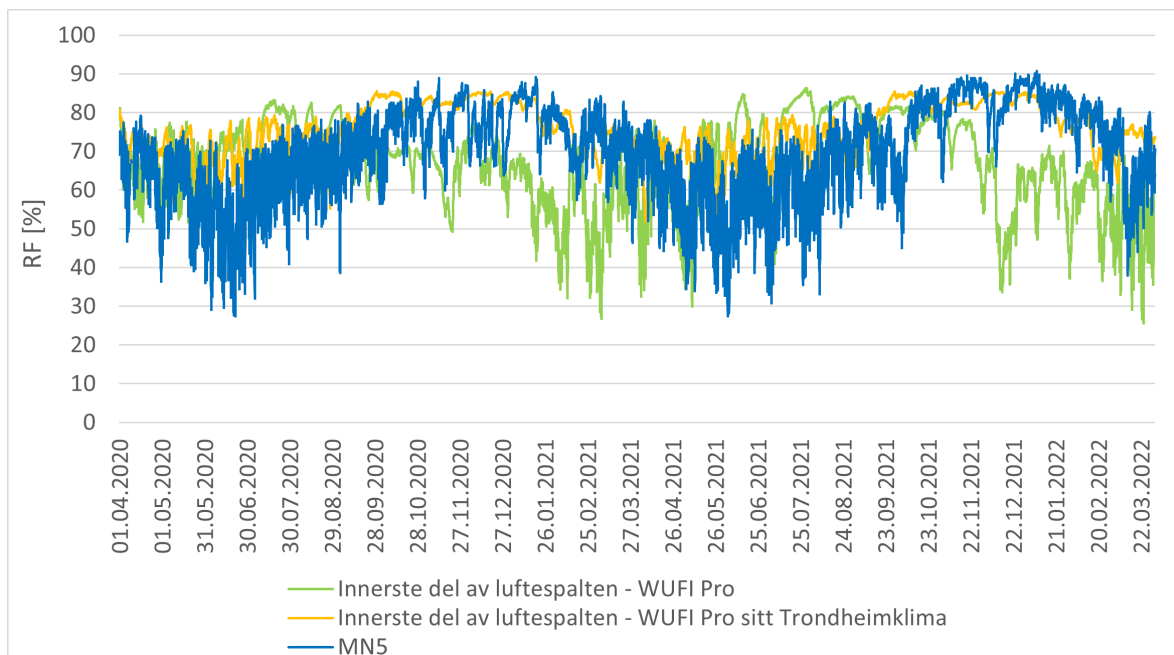
Korrelasjonen mellom klimaforhold i luftespaltene beregnet i WUFI Pro med egenkomponert klimafil utarbeidet fra målinger fra målestasjonen ved ZEB Test Cell og klimaforhold målt med fuktsensorer er mellom -0,107 og 0,133. Ved å benytte WUFI Pro sin innebygde klimafil for Trondheim er korrelasjonen med sensormålte klimaforhold i luftespaltene 0,440 og 0,745.

Illustrasjon av temperaturforhold i luftespalten simulert med egenkomponert klimafil fra ZEB Test Cell og med WUFI Pro sin innebygde klimafil for Trondheim og temperaturforhold målt

med fuktsensor er vist i figur 4.22. Tilsvarende er vist for RF i figur 4.23. Siden korrelasjonen over luftespaltens tykkelse er tett opp mot 1,00 er det valgt å kun presentere beregnede temperaturforhold for den inneste delen av luftespalten da dette tilsvarer posisjonen til fukt-sensorene. Det er også kun presentert med én sammenligning av sensorposisjonen MN5 som er plassert omtrent på midten av nord-fasadens høyde. Dette er fordi resultatene over luftespaltens høyde og orientering korrelerer sterkt.



Figur 4.22: Sensormålt temperatur og simulert temperatur for nord-fasaden på ZEB-laboratoriet med egenkomponert klimafil og WUFI Pro sin innebygde klimafil.



Figur 4.23: Sensormålt RF og simulert RF for nord-fasaden på ZEB-laboratoriet med egenkomponert klimafil og WUFI Pro sin innebygde klimafil.

4.8 Muggvekstanalyse i WUFI Mould Index VTT

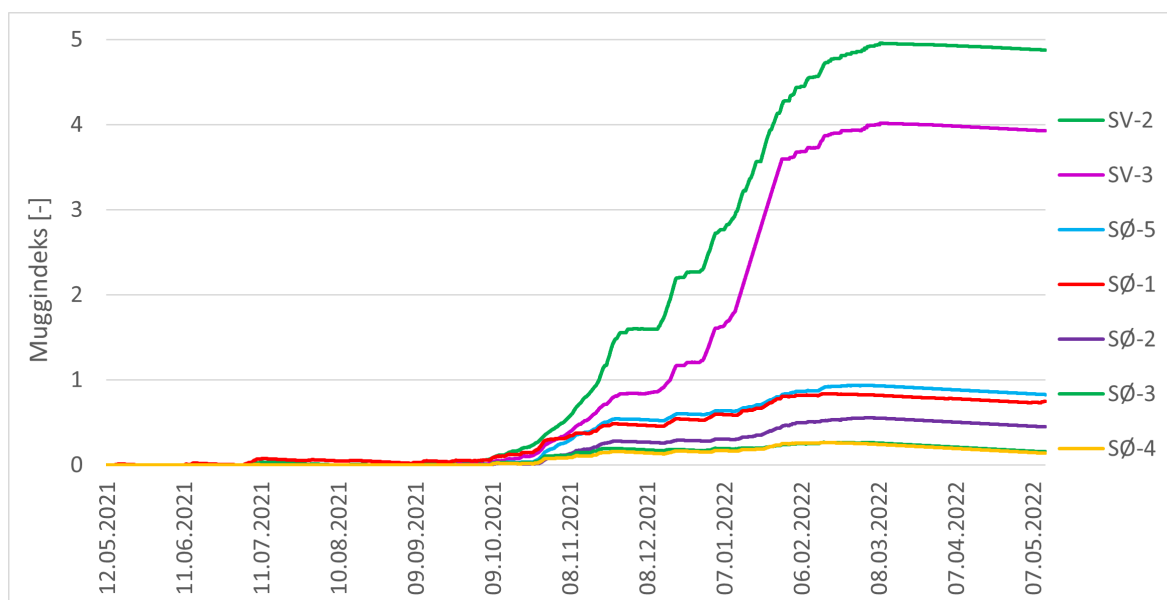
4.8.1 Muggvekstanalyse

Fjogstad-Hus

Årlig muggvekstindeks for Fjogstad-Hus er vist i tabell 4.11 med vurdering av verdiene etter trafikklysmodellen. Utviklingen over måleperioden er vist i figur 4.24. Resultatene viser at beregningene for sør-vest-fasaden skiller seg markant fra sør-øst-fasaden hva gjelder høye muggindeksverdier. Muggindeks for sensorene på sør-vest-fasaden øker jevnt og markant gjennom hele senhøsten og frem til midtvinters der verdiene holdes seg stabilt høye ut måleperioden.

Tabell 4.11: Årlig muggvekstindeks for Fjogstad-Hus.

Sensor	SØ-1	SØ-2	SØ-3	SØ-4	SØ-5	SV-2	SV-3
Årlig muggvekstindeks	0,84	0,55	0,27	0,26	0,94	4,95	4,02



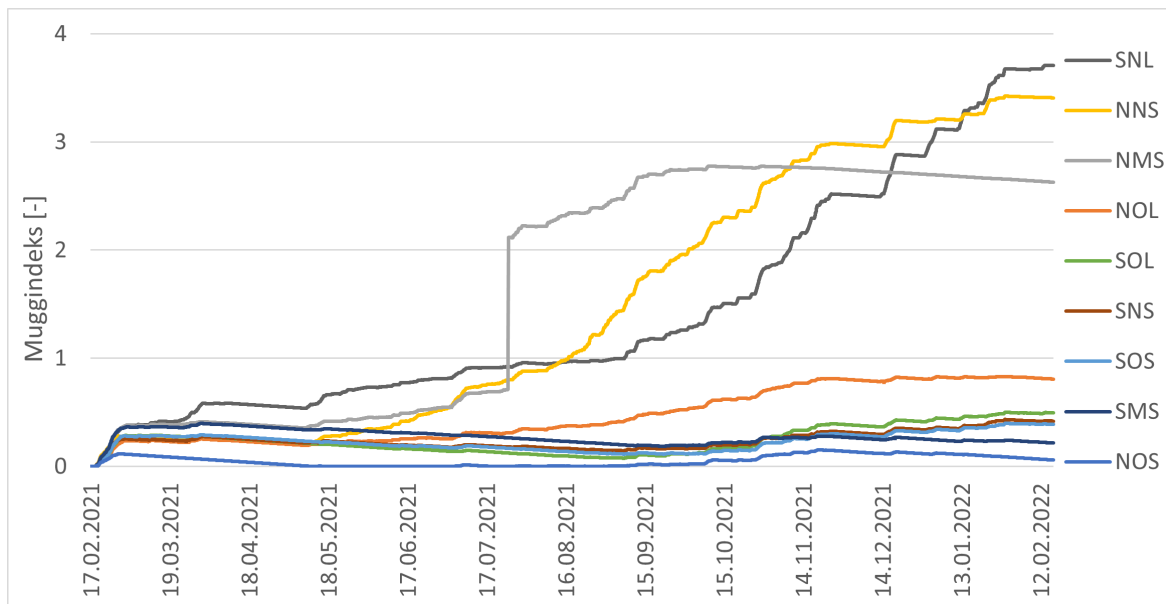
Figur 4.24: Utviklingen av muggindeks over måleperioden for luftespaltene i Fjogstad-Hus beregnet med WUFI Mould Index VTT.

Norgeshus

Årlig muggvekstindeks for Norgeshus er vist i tabell 4.12 med vurdering av verdiene etter trafikklysmodellen. Utviklingen over måleperioden er vist i Figur 4.25. Sensorposisjonene SNL, NNS og NMS skiller seg markant fra øvrige sensorposisjoner med sine høye muggindeksverdier. SNL og NNS har en relativt jevn økning i muggindeksverdi fra sommeren og ut måleperioden i midten av februar. For NMS viser målingene et markant hopp i muggindeksverdi i slutten av juli, og deretter relativt stabile og forholdsvis høye verdier ut måleperioden.

Tabell 4.12: Årlig muggvekstindeks for Norgeshus.

Sensor	NOS	NOL	NMS	NNS	SOS	SOL	SMS	SNS	SNL
Årlig muggvekstindeks	0,15	0,83	2,77	3,42	0,40	0,50	0,40	0,43	3,71



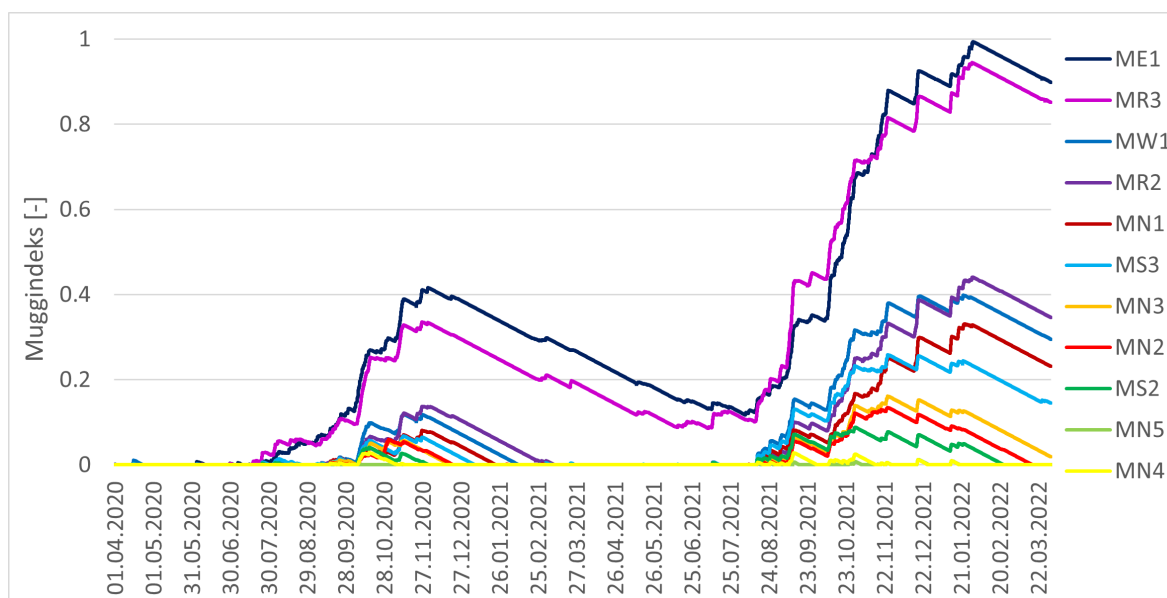
Figur 4.25: Utviklingen av muggindeks over måleperioden for luftespaltene i Norgeshus beregnet med WUFI Mould Index VTT.

ZEB-laboratoriet

Årlig muggvekstindeks for ZEB-laboratoriet er vist i tabell 4.13 med vurdering av verdiene etter trafikkllysmodellen. Utviklingen over måleperioden er vist i figur 4.26, der det fremkommer at beregnet muggindeks for vinteren andre året er forholdsmessig mye høyere enn vinteren første året. Selv om samtlige av målingene viser muggvekstindeks lavere enn 1, skiller sensorposisjonene ME1 i øst-fasaden og MR3 nederst i pulttaket seg markant fra resterende sensorposisjoner.

Tabell 4.13: Årlig muggvekstindeks for ZEB-laboratoriet.

Sensor	MN1	MN2	MN3	MN4	MN5	MS2	MS3	MW1	ME1	MR2	MR3
Årlig muggvekstindeks	0,33	0,14	0,16	0,03	0,01	0,09	0,26	0,40	0,99	0,44	0,95



Figur 4.26: Utviklingen av muggindeks over måleperioden for luftespaltene i ZEB-laboratoriet beregnet med WUFI Mould Index VTT.

4.8.2 Parameterstudie

Resultatene fra muggvekstanalysen viser at de to mest kritiske sensorposisjonene ved hvert av de tre case-byggene er som gjengitt i tabell 4.14.

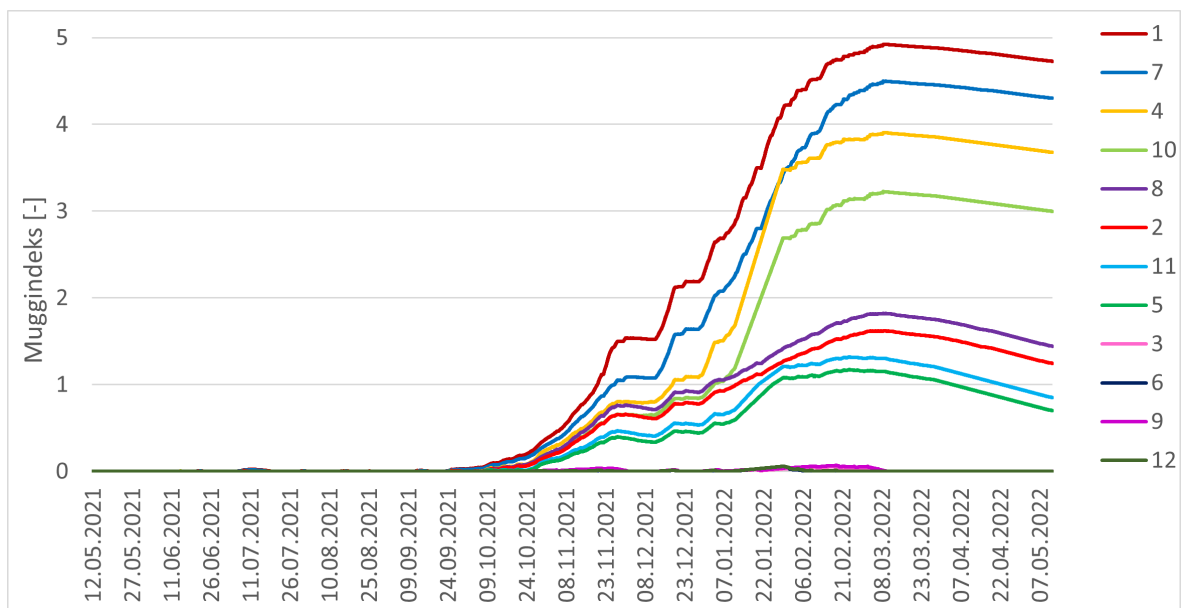
Tabell 4.14: Sensorposisjoner benyttet i parameterstudien.

Bygg	Sensorposisjon 1	Sensorposisjon 2
Fjogstad-Hus	SV-2	SV-3
Norgeshus	NNS	SNL
ZEB-laboratoriet	ME1	MR3

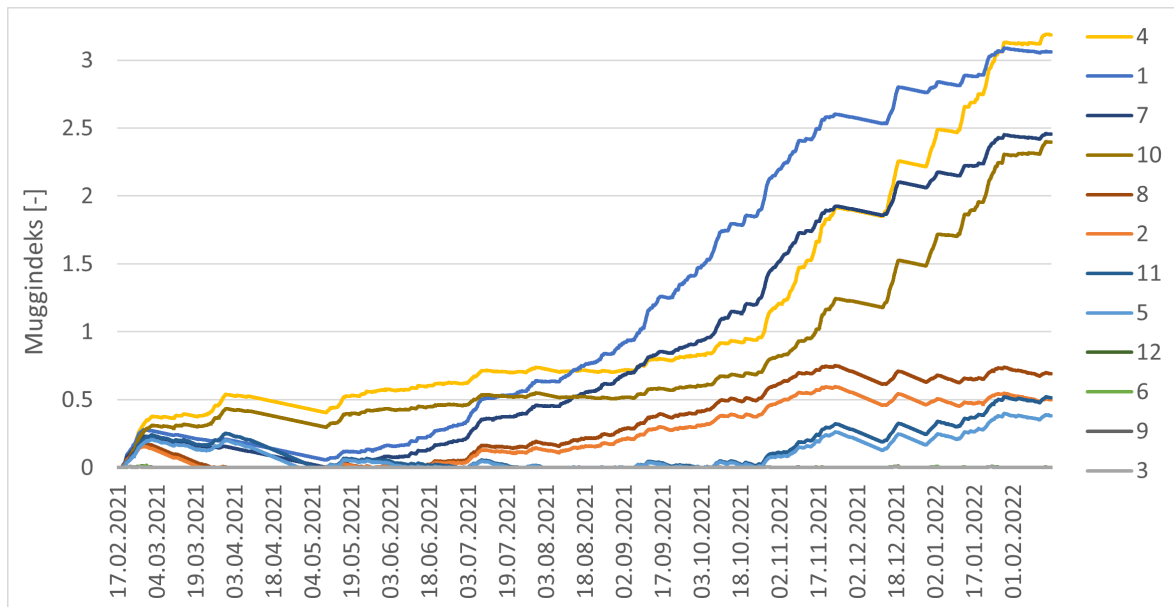
Resultatene fra parameterstudien utført for de to mest kritiske sensorposisjonene for hvert av de tre byggene er vist i tabell 4.15 med vurdering av verdiene etter trafikklysmo- dellens. Utviklingen over måleperiodene er vist i figur 4.27 for Fjogstad-Hus, figur 4.28 for Norgeshus og i figur 4.29 for ZEB-laboratoriet. Vær oppmerksom på ulike verdier langs y-aksen. Som tabell 4.15 viser er det for samtlige beregningstilfeller høyest muggindeks for klima fra Fjogstad-Hus, deretter for Norgeshus og lavest for ZEB-laboratoriet. Det er beregnet høye muggindeksver- dier for beregningstilfelle 1, 4, 7 og 10, som alle er kombinasjoner av materialparameterene antatt å være mest gunstige for muggvekst.

Tabell 4.15: Årlig muggvekstindekst fra parameterstudien for Fjogstad-Hus, Norgeshus og ZEB-laboratoriet.

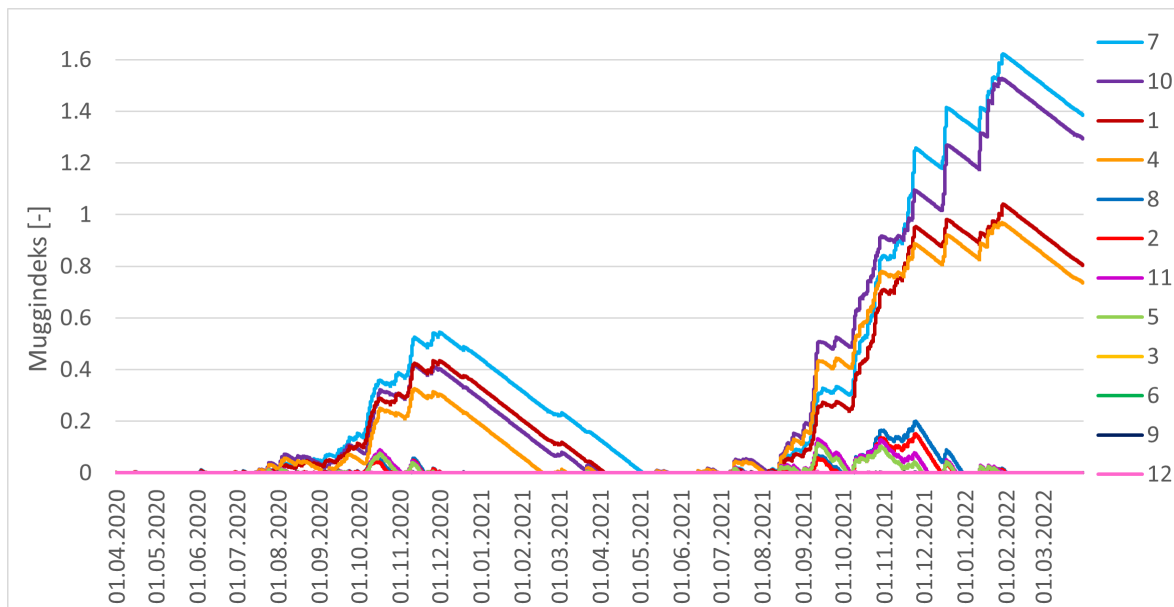
Beregningstilfeller	Fjogstad-Hus	Norgeshus	ZEB-laboratoriet
1	4,93	3,09	1,04
2	1,62	0,60	0,15
3	0,05	0,01	0,00
4	3,91	3,19	0,97
5	1,17	0,40	0,12
6	0,05	0,01	0,01
7	4,50	2,46	1,62
8	1,82	0,75	0,20
9	0,07	0,01	0,00
10	3,23	2,40	1,53
11	1,32	0,52	0,13
12	0,06	0,02	0,01



Figur 4.27: Parameterstudie av muggindeks for luftespaltene i Fjogstad-Hus beregnet med WUFI Mould Index VTT.



Figur 4.28: Parameterstudie av muggindeks for luftespaltene i Norgeshus beregnet med WUFI Mould Index VTT.



Figur 4.29: Parameterstudie av muggindeks for luftespaltene i ZEB-laboratoriet beregnet med WUFI Mould Index VTT.

4.9 Sammenstilling av ulike muggvekstmodeller

Andelen av tiden sensorene måler klimaforhold over øvre og nedre kurvesammenstilling, utviklet som beskrevet i seksjon 3.9, er vist i tabell 4.16 for Fjogstad-Hus, tabell 4.17 for Norgeshus og tabell 4.18 for ZEB-laboratoriet. Sensorposisjonene som viser de mest kritiske klimaforholdene i luftespaltene basert på kurvesammenstillingene er SV-2 for Fjogstad-Hus, NNS for Norgeshus, ME1 for fasaden i ZEB-laboratoriet og MR3 for taket i ZEB-laboratoriet. Figur 4.30 viser klimaforholdene til disse fire posisjonene med punktmålinger som funksjon av temperatur og RF. I tillegg er trendlinjene for sensorenes målinger vist i striplede linjer, samt både øvre og nedre kurvesammenstilling. Tilsvarende illustrasjoner for de resterende sensorene er i sin helhet vist i vedlegg F.

Tabell 4.16: Andel av tiden der målingene fra Fjogstad-Hus er over nedre og øvre kurvesammenstilling.

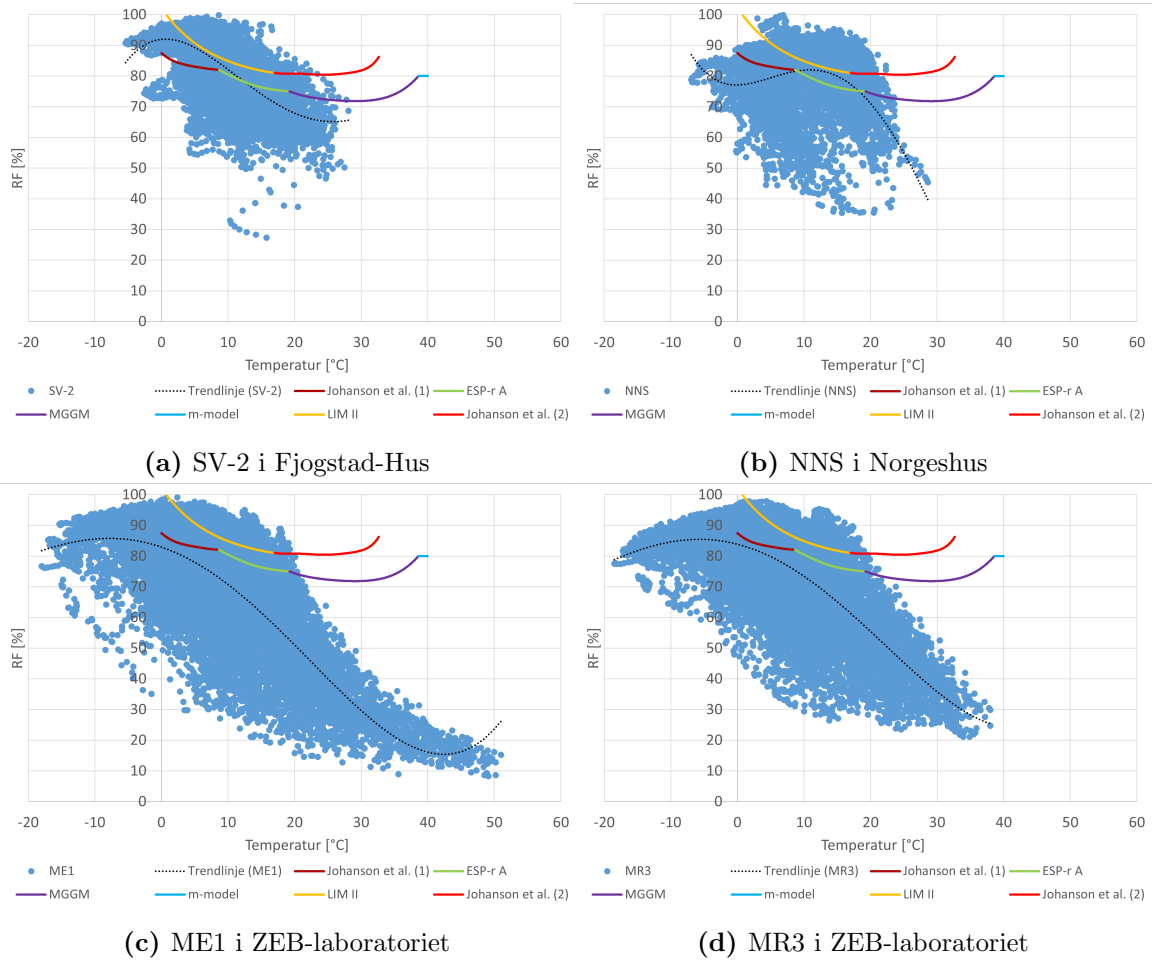
	SØ-1	SØ-2	SØ-3	SØ-4	SØ-5	SV-2	SV-3
Nedre kurve	32%	31%	19%	21%	30%	52%	39%
Øvre kurve	17%	8%	6%	5%	13%	37%	22%

Tabell 4.17: Andel av tiden der målingene fra Norgeshus er over nedre og øvre kurvesammenstilling.

	NOS	NOL	NMS	NNS	SOS	SOL	SMS	SNS	SNL
Nedre kurve	24%	40%	38%	57%	29%	31%	22%	31%	55%
Øvre kurve	8%	18%	23%	36%	11%	12%	8%	12%	33%

Tabell 4.18: Andel av tiden der målingene fra ZEB-laboratoriet er over nedre og øvre kurvesammenstilling.

	MN1	MN2	MN3	MN4	MN5	MS2	MS3	MW1	ME1	MR2	MR3
Nedre kurve	22%	19%	21%	18%	14%	16%	20%	23%	26%	22%	31%
Øvre kurve	3%	2%	3%	1%	0%	2%	4%	5%	9%	4%	9%



Figur 4.30: Punktmålingene som funksjon av temperatur og RF med tilhørende trendlinje sammen med øvre og nedre kurvesammenstilling for sensorposisjonene SV-2, NNS, ME1 og MR3.

4.10 Kritisk RF

Kritisk RF er beregnet som omtalt i seksjon 3.10. Andelen av tiden der målte verdier for RF i luftespartene er høyere enn kritisk RF er vist i tabell 4.19 for Fjogstad-Hus, tabell 4.20 for Norgeshus og tabell 4.21 for ZEB-laboratoriet. For de to sensorposisjonene med størst andel av tiden over kritisk RF er differansene mellom målt RF og den kritiske RF over måleperioden vist i figur 4.31 for Fjogstad-Hus, figur 4.32 for Norgeshus og figur 4.33 for ZEB-laboratoriet. Positiv verdi tilsier at målt RF er høyere enn kritisk RF.

Tabell 4.19: Andelen av tider der RF målt i luftespartene i Fjogstad-Hus er høyere enn beregnet kritisk RF.

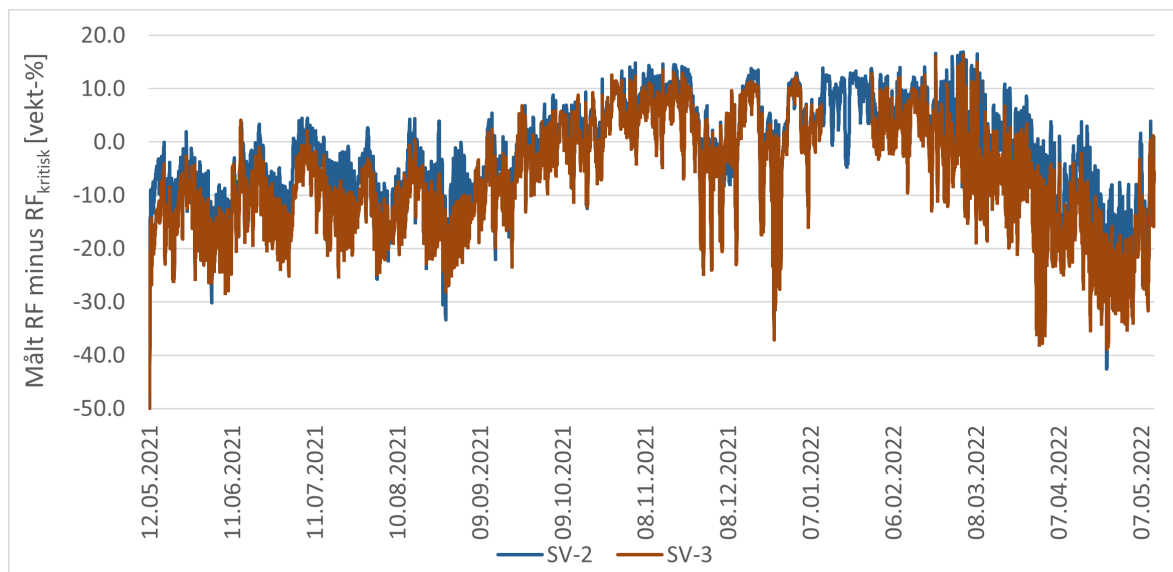
Sensor	SØ-1	SØ-2	SØ-3	SØ-4	SØ-5	SV-2	SV-3
Andel av tiden	19%	14%	10%	10%	17%	40%	27%

Tabell 4.20: Andelen av tider der RF målt i luftespartene i Norgeshus er høyere enn beregnet kritisk RF.

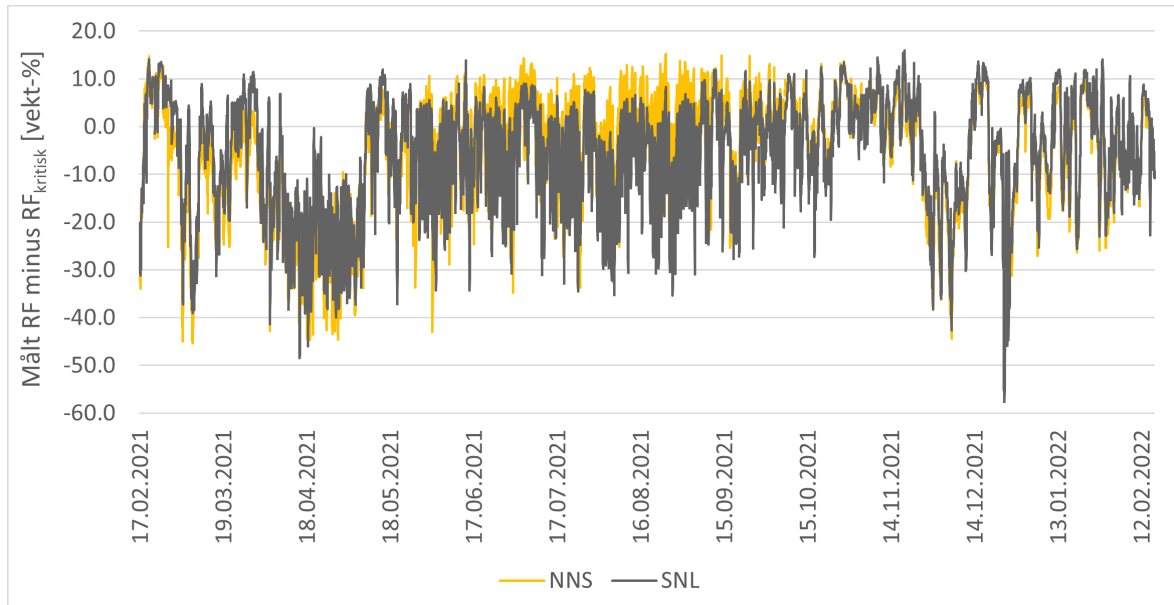
Sensor	NOS	NOL	NMS	NNS	SOS	SOL	SMS	SNS	SNL
Andel av tiden	11%	25%	27%	41%	16%	17%	12%	17%	38%

Tabell 4.21: Andelen av tider der RF målt i luftespartene i ZEB-laboratoriet er høyere enn beregnet kritisk RF.

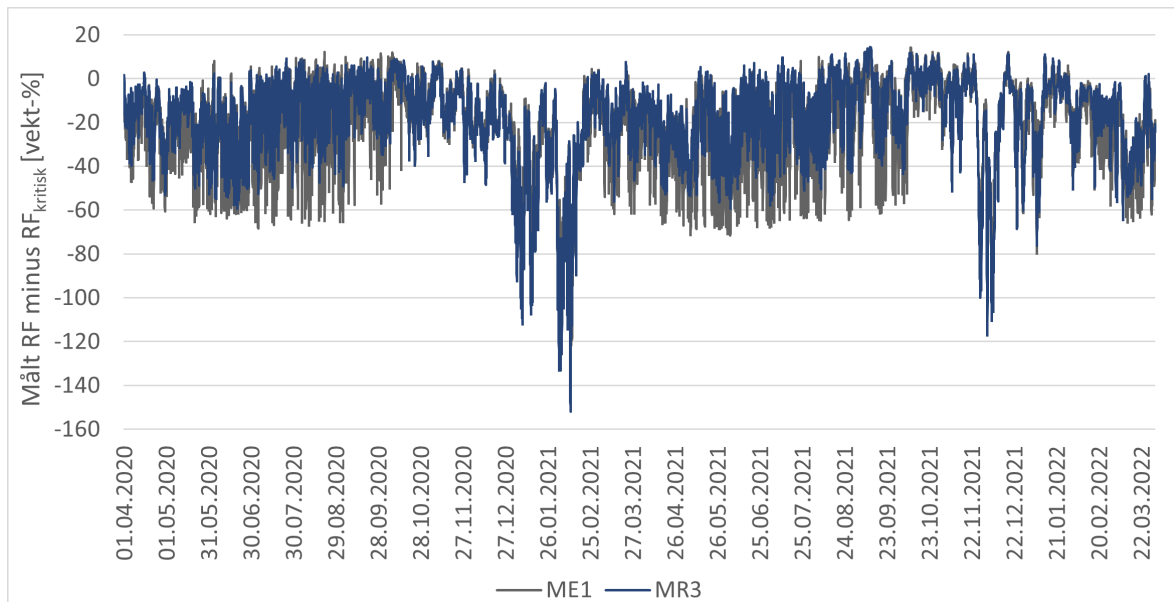
Sensor	MN1	MN2	MN3	MN4	MN5	MS2	MS3	MW1	ME1	MR2	MR3
Andel av tiden	7%	4%	6%	3%	1%	4%	6%	7%	12%	7%	12%



Figur 4.31: Differansen mellom målt RF og kritisk RF over måleperioden for Fjogstad-Hus.



Figur 4.32: Differansen mellom målt RF og kritisk RF over måleperioden for Norgeshus.

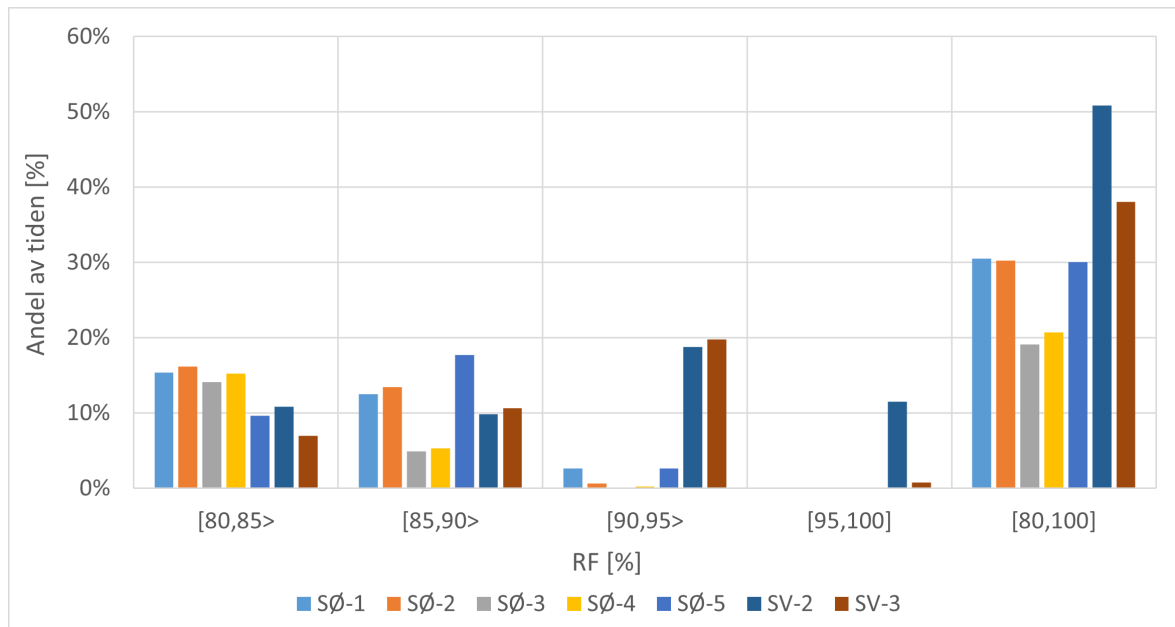


Figur 4.33: Differansen mellom målt RF og kritisk RF over måleperioden for ZEB-laboratoriet.

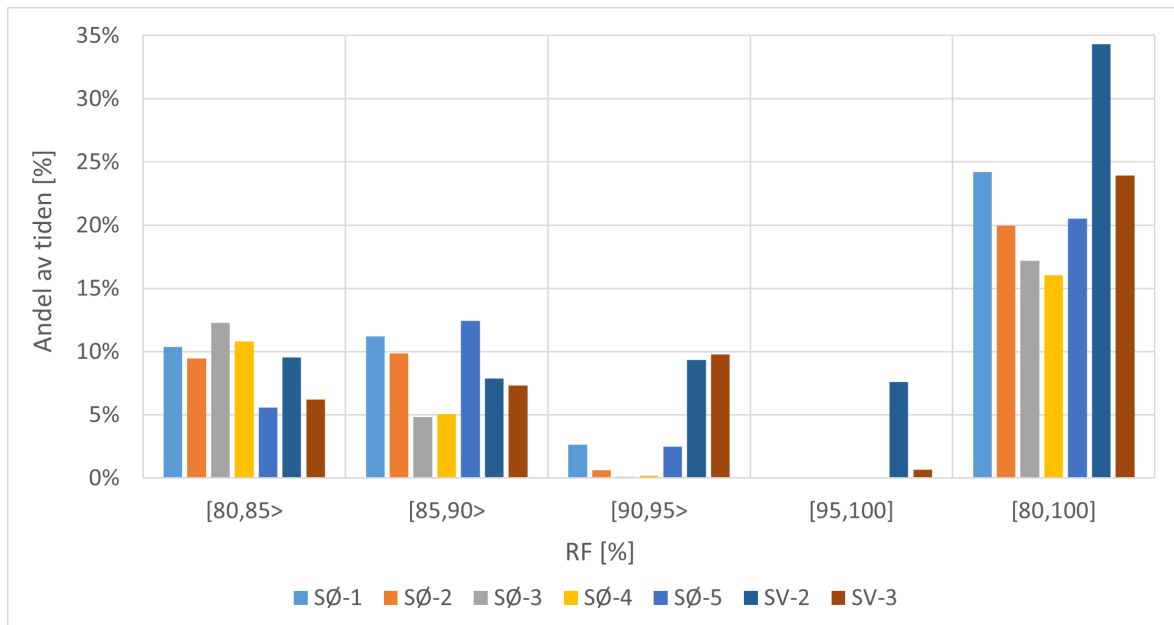
4.11 Konstante grenseverdier for muggvekstrisiko

Som beskrevet i seksjon 3.11 tar de konstante grenseverdiene enten hensyn til målte verdier for både temperatur og RF eller bare for RF. Andelen av tiden der sensorene måler kritiske forhold for kombinasjonen av temperatur og RF basert på ulike konstante grensverdier er vist i figur 4.34 og figur 4.35 for Fjogstad-Hus, figur 4.36 og figur 4.37 for Norgeshus og figur 4.38 og figur 4.39 for ZEB-laboratoriet. Andelen av tiden der målte verdier for RF overstiger de konstante grenseverdiene for RF uten at temperaturen blir tatt hensyn til er vist i figur 4.40 for Fjogstad-Hus, figur 4.41 for Norgeshus og figur 4.42 for ZEB-laboratoriet.

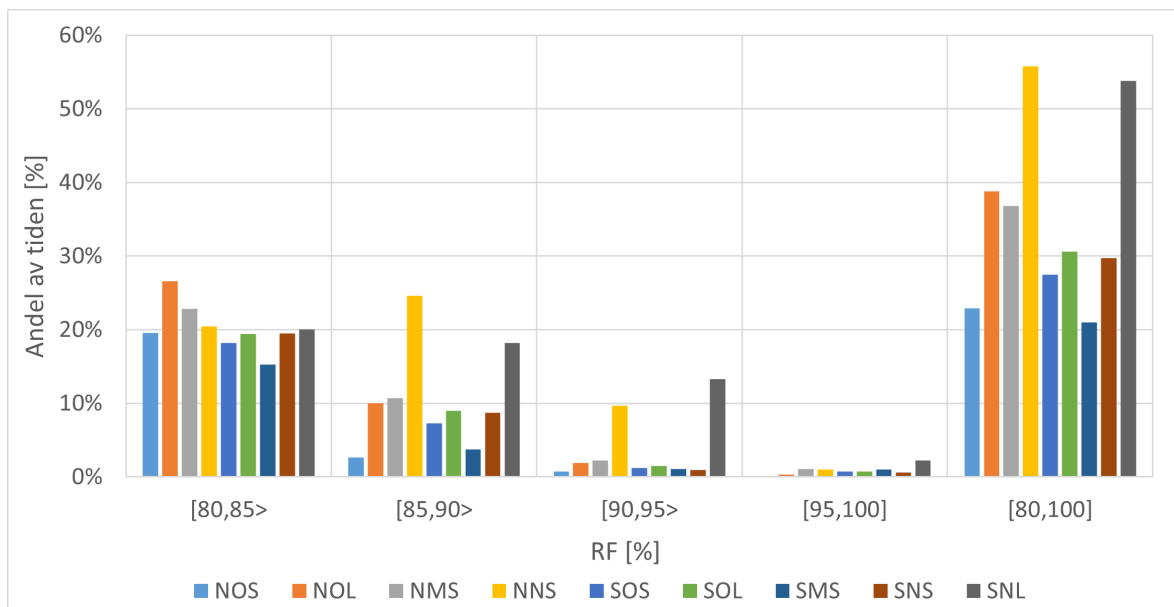
For Fjogstad-Hus viser figurene at fasaden mot sør-vest skiller seg markant fra fasaden mot sør-øst hva gjelder høy andel av tiden med høye verdier for RF, både når temperaturen er over 0°C og 5°C og når temperaturparameteren ikke er inkludert. På tilsvarende vis skiller sensorposisjonene NNS og SNL seg ut fra øvrige sensorposisjoner i Norgeshus. For ZEB-laboratoriet skiller sensoren MN1 seg litt ut fra øvrige sensorposisjoner i nord-fasaden med de høyeste verdiene for RF. Sensorposisjonene MR3 nederst i taket og ME1 i øst-fasaden har ved en større andel av tiden kritiske forhold enn øvrige sensorposisjoner i ZEB-laboratoriet.



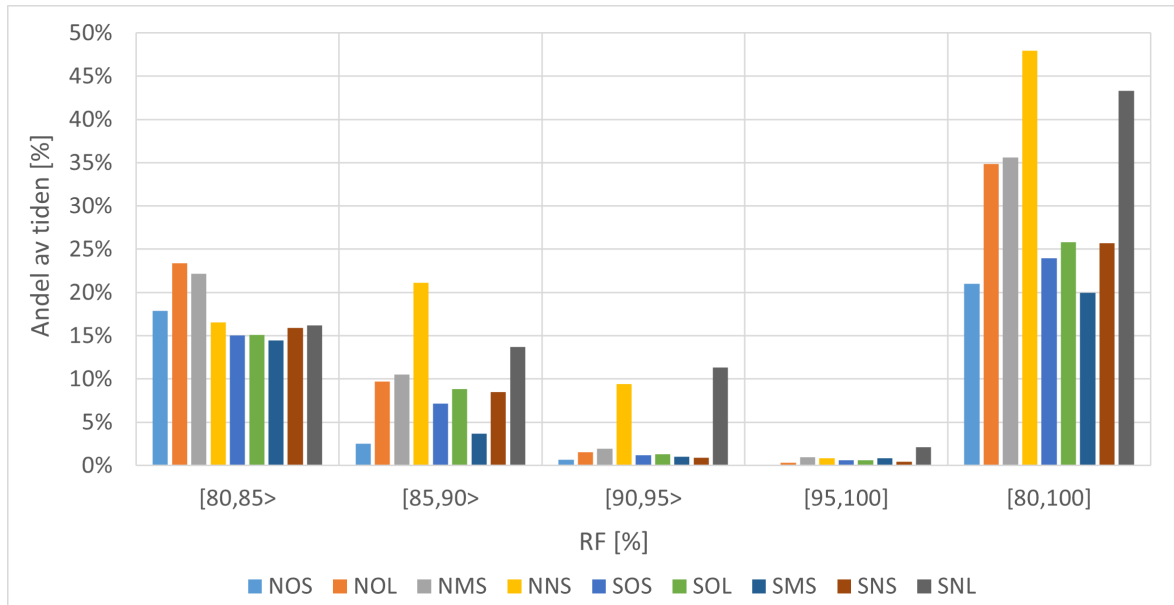
Figur 4.34: Andelen av tiden temperaturen er $\geq 0^\circ\text{C}$ og RF møter kritiske grenseverdier i luftespaltene i Fjogstad-Hus.



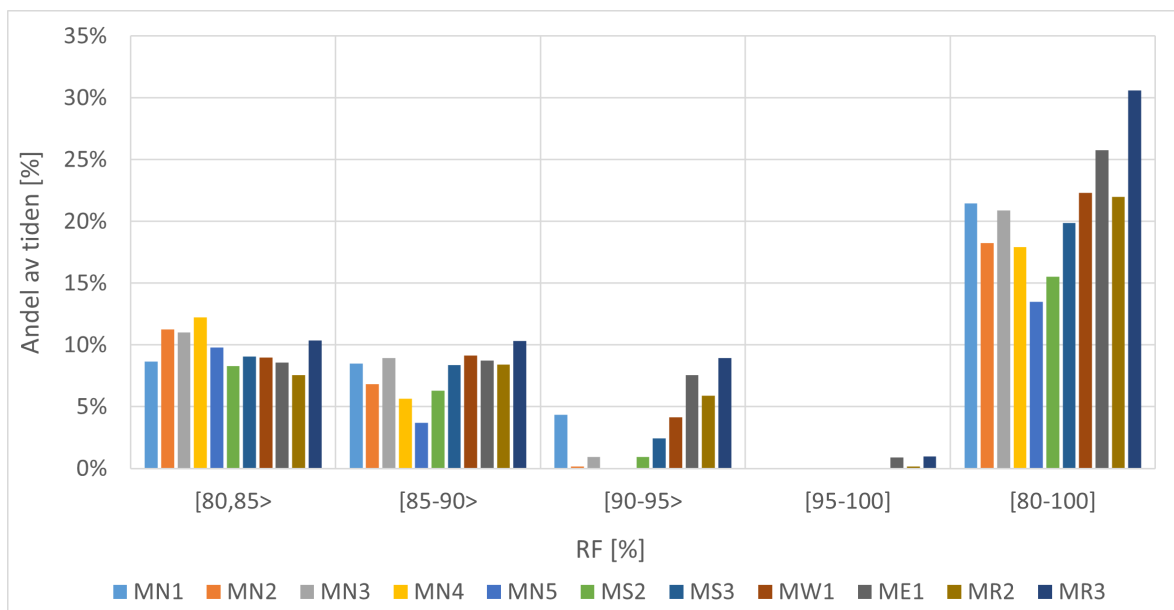
Figur 4.35: Andelen av tiden temperaturen er $\geq 5^\circ\text{C}$ og RF møter kritiske grenseverdier i luftespaltene i Fjogstad-Hus.



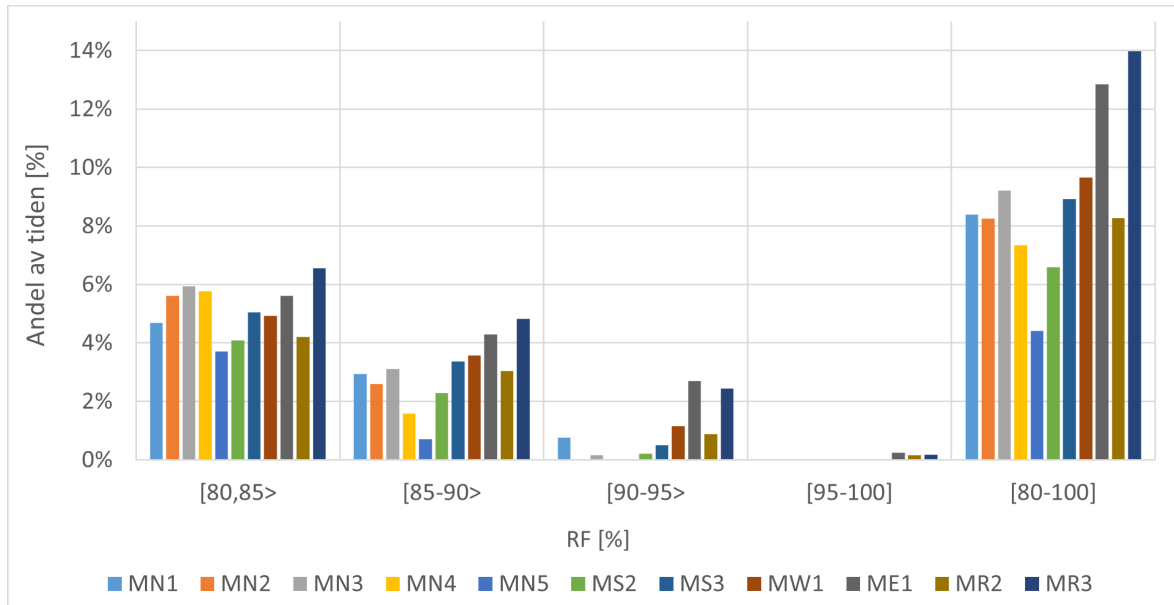
Figur 4.36: Andelen av tiden temperaturen er $\geq 0^\circ\text{C}$ og RF møter kritiske grenseverdier i luftespaltene i Norgeshus.



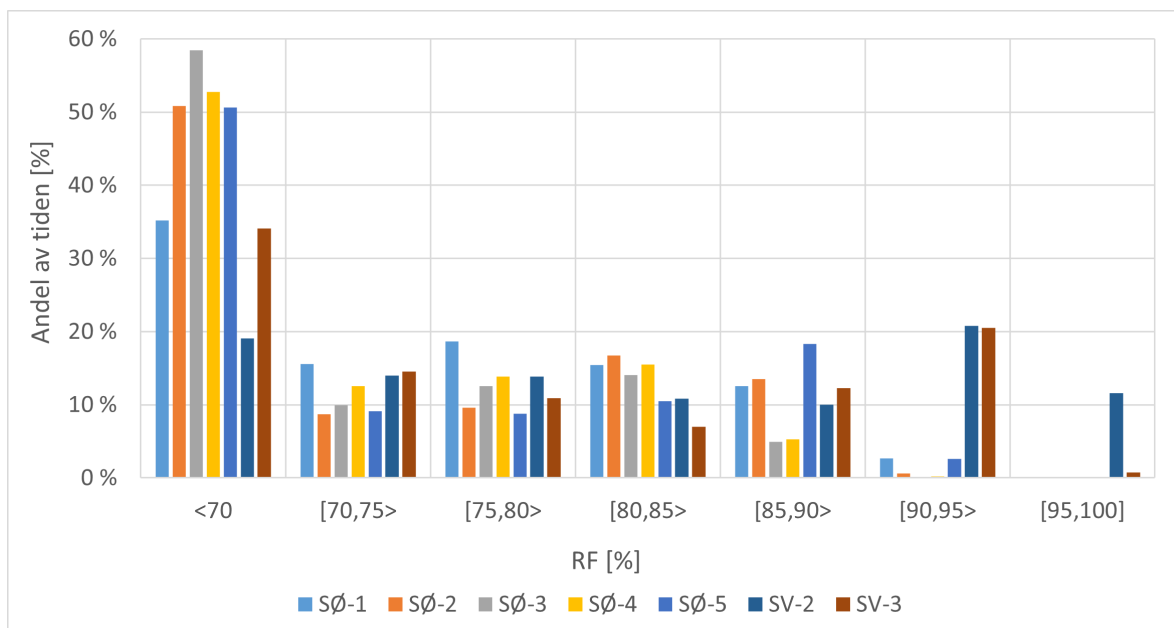
Figur 4.37: Andelen av tiden temperaturen er $\geq 5^\circ\text{C}$ og RF møter kritiske grenseverdier i luftespaltene i Norgeshus.



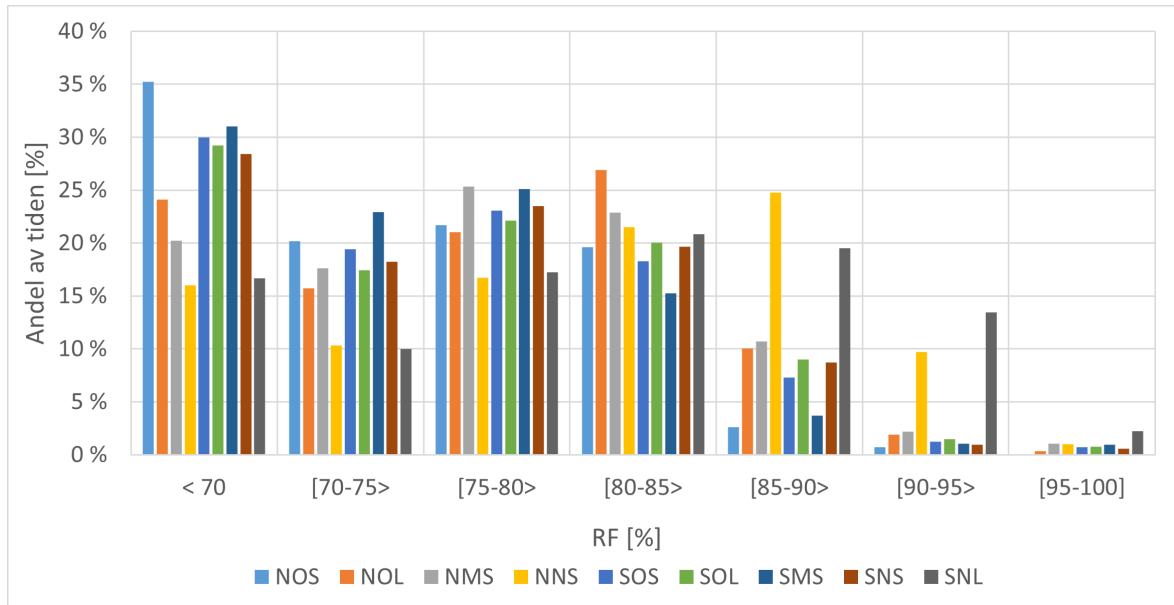
Figur 4.38: Andelen av tiden temperaturen er $\geq 0^\circ\text{C}$ og RF møter kritiske grenseverdier i luftespaltene i ZEB-laboratoriet.



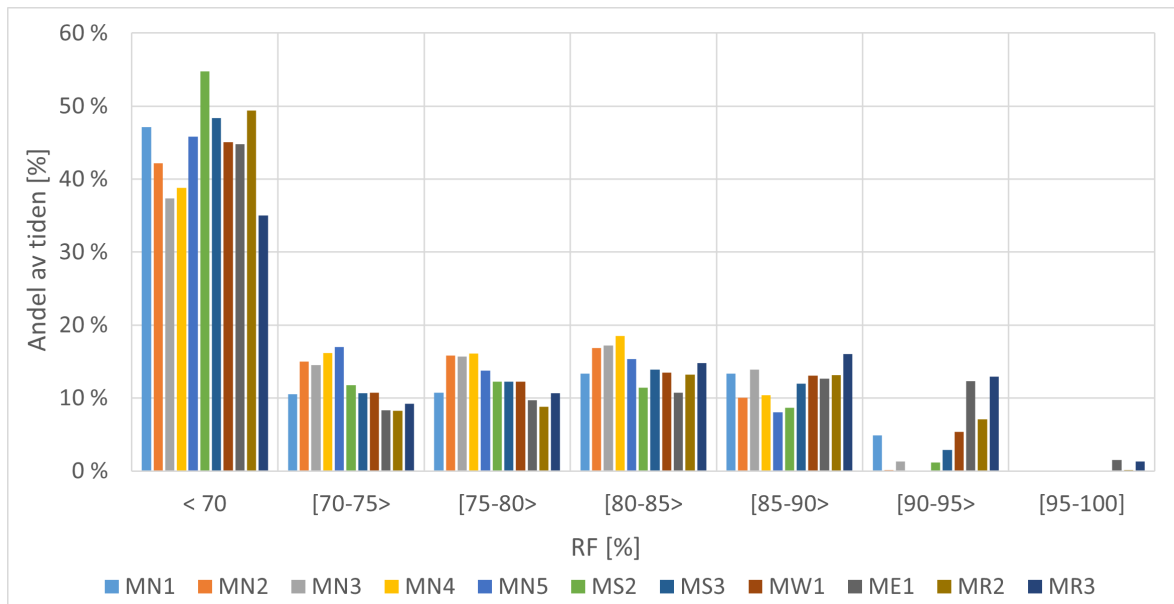
Figur 4.39: Andelen av tiden temperaturen er $\geq 5^{\circ}\text{C}$ og RF møter kritiske grenseverdier i luftespalte i ZEB-laboratoriet.



Figur 4.40: Andelen av tiden RF i luftespalter i Fjogstad-Hus møter kritiske grenseverdier.



Figur 4.41: Andelen av tiden RF i luftespalter i Norgeshus møter kritiske grenseverdier.

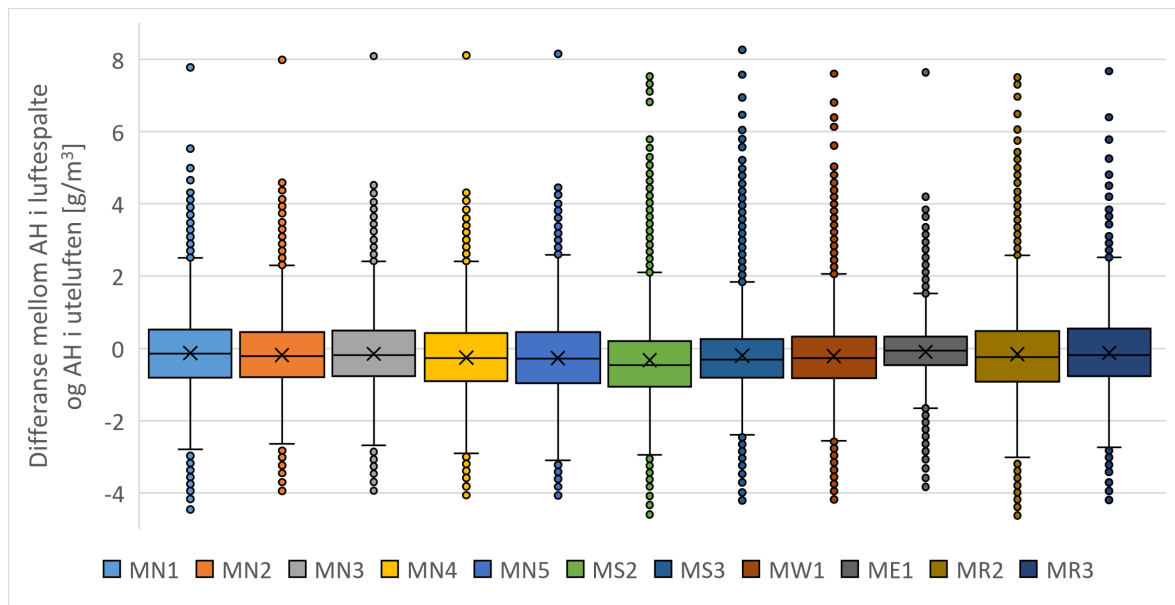


Figur 4.42: Andelen av tiden RF i luftespalter i ZEB-laboratoriet møter kritiske grenseverdier.

4.12 Kondenspotensialet

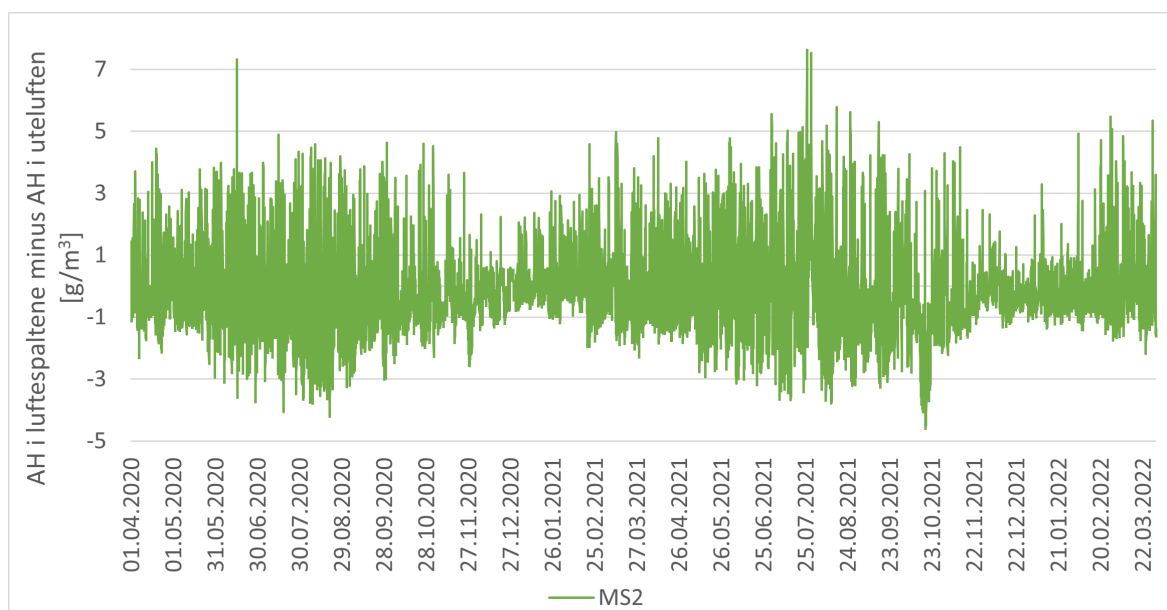
4.12.1 Sammenligning av AH i luftespalte og AH i uteluft

Seksjon 3.12.2 beskriver hvordan AH i luftespalten er sammenlignet med AH i uteluften. Sensormålte verdier for AH i [g/kg] i luftespaltene i ZEB-laboratoriet er omregnet til [g/m³] med en kurvetilpasning som beskrevet i seksjon 3.12.2. Differansen mellom disse omregnede verdiene og verdiene for AH i uteluften er vist for de 11 sensorene i ZEB-laboratoriet i et box-diagram i figur 4.43. Positive differanseverdier tilsier at AH i luftespalten er høyere enn AH i uteluften. En beskrivelse av hvordan et box-diagram presenterer data er vist i seksjon 3.6.



Figur 4.43: Differansen mellom sensormålt AH i luftespaltene og AH i uteluften.

Som figur 4.43 viser er gjennomsnittlig differanse for samtlige sensorer rett under null. Det vil si at AH for uteluften i gjennomsnitt er litt høyere enn for luftespaltene. Det fremkommer også at spredningen i målingene er store, samt at det er en del målinger som viser verdier utenfor spredning av utvalgsvariabilitet. Differansene mellom AH i luftespalter og i uteluften er størst om sommeren og minst om vinteren. For å illustrere hvordan denne differansen typisk varierer over måleperioden er differansen målt med sensoren MS2 øverst i sør-fasaden presentert i figur 4.44. Målingene av AH i luftespaltene og AH i uteluften korrelerer relativt godt, som vist i tabell 4.22.



Figur 4.44: Differansen mellom AH i luftespalten målt med fuktsensoren MS2 og AH i uteluften vist over måleperioden.

Tabell 4.22: Korrelasjonen mellom AH i luftespaltene og AH i uteluften.

Sensor	MN1	MN2	MN3	MN4	MN5	MS2	MS3	MW1	ME1	MR2	MR3
Korrelasjon	0,907	0,935	0,933	0,927	0,916	0,890	0,912	0,914	0,966	0,883	0,928

Når AH i luftespalten er høyere enn AH i uteluften, er den største differansen mellom uteluften og luften i luftespalten i 42% av tiden i målt ved sensoren ME1 i luftespalte i øst-fasaden. De resterende sensorene står for tilsvarende største differanseverdi 0-11% av tiden. Største differanse i AH er 8,26 g/m³, målt ved sensor MS3 26.07.2021 som en gjennomsnittsverdi for punktmålingene målt mellom klokka 13:00 og 14:00. Ved dette punktet er AH i luftespalten 18,1 g/m³ og AH i uteluften 9,9 g/m³.

Når AH i luftespalten er lavere enn AH i uteluften, er den største differansen mellom uteluften og luften i luftespalten i 31% av tiden i målt ved sensoren MS2 i luftespalte i sør-fasaden. De resterende sensorene står for tilsvarende største differanseverdi 0-17% av tiden. Største differanse i AH er -4,62 g/m³, målt ved sensor MR2 20.08.2020 som en gjennomsnittsverdi for punktmålingene målt mellom klokka 22:00 og 23:00. Ved dette punktet er AH i luftespalten 10,2 g/m³ og AH i uteluften 14,8 g/m³.

4.12.2 Kondenspotensialet

Resultatene av kondenspotensialet beregnet med de ulike metodene omtalt i seksjon 3.12 er presentert i tabell 4.23 og tabell 4.24. Verdiene i tabellene gjengir andelen av tiden der målingene viser potensialet for kondens ut ifra kriteriene til de ulike metodene.

Tabell 4.23: Andel av tiden de klimatiske forholdene regnes som kritiske basert på ulike metoder. Temperatur i luftespalter er målt med fuktsensorer.

Sensorer	1.1 $T \leq T_{ext}$	2.1 $T \leq T_{D,ext}$	3.1 $T \leq T_D$	4.1 $CP_{i,forenklet}$	5.1 $CP_{i,AH,ext}$	6.1 $CP_{i,AH}$
MN1	29%	9%	0%	0%	10%	0%
MN2	37%	7%	0%	0%	9%	0%
MN3	46%	10%	0%	0%	12%	0%
MN4	48%	12%	0%	0%	15%	0%
MN5	40%	10%	0%	0%	13%	0%
MS2	40%	13%	0%	0%	15%	0%
MS3	33%	9%	0%	0%	11%	0%
MW1	41%	12%	0%	0%	14%	0%
ME1	31%	7%	1%	0%	9%	2%
MR2	32%	12%	0%	0%	13%	0%
MR3	49%	20%	0%	0%	21%	1%

Tabell 4.24: Andel av tiden de klimatiske forholdene regnes som kritiske basert på ulike metoder. Overflatetemperatur i luftespalter er målt med termoelementer.

Sensorer	1.2 $T \leq T_{ext}$	2.2 $T \leq T_{D,ext}$	3.2 $T \leq T_D$	4.2 $CP_{i,forenklet}$	5.2 $CP_{i,AH,ext}$	6.2 $CP_{i,AH}$
TR1-3	60%	28%	8%	0%	29%	16%
TR2-3	62%	31%	13%	0%	32%	21%
TR3-3	68%	36%	21%	0%	37%	30%

5 Diskusjon

Resultatene til forskningsspørsmål 1, *Hvordan omtaler forskningslitteraturen mikroklimaet i luftespalter?*, diskuteres i sin helhet i artikkelen *Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates* (Ingebretsen, Andenæs og Kvande, 2022) i vedlegg D.

Resultatene til forskningsspørsmål 2, *Hvilke temperatur- og fuktforhold kan forventes i luftespalter bak fasadekledning og taktekning?*, og forskningsspørsmål 3, *Hva er risikoen for muggvekst i en totrinnstetning?*, diskuteres hovedsakelig i artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* i vedlegg E. Resultatene som ikke presenteres og diskuteres i artikkelen diskuteres i denne seksjonen. Dette inkluderer utviklingen av trefukt over måleperiodene, undersøkelsen av temperaturdifferansen over luftespaltens tykkelse, undersøkelsen av treffsikkerheten til fuktberegningsprogrammet WUFI Pro, parameterstudien utført med WUFI Mould Index VTT og undersøkelsen av kondenspotensialet.

5.1 Målt trefukt sett over måleperiodene

Resultatene av trefukten i Fjogstad-Hus viser at sensorposisjonen SV-2 skiller seg tydelig fra øvrige sensorposisjoner med sine høye verdier. Målingene viser en kraftig økning i trefukt i midten av november. I utgangspunktet kan det tenkes at slike hopp i trefukten kan skyldes ekstra vanninntrengning som treffer elektrodene i fuktsensorene, og dermed gir en unaturlig høy verdi som ikke nødvendigvis representerer den generelle trefukten. Dette er trolig tilfelle ved de to hoppene i trefuktnivåer ved sensorposisjonen SØ-5 og SØ-1 i slutten av februar. Etter disse kortvarige ekstremt høye verdiene i trefukt reduseres måleverdiene igjen og stabilises tilsvarende målingene før hoppene. Dette er ikke tilfelle ved sensorposisjonen SV-2. Etter det nevnte økningen i midten av november stabiliseres målingene på et veldig høyt nivå istedenfor å reduseres til nivået før økningen. Disse høye verdiene måles over omtrent 18 uker helt til trefukten reduseres jevnt utover våren.

For Norgeshus viser utviklingen over måleperioden at sensorene trolig har målt en del byggfukt i starten av måleperioden. Trefukten reduseres utover våren, og viser i slutten av april at trevirket er godt uttørket. Deretter viser målingene en noe uventet økning i trefukten i første halvdel av mai, som videre holdes stabilt gjennom sommeren og starten av høsten. At trefukten øker utover senhøsten og vinteren er å forvente, men for Norgeshus gir denne økningen at noen av sensorposisjonene måler trefukt over 20 vektprosent over lengre perioder gjennom vinteren. Dette kan være ugunstig med tanke på organisk vekst, spesielt siden Sørvestlandet har et relativt mildt klima også på vinteren.

For ZEB-laboratoriet viser utviklingen over måleperioden på to år store variasjoner i trefukt mellom sommer og vinter. Spesielt for sensorene i taket som måler omtrent 15 vektprosent i differanse mellom det svært fuktige trevirket om vintrene og det tørre trevirke om somrene.

Det er også en tydelig forskjell mellom fasadene, der det særlig for den andre vinteren i måleperioden er målt vesentlig høyere trefukt for fasadene mot øst, vest og sør enn for fasaden mot nord. Dette kan skyldes at fasadene mot øst, vest og sør har kledning av BIPV som både er montert med åpne fuger og ikke har kondensopptaksevne, mens fasaden mot nord hovedsakelig har kledning av trevirke som har kondensopptaksevne.

Det er viktig å poengtere at treverk er et levende materiale. Det vil dermed være naturlig variasjon i treverkets fuktighet. Som nevnt i seksjon 1.3 er byggene enten helt nye eller har fått rehabilitert fasader i forbindelse med instrumenteringen. Til tross for at målinger foretatt før kledningen er montert er sett bort ifra, vil det kunne være muligheter for at byggefukt spiller inn. Likevel ser man på verdiene for trefukt over måleperioden ved samtlige bygg at kritiske perioder er registrert etter at treverket har vært tørket ut til tilstrekkelig lave trefuktverdier. En annen faktor som skiller ZEB-laboratoriet fra byggene på Sørvestlandet er fargen på kledningene. ZEB-laboratoriet har mørk brun til svart kledning, og byggene på Sørvestlandet er hvite. Mørkere farge absorberer mer varme fra solinnstråling enn lyse farger, og det kan tenkes at dette også spiller inn i opptørkingen av fasadene.

5.2 Temperaturdifferanse over luftespaltens tykkelse

Som resultatene viser er det en vesentlig temperaturdifferanse over luftespaltens tykkelse i taket på ZEB-laboratoriet. Overflatetemperaturen på undersiden av kledningen holder de desidert høyeste temperaturene i luftespalten. I tillegg holder de også de laveste temperaturene. Det vil dermed være svært avgjørende for beregninger av eksempelvis kondenspotensialet og ved dimensjonering av solcellepanel hvor i luftespalten målingene er gjennomført, samt om det er lufttemperaturen eller overflatetemperaturen som måles. Ved å underestimere hvor høye overflatetemperaturer undersiden av kledningen kan nå, vil eksempelvis produsert elektrisk energi ikke møte prosjektert produksjon. Tilsvarende vil underestimering av hvor kald undersiden av kledningen kan bli, føre til at potensiell kondens og oppfuktig overgår dimensjonert fuktsikring. Videre vil det være avgjørende både i bygningsfysisk prosjektering og i utviklingen av materialer å ha kjennskapt til hvor i luftespalten målinger av klimapåkjenning er målt, slik at bygg blir prosjektert fuktsikkert og materialene blir produsert med tilstrekkelig robusthet.

5.3 Treffsikkerheten til fuktberegninger i WUFI Pro

Resultatene av fuktberegningene utført med WUFI Pro viser at beregningsprogrammet simulerer et klima som ikke stemmer helt overens med de faktiske forholdene. Simuleringene med egenkomponert klimafil korrelerer ikke med de faktiske forholdene. En viktig faktor som gir denne mangelen på korrelasjon er at temperaturkurvene over måleperioden er vesentlig forskjøvet i tid, selv om formen på kurven ser ut til å passe omtrent like godt med de faktiske forholdene som WUFI sin innebygde klimafil. Det er veldig ugunstig at egenkomponerte klimafilene ikke korrelerer bedre enn resultatet i denne oppgaven viser, for det vil være for-

delaktig å kunne legge inn egne klimadata i form av eksempelvis genererte fremtidsklima slik at klimatilpasningen av bygninger kan være proaktiv istedenfor reaktiv. Den innebygde klimafilen korrelerer til gjengjeld lang mer enn den egenkomponerte klimafilen, selv om korrelasjonen ikke er høyere enn 0,44-0,75. Beregnet temperatur med WUFI sin innebygde klimafil viser ikke like høye maksimumstemperaturer eller like lave minimumstemperaturer i luftespaltene som fuktsensorene måler. Ved bruk av egenkomponerte klimafilene estimeres det maksimumstemperaturer som er omtrent like høye som sensorene måler, men på helt feil tidspunkt i måleperioden. Minimumstemperaturene simuleres verken like kalde temperaturer som de faktiske forholdene, eller på riktig tidspunkt i måleperioden. Til tross for at ingen av beregningene simulerer ekstremalverdier tilsvarende de ekstremalverdiene som luftespalten faktisk holder, er det den egenkomponerte klimafilen som beregner verdier nærmest de faktiske forholdene. Selv om beregningene av disse verdiene ikke tilhører korrekt tidspunkt i måleperioden, vil kjennskap til klimaets potensiale likevel være nyttig. Det kan dermed tenkes at WUFI sine innebygde klimafilene er noe utdaterte, og bør fornyes med klimagrunnlag fra klimanormalen 1991-2020. Dersom et slikt simuleringsprogram skal benyttes vil det være essensielt å gjøre beregninger over lengre måleperioder slik at ikke beregningstidspunktene fører til at kritiske forhold ikke blir avdekket. Simuleringene av RF fanger ikke opp de høyeste luftfuktighetene som fuktsensorene måler i luftespaltene. Dette er særlig ugunstig dersom det er ønskelig å bruke WUFI Pro til å beregne eksempelvis fare for kondens og muggvekst. De simulerte luftfuktighetene fanger heller ikke opp hvor mye RF faktisk varierer over kort tid. En annen vesentlig usikkerhet i simuleringene er at variasjonen i klimaet i den vertikale retningen samt mellom fasadeorienteringene ikke kommer frem i simuleringene slik de faktiske klimaforholdene måles med fuktsensorene.

5.4 Følsomhetet til valg av materialparametere i WUFI Mould Index VTT

Parameterundersøkelsen viser at beregningene av muggindeks ved bruk av beregningsprogrammet WUFI Mould Index VTT er svært sensitivt til valg av materialparametere. Det er stor differanse i muggindeksverdi for samme klima når materialparametere varierer. Dette gjelder spesielt for Fjogstad-Hus og Norgeshus. Riktig valg av parametere er dermed avgjørende for å kunne forutse hvilke konsekvenser som er reelle for et gitt klima. Likevel viser studien at klimaet i luftespalten må ha belegg for å være gunstig for muggvekst for at muggindeksen skal vise kritiske verdier. Dette ser man tydelig ved å sammenligne beregningstilfellene til de tre case-byggene. Ved valg av de samme gunstige kombinasjonene av materialparametere gis veldig lave muggindeksverdier for samtlige bygg, men det er kun byggene på Sørvestlandet som får svært kritiske verdier ved å velge de ugunstige kombinasjonene av materialparametere. Ved bruk av dette beregningsprogrammet kan det dermed være en fordel å i første omgang benytte de mest ugunstige kombinasjonene for å undersøke verste tilfellet. På den måten vet man i større grad om klimaet har et potensialet for å være et kritisk klima. Deretter kan reelle materialparametere velges med forsiktighet.

5.5 Ulike metoder for å beregne kondenspotensialet

Sammenligningen av ulike beregningsmetoder for å undersøke hvorvidt det er fare for kondens i luftespalten eller ei viser at valg av metode er helt avgjørende. For samme fuktsensorposisjon er alt fra 0% til 49% av tiden kritisk med tanke på fare for kondensutfelling. For termoelementene er tilsvarende variasjon i resultatene 0% til 68% av tiden. Disse store variasjonene er mellom forenklete metoder som benytter målte temperaturer og metoder som beregner CP_i . Det er også store variasjoner dersom man sammenligner metodene som ser på andelen av tiden der målte temperaturer i luftespalten er lavere enn andre ulike temperaturparametere. Her varierer andelen av tiden der forholdene er kritisk fra 0% til 49% ved samme fuktsensorposisjon, og fra 8% til 60% ved samme termoelementposisjon. Ulike metoder å beregne CP_i gir også svært forskjellige resultater. Den forenklete metoden å beregne partialtrykket gir et resultat der det i 0% av tiden er fare for kondens, uansett måleinstrument og posisjon. Dersom man antar at AH i luftespalten er tilsvarende AH i uteluften vil det fra 9% til 37% av tiden være fare for kondens, avhengig av måleinstrument og posisjon. Som det fremgår i resultatene er AH i uteluften i gjennomsnitt noe lavere enn AH i luftespaltene for Trondheims klima. Det er likevel stor spredning, og mange tilfeller der AH i luftespalter er høyere enn i uteluften. Ved å beregne CP_i ved å regne om AH målt i luftespalten fra g/kg til kg/m³, viser resultatene at det er fare for kondens fra 0% til 2% av tiden dersom temperaturen måles med fuktsensorer og fra 16% til 30% av tiden dersom temperaturen måles med termoelementer. Det er gjennomgående at andelen av tiden der det er faren for kondens i luftespaltene i taket er høyere dersom man benytter temperaturmålinger fra termoelementene på undersiden av kledningen enn fra fuktsensorene. Beregninger av kondenspotensialet bør dermed utføres med forsiktighet.

6 Konklusjon

Studien viser at omfanget av undersøkelser av de klimatiske forholdene i luftespalter i ventilerte fasader og tak er begrenset. Det er en generell mangel på sammenlignbare studier og kvantitative resultater. Studiene er i tillegg geografisk begrenset. Selv om ventilerte fasader og tak er en utbredt byggeteknikk over hele Nord-Europa, er de gjennomførte studiene hovedsakelig fra Norge, og noen fra Sverige. Det er også viet mer oppmerksomhet til tak enn til fasader. Forskningslitteraturen viser at klimaet i luftespaltene kan avvike fra uteklimaet, der luften i luftespaltene ofte holder en lavere temperatur enn uteluften. Dette gir en risiko for organsk vekst i luftespalter. Mangelen på forskninglitteratur impliserer at det foreløpig ikke er godt nok grunnlag til å konkludere med hvilket klima luftespalter holder.

Tre bygninger har blitt undersøkt i to ulike klimasoner i Norge. Mikroklimate i luftespaltene i ventilerte fasader og tak varierer sterkt, ikke bare i henhold til den geografiske lokasjonen, men også fasadens eller takets orientering og høyde over bakken. Dette er variasjoner som ikke fremgår ved bruk av WUFI Pro i samme grad. Hver sensorposisjon måler stor variasjon i luftespaltens temperatur og luftfuktighet over måleperiodene. Lufttemperaturen i luftespaltene viser seg å være lavere enn utetemperaturen en betydelig andel av tiden. Temperaturen i luften måles også til å være vesentlig høyere enn utetemperaturen.

Samtlige av sensorposisjonene innehar en viss risiko for muggvekst i følge én eller flere metoder. Det er stor variasjon mellom sensorene instrumentert både i samme bygg, men også i samme fasade. Hvor stor risikoen er, avhenger av hvilke metoder man benytter, hvilke parametere som undersøkes og hvor i luftespaltene man foretar målinger. Resultatene viser alt fra at klimaforholdene gir en liten risiko for muggvekst eller kondens, til at forholdene fører til at store deler av luftespalten trolig kommer til å dekkes med mugg og det vil være stor oppfukning fra kondensfelling. Den overordnede vurderingen er likevel at forholdene på Sørvestlandet gir en større risiko for muggvekst enn forholdene i Trondheim.

7 Videre arbeid

7.1 Utvidet sensormåling i luftespalter og i uteklima

For å øke forståelsen for hvilket mikroklima som er i luftespalter bør flere bygg instrumenteres og analyseres over lengre måleperioder. Byggene bør instrumenteres med enda flere sensorer i hver fasade i tillegg til i luftede skråtak for å sikre tilstrekkelig og pålitelig data. For å kunne forstå det større bildet hva gjelder luftespalteklima, bør instrumenteringen av luftespalter kunne måle flere parametere som spiller inn i et mikroklima. Dette kan eksempelvis være luftgjennomstrømming og luftstrømkarakteristikker for å blant annet undersøke hvor mye av luften som faktisk skiftes ut. Videre kan temperaturvariasjoner over luftespaltens tykkelse i fasadene, både i luften og overflatene, være parametere som vil bidra til å øke forståelsen rundt mikroklimaet i luftespalter.

Instrumentering av flere bygg i ulike klima kan øke kunnskapen om hvordan mikroklima i luftespalter samsvarer med uteklima. I tillegg bør flere bygg eksponert for samme klima instrumenteres for å undersøke hvilke eventuelle forskjeller som kan oppstå i luftespalter i fasader med samme orientering og klimaeksponering. Det bør i tillegg instrumenteres med måleutstyr som måler uteklimaet på stedet. Dette vil gi mindre usikkerhet grunnet lokale klimavariasjoner enn ved bruk av klimadata fra meteorologiske værstasjoner. Det bør eksempelvis måles lufttemperatur, RF, AH, duggpunktstemperatur, nedbør, vindhastighet, vindretning, slagregn, solinnstråling og skydekke.

7.2 Utvidet analyse av simuleringene utført i WUFI Pro

For å kunne benytte beregningsprogrammet WUFI Pro til å estimere mikroklimaet i luftespalter, bør det gjøres en utvidet analyse av hvordan beregningene kan treffe det faktiske klimaet med en høyere korrelasjon enn det som er tilfelle i denne oppgaven. Det bør undersøkes hvilke parametere som har størst innvirkning på simuleringene, og hvordan estimering av disse parameterene kan gjøres mer treffsikkert. Det vil øke kunnskapen rundt klimaet i luftespalter dersom lokale uteklimadata og antatte fremtidsklima kan benyttes til å utarbeide egenkomponerte klimafilere til å forutse forventet temperatur- og luftfuktighet i luftespalter.

7.3 Beregnet muggvekstrisiko sett opp mot faktisk muggvekst

Som det presenteres i denne oppgaven er det svært mange metoder som kan benyttes for å undersøke hvorvidt et klima er kritisk med tanke på risiko for organisk vekst. For å øke kunnskapen på feltet for reelle klimaforhold i Norge, kan instrumenterte bygg som viser risiko for organisk vekst etter ulike modeller følges over tid og inspiseres etter muggvekst. Dette vil øke kunnskapen om hvilke modeller som er mest treffsikre på risikovurderinger for luftede kledinger sett opp mot klimaforholdene i luftespalten og i uteluften som overvåkes. I tillegg kan eventuelle ukjente faktorer som påvirker luftespaltens mikroklimaforhold avdekkes.

Referanseliste

- Arksey, H. og O'Malley, L. (2005). Scoping studies: towards a methodological framework. I: *International Journal of Social Research Methodology* vol. 8.nr. 1, s. 19–32. DOI: 10.1080/1364557032000119616.
- Ayerst, G. (1969). The effects of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. I: *Journal of Stored Products Research* vol. 5.nr. 2, s. 127–141. DOI: 10.1016/0022-474X(69)90055-1.
- Birkeland, Ø. (1968). The Mechanism of Rain Penetration. I: *Proceedings of the International Symposium on Weathertight Joints for Walls* nr. 11, s. 33–34.
- Brischke, C., Bayerbach, R. og Rapp, A.O. (2006). Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. I: *Wood Material Science & Engineering* vol. 1.nr. 3-4, s. 91–107. DOI: 10.1080/17480270601019658.
- Bunkholt, N. S., Gullbrekken, L., Time, B. og Kvande, T. (2021). Process induced building defects in Norway – development and climate risks. I: *Journal of Physics: Conference Series* vol. 2069.nr. 1, s. 012040. DOI: 10.1088/1742-6596/2069/1/012040.
- Bunkholt, N.S., Gullbrekken, L. og Kvande, T. (2020). Influence of Local Weather Conditions on Ventilation of a Pitched Wooden Roof. I: *Journal of Civil Engineering and Architecture* nr. 14, s. 37–45. DOI: 10.17265/1934-7359/2020.01.004.
- Bunkholt, N.S., Time, B. og Kvande, T. (2021). Luftede kledninger. Anbefalinger for klimatilpasning. Klima 2050 rapport nr. 23. Trondheim: SINTEF Community.
- (2022). Trefuktmålinger: Litteraturundersøkelse og korrelasjonskurver. Klima 2050 Note nr. 151.
- Byggforskserien 321.231 (2021). Prosjektering av solcelleanlegg på bygninger. SINTEF Community.
- Byggforskserien 421.132 (2018). Fukt i bygninger. Teorigrunnlag. SINTEF Community.
- Byggforskserien 451.031 (2013). Klimadata for dimensjonering mot regnpåkjønning. SINTEF Community.
- Byggforskserien 525.101 (2021). Skrå, luftede tretak med isolerte takflater. SINTEF Community.
- Byggforskserien 540.003 (2013). Totrinnstetning mot slagregn på fasader. Luftede kledninger og fuger. SINTEF Community.
- Byrkjedal, Ø. og Åkervik, E. (2009). Vindkart for Norge. Tekn. rapp. nr. 9. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat.

- Clarke, J. A, Johnstone, C. M, Kelly, N. J, McLean, R. C, anderson, J. A, Rowan, N. J og Smith, J. E (1999). A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings. I: *Building and Environment* vol. 34.nr. 4, s. 515–521. DOI: 10.1016/S0360-1323(98)00023-7.
- Edwardsen, K.I. og Ramstad, T.Ø. (2018). Trehus. Håndbok 5. 4. utg. Oslo: SINTEF akademisk forlag. ISBN: 978-82-536-1391-8.
- Elma Instruments AS (2022). OmniSense S-160. URL: <https://elma-instruments.no/produkter/omnisense-s-160-rh-temp-fukt-i-tre> (sjekket 24. feb. 2022).
- Fraunhofer Institute for Building Physics (2018). WUFI Mould Index VTT. URL: <https://wufi.de/en/2017/03/31/wufi-mould-index-vtt/> (sjekket 27. jan. 2022).
- (2021). WUFI Pro. URL: <https://wufi.de/en/software/wufi-pro/> (sjekket 27. jan. 2022).
- Geving, S. (2011). Fuktskader: årsaker, utredning og tiltak. Håndbok 3. Oslo: SINTEF akademisk forlag. ISBN: 978-82-536-1228-7.
- Geving, S., Holme, J. og Jenssen, J.A. (2008). Indoor air humidity in Norwegian houses. I: *Proceedings of the 8th International Building Physics in the Nordic Countries*. København, Danmark, s. 801–807.
- Geving, S. og Thue, J.V. (2002). Fukt i bygninger. Håndbok 50. Oslo: Norsk byggforskningsinstitutt. ISBN: 82-536-0747-4.
- Gradeci, K., Labonnote, N., Time, B. og Köhler, J. (2017). Mould growth criteria and design avoidance approaches in wood-based materials – A systematic review. I: *Construction and Building Materials* vol. 150, s. 77–88. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.204.
- Grynning, S., Aspshaug, S.K., Gullbrekken, L. og Time, B. (2019). Moisture robustness of eaves solutions for ventilated roofs: Experimental studies. I: *Science and Technology for the Built Environment* vol. 25.nr. 9, s. 1121–1131.
- Gullbrekken, L., Kvande, T. og Time, B. (2015). Roof-integrated PV in Nordic climate - Building physical challenges. I: *Energy Procedia*. Bd. vol. 78, s. 1962–1967. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.382.
- (2021). Instrumentering av luftede trefasader på Orre for Norgeshus Varhaug. Tekn. rapp. nr. 102022142. Trondheim.
- Gullbrekken, L., Time, B., Harboe, T. og Kvande, T. (2021). Trekledning - Instrumentering av luftede trefasader hos Fjogstad-Hus. Klima 2050 Note nr. 128. Trondheim.
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E. J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J. E. Ø., Sandven, S., Sandø, A. B., Sorteberg, A. og Ådlandsvik, B. (2015). Klima i

- Norge 2100 - Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015. Oppdragsrapport 2. Oslo: Miljødirektoratet/Norsk klimaservicesenter.
- Hens, H. (2012). *Building Physics - Heat, Air and Moisture*. 2. utg. Berlin: Ernst & Sohn. ISBN: 978-3-433-03027-1.
- Hukka, A. og Viitanen, H.A. (1999). A mathematical model of mould growth on wooden material. I: *Wood Science and Technology* vol. 33.nr. 6, s. 475–485. DOI: 10.1007/s002260050131.
- Ingebretsen, S.B., Andenæs, E. og Kvande, T. (2022). Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates. I: *Buildings* vol. 12.nr. 5, s. 683. DOI: 10.3390/buildings12050683.
- Johansson, S., Wadsö, L. og Sandin, K. (2010). Estimation of mould growth levels on rendered façades based on surface relative humidity and surface temperature measurements. I: *Building and Environment* vol. 45.nr. 5, s. 1153–1160. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.10.022.
- Lexico Dictionaries (2022). MICROCLIMATE — Meaning & Definition for UK English — Lexico.com. URL: <https://www.lexico.com/definition/microclimate> (sjekket 19. apr. 2022).
- Lisø, K.R. og Kvande, T. (2007). *Klimatilpasning av bygninger*. 1. utg. SINTEF Community. ISBN: 978-82-536-0960-7.
- Miljødirektoratet (2022). Dagens og framtidens klima for Norge. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/klimatilpasning/klimatilpasning-krever-kunnskap/dagens-og-framtidens-klima/> (sjekket 15. mai 2022).
- Moon, H.J. og Augenbroe, G.L.M. (2004). Towards a practical mould growth risk indicator. I: *Building Services Engineering Research and Technology* vol. 25.nr. 4, s. 317–326. DOI: 10.1191/0143624404bt101oa.
- Mundt Petersen, S. (2015). *Moisture Safety in Wood Frame Buildings - Blind evaluation of the hygrothermal calculation tool WUFI using field measurements and determination of factors affecting the moisture safety*. PhD. Lund: Byggnadsfysik LTH, Lunds Tekniska Högskola.
- Norsk Klimaservicesenter (2022a). Observasjoner og værstatistikk. URL: <https://seklima.met.no/observations/> (sjekket 1. jun. 2022).
- (2022b). Om Norsk klimaservicesenter. URL: <https://klimaservicesenter.no/kss/om-oss/om-kss> (sjekket 26. apr. 2022).
- (2022c). Stasjonsinformasjon. URL: <https://seklima.met.no/stations/> (sjekket 26. apr. 2022).

- O'Brien, K., Sygna, L. og Haugen, J.E. (2004). Vulnerable or Resilient? A Multi-Scale Assessment of Climate Impacts and Vulnerability in Norway. I: *Climatic Change* vol. 64, s. 193–225. DOI: 10.1023/B:CLIM.0000024668.70143.80.
- Ojanen, T., Peuhkuri, R., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Vinha, J. og Salminen, K. (2011). Classification of material sensitivity: New approach for mould growth modeling. I: *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics*. Bd. vol. 2. Tampere, Finland, s. 867–874.
- Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J. og Salminen, K. (2010). Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials. I: *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference*. Clearwater Beach, Florida USA, s. 1–10.
- Pallin, S., Boudreaux, P., Shrestha, S., New, A. og Adams, M. (2017). State-of-the-Art for Hygrothermal Simulation Tools. Tekn. rapp. ORNL/TM-2017/92, 1407999. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory. DOI: 10.2172/1407999.
- Rønningen, E.S. (2020). Feltstudie av klimatiske forhold i luftespalter bak kledning og taktekning. Masteroppg. Trondheim: NTNU.
- Sedlbauer, K. (2001). Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components. PhD. Stuttgart: Fraunhofer Institute for Building Physics, University of Stuttgart.
- (2002). Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation. I: *Journal of Thermal Envelope and Building Science* vol. 25.nr. 4, s. 321–336. DOI: 10.1177/0075424202025004093.
- SINTEF (2022). ZEB-laboratoriet. URL: <https://www.sintef.no/laboratorier/zeb-lab/> (sjekket 25. mai 2022).
- Smith, S.L. og Hill, S.T. (1982). Influence of temperature and water activity on germination and growth of *Aspergillus restrictus* and *A. versicolor*. I: *Transactions of the British Mycological Society* vol. 79.nr. 3, s. 558–560. DOI: 10.1016/S0007-1536(82)80058-2.
- Svendsen, S.D. (1968). The Principle of One-Stage and Two-Stage Seals. I: *Proceedings of the International Symposium on Weathertight Joints for Walls* nr. 11, s. 298–301.
- Thodesen, B., Kvande, T., Tajet, H.T.T., Time, B. og Lohne, J. (2018). Adapting Green-Blue Roofs to Nordic Climate. I: *Nordic Journal of Architectural Research* nr. 2, s. 99–128.
- Thue, J.V. (2016). Bygningsfysikk grunnlag. Fagbokforlaget. ISBN: 978-82-450-1994-0.
- Togerö, Å., Tengberg, C. S. og Bengtsson, B. (2011). m-model: a method to assess the risk for mould growth in wood structures with fluctuating hygrothermal conditions. I: *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics*. Bd. vol. 2. Tampere, Finland, s. 883–890.

- Tveito, O.E. (2021). Norwegian standard climate normals 1991-2020 - the methodological approach. MET rapport nr. 5. Meteorologisk institutt.
- Ulrich, G., Jones, C., Driggers, W., Drymon, M., Oakley, D. og Riley, C. (2007). Habitat Utilization, Relative Abundance, and Seasonality of Sharks in the Estuarine and Nearshore Waters of South Carolina. I: *American Fisheries Society Symposium* vol. 50, s. 125–139.
- Uvsløkk, S. (2008). Selvuttørkingsmekanismer for kompakte tak. Prosjektrapport nr. 19. SINTEF Community.
- Vignesh, V., Pavithra, D., Dinakaran, K. og Thirumalai, C. (2017). Data analysis using box and whisker plot for stationary shop analysis. I: *Proceedings of the International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*, s. 1072–1076. DOI: 10.1109/ICOEI.2017.8300874.
- Viitanen, H. (1997). Modelling the time factor in the development of mould fungi: The effect of critical humidity and temperature conditions on pine and spruce sapwood. I: *Holzfor-schung* vol. 51.nr. 1, s. 6–14. DOI: 10.1515/hfsg.1997.51.1.6.
- Viitanen, H. og Bjurman, J. (1995). Mould growth on wood under fluctuating humidity conditions. I: *Material und Organismen* vol. 29.nr. 1, s. 27–46.
- Viitanen, H., Krus, M., Ojanen, T., Eitner, V. og Zirkelbach, D. (2015). Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models. I: *Proceedings of the 6th International Building Physics Conference*. Bd. vol. 78, s. 1425–1430. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.165.
- Viitanen, H. og Ojanen, T. (2007). Improved Model to Predict Mould Growth in Building Materials. I: *Proceedings of the 10th Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Conference*. Clearwater Beach, Florida USA.
- Viitanen, H., Ojanen, T., Krus, M., Eitner, V., Bögl, S. og Zirkelbach, D. (2019). WUFI Mould Index VTT Help. Tekn. rapp. Fraunhofer Institute for Building Physics.
- Viitanen, H. og Ritschkoff, A-C (1991). Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Tekn. rapp. nr. 221. Uppsala: Institutionen för virkeslära ved Sveriges lantbruksuniversitet.
- Viitanen, H., Vinha, J., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Lähdesmäki, K. og Salminen, K. (2008). Development of an improved model for mould growth: Modelling. I: *Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*. Bd. vol. 2. København, Danmark, s. 927–934.
- Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paajanen, L. og Lähdesmäki, K. (2010). Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures. I: *Journal of Building Physics* vol. 33.nr. 3, s. 201–224. DOI: 10.1177/1744259109343511.

Yang, D. og Gueymard, C.A. (2020). Ensemble model output statistics for the separation of direct and diffuse components from 1-min global irradiance. I: *Solar Energy* nr. 208, s. 591–603. DOI: 10.1016/j.solener.2020.05.082.

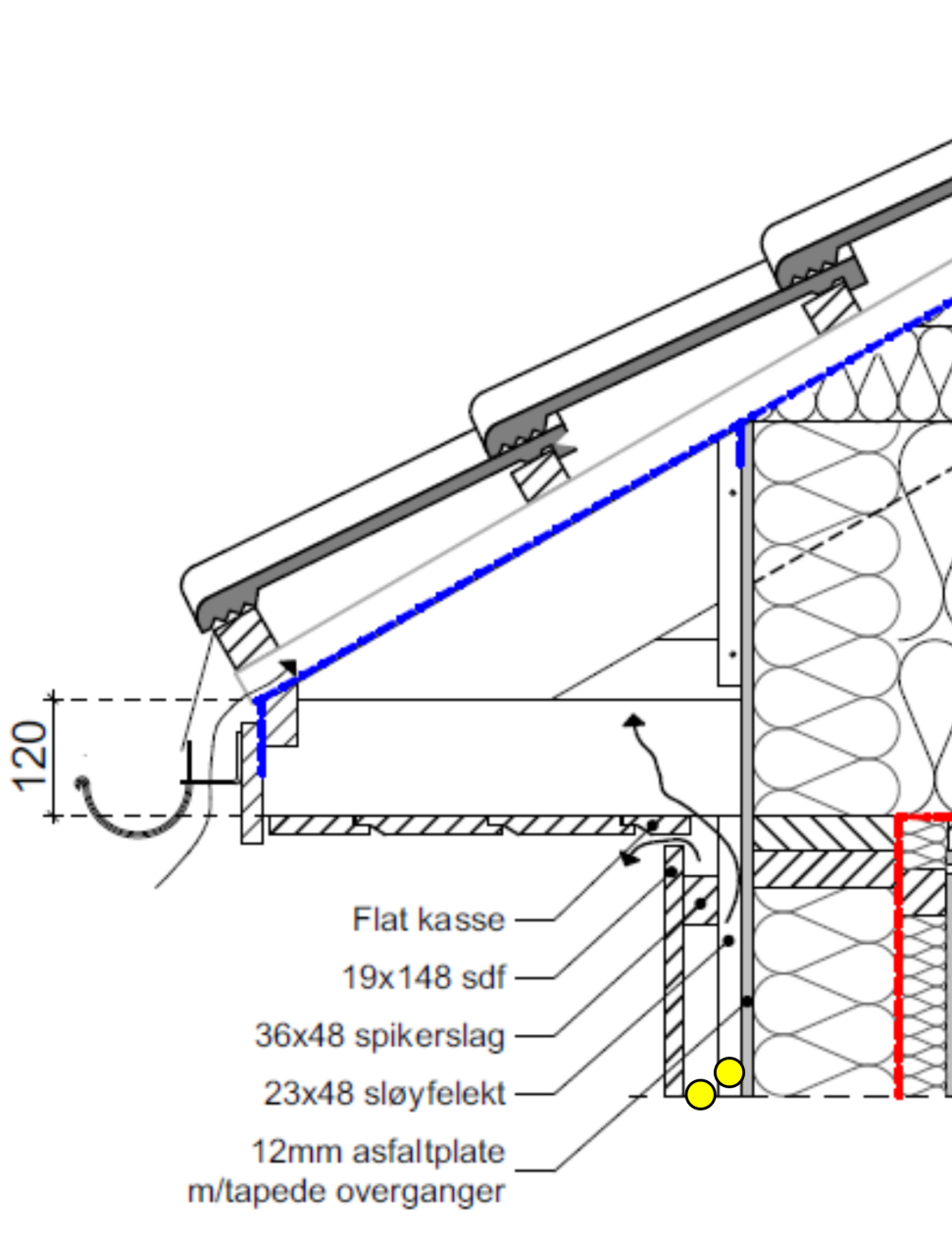
Østrøm, K.S. (2019). Fuktmåling av LVL og gran. Fordypningsprosjekt. Trondheim: NTNU.

Vedlegg

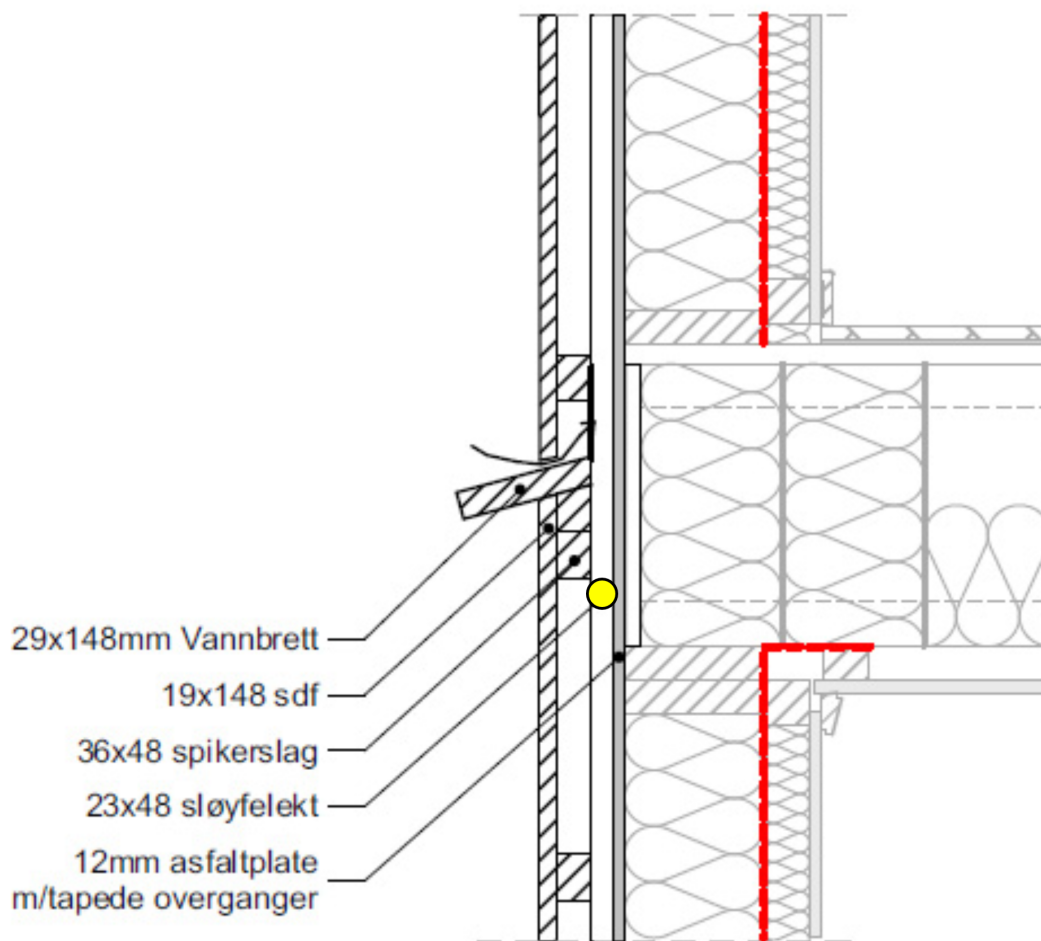
Vedleggsliste

A) Detaljtegninger av Norgeshus med sensorposisjoneringer i luftespalter	iii
B) Detaljtegninger av ZEB-laboratoriet med sensorposisjoneringer i luftespalter	vii
C) WUFI Pro - inndata	ix
D) Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates	xi
E) Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway	xxxi
F) Punktmålinger av temperatur og RF sett opp mot sammenstilling av ulike muggvekstmodeller	lvii

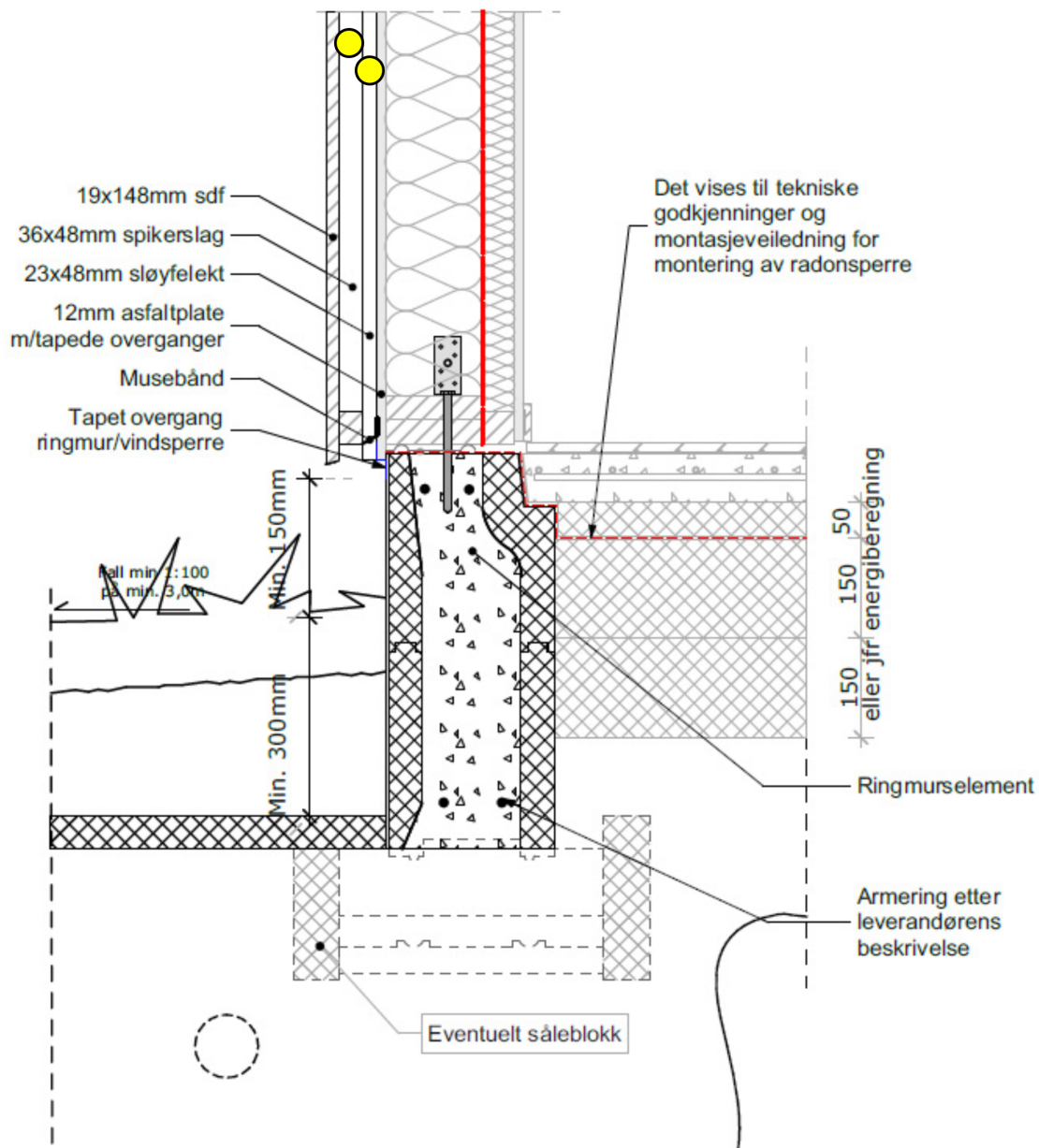
A Detaljtegninger av Norgeshus med sensorposisjoneringer i luftespalter



Figur A.1: Detaljtegning av Norgeshus med plassering av sensor i øvre del av luftespalte vist med gule markeringer. Sensorene i lekt og i sløyfe er ca. 600 mm nedenfor luftespaltens utløp. Detaljtegningen er kun ment som en illustrasjon av sensorenes plassering i luftespalten, slik at detaljen som helhet kan fravike fra utført oppbygging. (Gullbrekken, Kvande og Time, 2021).

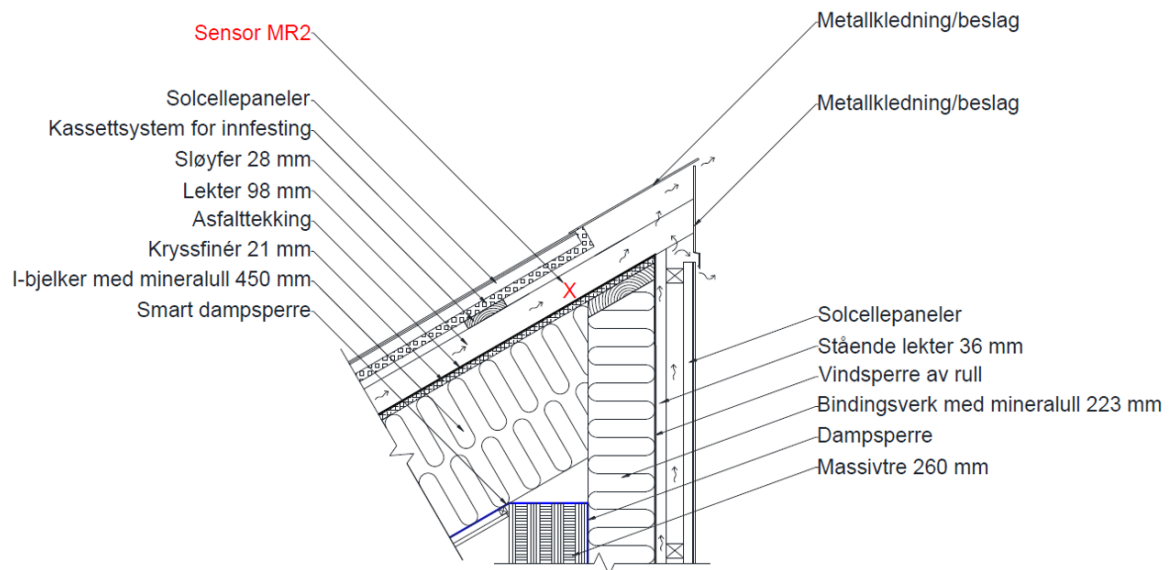


Figur A.2: Detaljtegning av Norgeshus med plassering av sensor sløyfe i midtre del av luftespalte, vist med gule markeringer. Detaljtegningen er kun ment som en illustrasjon av sensorenes plassering i luftespalten, slik at detaljen som helhet kan fravike fra utført oppbygging. (Gullbrekken, Kvande og Time, 2021).

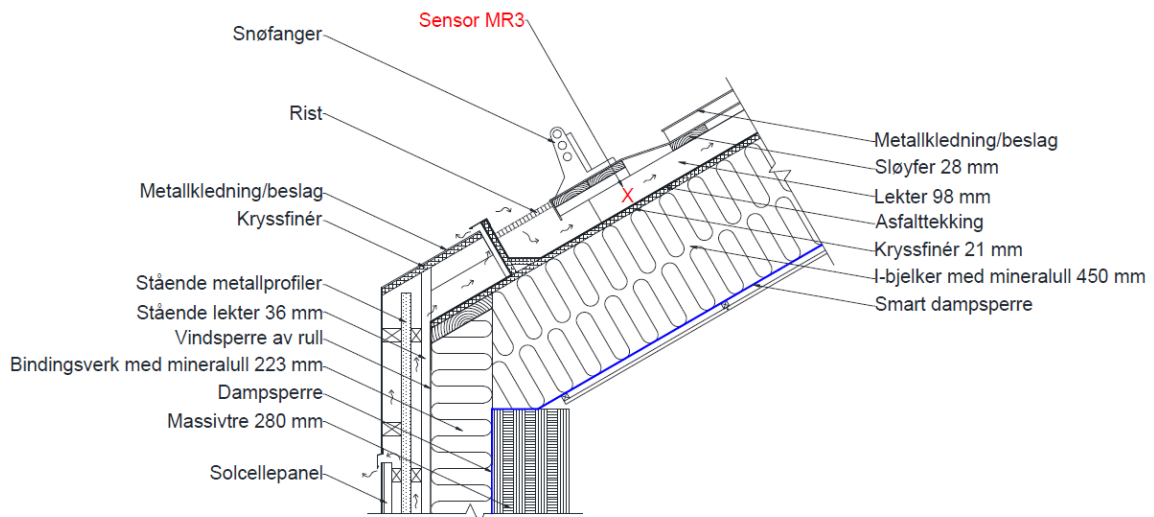


Figur A.3: Detaljtegning av Norgeshus med plassering av sensor i nedre del av luftespalte vist med gule markeringer. Sensorene i lekt og i sløyfe er ca. 600 mm over luftespaltens innløp. Detaljtegningen er kun ment som en illustrasjon av sensorenes plassering i luftespalten, slik at detaljen som helhet kan fravike fra utført oppbygging. (Gullbrekken, Kvande og Time, 2021).

B Detaljtegninger av ZEB-laboratoriet med sensorposisjoneringer i luftespalter



Figur B.1: Detaljtegning av ZEB-laboratoriet med plassering av sensor MR2 (Rønningen, 2020).



Figur B.2: Detaljtegning av ZEB-laboratoriet med plassering av sensor MR3 (Rønningen, 2020).

C WUFI Pro - inndata

Tabell C.1 viser materialegenskapene til de ulike sjiktene i konstruksjonsoppbyggingen benyttet i fuktsimuleringene i WUFI Pro 6.5. Innstillingene benyttet ved simuleringene er vist i tabell C.2. Disse innstillingene er felles for simulering av alle beregningstilfellene.

Tabell C.1: WUFI - materialdata.

Oppbygging av konstruksjonen (ytterst til innerst)				
Sjikt	Tykkelse [mm]	Vanndampdiffusjons- motstand μ [-]	Romdensitet [kg/m ³]	Varmekonduk- tivitet [W/mK]
Utvendig kledning	22	108	390	0,13
	5	0,79	1,3	0,047
Luftespalte	101	0,51	1,3	0,155
	5	0,79	1,3	0,047
Vindsperre	1	10	130	3
Isolasjon	223	1,3	60	0,034
Dampsperre	1	70000	130	2,2
Isolasjon	75	1,3	60	0,034
Innvendig kledning	12	8,3	850	0,2

Tabell C.2: WUFI - inndata.

Monitorposisjon	
1	Ytterst i luftespalten mot kledningen
2	Midten av luftespalten
3	Innerst i luftespalten, mot vindsperra
Orientering / Helning / Høyde	
Variabel	Variert ut ifra klimafilene
90°	Vertikal yttervegg
R1 = 0	Slagregnskoeffisient. Standardverdi i WUFI
R2 = 0,05/0,1	Slagregnskoeffisient. Standardverdier i WUFI. Sensorene MN3, MN4, MS3 / sensorene MN1, MN2, MN5, MS2, MW1, ME1.
Høy bygning, nederste del inntil 10 m	Bygningshøyde. Sensorene MN3, MN4, MS3.

Høy bygning, midtre del 10-20 m	Bygningshøyde. Sensorene MN1, MN2, MN5, MS2, MW1, ME1
---------------------------------	---

Overflatens overgangskoeffisient - Ytre overflate (venstre side)

Varmemotstand:	0,0588 (m ² K)/W (yttervegg). Ikke vindavhengig
Sd-verdi:	- (ingen overflatebehandling)
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall:	0,8 (Treverk (gran) brunmalt).
Terreng kortbølget refleksjonsgrad:	0,2 (standardverdi)
Regnvannabsorpsjonstall:	0,7 (avhengig av komponenthelning)

Overflatens overgangskoeffisient - Indre overflate (høyre side)

Varmemotstand:	0,125 (m ² K)/W (yttervegg)
Sd-verdi:	- (ingen overflatebehandling)

Startbetingelser

Startfuktighet i konstruksjonen:	Middelverdi over konstruksjonen
Starttemperatur i konstruksjonen:	Middelverdi over konstruksjonen
RF ved start:	0,8
Starttemperatur i konstruksjonen:	20°C

Beregningsperiode / Profiler

ZEB:	01.04.2020-31.03.2022. (f.o.m-t.o.m)
Tidstrinn:	1 time. Gjelder alle tre byggene.

Numerikk

Beregningstype:	Varmetransport og fukttransport aktivert.
Hygrotermiske spesialinnstillinger:	Ingen alternativer aktivert.
Numeriske parametere:	Økt nøyaktighet og konvergensforbedring aktivert.
Adaptiv styring av tidstinn:	Ikke aktivert.
Geometri:	Kartesisk aktivert.

Klima

Ute:	Klimastasjon ved ZEB Test Cell og WUFI sitt innebygde klimadata for Trondheim.
Inne:	Inneklima er avhengig av uteklima. ISO 13789 er benyttet i kombinasjon med brukerdefinert fukttilskudd beskrevet i seksjon 3.7.4

D Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates

I dette vedlegget er artikkelen Ingebretsen, Andenæs og Kvande, 2022, *Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates*, vist. Artikkelen er publisert i det vitenskapelige tidsskriftet *Buildings* 19. mai 2022.

Review

Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates

Sara Bredal Ingebretsen, Erlend Andenæs *  and Tore Kvande 

Department of Civil and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 7491 Trondheim, Norway; sarabin@stud.ntnu.no (S.B.I.); tore.kvande@ntnu.no (T.K.)

* Correspondence: erlend.andenas@ntnu.no

Abstract: Accurate values for the climatic conditions in an air cavity, hereby called the microclimate, are crucial when calculating and simulating the performance of a ventilated roof and façade system. The climatic stress of its components and their mould and rot potential influence the long-term durability of the roof or façade. A scoping study is conducted to gain an overview on research and the scientific literature on the microclimate of air cavities in ventilated roofing and claddings in Nordic climates. From the body of the research literature, 21 scientific works were of particular interest, and their findings are summarized. The review shows that only a limited number of studies discuss the microclimate of air cavities. Roofs are discussed to a greater and more varied degree compared to façades and air cavities behind solar panels. However, the results cannot be compared and validated against each other to generally describe the microclimate of air cavities, as the surveyed papers approach the subject differently. This knowledge gap indicates that calculations and simulations can be performed without knowing whether the results represent reality. If the structure of ventilated roof and façade systems are only designed based on experience, it can be difficult to be proactive and adapt to future climate changes. Further studies are needed to determine the relation between the exterior climate and the air cavity microclimate, so that future climate predictions can be used to simulate the long-term performance of ventilated roof and façade systems.

Keywords: air cavity; air gap; ventilated roof; ventilated façade system; Nordic climate; literature survey



Citation: Ingebretsen, S.B.; Andenæs, E.; Kvande, T. Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates. *Buildings* **2022**, *12*, 683. <https://doi.org/10.3390/buildings12050683>

Academic Editor: Ana Silva

Received: 23 March 2022

Accepted: 16 May 2022

Published: 19 May 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The climate screen of a building mainly consists of its outer walls and roof. Its primary function is to create a shelter against weather exposure. The type and severity of this exposure depends on the geographical location of the building and local conditions specific to its site. In a Nordic climate, the weather will involve strong winds, precipitation, snow loads, great temperature fluctuations, and freeze–thaw cycles [1]. The climate is expected to become more severe in coming years. The temperature and annual precipitation will increase, and extreme precipitation events will become more intense and more common [2]. Climate change of this type will affect material durability, due to an increase in conditions where wood materials will be at risk of deterioration due to biological growth [3]. Among other reasons, the reduction in the number and duration of frost periods is particularly unfortunate, as the growth of mould and fungi will be drastically impeded during and after a frost period [4,5]. The climate zones of the Nordic countries are illustrated in Figure 1.



Figure 1. Climate Classification map for Nordic countries according to the Köppen–Geiger system—all cities above 100,000 inhabitants are marked (2016). Reprinted with permission from Ref. [6].

Specific climatic challenges in the Nordic climate include wind-driven rain, freeze–thaw cycles, strong winds, frost, low annual average temperatures, and snow loads, often in frequently varying combinations. Especially in coastal areas, the weather can change rapidly and vary greatly over short periods. To adapt to the varied Nordic climate, facades and sloped roofs are usually built according to a principle of two-stage weatherproofing (“totrinnstetning” in Norwegian) [7]. A universally accepted English translation of this term has not been identified, but the authors are aware that the terms “two-step” or “two-layer” weatherproofing have also been in use, as well as “two-stage tightening” or “two-stage sealing/seals”. The term “two-stage weatherproofing” is preferred in this article as multiple material layers may be involved in the assembly, and the terms “tightening” or “sealing” are direct, but erroneous, translations of the Norwegian term. A roof or façade built according to this principle consists of a rain screen (cladding) and a vapour-open wind barrier layer, separated by an air cavity for drainage and ventilation. The air cavity ensures that precipitation does not leak into the building envelope, and that any moisture in the building envelope is allowed to dry. Note that the air cavity is ventilated to the exterior climate to remove moisture, as opposed to systems such as Trombe walls that are ventilated to the building’s interior for purposes of indoor ventilation [8,9]. For roofs, the ventilated air cavity also prevents heat flows from the building interior from melting snow piled up on the roof tiles, reducing the risk of ice formation. The principle of two-stage weatherproofing is illustrated in Figure 2.

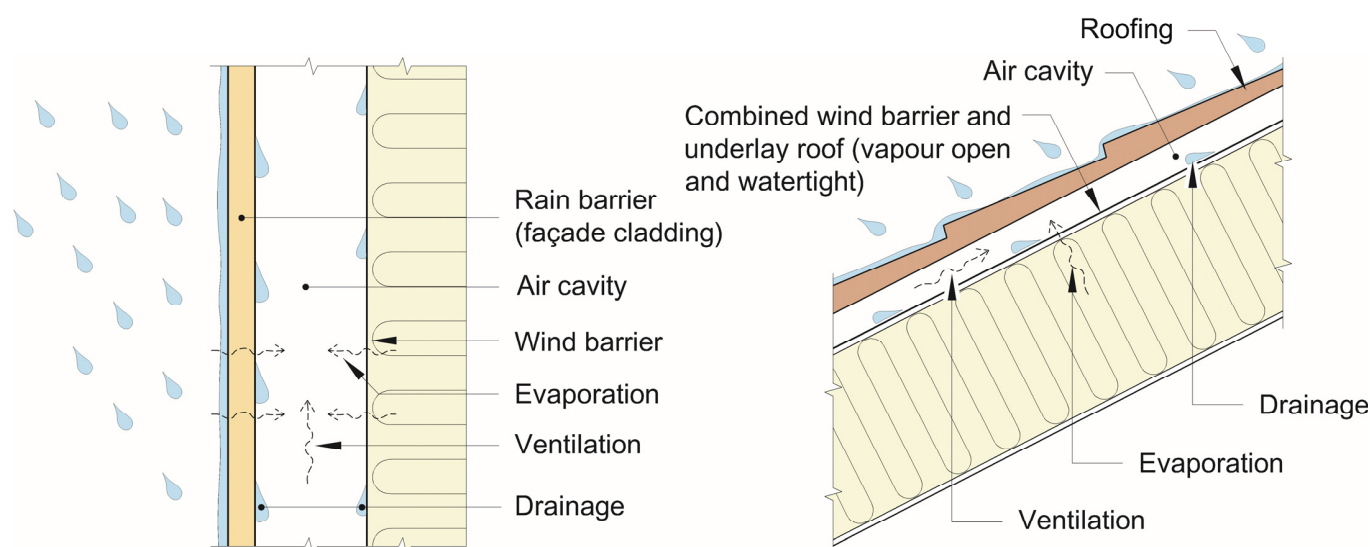


Figure 2. Illustration of the principle of two-stage weatherproofing for a façade (left) and a roof (right). Reprinted with permission from Refs. [10,11].

The principle of two-stage weatherproofing has been shown to create robust roofs and façades [7], but climate change might alter its performance. Norwegian statistics show that the share of process-induced building defects caused by precipitation have increased from 24% for the period 1993–2002 to 42% for the period 2017–2020 [12]. Insufficient ventilation and/or drainage of the air cavity is often the main reason why precipitation causes defects in a ventilated façade. Although flaws of the ventilation cavity are usually caused by errors in design or execution that deviate from good moisture safety practices, defects have also been reported in façades built in a way traditionally considered sound [13]. More humid weather with more precipitation and shorter frost periods causes reports of moisture damages hitherto unseen. Wooden battens rot while the cladding remains intact. In a new climate, existing knowledge of moisture-safe design seems to not apply anymore.

Being able to predict service life and making sound material choices for the building envelope is a central part of the building physical design of a building. Service life prediction is conducted using accelerated artificial ageing experiments [14], numerical simulations [15], and knowledge gathering [16,17]. Traditionally, assessments of durability are conducted using the exterior climate as an input parameter. Assessments of accelerated artificial ageing methods show that the determination of precise boundary conditions is a challenge even for façades with only single-stage weatherproofing [18]. Assessing the durability of materials exposed to the microclimate of the air cavity will likewise require in-depth understanding of the climatic boundary conditions. The microclimate of the air cavity will not necessarily correlate directly with the exterior climate [19]. The term “microclimate” is defined as a set of climatic conditions in a limited area, which may differ from those of the surrounding area [20]. New experiences and observed defects suggest a need for better knowledge of climatic conditions in the air cavity to accurately assess the durability of battens, wind barriers, and wind barrier tape. Relevant microclimate parameters for the air cavity may include temperature, relative humidity, air pressure, water intrusion, and air flow characteristics, and how these parameters all behave in relation to those of the exterior climate. This knowledge will be useful when selecting the methodology for accelerated artificial ageing and for numerical simulations of mould/rot risk throughout the lifetime of buildings in Nordic climates.

The purpose of this study is to map the current body of knowledge regarding the long-term microclimate of the air cavity in a roof or wall façade following the two-stage principle for weatherproofing. To address this general issue, the following research questions are investigated:

1. To what degree are the climatic conditions of the air cavity of two-stage weather-proofed façades addressed in the research literature?
2. Which climatic conditions can be expected in the air cavity of a two-stage weather-proofed façade?
3. What are the most important knowledge gaps concerning the climatic conditions of air cavities?

To answer these research questions, a systematic review of the research literature was conducted, using different library databases. Note that there appears to be some disagreement on the nomenclature of the term “air cavity”, with many sources using the term “air gap” instead. This article consistently uses the term “air cavity”, even when reporting on literature using “air gap” in the original text, provided that the cavity in question is ventilated at the top and bottom (an “inlet” and “outlet” opening).

Some limitations to the study are acknowledged: A considerable portion of the literature originates from Norway. This is not unexpected, as the principle of two-stage weatherproofing originates from the Norwegian Building Research Institute (later incorporated into SINTEF) [21–23], where research and development of the principle continues today. Other northern European countries, as well as Canada and the United States, have also adopted the construction principle to various degrees. However, in Canada, the main function of the air cavity appears to be drainage, and air cavities are built considerably narrower than in Nordic countries—as narrow as 1 mm [24,25]. For this reason, research from North America was excluded from the main part of this study. Research on air cavities was also identified from Central Europe, but this was also excluded due to the climate being different from Nordic countries. The warmer Central European climate leads to different considerations to be taken when assessing durability and service life. Nevertheless, relevant studies from countries beyond the Nordics are discussed in brief at the end of the Results chapter.

2. Methodology

2.1. Scoping Studies

To investigate the current body of knowledge on the microclimate of air cavities, a scoping study was conducted. Scoping studies are used to rapidly map the key terms and concepts within a specific area of research. The framework developed by Arksey and O'Malley [26] was used to guide the literature search through the following five stages:

1. Identifying the research questions;
2. Identifying relevant studies;
3. Study selection;
4. Charting the data;
5. Collating, summarizing, and reporting the results.

The specific procedure used in this study is a refinement of the framework described in [27]. The full procedure is illustrated in Figure 3.

2.2. Literature Search Parameters

The search was conducted through the following literature databases: Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, and Web of Science. For an overview of the search terms and search strings that were employed, see the Supplementary File to this article. Filters in the search databases were used to limit the results to scientific articles in English. To further ensure that results were relevant to Nordic climates, the selection of articles was limited to articles originating from Denmark, Finland, Iceland, Ireland, Norway, Sweden, and the United Kingdom. This selection was made to limit the relevance to a Nordic climate, with its associated climatic parameters such as the frequent combination of precipitation and wind, freeze–thaw cycles, frost, and low annual average temperatures, as opposed to cold climates in general which may include high-altitude locations in warmer countries or entirely polar climates.

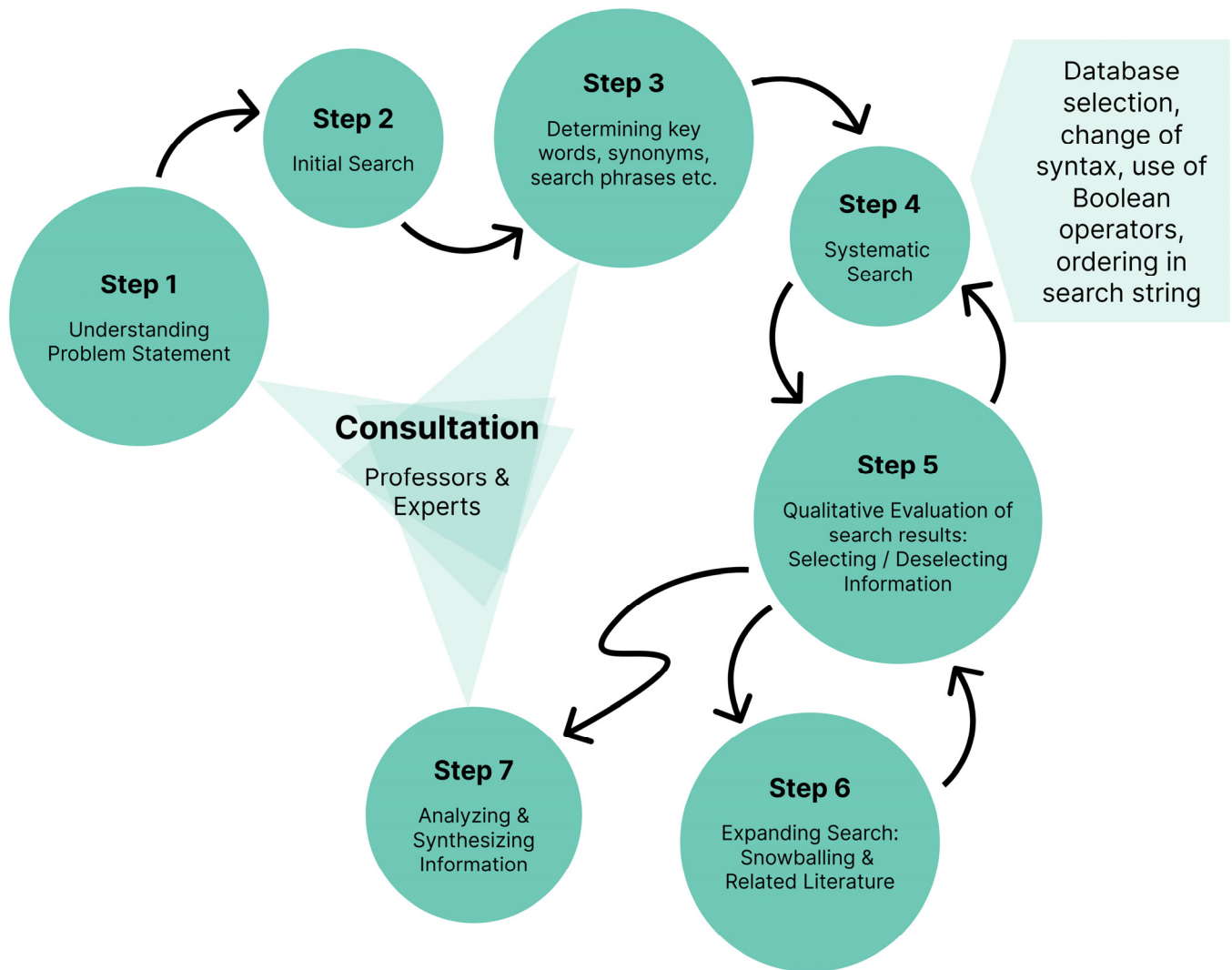


Figure 3. Scoping study methodology. Reprinted with permission from Ref. [28].

After a list of relevant articles was found through the database search, citation chaining, or “snowballing” [29], was used to find further relevant studies that were not found in the database search. Search results (Step 5 in Figure 3) were reviewed by assessing the titles of each study. For articles that seemed relevant, abstracts were thoroughly read, and if they appeared to match the research questions, they were included for further assessment of relevance. The search procedure thus resulted in a list of 70 relevant articles, of which 54 were discarded from the final study, for one or more of the following reasons:

- The article did not discuss the microclimate of air cavities (e.g., [30]).
- A microclimate was discussed, but not in relation to a ventilated façade (e.g., [31]).
- The research design of the article did not contain an air cavity, instead focusing on the properties of materials such as insulation or the cladding itself (e.g., [32]).
- The article featured temperature and moisture measurements, but only from the outside of the cladding or on the inside of the wind barrier (e.g., [33,34]).
- The article discussed air cavities that were not open to the exterior air at both the top and bottom of the façade (e.g., [8,9]).
- The article only considered masonry structures (e.g., [35]).
- Review articles of studies that chiefly contained studies from other climates or countries (e.g., [36]).

- Articles based on results from irrelevant climates (humid tropical climates, desert climates, etc.) (e.g., [8,9,37]).

Since articles from Norwegian universities constituted a large part of the relevant literature, an additional search was conducted in the Norwegian library database to find M.Sc. theses or other reports that could possibly contain relevant information. This additional search identified five theses containing relevant works of research, primarily published in Norwegian.

3. Literature Review Results

3.1. General Overview of the Literature

The literature search identified 16 scientific articles and 5 M.Sc. theses that discuss the microclimate of ventilated façade and roof cavities specifically in a Nordic climate context. The review includes articles focusing on field studies, laboratory studies, computer simulations, and/or calculations. Of the 21 works of research, 6 focus on façades, 10 focus on sloped roofs, 3 concern roofs and/or façades with integrated photovoltaics, and 2 focus on both façades and roofs. A further 11 studies from outside the Nordic climate were selected to provide a brief overview of relevant research internationally, and to take in some perspectives that were not discussed by the Nordic articles. However, the limits to their applicability in a Nordic context must be noted.

The relevant research originated from Norway (Norwegian University of Science and Technology and SINTEF (formerly Selskapet for Industriell og Teknisk Forskning) in Trondheim), Sweden (Gävle University College, Kungliga Tekniska Högskolan in Stockholm, Lund University, and Chalmers University of Technology in Gothenburg), and Finland (Aalto University near Helsinki). Relevant studies were sought, but not found, from Denmark, Iceland, Ireland, and the United Kingdom, whose climates are similar.

Table 1 presents an overview of the individual studies identified in the literature review. Some studies resulted in (or contributed to) multiple publications, as shown in the “References” column. The investigated climate parameters of each study are also listed, as well as the duration of measurements (if applicable). Note that not all of the studies measured the parameters the same way or presented the measurements directly.

Table 1. Overview of studies.

Type of Study	References	Exterior Climate	Duration	Main Purpose of Study	Analysed Parameters of Relevance
Field study	[38–40]	Lund, Sweden	4 months	Describing cavity air flows and drying potential. Validating numerical model.	<ul style="list-style-type: none"> - Air velocity (measured); - Temperature (measured); - Exterior temperature (measured); - Exterior wind speed and approach angle (measured); - Driving forces (calculated); - ACH (calculated); - Drying rates (calculated).
Field study	[41]	Trondheim, Norway	-	Describing the impact of wind on heat transmission through wooden walls.	<ul style="list-style-type: none"> - Wind pressure (measured); - Wind pressure coefficients and gradient (calculated); - Exterior wind speed and approach angle (measured).

Table 1. Cont.

Type of Study	References	Exterior Climate	Duration	Main Purpose of Study	Analysed Parameters of Relevance
Field study	[42]	Trondheim, Norway	4 years	Describing factors affecting the hygrothermal performance of wooden claddings in Norway.	<ul style="list-style-type: none"> - Exterior temperature (measured); - RH in exterior air (measured); - Exterior wind speed and approach angle (measured); - Global radiation (measured); - Wind-driven rain (measured); - Surface temperature in air cavity (measured); - RH (measured); - Water vapour pressure (calculated); - Moisture content in wood (measured).
Simulations (validating field study)	[43]			Studying wind-induced airflows in cavities.	<ul style="list-style-type: none"> - Air flow characteristics (calculated); - Air cavity speed (calculated); - ACH (calculated).
Field study	[44]	Espoo, Finland	2.5 years	Evaluating a façade with exterior insulation.	<ul style="list-style-type: none"> - Temperature (measured); - RH (measured); - Mould index (calculated).
Laboratory study	[45]	Interior lab climate	-	Describing air flows in cavities and assessing how design details affect pressure losses.	<ul style="list-style-type: none"> - Air flow characteristics (calculated/measured); - Air pressure (measured); - Temperature (measured).
	[46]				<ul style="list-style-type: none"> - Air flow characteristics (calculated/measured); - Air pressure (measured); - Temperature (measured).
	[47]				<ul style="list-style-type: none"> - Air flow characteristics (calculated/measured); - Temperature (measured); - Air pressure (measured).
	[48,49]				<ul style="list-style-type: none"> - Temperature (measured); - Air velocity (measured); - Thermal buoyancy (calculated).
	[50]	Interior lab climate with simulated solar radiation.	-	Modelling air flows in roof cavities due to buoyancy.	<ul style="list-style-type: none"> - Temperature (measured); - Surface temperature in air cavity (measured); - Air flow characteristics (calculated/measured); - Thermal buoyancy (calculated).
Simulations (validating Laboratory study)	[51]	-	-	Numerical study of roof cavity air flows.	<ul style="list-style-type: none"> - Air flow characteristics (calculated); - Temperature (calculated).
Field study	[52]	Skellefteå, Stockholm, and Växjö, Sweden	1–2 years (multiple)	Evaluating a simulation model for mould growth in roof cavities.	<ul style="list-style-type: none"> - RH (measured); - Temperature (measured); - RH_{crit} (calculated).

Table 1. Cont.

Type of Study	References	Exterior Climate	Duration	Main Purpose of Study	Analysed Parameters of Relevance
Field study	[53]		8–12 days (multiple)	Evaluating condensation risk in roof cavity. Relating cavity air flows to wind.	<ul style="list-style-type: none"> - Exterior temperature (measured); - Exterior wind speed and approach angle (measured); - Surface temperatures in air cavity (measured); - Temperature (measured); - Air velocity (measured).
	[19]	Trondheim, Norway	6–11 days (multiple)	Examining the influence of temperature and wind on roof ventilation. Condensation risk.	<ul style="list-style-type: none"> - Exterior temperature (measured); - Exterior wind speed and approach angle (measured); - Surface temperatures in air cavity (measured); - Temperature (measured); - Air velocity (measured); - Condensation potential (calculated).
	[54]		9 days/21 days	Mapping the influence of exterior climate on air cavity climates.	<ul style="list-style-type: none"> - Temperature (measured); - RH (measured); - Wood moisture (measured); - Exterior temperature (measured); - RH in exterior air (measured); - Exterior wind speed and approach angle (measured); - Global radiation (measured).
Laboratory study	[55–57]	Interior lab climate with simulated solar radiation.	-	Analysing air flows and heat transfer behind solar panels on façades.	<ul style="list-style-type: none"> - Temperature (measured); - Surface temperature in air cavity (measured); - Surface temperature (measured); - Air flow rate (measured); - Air velocity (measured); - Aspect ratio of air cavity.

3.2. Façades

Falk and Sandin [38] described field studies measuring air velocities and temperatures in south-facing, vented, and ventilated façades using different batten configurations. The research period spanned 2400 h between the beginning of October and the middle of February. A single sensor was moved periodically between the three test specimens. The results were compared to a simulation model. The studies found an average absolute air velocity in the cavity of 0.195 m/s and an average driving force of 0.3–0.5 Pa. According to calculations, the air change rate for the cavity was 230–310 ACH (air change rate per hour). The maximum rate was 2–3 times higher than the average rate, primarily driven by thermal buoyancy. The results showed a clear correlation between average cavity temperature and flow characteristics, where the temperature increased if the flow resistance was increased.

A further study by Falk and Sandin [39] explored the connection between air cavity design, air change rate, and ventilation drying processes. Calculations and mathematical models were employed and compared to field studies from the previous article from Università di Napoli Federico II. The results showed that the model used to calculate ACH yielded values that agreed with field measurements. The calculations of drying rates showed that the evaporation of moisture to the air cavity varied greatly between the different air cavity designs, but the variations tended to even out over time. The measurements also showed that a favourable exterior climate and the colour of the façade cladding had a greater impact than the design of the air cavity, and that a cavity width of 40 mm yielded 20–25 times more drying potential than a cavity 5 mm wide.

A third study in this series [40] presented a method to predict ACH in an air cavity. Mathematical models were used alongside climate data and validated using field measurements from [38]. The results showed that the calculated ACH largely fit the measured

values from the field studies, even reflecting hourly variations. The model still was shown to be slightly lacking for daytime conditions. Significant hourly deviations were observed during daytime hours, showing thermal buoyancy to be weak compared to wind pressures.

Uvsløkk [41] presented information on how wind affects the air pressure in an air cavity. Field experiments, laboratory experiments, and calculations were conducted. The results indicated that the geometry of the air cavity and the details near the cavity openings greatly affected the pressure gradients in the air cavity and that the calculation methods were less suitable for complex cavity geometries. The article concluded that for most locations in Norway, it will be sufficient to use a reference wind velocity of 10 m/s, 10 m above the ground, for calculations spanning the heating season.

Nore [42] sought to increase the scientific knowledge of the performance of wooden claddings through conducting field studies. Sensors were mounted on the inside and outside of the wooden cladding on a test building in Trondheim, measuring the exterior climate, the relative humidity in the air cavity, and the moisture content of the wooden cladding. Measurements ran across four years between 2004 and 2007. The measurements showed that the cladding's hygrothermal response depended greatly on the orientation of the façade, largely due to different exposure to solar radiation, wind, and wind-driven rain. Further, the results showed that an air cavity was necessary, but that an air cavity opening of 23 mm did not significantly improve the drying potential of a west-facing façade compared to a smaller cavity opening of 4 mm. The surface treatment of the cladding affected the response to climate exposure, where untreated wood responded faster to variations compared to surface-treated wood, giving larger fluctuations in the moisture content of the cladding. Changes in the claddings' moisture content were more correlated with variations in temperature, solar radiation, and wind speed than with variations in precipitation, wind-driven rain, and wind direction.

Nore et al. [43] studied the wind-driven air stream in a 23 mm air cavity in a ventilated cladding using RANS CFD simulation, a validation study, and a comparison to earlier studies. The validation study showed a margin of error of 25% for cavity air flows with a Reynold's number (Re) between 1000 and 3500. Simulations with a Re outside these parameters showed an ACH/U10 between 120 and 250 for a high reference wind speed of 10 m/s perpendicular to the façade. The CFD results of cavity air speed and air change rate were compared to those of previous experimental studies, indicating agreement. Local pressure losses were calculated by comparing the results of separate and combined simulations. The pressure loss coefficient for wind perpendicular to the façade was between 4.5 (middle cavities) and 5.7 (edge cavities), and for wind angled at 22.5 degrees, it was between 4.9 and 7.1.

Viljanen et al. [44] evaluated the performance of the air cavity for a highly insulated façade by assessing mould growth potential as a performance criterium and investigating which factors affect this performance. Field studies were conducted on two externally insulated air cavities with a thermal resistance $R = 0.18$ and $1.57 \text{ m}^2\text{K/W}$ on the exterior side. Measured parameters included absolute humidity, solar radiation, mould growth potential, and the temperature and relative humidity in the air cavity and the exterior air. The results indicated that the average temperature in the winter season was 0–2 °C lower in the air cavity than in the exterior air, but the RH was typically 0–15% lower, depending on the type of wall. The computational analyses showed that the optimal air change rate was 4–40 h^{-1} . Significant mould growth in the air cavity was only possible near the inlet area, where the temperature was the lowest and RH the highest. The analytical model identified that the most influential factors for the hygrothermal conditions in the air cavity were the interior and exterior R values, the ACH of the air cavity, and the vapour resistance of the layers close to the air cavity. Insulation on the exterior side of the air cavity improved the performance of the air cavity, but it was shown that reducing the size of the inlet can be beneficial. Exterior R values should not exceed $R = 0.35\text{--}0.5 \text{ m}^2\text{K/W}$ to maintain solar-radiation-driven drying and to prevent mould growth during the summer season.

Overall, it may be seen that the research regarding the microclimate of façade air cavities primarily concerns air flows by buoyancy and responses to wind, while parameters such as moisture and temperature remain little studied. Viljanen's work [44] is a welcome exception, but unfortunately, the measurements were conducted on an unconventional wall assembly that cannot be directly compared to the remainder of the studies.

3.3. Roofs

Gullbrekken et al. [45] presented calculations to determine pressure losses at the inlet (eave) opening and inside the air cavity, consisting of friction losses and passing of tile battens. The study consisted of a large-scale laboratory experiment and a numerical analysis using the COMSOL software. The results showed that the pressure loss coefficient of the airstream was greatly dependent on the shape of the tile battens (aligned perpendicular to the air flow through the air cavity). Tile battens with rounded edges were found to incur a pressure loss coefficient 40% lower than battens with right-angled edges. Additionally, the results indicated that a classic eave design gave a lower pressure loss coefficient than modern eave design. Installing a bug net at the openings of the air cavity doubled the pressure loss coefficient. The calculations as well as laboratory and field studies were further described in an M.Sc. thesis by Hansen [46]. Hansen noted that the air cavity width should be increased by increasing the height of the longitudinal battens rather than the cross battens, to reduce pressure losses of the cavity air flow. Another M.Sc. thesis that contributed to the results of [44] is that of Eggen and Røer [47], who built upon the study by Hansen. The two theses disagree slightly on whether it is more advantageous to ventilate the roof cavity through openings in the eaves or behind the roof gutter. The disagreement might be explained by the different placement of sensors in the two experiments.

Bunkholt et al. [48] investigated, through a laboratory study, how the air flow through a ventilated roof cavity is affected by temperature and air cavity design. Measurements indicated that the air cavity temperature and flow conditions were affected by the cavity width as well as the roof angle. The temperature decreased and air flow rate increased with higher roof angles and larger cavity widths. Increasing the cavity width only increased the air temperature up to a certain point. The optimal cavity width was found to be 48 mm. Increasing the cavity width from 23 mm to 70 mm reduced thermal buoyancy by two thirds. The results of the study were also presented in a Master thesis [49]. A result reported in the thesis is that thermal buoyancy caused a driving pressure equivalent to a wind speed of 0.4–2 m/s. Thermal buoyancy may thus be the primary driving force of the airflow through the air cavity large portions of the year in Norway.

Säwén et al. [50] presented an analytical model to predict the air flow due to buoyancy in a ventilated roof assembly. The developed Thermal Buoyancy Model was compared to a laboratory study and a numerical calculation by using all three methods to analyse the air flow and thermal conditions in an air cavity using the same test setup and the same Norwegian climate. Results from the laboratory experiment and the numerical simulations quantitatively showed that an increase in the heat loads or the roof inclination increased the air flow rate due to increased driving forces. Increasing the cavity width increased the air volume flow due to decreased air flow resistance. The analytical model underestimated the air volume flow by an average of 20% compared to the laboratory experiment, and overestimated by 3% compared to the numerical calculations, but the trends are similar.

Mundt-Pedersen and Harderup [52] investigated the suitability of a 1D hygrothermal calculation tool in the design phase to prevent and evaluate the risk of mould growth and moisture damage in ventilated roofs. Moisture and temperature sensors were mounted in different positions in the roofs of four residential buildings in Sweden, while similar roof structures were modelled in the WUFI simulation program. The sensors measured temperature and RH over a period of 12–33 consecutive months. Quantitative results from sensors and WUFI were compared to each other and to critical values for mould growth. The results indicated that WUFI can be used as a tool to predict the climatic conditions, but

that multiple parameters will affect the results and need to be considered to reliably assess the mould growth potential.

In addition to their evaluations of façades as described in Section 3.3., Viljanen et al. [44] assessed the performance of a roof structure. Field measurements were conducted similarly to what was carried out for façades, insulating the exterior side of a roof air cavity with a thermal resistance value $R = 0.13$ and $2.13 \text{ m}^2\text{K/W}$. Calculation analyses showed that the optimal air change rate for the setup was 20 h^{-1} . Significant mould growth in the cavity was only possible near the inlet, where the temperature was lowest and the RH was highest. The analytical model identified the most influential parameters for the hygrothermal conditions in the cavity to be the internal and external R values, the ACH of the cavity airspace, and the vapour permeability of the vapour control layer. Insulating the exterior side of the air cavity was shown to increase the performance of the air cavity. Exterior R values should not exceed $0.7 \text{ m}^2\text{K/W}$ to maintain solar drying and to prevent mould growth in the summer season.

Gullbrekken et al. [53] described the risk of condensation on the interior side of the air cavity and mapped the relation between the air velocity in the cavity and the exterior wind speed. Field measurements were conducted in Norway using sensors to measure surface temperatures, the air temperature in the air cavity, and the air velocity in the cavity for three seasons: spring, summer, and autumn. The temperature below the roofing was shown to be lower than the exterior temperature 51%, 14%, and 56% of the time, respectively, for the three seasons. The measurements indicated a strong correlation between the wind speed and the air flow velocity in the air cavity. The hourly air exchange rate could be estimated as 11 h^{-1} for periods of low wind speed and 84 h^{-1} for periods of high wind speeds.

Bunkholt et al. [19] investigated the influence of exterior temperatures on the temperature in the air cavity, what condensation potential results from an air cavity temperature lower than the exterior temperature, and what the consequences of condensation risk can be. Field studies were conducted using sensors to measure surface temperatures, air temperature in the air cavity, and the air volume flow in the air cavity. Measurements were conducted over five periods in Norway between 2016 and 2018: one period each for spring, summer, and autumn, and two periods during winter. The results showed marked periods of air cavity temperatures being lower than the exterior air temperature and positive CP_i (condensation potential) values for extended periods, especially during spring and autumn, and in winter periods without snow on the roof. This indicated that the materials in the roof absorbed moisture and regulated the air humidity in the air cavity. Large negative CP_i values indicated drying of the roof structure.

Rønningen [54] conducted a field study on air cavities on research buildings in Trondheim, Norway. Solar radiation was measured to cause significantly higher temperatures in the air cavity (up to 35–40 degrees) than the outside air temperature. Near the top of the ventilated roof cavity of a sloped roof, temperatures were lower than outside temperatures 42% of the time, compared to 63% at the bottom. For a neighbouring building with a saddle roof, the numbers were 58% and 63% for the south and north side, respectively. Moisture measurements showed that the battens were able to dry quite quickly, going from a moisture level of 37 weight-% to 25% in 38 days.

Tianshu [51] conducted a numerical study of the air flow in air cavities for pitched wooden roofs using computational flow dynamics (CFD). It was found that increasing the width of a cavity from 23 to 48 mm greatly reduced the pressure gradient, friction coefficient, and total loss coefficient. A further increase to 140 mm yielded significantly lower impacts. The shape of the tile battens also greatly influenced the air flow, with a small rounding ($r = 4 \text{ mm}$) of the edges reducing the loss coefficient by 20% compared to right-angled battens.

3.4. Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)

Sandberg and Mosfegh [55] analysed the air flows and thermal transfer due to thermal buoyancy behind solar panels numerically and experimentally. Laboratory experiments

were conducted in Sweden, where thermoelements on the exterior side of the air cavity simulated a solar heating flux of 20–300 W/m². Numerical simulations were conducted with a uniform thermal flux varying between 20 and 500 W/m². The results showed agreement between the laboratory experiments and the simulations and indicated that it is advantageous to use high-emissivity materials for surfaces in air cavities. The analysis revealed the importance of thermal radiation exchange for the heat transfer mechanisms between the air cavity walls. For a thermal flux at or above 200 W/m², almost 30% of the heat was transferred to the otherwise unhated wall through radiation, and from there, it was transferred to the air through convection.

In a further study [56], the same authors investigated governing parameters for air flows generated by the heat transfer between solar panels and air cavities. A laboratory study was conducted, using the variables of inclination angle, the placement of solar panels, and the ratio between air cavity length and width. The results indicate that all the variables greatly influenced the air change ratio and the temperature of the air cavity. The velocity profile was uneven, and the highest airflow velocity did not necessarily occur on the heated side, which indicated a complex airflow pattern. The net effect would be an uneven cooling of the PV module, reducing its electricity generation. The temperature profile showed the highest temperature by the heated wall, the second highest temperature along the opposite wall of the air gap, and the lowest temperature in the middle of the air cavity. The temperature across the entire air gap decreased as the wall/roof angle increased.

In a final study [57], Sandberg and Mosfegh analytically derived expressions for the mass flow rate, air velocity, temperature increase, and location of neutral height (the point where the air pressure in the air cavity is equivalent to the ambient air pressure) in air cavities behind solar panels mounted on vertical façades. The calculations were compared to measured temperature values from previous studies [55,56]. The results indicated a good correlation between analytical expressions and experimental measurements for situations of constrained flow due to the small area of the inlet and/or the outlet compared to the cross-section area of the air cavity. With both ends at the size of the cross-section of the air gap, the agreement was 10–20% but increased at higher wall heights and cavity width ratios. Possible reasons for the discrepancy between the theory and measurements include difficulties with the laboratory measurements and the uncertainty in the many parameters required for a mathematical calculation. Sandberg and Mosfegh's studies comprise the only identified work that concerns the microclimate behind photovoltaic façade elements, unfortunately making comparisons impossible.

3.5. Notable Studies from Outside Nordic Climates

Some studies were identified that directly address the concerns of the present review but that were not included in the main assessment (Table 1) for various reasons. For the sake of reporting the wider international perspective on the microclimate of ventilated air cavities, some notable studies are recounted in this section.

Bouchair [9] presented a theoretical framework for describing cavity airflows in relation to an interior and exterior climate, using the example of a wall built for solar-driven ventilation in an Algerian climate. While "Nordic" parameters such as frost or wind-driven rain were not considered, the equations described may be used to create numerical models of air behaviour in cavities.

In Vancouver, Canada, Tariku and Iffa [58] performed an experimental study assessing the hygrothermal performance of wood frame systems built with different concepts of air cavities (ventilated, vented, no cavity). The findings included that ventilated façades have a vastly higher air change rate; that temperatures behind the façade boards are lower in the wall without an air cavity during winter days; and that the ventilated cavity sees a higher moisture content in the upper section during the wet winter season. This article was not included in the main study as Canada fell outside the scope of Nordic climates; however, the similar temperature conditions of the study site imply that its conclusions can be relevant, nonetheless.

Also in Canada, John Straube and various co-authors [24,25,59,60] examined the role of air cavities in the drying and ventilation of façades. A cavity width as small as 1 mm was found to be enough to ensure drainage. The openings of air cavities were found to play a significant role in the drying potential, they should be as large and unobstructed as possible to ensure drying. Straube also documented that moisture retained in the cavity air and deposited on surfaces was very challenging to simulate in computer models, highlighting the need for field studies and laboratory measurements.

Defo et al. [61] assessed the moisture performance and durability of brick veneer walls in the face of climate change in Canada. The deposition of moisture by wind-driven rain was found to pose a moisture risk on Canada's east coast, and it was found that an air cavity should be accompanied by other measures such as roof overhangs to reduce this risk.

Rahiminejad and Khovalyg [62] reviewed the literature on ventilation rates in ventilated air cavities in façades. A theoretical framework and mathematical models of cavity air flows were presented. The reviewed articles relevant to Nordic climates are all included in the present study.

Van Belleghem et al. [63] modelled the air, heat, and moisture transport in ventilated cavity walls in Belgium, comparing a simplified model in WUFI to a more detailed model. The WUFI model was found to overestimate the ventilation effect on drying and subsequently indicate lower moisture levels than was the case. A lesson learned from this study is that the widely commercially used software may not be sufficient to evaluate the moisture risk in air cavities accurately, presenting a challenge to the building designers who may rely upon it for moisture risk assessment.

Also in Belgium, Langmans and Roels [35] compared four measuring techniques for analysing cavity ventilation behind rainscreen cladding systems. The most suitable method depended on the type of cladding: a vented brick veneer façade displayed air change rates two orders of magnitude lower than ventilated siding, and thus required a pressure gauge to accurately measure the air change rates. The study indicated that measurements of air change rates in air cavities behind brick veneer may not be directly comparable to those behind more open façade claddings.

Marinosci et al. [37] investigated, numerically and experimentally, the thermal behaviour of a rainscreen façade in Italy, featuring an air cavity width of 240 mm. The velocity and temperature distribution of the air in the air cavity was measured and modelled. Correlating values between the model and field measurements suggested that the model is suitable for simulating large air cavities. The study, while thoroughly describing air flows and temperature, did not consider moisture.

4. Discussion

4.1. Air Cavities in Research Literature

An observation recorded early in the literature review was that the literature focusing on brick or rendered façades is much more abundant than the literature on ventilated façades. Even within the latter category, more literature focuses on the cladding itself or the structure behind the wind barrier than on the climate within the air cavity. Many of these articles use assumed climate data for the cavity for calculations or simulations, without performing or citing studies that indicate whether they match the actual conditions. If anything, these articles illustrate the need for the microclimate in air cavities to be investigated further.

The relevant literature recounted in this review originates from a quite small number of researchers at a few research institutions in Norway, Sweden, and Finland. In practice, only six independent field studies and two independent laboratory studies were identified within the relevant scope and climate. Several of the studies lack adequate descriptions of research parameters such as the precise design of the structure, or climate data for the research period, which makes it challenging to replicate or validate the results. The studies are also too different to make it feasible to directly compare their results with each other. For instance, the studies from Finland [44] investigated air cavities with insulation on the

exterior side, while the solar panel studies from Sweden [55–57] applied heat sources to the exterior side. Another observed issue is that the studies did not seek to quantify or describe microclimate parameters in the air cavity over time, with a chief focus instead being to compare the performance of different designs.

Wider international literature has been found that addresses these concerns to a greater degree, describing studies that cover hygrothermal conditions in finer detail with several parameters. However, the studies are of limited applicability, as they do not consider temperatures below 0 °C and rarely cover rain penetration. The deposition of liquid water in general remains challenging to simulate in numerical models. It was reported by Van Belleghem et al. [63] that commonly used simulation software tends to underestimate moisture loads, highlighting a challenge in using computer models to investigate high-moisture environments such as air cavities subject to wind-driven rain.

4.2. Climatic Conditions in the Air Cavity

A common observation across many of the field studies was that the temperature of the air cavity will be colder than the ambient air temperature for significant portions of the year, particularly near the inlet opening of the cavity. This creates potential for condensation and moisture damage. There is insufficient data to quantify the moisture risk due to this effect, as the studies are limited to short measurement periods and limited local climates—effectively, relevant measurements have only been conducted in Trondheim in Norway and Lund in Sweden.

Laboratory studies suggest that thermal buoyancy is a quite weak driving force of cavity airflows when compared to wind pressure [49]. The shape of the tile battens has a surprisingly large influence on the airflow resistance of the air cavity of ventilated roofs, with rounded battens reducing the pressure loss coefficient by 20–40% compared to right-angled battens [53]. This effect was observed through both laboratory and CFD studies [51].

4.3. Knowledge Gaps

This study uncovers certain knowledge gaps regarding the microclimate of ventilated cavities in façades and roofs in Nordic climates. There is a general lack of research into the long-term climatic behaviour of air cavities, and the few available studies are not directly comparable to each other. Little systematic research has been conducted that considers all relevant climatic parameters over time, such as the combination of temperature and moisture (in the cavity materials as well as in the air) and how they vary during all seasons. More studies, carried out in a comparable fashion to existing studies, would help address the limited availability of data. Concrete knowledge gaps that have been identified and should be addressed by future studies include:

- To what degree the temperature and relative humidity of the air cavity and correlate with that of the ambient air in long time series, considering the impact of wind, humidity, and rainwater penetration.
- The impact of precipitation and freeze–thaw cycles and how they affect the durability of materials in the building envelope.
- Determining how the air cavity microclimate can be simulated for long-term simulations using exterior climate data in a Nordic climate.
- Determining and describing the climatic loads that materials in the air cavity must withstand to achieve sufficient durability.
- Validating the accuracy of models of humidity conditions in the air cavity, using field or laboratory measurements.

Knowledge about these issues is required to improve the accuracy of simulations and calculations of the durability of materials in ventilated roof and façade systems, increasing the accuracy and reliability of service life predictions.

5. Conclusions

This study showed that the extent of research into the climatic conditions in air cavities in ventilated building roof and façade systems is limited. There is a general lack of comparable studies and quantitative results. The studies are also geographically limited; even though ventilated façade and roof systems are widespread across northern Europe, research into their operating parameters is mainly conducted in Norway and to a limited degree in Sweden. Roofs have generally received more research attention than façades. The studies show how the microclimate of the air cavity may differ from the exterior climate, with the cavity air temperature often being lower than the exterior air temperature. This creates a risk of mould in the air cavity. Thermal buoyancy is also seen to be a relatively weak driving force of air flow in cavities, while the impact of wind is significant.

The implication of the deficiency of studies is that there is currently no good information to use in assessing the durability and service life of materials in air cavities. Industry experience suggests that the principle of two-stage weatherproofing creates durable façade and roof systems, but new types of defects emerge due to a changing climate. It is currently difficult to predict how to improve designs to address these challenges to material durability, as the climatic loads in air cavities are not well studied.

Future work should aim to gather sensor data from buildings spread across different Nordic climate zones over extended durations of time. The relation between the exterior climate—e.g., as described in climate files for simulations—and the climatic conditions of air cavities must also be investigated further. Sensor data may be compared to climate data to evaluate the correlation between the exterior climate and the cavity microclimate, to determine necessary corrections when using climate data to simulate the conditions of ventilated air cavities. Such simulations are essential in evaluating the risk of rot and mould growth in air cavities, and thus the long-term deterioration of components such as the cladding, battens, and wind barrier.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/buildings12050683/s1>, Table S1: Search Strings.

Author Contributions: Conceptualization, S.B.I. and T.K.; methodology, S.B.I., E.A. and T.K.; formal analysis, S.B.I.; investigation, S.B.I.; writing—original draft preparation, S.B.I. and E.A.; writing—review and editing, S.B.I., E.A. and T.K.; supervision, E.A. and T.K.; funding acquisition, T.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Research Council of Norway, grant number 237859.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The work is carried out as part of the research project *SFI Klima 2050—Climate adaptation of buildings and infrastructure*. The authors would like to extend a thanks to CAD operator Remy Eik at SINTEF.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. O'Brien, K.; Sygna, L.; Haugen, J.E. Vulnerable or Resilient? A Multi-Scale Assessment of Climate Impacts and Vulnerability in Norway. *Clim. Chang.* **2004**, *64*, 193–225. [[CrossRef](#)]
2. Hanssen-Bauer, I.; Drange, H.; Førland, E.J.; Roald, L.A.; Børsheim, K.Y.; Hisdal, H.; Lawrence, D.; Nesje, A.; Sandven, S.; Sorteberg, A. *Klima i Norge 2100-Kunnskapsgrunnlag for Klimatilpasning Oppdatert i 2015*; Norwegian Environmental Agency/Norwegian Climate Service Center: Oslo, Norway, 2015.
3. Lisø, K.R.; Kvande, T. *Klimatilpasning Av Bygninger*, 1st ed.; Sintef Community: Trondheim, Norway, 2007; ISBN 978-82-536-0960-7.
4. Magnussen, K.; Mattsson, J. *Muggsopp i Bygninger. Forekomst og Konsekvenser for Inneklimaet*; Byggforskserien 701.401; SINTEF Community: Trondheim, Norway, 2005.
5. Viitanen, H. Factors Affecting the Development of Biodeterioration in Wooden Constructions. *Mater. Struct.* **1994**, *27*, 483–493. [[CrossRef](#)]

6. Thodesen, B.; Kvande, T.; Tajet, H.T.T.; Time, B.; Lohne, J. Adapting Green-Blue Roofs to Nordic Climate. *Nordic Archit. Res.* **2018**, *30*, 99–128.
7. Edvardsen, K.I.; Haug, T.; Ramstad, T. *Trehus. Håndbok 5*; SINTEF Akademisk Forlag: Oslo, Norway, 2018; ISBN 978-825360919.
8. Pourghorban, A.; Asoodeh, H. The Impacts of Advanced Glazing Units on Annual Performance of the Trombe Wall Systems in Cold Climates. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **2022**, *51*, 101983. [[CrossRef](#)]
9. Bouchair, A. Solar Induced Ventilation in the Algerian and Similar Climates. Ph.D. Thesis, University of Leeds, Leeds, UK, 1989.
10. Kvande, T. *Totrinnetning Mot Slagregn På Fasader. Luftede Kledninger og Fuger*; Byggeforskserien 542.003; SINTEF Community: Trondheim, Norway, 2013.
11. Gaarder, J.E. *Skrå, Luftede Tretak Med Isolerte Takflater-Byggeforskserien 525.101*; SINTEF Community: Trondheim, Norway, 2021.
12. Bunkholt, N.S.; Gullbrekken, L.; Time, B.; Kvande, T. Process Induced Building Defects in Norway—Development and Climate Risks. *J. Phys. Conf. Ser.* **2021**, *2069*, 012040. [[CrossRef](#)]
13. Bunkholt, N.S.; Time, B.; Kvande, T. *Luftede Kledninger. Anbefalinger for Klimatilpasning*; SINTEF Community: Trondheim, Norway, 2021.
14. Jelle, B.P. Accelerated Climate Ageing of Building Materials, Components and Structures in the Laboratory. *J. Mater. Sci.* **2012**, *47*, 6475–6496. [[CrossRef](#)]
15. Hens, H. Modeling the Heat, Air, and Moisture Response of Building Envelopes: What Material Properties Are Needed, How Trustful Are the Predictions? In Proceedings of the 1st Symposium on Heat-Air-Moisture Transport-Measurements on Building Materials, Toronto, ON, Canada, 23 April 2006.
16. Kvande, T.; Bakken, N.; Bergheim, E.; Thue, J.V. Durability of ETICS with Rendering in Norway—Experimental and Field Investigations. *Buildings* **2018**, *8*, 93. [[CrossRef](#)]
17. Gullbrekken, L.; Kvande, T.; Jelle, B.P.; Time, B. Norwegian Pitched Roof Defects. *Buildings* **2016**, *6*, 24. [[CrossRef](#)]
18. Asphaug, S.K.; Time, B.; Kvande, T. Moisture Accumulation in Building Façades Exposed to Accelerated Artificial Climatic Ageing—A Complementary Analysis to NT Build 495. *Buildings* **2021**, *11*, 568. [[CrossRef](#)]
19. Bunkholt, N.S.; Gullbrekken, L.; Kvande, T. Influence of Local Weather Conditions on Ventilation of a Pitched Wooden Roof. *J. Civ. Eng. Archit.* **2020**, *14*, 37–45. [[CrossRef](#)]
20. Lexico Dictionaries MICROCLIMATE | Meaning & Definition for UK English | Lexico.Com. In Lexico Dictionaries | English. Available online: <https://www.lexico.com/definition/microclimate> (accessed on 19 April 2022).
21. Svendsen, S.D. The Principle of One-Stage and Two-Stage Seals. In Proceedings of the International Symposium on Weathertight Joints for Walls, Oslo, Norway, 25 September 1967; pp. 298–301.
22. Birkeland, Ø. The Mechanism of Rain Penetration. In Proceedings of the International Symposium on Weathertight Joints for Walls, Oslo, Norway, 25 September 1967; pp. 33–34.
23. Isaksen, T. Rain Leakage Test on Open Joints in Ventilated Claddings. In Proceedings of the International Symposium on Weathertight Joints for Walls, Oslo, Norway, 25 September 1967; pp. 349–354.
24. Straube, J. The Role of Small Gaps Behind Wall Claddings on Drainage and Drying. In Proceedings of the 11th Canadian Conference on Building Science & Technology, Banff, AB, Canada, 22 March 2007.
25. Straube, J.; Smegal, J. *Modeled and Measured Drainage, Storage and Drying Behind Cladding Systems*; Building Science Corporation: Somerville, MA, USA, 2009.
26. Arksey, H.; O'Malley, L. Scoping Studies: Towards a Methodological Framework. *Int. J. Soc. Res. Methodol.* **2005**, *8*, 19–32. [[CrossRef](#)]
27. O'Brien, A.M.; Mc Guckin, C. The Systematic Literature Review Method: Trials and Tribulations of Electronic Database Searching at Doctoral Level. In *SAGE Research Methods Cases*; SAGE Publishing Ltd.: New York, NY, USA, 2016. [[CrossRef](#)]
28. Johansen, K.S. Internal Rain Gutter for BIPV Roof. Dimensioning the Internal Rain Gutter for ZEB Laboratory's BIPV Roof. Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2019.
29. Wohlin, C. Guidelines for Snowballing in Systematic Literature Studies and a Replication in Software Engineering. In *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering—EASE '14*; ACM Press: London, UK, 2014; pp. 1–10.
30. Gobakken, L.R.; Høibø, O.A.; Solheim, H. Factors Influencing Surface Mould Growth on Wooden Claddings Exposed Outdoors. *Wood Mater. Sci. Eng.* **2010**, *5*, 1–12. [[CrossRef](#)]
31. Janssen, H.; Blocken, B.; Carmeliet, J. Conservative Modelling of the Moisture and Heat Transfer in Building Components under Atmospheric Excitation. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2007**, *50*, 1128–1140. [[CrossRef](#)]
32. Gupta, B.S.; Jelle, B.P.; Hovde, P.J.; Gao, T. Wood Coating Failures against Natural and Accelerated Climates. *Proc. Inst. Civ. Eng.-Constr. Mater.* **2015**, *168*, 3–15. [[CrossRef](#)]
33. Geving, S.; Holme, J. Vapour Retarders in Wood Frame Walls and Their Effect on the Drying Capability. *Front. Archit. Res.* **2013**, *2*, 42–49. [[CrossRef](#)]
34. Lie, S.K.; Thiis, T.K.; Vestøl, G.I.; Høibø, O.; Gobakken, L.R. Can Existing Mould Growth Models Be Used to Predict Mould Growth on Wooden Claddings Exposed to Transient Wetting? *Build. Environ.* **2019**, *152*, 192–203. [[CrossRef](#)]
35. Langmans, J.; Roels, S. Experimental Analysis of Cavity Ventilation behind Rainscreen Cladding Systems: A Comparison of Four Measuring Techniques. *Build. Environ.* **2015**, *87*, 177–192. [[CrossRef](#)]

36. Brischke, C.; Thelandersson, S. Modelling the Outdoor Performance of Wood Products—A Review on Existing Approaches. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *66*, 384–397. [[CrossRef](#)]
37. Marinosci, C.; Strachan, P.A.; Semprini, G.; Morini, G.L. Empirical Validation and Modelling of a Naturally Ventilated Rainscreen Facade Building. *Energy Build.* **2011**, *43*, 853–863. [[CrossRef](#)]
38. Falk, J.; Sandin, K. Ventilated Rainscreen Cladding: Measurements of Cavity Air Velocities, Estimation of Air Change Rates and Evaluation of Driving Forces. *Build. Environ.* **2013**, *59*, 164–176. [[CrossRef](#)]
39. Falk, J.; Sandin, K. Ventilated Rainscreen Cladding: A Study of the Ventilation Drying Process. *Build. Environ.* **2013**, *60*, 173–184. [[CrossRef](#)]
40. Falk, J.; Molnár, M.; Larsson, O. Investigation of a Simple Approach to Predict Rainscreen Wall Ventilation Rates for Hygrothermal Simulation Purposes. *Build. Environ.* **2014**, *73*, 88–96. [[CrossRef](#)]
41. Uvsløkk, S. The Importance of Wind Barriers for Insulated Timber Frame Constructions. *J. Therm. Insul. Build. Envel.* **1996**, *20*, 40–62. [[CrossRef](#)]
42. Nore, K. Hygrothermal Performance of Ventilated Wooden Cladding. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2009.
43. Nore, K.; Blocken, B.; Thue, J.V. On CFD Simulation of Wind-Induced Airflow in Narrow Ventilated Facade Cavities: Coupled and Decoupled Simulations and Modelling Limitations. *Build. Environ.* **2010**, *45*, 1834–1846. [[CrossRef](#)]
44. Viljanen, K.; Lü, X.; Puttonen, J. Factors Affecting the Performance of Ventilation Cavities in Highly Insulated Assemblies. *J. Build. Phys.* **2021**, *45*, 67–110. [[CrossRef](#)]
45. Gullbrekken, L.; Uvsløkk, S.; Geving, S.; Kvande, T. Local Loss Coefficients inside Air Cavity of Ventilated Pitched Roofs. *J. Build. Phys.* **2018**, *42*, 197–219. [[CrossRef](#)]
46. Hansen, E. Luftstrømning i skrå tretak-Eksperimentelle undersøkelser og numeriske beregninger. Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2016.
47. Eggen, M.G.; Røer, O.V. Lufting av Skrå Tretak-Trykktap ved Ulike Luftespalteutforminger. Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2018.
48. Bunkholt, N.S.; Säwén, T.; Stockhaus, M.; Kvande, T.; Gullbrekken, L.; Wahlgren, P.; Lohne, J. Experimental Study of Thermal Buoyancy in the Cavity of Ventilated Roofs. *Buildings* **2020**, *10*, 8. [[CrossRef](#)]
49. Bunkholt, N.S. Eksperimentell studie av termisk oppdrift i tak med luftet tekning. Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2019.
50. Säwén, T.; Stockhaus, M.; Hagentoft, C.E.; Bunkholt, N.S.; Wahlgren, P. Model of Thermal Buoyancy in Cavity-Ventilated Roof Constructions. *J. Build. Phys.* **2021**, *45*, 413–431. [[CrossRef](#)]
51. Tianshu, L. Numerical Study of Air Flow in Air Cavities for Pitched Wooden Roofs. Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2020.
52. Mundt-Petersen, S.O.; Harderup, L.E. Predicting Hygrothermal Performance in Cold Roofs Using a 1D Transient Heat and Moisture Calculation Tool. *Build. Environ.* **2015**, *90*, 215–231. [[CrossRef](#)]
53. Gullbrekken, L.; Kvande, T.; Time, B. Ventilated Wooden Roofs: Influence of Local Weather Conditions—Measurements. *Energy Procedia* **2017**, *132*, 777–782. [[CrossRef](#)]
54. Rønningen, E.S. Feltstudie Av Klimatiske Forhold i Luftespalter Bak Kledning Og Taktekning. Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2020.
55. Sandberg, M.; Moshfegh, B. Flow and Heat Transfer in the Air Gap behind Photovoltaic Panels. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **1998**, *2*, 287–301. [[CrossRef](#)]
56. Sandberg, M.; Moshfegh, B. Ventilated Solar Roof Air Flow and Heat Transfer Investigation. *Renew. Energy* **1998**, *15*, 287–292. [[CrossRef](#)]
57. Sandberg, M.; Moshfegh, B. Buoyancy-Induced Air Flow in Photovoltaic Facades—Effect of Geometry of the Air Gap and Location of Solar Cell Modules. *Build. Environ.* **2002**, *37*, 211–218. [[CrossRef](#)]
58. Tariku, F.; Iffa, E. Empirical Model for Cavity Ventilation and Hygrothermal Performance Assessment of Wood Frame Wall Systems: Experimental Study. *Build. Environ.* **2019**, *157*, 112–126. [[CrossRef](#)]
59. Straube, J.; van Straaten, R.; Burnett, E. Field Studies of Ventilation Drying. In Proceedings of the 9th International Conference on Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings (Buildings IX), Clearwater Beach, FL, USA, 5–10 December 2004.
60. Straube, J.F.; Finch, G. *Ventilated Wall Claddings: Review, Field Performance, and Hygrothermal Modelling*; Research Report-0906; Building Science Corporation: Westford, MA, USA, 2009.
61. Defo, M.; Lacasse, M.A.; Wang, L. Effects of Climate Change on the Moisture Performance and Durability of Brick Veneer Walls of Wood Frame Construction in Canada. *J. Phys. Conf. Ser.* **2021**, *2069*, 012063. [[CrossRef](#)]
62. Rahiminejad, M.; Khovalyg, D. Review on Ventilation Rates in the Ventilated Air-Spaces behind Common Wall Assemblies with External Cladding. *Build. Environ.* **2021**, *190*, 107538. [[CrossRef](#)]
63. Van Bellegem, M.; Steeman, M.; Janssens, A.; De Paepe, M. Heat, Air and Moisture Transport Modelling in Ventilated Cavity Walls. *J. Build. Phys.* **2015**, *38*, 317–349. [[CrossRef](#)]

E Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway

I dette vedlegget er artikkelen *Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway* vist slik den ble innsendt til det vitenskapelige tidsskriftet *Buildings* i juni 2022.

Ingebretsen, S.B., Andenæs, E., Kvande, T. (2022). Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway. Innsendt.

Microclimate of air cavities in ventilated wooden façade and roof systems – case studies from Norway

Sara Bredal Ingebretsen ¹, Erlend Andenæs ^{2*}, Lars Gullbrekken ³, and Tore Kvande ⁴

¹ M.Sc. student, Department of civil and environmental engineering, Norwegian University of Science and Technology; sarabin@stud.ntnu.no

² Post-doctoral researcher, Department of civil and environmental engineering, Norwegian University of Science and Technology; erlend.andenas@ntnu.no

³ Ph.D., SINTEF, lars.gullbrekken@sintef.no

⁴ Professor, Department of civil and environmental engineering, Norwegian University of Science and Technology; tore.kvande@ntnu.no

* Correspondence: erlend.andenas@ntnu.no ;

Abstract: Harsh climatic conditions in the Nordic countries are being worsened by climate change, which increases the moisture loads on building façades. New types of defects are being observed in air cavities in well-designed and well-built wooden façades and roofs. More knowledge is required on the microclimatic conditions in air cavities and roofs, and their implications for organic growth and biological deterioration. The present study collects and presents sensor data from three buildings in Norway. Collected air temperature, air humidity, and wood moisture data are compared to mould growth criteria found in scientific literature, building physics software, and national and international standards. The data shows great differences in air cavity microclimates between the case buildings and between different sensor positions within the instrumented air cavities. Air cavity temperatures are found to be lower than exterior temperatures for a substantial portion of the time. For tall buildings, the vertical positioning of a sensor influences the data more than the orientation of the façade. All three buildings feature monitoring positions with both acceptable and critically high levels of moisture to indicate mould risk. There is great variation in the estimated risk of mould growth according to the different criteria.

Keywords: Climate adaptation, Nordic climate, temperature and moisture conditions, wood, mould growth, rot, dual-barrier weatherproofing

Citation: Lastname, F.; Lastname, F.; Lastname, F. Title. *Buildings* **2022**, *12*, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Academic Editor: Firstname Lastname

Received: date

Accepted: date

Published: date

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Building façades and roofs serve to protect the building structure from all types of weather year-round. Their long-term durability is therefore a major concern. To assess the requirements of durability, it is necessary to know which climatic parameters the materials will be exposed to throughout their design lifetime. In the Nordic countries, the exterior climate is harsh, with strong winds, wind-driven precipitation, freeze-thaw cycles, and large and frequent temperature fluctuations, often in varying combinations [1]. With climate change, the climate is expected to involve increased temperatures and precipitation levels [2]. Façades will thus be exposed to even more harsh weather through their lifetimes. In the Nordic countries, wood as a construction material sees widespread usage, being used in load-bearing structures as well as façade elements. The need for climate change mitigation has also led to an increase in the use of cross-laminated timber (CLT) structures [3] and solar panels integrated as roofing and façade materials (BIPV) [4].

To protect the underlying structure from weather exposure, façades and roofs in the Nordic climate are commonly built according to the principle of dual-barrier weatherproofing, also known as “two-stage weatherproofing” [5]. The exterior barrier is the

cladding, which functions as a rain barrier. The inner barrier is the water-repellent but vapour permeable wind barrier, which permits drying of the structure. Between the two barriers is a ventilated air cavity for moisture removal through drainage and ventilation drying [6,7]. As the air cavity is ventilated to the exterior air at the top and bottom, as well as any joints in the cladding, the exterior climate will greatly affect the microclimate of the air cavity. However, the correlation between the exterior climate and cavity microclimate has not been adequately investigated for a Nordic climate [5]. The term “microclimate” is understood as the set of climatic conditions within a limited area, that may differ from those of the surrounding area [8]. Relevant microclimate parameters involve temperature and moisture conditions; rain intrusion; air flow characteristics; and how these parameters behave in relation to those of the exterior climate [5]. Theoretically assessing the microclimate is a complex challenge, although the governing equations are known [9]. Simplified models used in commercially available building physics software tend to underestimate the moisture conditions by overestimating drying rates [10]. In Nordic climates in particular, this tendency could result in hazardous conditions going unnoticed. Therefore, field studies are necessary to investigate and validate the microclimatic conditions of ventilated façades.

Wood is an organic material that needs to be protected from biological degradation to achieve a long service life, it is otherwise resistant against other forms of degradation [11,12]. An increase in building defect cases involving wooden façades is now observed in certain parts of Norway [13,14], with battens rotting while the cladding has remained intact. The façades are designed and built according to principles traditionally considered sound [15], which suggests that unexpected microclimatic conditions in the air cavity may be the cause. The microclimate assumed during the design appears to underestimate the potential for organic growth. The growth of microorganisms is a well-known hazard for wood structures, and while there is no general agreement over the exact parameter thresholds where it occurs [16], it is well known that the combination of high moisture loads and moderate temperatures over time facilitates a high risk of mould growth. A previous study concluded that there is a lack of available research literature documenting the microclimatic conditions in air cavities using dual-barrier weatherproofing applicable for long-term durability assessments [5].

Evidently, it is essential to chart the microclimatic conditions of ventilated wooden façades and roofs in a Nordic climate and analyse the risk of biological degradation. Considering this general need, the present study investigates the following research questions:

- What moisture and temperature conditions may be expected in ventilated air cavities behind façade cladding and roofing?
- What is the risk of mould growth in façades and roofs featuring dual-barrier weatherproofing?

The following limitations apply to the research: The studies have been conducted on three buildings in two climate zones in Norway. Two of the buildings are situated in a climate zone where challenging conditions have been reported. The last building is a reference building monitored in detail as part as a research laboratory.

The measurement series extend over two years for the reference building and one year for the two others. The buildings are relatively new at the start of measurements or have recently had their façade refurbished. Thus, built-in moisture may affect the results somewhat.

Two of the buildings are inhabited dwellings in ordinary use and have not been designed or modified to facilitate research, nor is the use of the buildings affected by the measurements. The reference building is heavily monitored for research purposes but is otherwise an office building in daily use [17].

Sensors were not placed in the buildings with the present study in mind. All sensors were mounted in untreated wood commonly used in wooden façades, either in the battens of the façade in question, or in a separate block attached to the battens.

The study measures temperature and humidity in the cavity air, as well as wood moisture. Other parameters of interest that were not monitored include: surface temperatures, air flow, and air pressure. Exterior climate was not monitored on site (except for the reference building) but was retrieved from nearby meteorological weather stations. Local climate variations may therefore be a source of uncertainty.

It is not deemed to be within the scope of the study to evaluate the design or workmanship of the case buildings.

2. Theoretical framework

2.1 Air cavities

Roofs and façades must work as a climate barrier against the varied exterior climate, while facilitating a healthy and comfortable indoor climate [18]. To ensure this function, heat and moisture must be prevented from entering the structure or be continuously removed [19]. Ventilated façades and sloped roofs made of wood are a commonly used building principle to achieve this in the Nordic countries [15]. These buildings use the principle of dual-barrier weatherproofing, also known as “two-stage weatherproofing” [5], wherein the exterior cladding functions as a rain screen while a vapour permeable wind barrier layer permits the structure to dry outwards [20]. These layers are separated by an air cavity that facilitates ventilation and drainage. The air cavity is continuous through the façade and ventilated to the outdoor air at the bottom and top of the walls and roofs. The principle of dual-barrier weatherproofing is illustrated in Figure 1. Weatherproofing façades, roofs, and structural transitions using dual barriers has proven to give an effective and long-lasting protection against wind-driven rain [21].

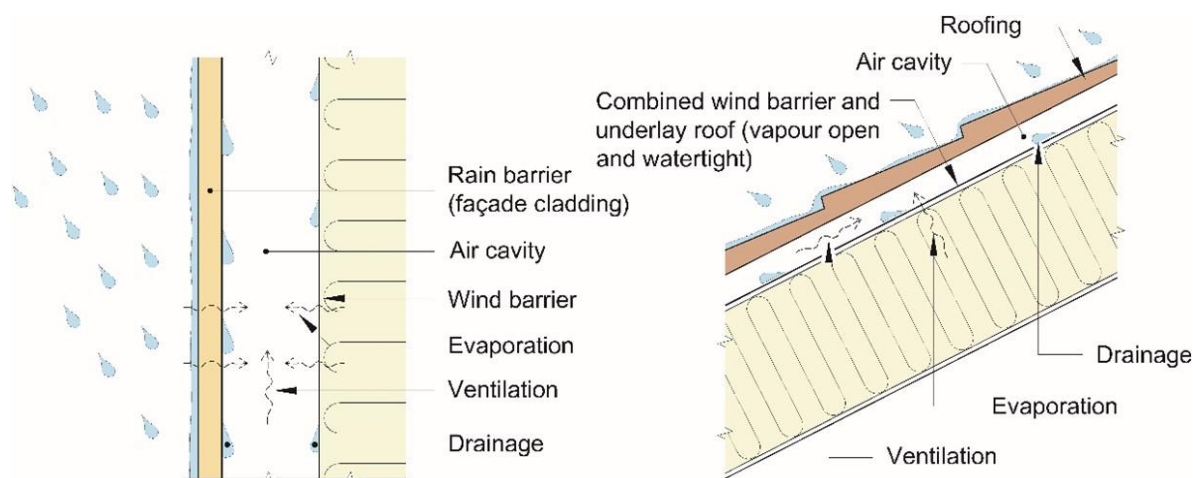


Figure 1: The principle of dual-barrier weatherproofing

The cladding forms the exterior layer of the façade and acts as a rain barrier that keeps most of the precipitation away from the wind barrier layer. It also acts as a physical protection barrier for the inner wall assembly. The cladding needs to withstand the climatic and mechanical stresses of the weather and allow expansion and contraction due to temperature and/or moisture. The cladding also protects the wind barrier from disintegration by solar UV radiation. Lastly, the cladding is also important for the aesthetic expression of the façade [21].

The air cavity between the cladding and the wind barrier is open to the exterior air at the top and bottom so that air flows can pass through the cavity and provide ventilation [22]. The purpose of the air cavity is [13,20]:

- To work as a capillary break between the rain barrier and the wind barrier, so that wind-driven rain that soaks the rain screen cannot transfer through to the inner wall assembly by capillary action.

- To provide drainage for water that penetrates the rain screen. 136
- To remove excess moisture from the inner wall assembly and the interior side of the cladding through ventilation drying, to prevent mould growth and rot. 137
138

For sloped roofs, the air cavity also serves to remove heat and interrupt thermal conduction through the roof assembly, to prevent the melting of snow on the roof. Snowmelt can re-freeze on roof overhangs or in roof gutters [23]. This may cause leaks, the deterioration of roof components, and hazardous ice formation [24,25]. The necessary air cavity width to prevent snowmelt is usually significantly larger than what is necessary to achieve ventilation drying [23]. 139
140
141
142
143
144

The wind barrier layer forms the inner surface of the air cavity. This layer needs to act as a wind break, to prevent cold exterior air from permeating the insulation layer and compromising its insulation properties. It must also act in tandem with the inner vapour barrier, to prevent the leakage of (warm, humid) interior and (cold) exterior air through the roof or wall assembly. The wind barrier surface must be water-repellent to ensure that water that penetrates the rain screen will be drained through the lower opening of the air cavity rather than soaking the inner wall assembly. If the façade is greatly exposed to wind-driven rain, it is recommended that the wind barrier be as vapour permeable as possible, so that moisture has the ability to dry outwards [21]. 145
146
147
148
149
150
151
152
153

For the ventilated façade to achieve the functional requirements, the air cavity must be designed according to its annual wind-driven rain load, other local climate conditions, the type of wall assembly, and the type of façade cladding [13]. Building design guides recommend different minimum cavity widths for different types of cladding, from 19 mm for horizontally oriented wood siding boards, to 55 mm for vertical siding boards [13]. For horizontal siding boards and façade panels, the air cavity is formed by placing vertical battens between the wind barrier layer and the cladding. For vertical siding board, which requires horizontal mounts, cross battens are mounted horizontally on the vertical battens and the cladding is attached to these. 154
155
156
157
158
159
160
161
162

For ventilated sloped roofs, the minimum roof angle should be 6° [26], but roof angles are recommended to be greater than $10\text{--}15^\circ$ to ensure sufficient drainage and watertight perforations [27]. The roof has a ventilated air cavity underneath the roofing [22], where roof panels may be mounted directly on longitudinal battens, and roof tiles are mounted on additional, horizontal tile battens. This also allows air flows across the roof. Roofs may be ventilated from the eaves to the ridge, or from eaves to eaves. 163
164
165
166
167
168

2.2 Parameters that affect the cavity climate 169

The microclimate of the air cavity is affected by several factors of heat and moisture transport. Heat transfer in the air cavity, see Figure 2, will to a large degree be determined by solar radiation and the temperature of the air ventilated into the cavity, but may also be affected by thermal conduction from the interior side, heat transfer due to moisture (condensation/evaporation), and thermal conduction through the cladding. 170
171
172
173
174

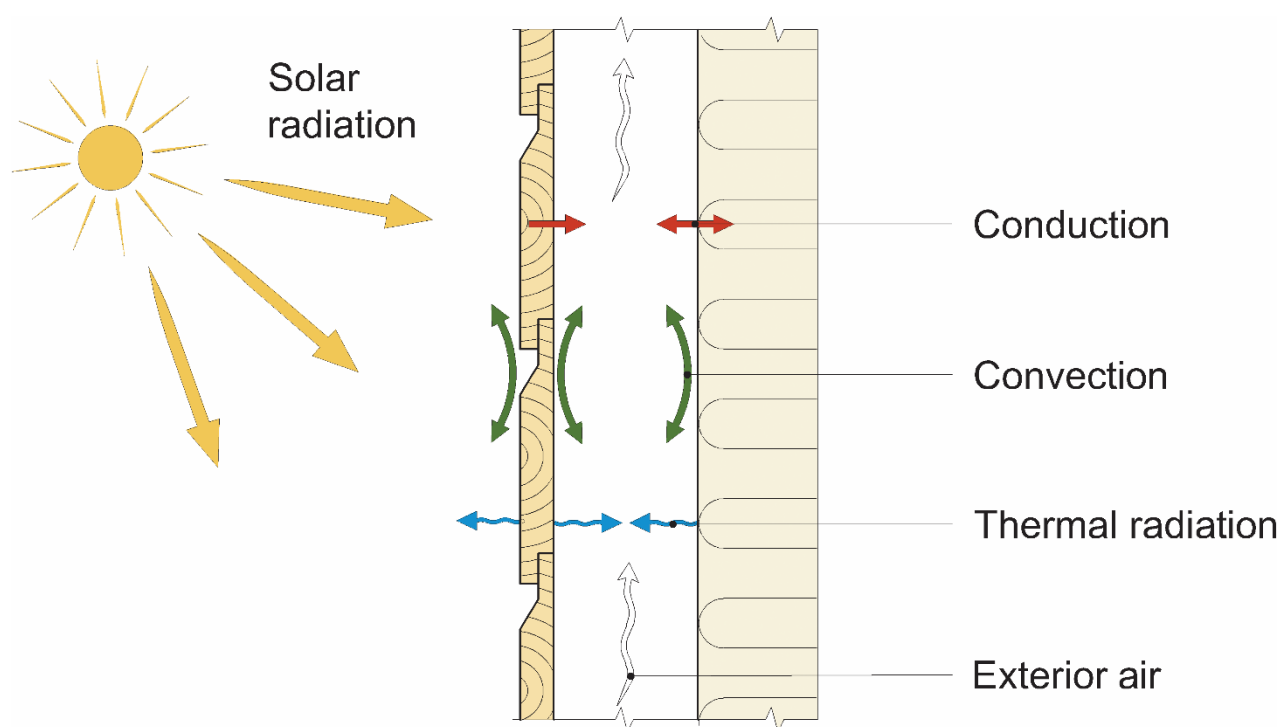


Figure 2: Heat transfer mechanisms in an air cavity. Figure drawn based on [28].

The ventilation of an air cavity is typically expressed as an air change rate – the hourly number of air exchanges between the cavity and the exterior air [29]. The driving force of the air flow is a combination of the stack effect and pressure differences across the air cavity [13]. The stack effect is caused by temperature differences between the air cavity openings (natural convection) [30]. It is to a large degree determined by the amount of incident solar radiation on the façade [31]. Pressure differences across the air cavity are caused by wind acting on the façade (forced convection) [30]. Key parameters to calculate this wind-driven ventilation are, among others, the wind velocity and the difference in air pressure coefficients, c_p , at the two air cavity openings [32]. Furthermore, the building's geometry, the local topography, the placement and size of the air cavity openings, the air cavity dimensions, the surface roughness of the air cavity, the permeability of the cladding, temperature, and the Reynolds number of the air cavity all contribute [30]. The air flow is also affected by the pressure loss through the air cavity, which reduces the driving force of pressure differentials. The pressure loss is a combination of losses at the cavity inlet and outlet, air flows around battens (local losses), and friction losses against the cavity surfaces [32].

Ventilation of the air cavity ensures the continuous removal of humid air, so that less humid air can flow in and provide drying of the rear wall and the interior side of the cladding. This type of drying is called “ventilation drying” and is of key importance to moisture control in the air cavity and the surrounding materials. Adequate drying will protect organic matter from moisture defects. The drying rate in the air cavity is closely correlated with the air flow rate. It is hence essential to know the temperature conditions, the air flow rate, and the driving force of the air flow to determine the ventilation drying of a wall assembly [33]. The importance of proper ventilation of the air cavity increases with higher insulation thicknesses, as the latter causes the relative humidity (RH) to increase, and thus the risk of mould growth in wooden structures. Ventilation is especially important for roofs and façades exposed to wind-driven rain [34].

Moisture transported into the air cavity and surrounding materials primarily originates from the exterior environment, in the form of precipitation and humid air entering through gaps in the cladding [35], or humid air entering through the openings of the air cavity [36]. Humidity in the air exists in the form of water vapour and is commonly

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

expressed in terms of relative humidity (RH) [%] or absolute humidity (AH) [g/kg or g/m³]. Precipitation in the form of wind-driven rain is among the most severe climatic stress a façade may endure [37,38], and has become the focus of much research [35]. Lesser moisture sources include the drying of built-in moisture or leaks of humid indoor air through the wall assembly. To quantify the moisture transport in an air cavity, it is necessary to know the temperature profile through the air cavity. The temperature profile depends on the temperature of intake air and the thermal exchange between the surfaces of the air cavity [33].

The consequences of condensation may include moisture defects, mould, and rot. How a material stores heat and moisture, depends on its hygrothermal properties, which also determine its drying properties. The hygrothermal conditions of an air cavity are chiefly determined by the moisture and thermal flows of the air. Hygrothermal simulation programs are often used to analyse the moisture performance of building envelopes. These include the risk of mould growth. For ventilated façades and roofs, the ventilation rate in the air cavity is an important parameter [5,39].

2.3 Consequences of air cavity climate

Inadequate ventilation of an air cavity may lead to insufficient and slow drying, bringing a risk of moisture defects, especially when combined with high air humidity levels, low sun exposure, and static air [13]. Moisture defects may foster mould growth and lead to indoor air quality issues [21]. Conversely, excessive ventilation may also cause moisture defects, by cooling the interior side of the cladding and increasing the risk of condensation. This may again lead to the growth of algae and black fungi [13].

Fungi that infect wood materials may be divided into two categories: rot and (blue, white, black) stain fungi [40]. Rot fungi creates enzymes that break down cellulose and lignin, deteriorating the structural properties of the wood. Stain fungi, as the name suggests, causes discolouration of the wood surface but do not affect its structural properties. Common stain fungi include mould (mildew) and blue stain fungi [40]. Certain species of mould may also release mycotoxins, which may cause allergic reactions in humans [41]. The presence of stain fungi on a surface is a typical indicator of high wood moisture levels, and that rot fungi may potentially develop. Common to all species of fungi is the need for moisture, air (oxygen and nitrogen), and nutrients like biological construction materials over time to grow [21,42]. Fungi spreads through spores, which are ever-present in the air, or directly through infected materials [21,40]. Water is released as part of the fungal deterioration of wood, which the fungi may transport through mycelium to drier parts of the wood material, facilitating further growth [40]. If the fundamental growth conditions for fungi are met, the growth rate will be determined by whether microclimatic conditions such as temperature and relative humidity (RH) remain within the fungi's tolerance limits over time [21,42,43]. Once a fungal infection has taken hold, its spread may occur at lower RH levels than what was required to initiate the growth in the first place [36]. It is therefore essential to dry the structure during the construction phase, quickly enough that fungal infections on surfaces do not have time to develop [44].

Determining the exact conditions required for fungal growth in wood to be initiated and spread is a complex and difficult task. It is also dependent on the species of fungus [36,40,42]. Several studies have been conducted trying to determine the threshold of fungal growth, drawing different conclusions. The present study is based on a literature review by Gradeci et al. [16], which systematically compares criteria and models for mould growth in wood-based materials. A key output of the study is a combination of mould growth criteria curves, among others, Clarke et al. [45], Johansson et al. [46], Biohygrothermal [47,48], Mould Germination Graph (MGGM) [49–51] and the m model [52]. Gradeci et al also presents a selection of mould growth criteria from national and international standards [16].

The VTT mould growth model [53–59], which is used by the simulation program WUFI Mould Index VTT [60] is also mentioned by Gradeci et al. [16]. The VTT program

is based on a mathematical empirical model based on laboratory measurements of mould growth on pine and spruce [53,55,56], and further developed to include more materials [57–59]. The model predicts a mould growth index as a function of the surface material, temperature, relative humidity (RH), and time. The mould growth index indicates the probability of mould growth activity on a scale from 0 to 6, where the value reflects the predicted amount of mould growth on the surface [55].

The criteria for mould growth include temperature, RH, and wood moisture content. The wood moisture content is defined as the relation between the weight of the moisture in the wood and the dry weight of the wood, expressed as a percentage (weight-%) [42]. Wood moisture is the sum of free water in the pore cavities and bound water in pore walls [42]. The minimum wood moisture content required to initiate mould growth is found to vary considerably, from 20 weight-% [36,40–42,44], 28–30 weight-% [36], down to 16–18 weight-% for more vulnerable wood products like chip boards [41]. Optimal growth conditions for most types of fungi occur at slightly higher levels of wood moisture.

The wood moisture content is greatly affected by the moisture of the surroundings since wood is a hygroscopic material. It will absorb and release moisture to the surrounding air, depending on its temperature and relative humidity [42]. Following long exposure to a given temperature or RH, the wood moisture content will stabilize around an equilibrium moisture content for the local microclimate [42].

3. Methods

3.1 Instrumentation of the case buildings

The case buildings for this study are designated Fjogstad-Hus (residential), Norgeshus (residential), and the ZEB Laboratory (office/laboratory) and are all located in Norway, as shown in Figure 3. Sensors are mounted into pieces of untreated wood in the façade air cavities of the three buildings, as well as the roof air cavity of the ZEB Laboratory. The sensors, OmniSense S-160 and Hygrotrac, measure temperature [$^{\circ}\text{C}$] ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$), RH [%] ($\pm 2\%$), og AH [g/kg] of the cavity air, as well as wood moisture content [weight-%]. For Fjogstad-Hus and Norgeshus, sensor data for one year is retrieved, while the ZEB Laboratory has two years of data. All data has a temporal resolution of one hour. The locations of the sensors in the three buildings are shown in Table 1 and in Figures 4 to 6, and further described in the instrumentation reports [14,61] and a M.Sc. thesis [62]. All buildings are assessed in the instrumentation reports to be designed according to sound principles and well-constructed; and the principle of dual-barrier weatherproofing is followed. Fjogstad-hus is clad in white-painted, horizontal wood siding boards and a 23 mm air cavity. Norgeshus has a cladding consisting of white-painted, vertical wood siding boards and a 59 mm air cavity. The ZEB Laboratory features building integrated photovoltaic (BIPV) panels on the south, east, and west façades and on the roof (which is sloped at 32 degrees and faces south); and vertical, black-coloured wood siding boards on the north façade. The air cavity is 111 mm wide for all façades and 126 mm for the roof.

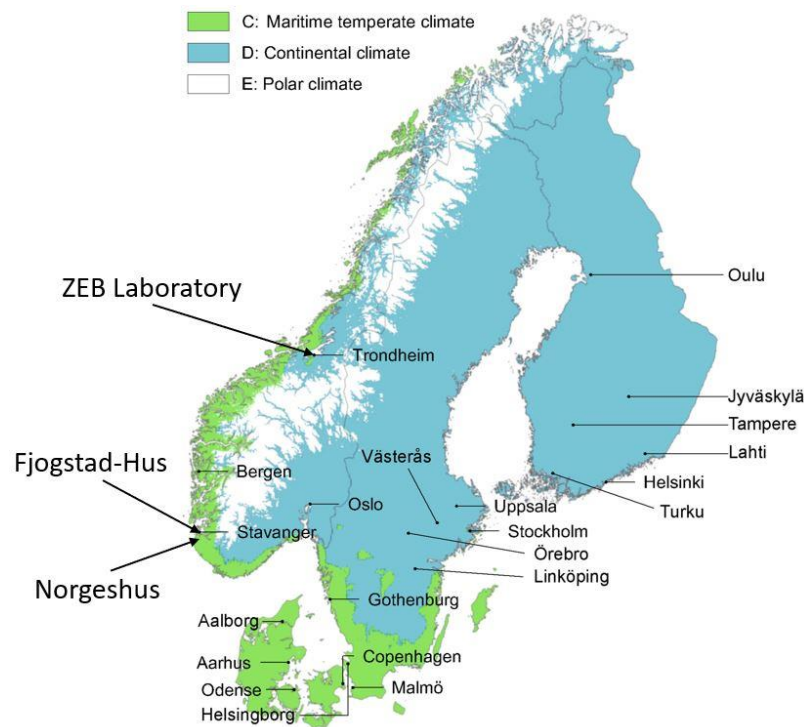


Figure 3: Location of the case buildings on a climate classification map of the Nordic countries according to the Köppen-Geiger classification system. All cities above 100,000 inhabitants are marked. Figure based on [63], used with permission.

Table 1: Sensor positions in the case buildings.

Building	Sensor	Orientation (façade/roof)	Description of placement
Fjogstad-Hus	SE-1	Southeast	560 mm from east corner, 430 mm from lower edge of siding board.
	SE-2		Top, 600 mm from eave height, 540 mm from east corner, 460 mm from eave.
	SE-3		Above window, 170 mm from head, 2820 mm from east corner.
	SE-4		Below window, approx. 300 mm from sill, 2250 mm from east corner, 420 mm from lower edge of siding board.
	SE-5		560 mm from east corner, 2950 mm from lower siding board.
	SW-1	Southwest	Above middle window, 230 mm above head, 310 mm from west corner. Frame partially covered by window.
	SW-2		Above middle window, 250 mm above head, 1720 mm from west corner.
Norgeshus	NOS	Northeast	Batten, top of façade. Sensor at 500 mm from lower edge of rafter.
	NOL		Counter-batten top of façade. Sensor at 780 mm from corner.
	NMS		Counter-batten, approx. middle of façade height.
	NNS		Counter-batten, bottom of façade.
	SOS	Southwest	Counter-batten, top of façade. Sensor at 4960 mm from lower edge of sill plate.
	SOL		Batten, top of façade. Sensor at 5010 mm from lower edge of sill plate.
	SMS		Counter-batten approx. middle of façade height, 2400 mm from lower edge of sill plate.
	SNS		Counter-batten, bottom of façade.
	SNL		Batten, bottom of façade. Mounted 2400 mm from west corner. 63 mm from lower edge of sill plate (~500 mm above terrain).

300

301

302

303

304

ZEB Laboratory	MN1	North	Batten, approx. 300 mm below top of façade.
	MN2		Batten below window, approx. 850 mm below sill.
	MN3		Batten below window, approx. 1250 mm below sill.
	MN4		Batten middle of wall, same elevation as MN3.
	MN5		Batten, middle of wall, same elevation as MN2.
	MS2	South	Batten, top of facade. Approx. 700 mm above head.
	MS3		Batten, above glass facade. Approx. 1150 mm above head.
	MW1	West	Batten, approx. 350 mm below and 1150 mm south of edge of sill.
	ME1	East	Batten, approx. 1100 mm above and 600 mm south of edge of head.
	MR2	Roof (south)	Batten, top of shed roof.
	MR3		Batten, bottom of shed roof.

305



Figure 4: Sensor positions for Fjogstad-hus

306

307

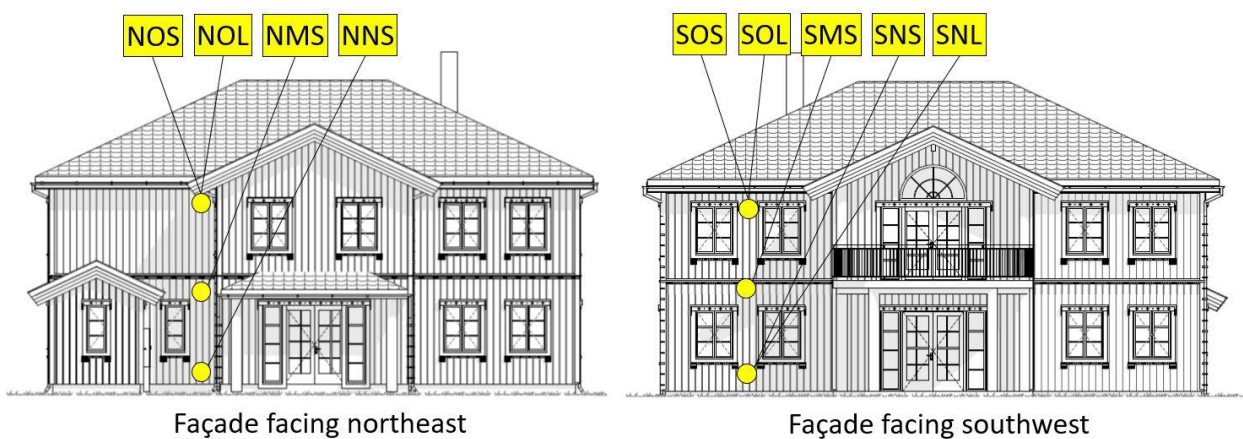


Figure 5: Sensor positions for Norgeshus.

308

309

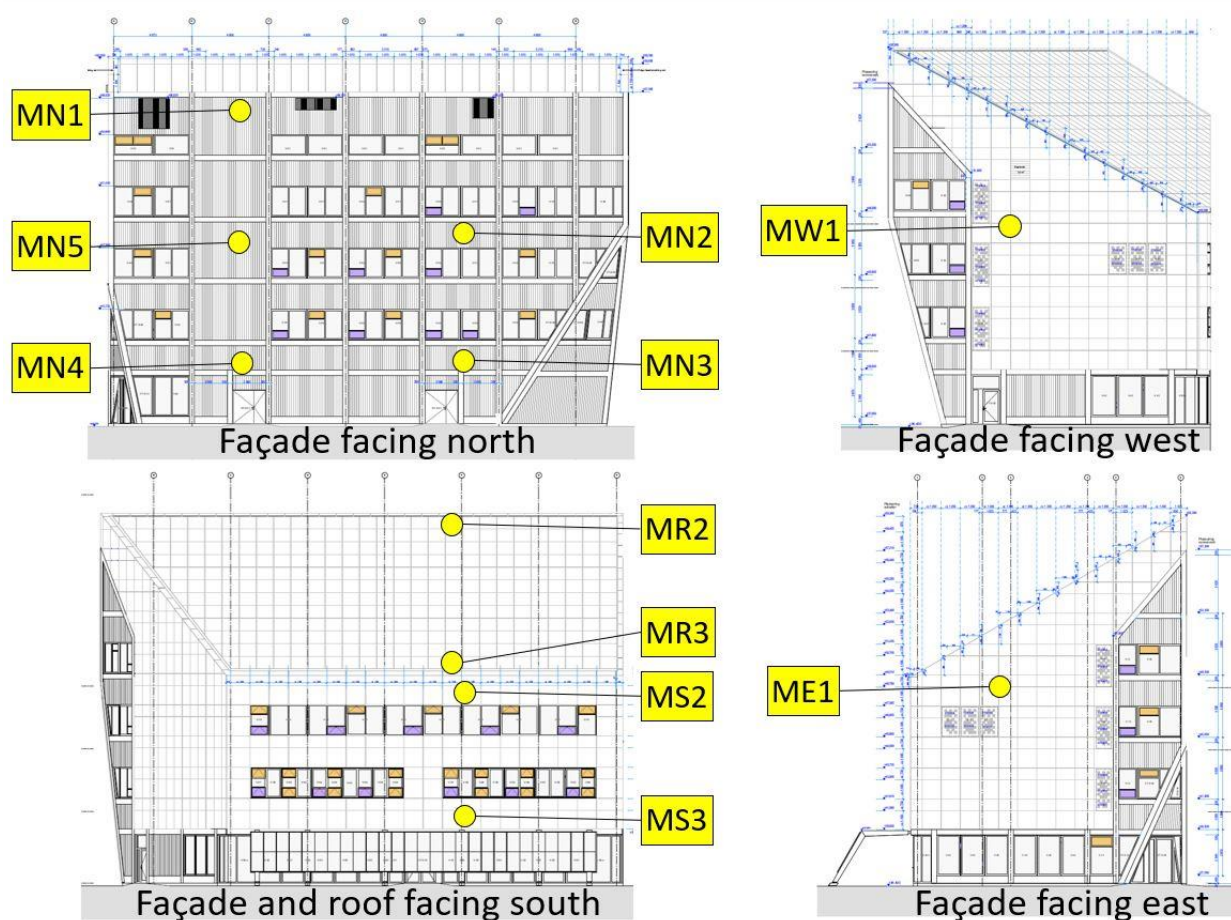


Figure 6: Sensor positions for the ZEB Laboratory.

3.2 Exterior climate data

Measured climate data of the exterior climate in south-west Norway is retrieved from the database of the Norwegian Centre for Climate Services (NCCS), “SeKlima” [64]. The climate data for Trondheim is retrieved from SINTEF’s weather station next to the ZEB Laboratory but is complemented with precipitation measurements retrieved from SeKlima.

3.3 Correction formulas

To correct for the different conductivity of different wood types, measurements wood moisture sensors must be corrected according to correction curves for the individual wood species. The curves are based on a comparison between measured wood moisture and gravimetric measurements [65]. The correction curve for correcting sensor data for Norway spruce is described by equation (1) [65].

$$\%MC_{\text{Spruce}} = 11,384 - 0,8737 * \%MC_{\text{measured}} + 0,1226 * \%MC_{\text{measured}}^2 - 0,0023 * \%MC_{\text{measured}}^3 \quad (1)$$

3.4 Mould growth criteria

Two fitted curves are made based on a combination of the mould growth criteria collected by Gradeci et al. [16], seen in Figure 7. The lower curve is based on the most conservative criteria for the onset of mould growth found by Gradeci et al. for any given temperature. As such it combines the mould growth criteria described by Johanson et al. [46] for low temperatures, the ESP-r A model [45] for low-medium temperatures, the Mould Germination Graph (MGGM) [49–51] for medium-high temperatures, and the m-model [52] for the highest temperatures in the analysed temperature range. The upper curve is more risk tolerant, being constructed from the least strict mould growth criteria

Gradeci et al. [16] analysed. This curve is based on LIM II (biohygro-thermal) [47,48] for lower temperatures and Johanson et al. [46] for higher temperatures. Using both a conservative and a risk tolerant curve for analyses, measured data can be compared to a wide range of criteria for the onset of mould growth. The fitted curves are used as limit values, one conservative where mould growth may occur, and one risk tolerant wherein all models agree mould growth would occur if exceeded for long enough, to analyse for how much of the time the sensors measure critical moisture and temperature conditions.

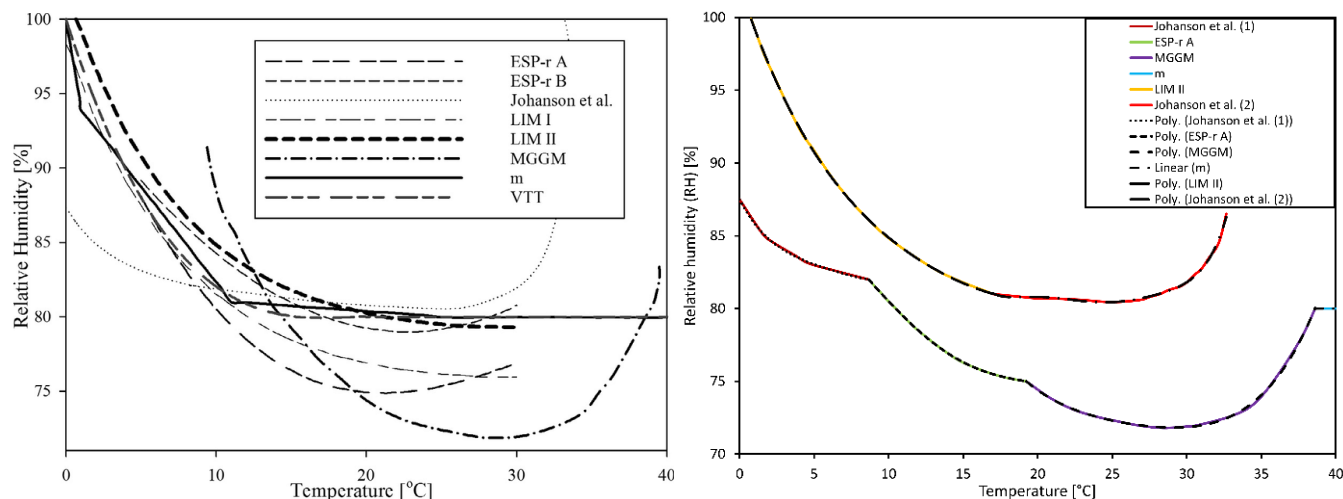


Figure 7: Adaptation (right) of different criteria graphs for the onset of mould growth, collected by Gradeci et al. [16] (left). Original image used with permission.

3.6 VTT parametric study

WUFI Mould Index is used to conduct an analysis of whether the sensor data indicate conditions for the onset of mould growth in the air cavities of the three buildings. For this analysis, the material parameters in the simulation program are identical and conservative, so that the climate is the only variable between the analyses. Thus, the data from all sensors are compared on equal terms, and the simulations are unlikely to underestimate the mould growth potential. The set material parameters are described in Table 2. The VTT parametric study outputs a mould growth indicator on a scale from 0 to 6, where the value reflects the predicted amount of mould growth on the surface [55].

Table 2: Parameters for the WUFI VTT simulations.

Parameter	Setting
Material category:	Wood or natural material
Material sub-category:	Untreated pine or spruce (heartwood)
Sensitivity class:	Very sensitive
Reduction factor:	Nearly no reduction
Type of surface:	Rough
Type of wood:	Conifer

3.7 Other analyses

Since the mould growth criteria vary to such a large degree [16], it is chosen to conduct four additional, analyses of how the measured temperature and moisture conditions correlate to different, simplified mould growth criteria. This way, each set of sensor data can be analysed using several different methods, creating a more comprehensive understanding of mould growth risk for each sensor position.

The first analysis concerns the number of hours wherein the sensors have measured critical wood moisture content values, as described in section 2.3.

Secondly, critical air RH values are analysed in a similar way. The critical relative air humidity (RH_{crit}) is determined from equation (2) [54], wherein T denotes the air temperature. [$^{\circ}C$]. $RH_{crit, min}$ is set to 80%, as is typical for moisture-sensitive materials such as wood.

$$RH_{crit} = -0,00267 * T^3 + 0,160 * T^2 - 3,13 * T + 100,0 \quad , T \leq 20^{\circ}C \quad (2)$$

$$RH_{crit} = RH_{crit, min} = 80\% \quad , T > 20^{\circ}C$$

Third, an analysis is performed counting the number of hours wherein RH and temperature meet different criticality criteria for mould growth. For these criteria, RH and temperature are not co-dependent, but standard minimum values. The criteria presented here will cover most of the minimum criteria mentioned in *Table 5* and *Table 6* in Gradeci et al. [16]. In addition, they cover the national and international standard criteria for mould growth presented in *Table 8* in Gradeci et al. [16].

- Temperature $\geq 0^{\circ}C$ and RH 80-85%
- Temperature $\geq 0^{\circ}C$ and RH 85-90%
- Temperature $\geq 0^{\circ}C$ and RH 90-95%
- Temperature $\geq 0^{\circ}C$ and RH 95-100%
- Temperature $\geq 5^{\circ}C$ and RH 80-85%
- Temperature $\geq 5^{\circ}C$ and RH 85-90%
- Temperature $\geq 5^{\circ}C$ and RH 90-95%
- Temperature $\geq 5^{\circ}C$ and RH 95-100%

A final analysis counts the hourly measurements of air cavity temperatures, compared to exterior air temperatures.

4. Results

4.1 Temperature, RH, and wood moisture

The climatic parameters of air temperature, air RH, and wood moisture of the air cavities of the three case buildings are presented as box plots in figures Figure 8, Figure 9, and Figure 10, respectively. While the average air temperature for the three locations is very similar, they exhibit very different moisture conditions.

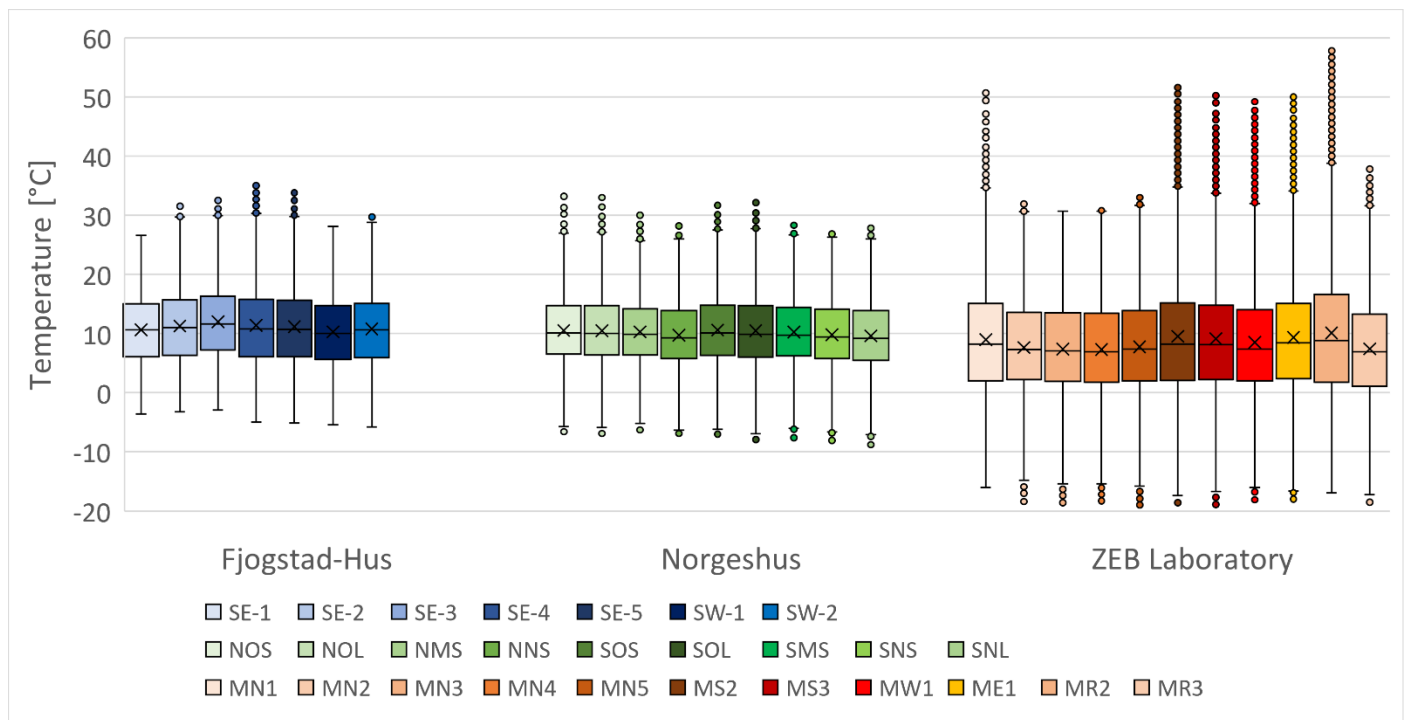


Figure 8: Measured cavity air temperatures in the three case buildings.

391

392

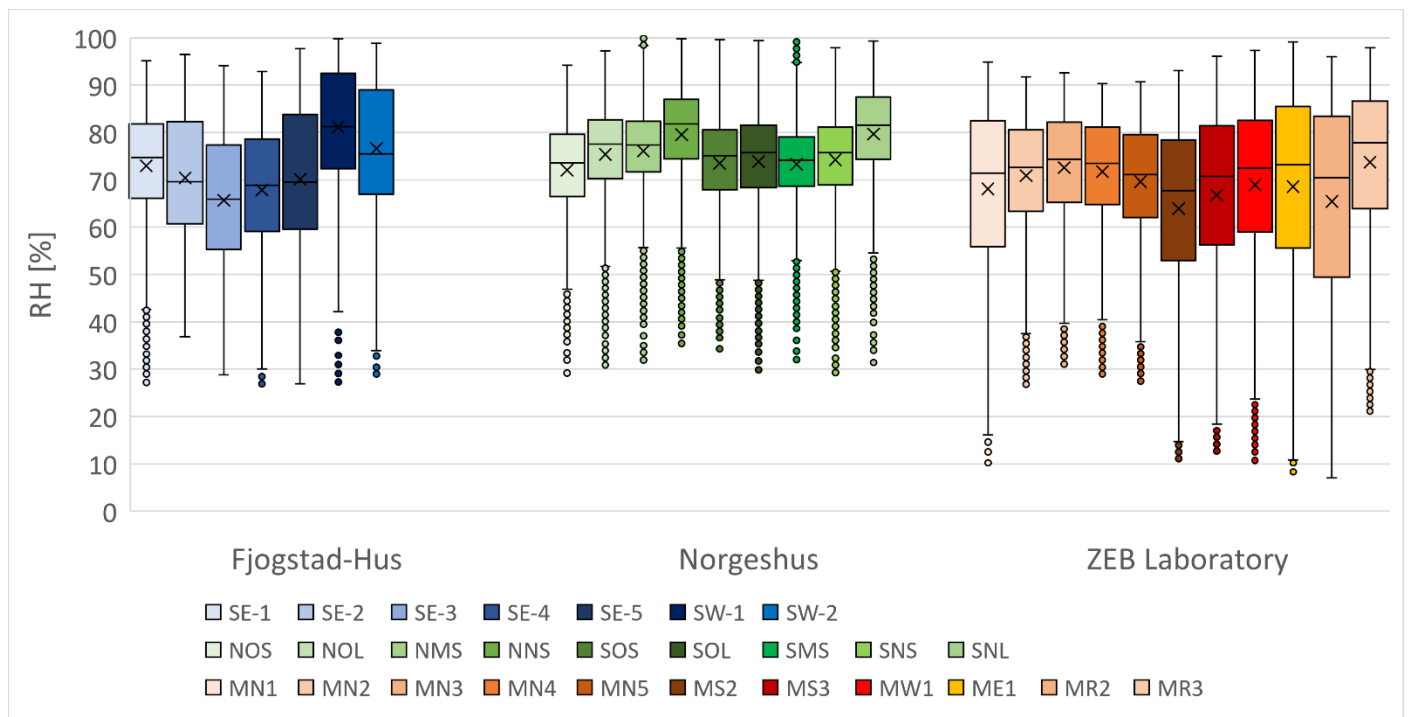


Figure 9: Measured cavity air relative humidity (RH) for the three case buildings.

393

394

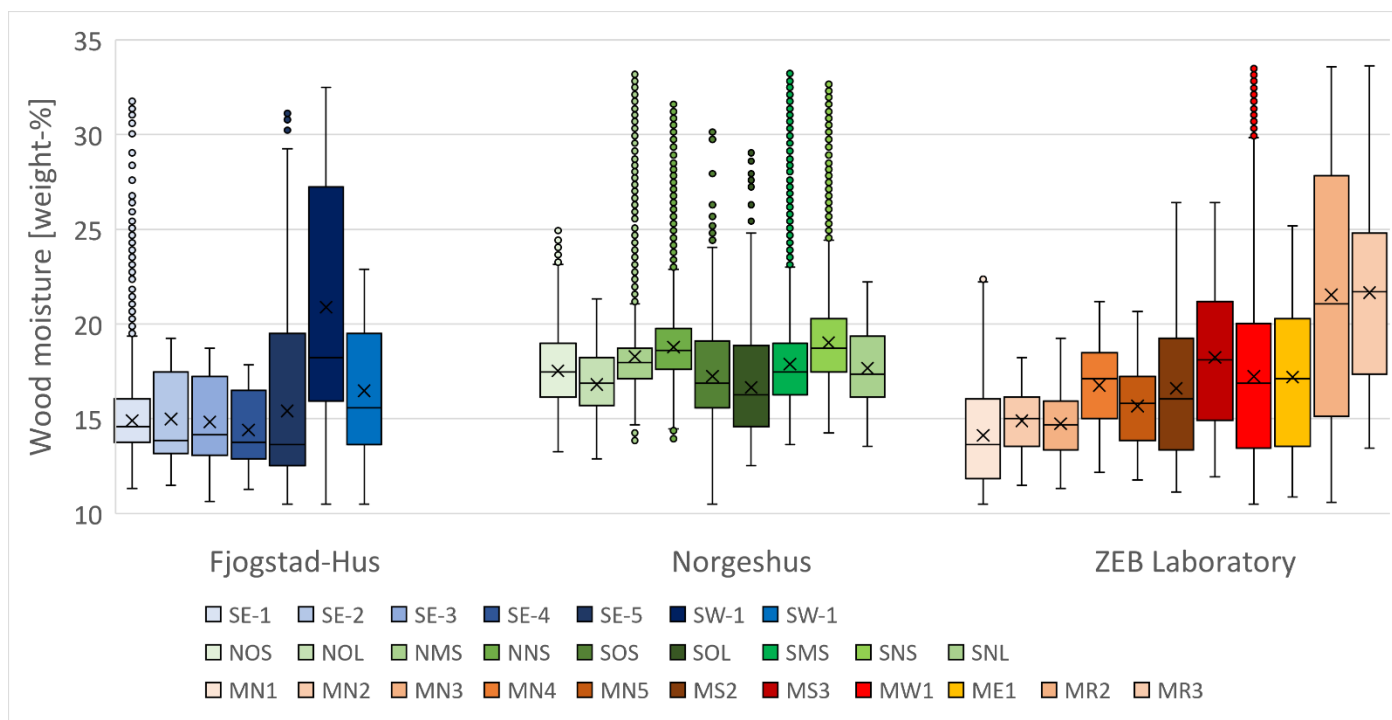


Figure 10: Measured wood moisture content in the air cavities of the three case buildings.

Table 3 shows the maximum and minimum temperatures recorded at each site. Air cavity temperatures are retrieved from the sensors. For Fjogstad-Hus and Norgeshus, exterior air temperatures are retrieved from the database of the Norwegian Climate Service Center [64], while for the ZEB Laboratory, exterior climate is measured on-site.

Table 3: Maximum and minimum temperatures measured in the air cavity of each building, and the highest and lowest recorded exterior air temperatures.

Building	Position	Maximum			Minimum		
		Value	Sensor	Date	Value	Sensor	Date
Fjogstad-Hus	Air cavity	35.3°C	SE-4	01.07.2021	-5.8°C	SW-2	24.12.2021
	Exterior air	26.7°C	-	25.07.2021	-4.5°C	-	24.12.2021
Norgeshus	Air cavity	33.5°C	NOL	01.07.2021	-8.8°C	SNL	24.12.2021
	Exterior air	22.8°C	-	25.07.2021	-8.4°C	-	24.12.2021
ZEB Laboratory	Air cavity (facade)	51.0°C	ME1	21.08.2020	-19.0°C	MN5	11.02.2021
	Air cavity (roof)	58.0°C	MR2	27.06.2020	-18.5 °C	MR3	11.02.2021
	Exterior air	31.0°C	-	20.06.2020	-18.8°C	-	11.02.2021

4.2 Mould growth criteria

A scatter plot of the air cavity and air RH measurements from each sensor has been overlaid the fitted curves created from the results of Gradeci et al. [16] to create a visual summary of the mould growth conditions for each sensor location. An example is shown in Figure 11. For brevity, the rest of the visual summaries are contained in the supplementary files for this article. The share of measurements exceeding the upper and lower graphs in Figure 7 is instead summarized with the results of the simplified analyses in Table 5.

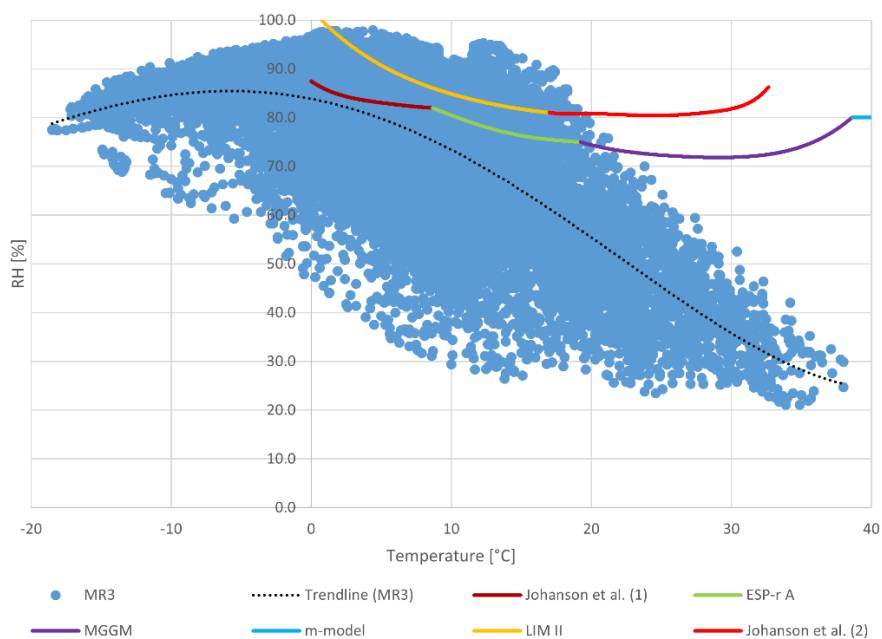


Figure 11: Example of visual summary of mould growth conditions for a sensor, here exemplified by the lower roof sensor on the ZEB Laboratory. A “trend line” is created to show the distribution of typical RH values for every temperature. Note that a substantial share of the data points exceed the criteria for the onset of mould growth, collected by Gradeci et al. [16]. This share for every monitoring point is summarized in Table 5.

The results of the WUFI VTT parametric study are summarized alongside other analysis results in Table 4. The development of the mould growth index for the ZEB Laboratory is shown in Figure 12. The values displayed in Table 4 correspond to the peak value seen in Figure 12. The results of the other analyses described in Section 3.4 are shown in Table 4 and Table 5.

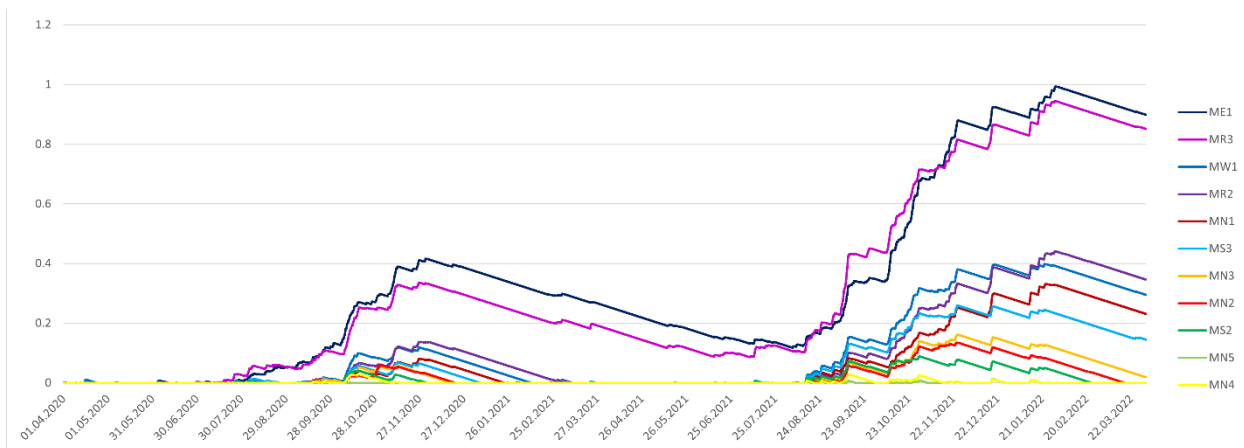


Figure 12: Development of the VTT Mould Growth Index for the ZEB Laboratory.

Table 4: Share of measurements [%] exceeding various criteria for mould growth for every sensor. The VTT parametric study results for each parameter are also shown in the right column.

Building	Sensor	Data completeness	Wood moisture [weight-%]				% of hours wherein ¹⁾ RH>RH _{crit}	% of hours wherein ²⁾ T<T _{ext}	Yearly mould growth (VTT)
			[<,15>	[15,20>	[20,25>	[25,→>			
Fjogstad-Hus	SE-1	100.00%	58%	40%	1%	0%	19%	16%	0.84
	SE-2	100.00%	58%	42%	0%	0%	14%	13%	0.55
	SE-3	100.00%	56%	44%	0%	0%	10%	6%	0.27
	SE-4	100.00%	63%	37%	0%	0%	10%	15%	0.26
	SE-5	100.00%	59%	27%	14%	0%	17%	17%	0.94
	SW-1	100.00%	6%	48%	10%	36%	40%	25%	4.95
	SW-2	95.10%	47%	35%	18%	0%	27%	24%	4.02
Norgeshus	NOS	99.58%	8%	86%	6%	0%	11%	11%	0.15
	NOL	99.59%	13%	84%	2%	0%	25%	11%	0.83
	NMS	99.77%	5%	87%	4%	4%	27%	9%	2.77
	NNS	99.69%	4%	76%	16%	4%	41%	17%	3.42
	SOS	99.98%	12%	77%	11%	0%	16%	14%	0.40
	SOL	99.82%	35%	57%	9%	0%	17%	17%	0.50
	SMS	99.43%	7%	86%	5%	3%	12%	15%	0.40
	SNS	99.67%	3%	66%	28%	3%	17%	20%	0.43
	SNL	99.77%	6%	80%	14%	0%	38%	25%	3.71
ZEB Laboratory	MN1	99.86%	61%	39%	0%	0%	7%	29%	0.33
	MN2	99.73%	49%	51%	0%	0%	4%	37%	0.14
	MN3	98.65%	55%	45%	0%	0%	6%	46%	0.16
	MN4	98.48%	24%	69%	8%	0%	3%	48%	0.03
	MN5	99.69%	41%	57%	3%	0%	1%	40%	0.01
	MS2	99.86%	41%	41%	16%	2%	4%	40%	0.09
	MS3	99.86%	26%	38%	33%	3%	6%	33%	0.26
	MW1	99.77%	37%	37%	22%	3%	7%	41%	0.40
	ME1	99.88%	37%	35%	28%	0%	12%	31%	0.99
	MR2	99.78%	24%	23%	14%	39%	7%	32%	0.44
	MR3	99.58%	6%	34%	35%	24%	12%	49%	0.95

¹⁾ See Equation (2).

²⁾ Cavity air temperature < exterior air temperature

426
427

428
429
430

Table 5: Results of the curve fitting analysis and the simplified mould growth criteria analysis.

431

Building	Sensor	% of data points exceeding lower curve	% of data points exceeding upper curve	T ≥ 0°C				T ≥ 5°C			
				RH 80-85%	RH 85-90%	RH 90-95%	RH 95-100%	RH 80%-85%	RH 85-90%	RH 90-95%	RH 95-100%
Fjogstad-Hus	SE-1	32%	17%	15.4%	12.5%	2.6%	0.0%	10.4%	11.2%	2.6%	0.0%
	SE-2	31%	8%	16.1%	13.4%	0.6%	0.0%	9.5%	9.9%	0.6%	0.0%
	SE-3	19%	6%	14.1%	4.9%	0.1%	0.0%	12.3%	4.8%	0.1%	0.0%
	SE-4	21%	5%	15.2%	5.3%	0.2%	0.0%	10.8%	5.1%	0.2%	0.0%
	SE-5	30%	13%	9.6%	17.7%	2.6%	0.1%	5.6%	12.4%	2.5%	0.1%
	SW-1	52%	37%	10.8%	9.8%	18.7%	11.5%	9.5%	7.9%	9.3%	7.6%
	SW-2	39%	22%	6.9%	10.6%	19.7%	0.7%	6.2%	7.3%	9.8%	0.6%
Norgeshus	NOS	24%	8%	19.6%	2.6%	0.7%	0.0%	17.9%	2.5%	0.6%	0.0%
	NOL	40%	18%	26.6%	10.0%	1.9%	0.3%	23.3%	9.7%	1.5%	0.3%
	NMS	38%	23%	22.8%	10.7%	2.2%	1.0%	22.2%	10.5%	1.9%	1.0%
	NNS	57%	36%	20.5%	24.6%	9.7%	1.0%	16.6%	21.1%	9.4%	0.8%
	SOS	29%	11%	18.2%	7.3%	1.2%	0.7%	15.0%	7.1%	1.2%	0.6%
	SOL	31%	12%	19.4%	9.0%	1.5%	0.8%	15.1%	8.8%	1.3%	0.6%
	SMS	22%	8%	15.2%	3.7%	1.1%	1.0%	14.4%	3.7%	1.0%	0.8%
	SNS	31%	12%	19.5%	8.7%	1.0%	0.6%	15.9%	8.5%	0.9%	0.4%
	SNL	55%	33%	20.1%	18.2%	13.3%	2.2%	16.2%	13.7%	11.3%	2.1%
ZEB Laboratory	MN1	22 %	3 %	8.6 %	8.5 %	4.3 %	0.0 %	4.7 %	2.9 %	0.8 %	0.0 %
	MN2	19 %	2 %	11.3 %	6.8 %	0.1 %	0.0 %	5.6 %	2.6 %	0.0 %	0.0 %
	MN3	21 %	3 %	11.0 %	8.9 %	0.9 %	0.0 %	5.9 %	3.1 %	0.2 %	0.0 %
	MN4	18 %	1 %	12.2 %	5.6 %	0.0 %	0.0 %	5.8 %	1.6 %	0.0 %	0.0 %
	MN5	14 %	0 %	9.8 %	3.7 %	0.0 %	0.0 %	3.7 %	0.7 %	0.0 %	0.0 %
	MS2	16 %	2 %	8.3 %	6.3 %	0.9 %	0.0 %	4.1 %	2.3 %	0.2 %	0.0 %
	MS3	20 %	4 %	9.0 %	8.4 %	2.4 %	0.0 %	5.0 %	3.4 %	0.5 %	0.0 %
	MW1	23 %	5 %	9.0 %	9.1 %	4.1 %	0.1 %	4.9 %	3.6 %	1.1 %	0.0 %
	ME1	26 %	9 %	8.6 %	8.7 %	7.6 %	0.9 %	5.6 %	4.3 %	2.7 %	0.3 %
	MR2	22 %	4 %	7.6 %	8.4 %	5.9 %	0.2 %	4.2 %	3.0 %	0.9 %	0.2 %
	MR3	31 %	9 %	10.3 %	10.3 %	8.9 %	1.0 %	6.5 %	4.8 %	2.4 %	0.2 %

432

Figures 13 to 15 show the difference between air cavity temperatures measured at Fjogstad-Hus, Norgeshus, and the ZEB Laboratory, respectively. The ZEB Laboratory features a dark cladding (charred wood) while the other two buildings are painted white.

433

434

435

436

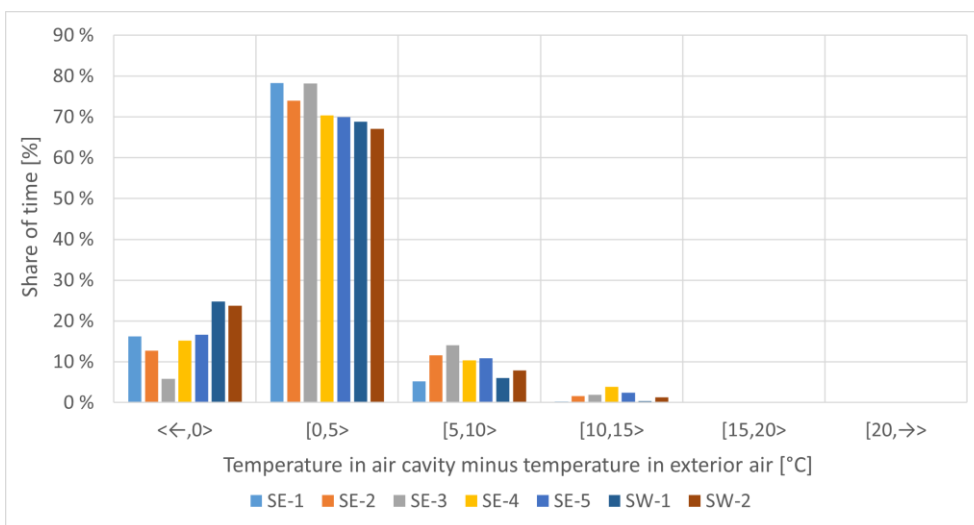


Figure 13: Difference between air cavity temperature and exterior temperature, T_{ext} , for Fjogstad-Hus. Exterior temperature retrieved from *Stavanger – Vålend* weather station, situated 5.23 km away.

437
438
439

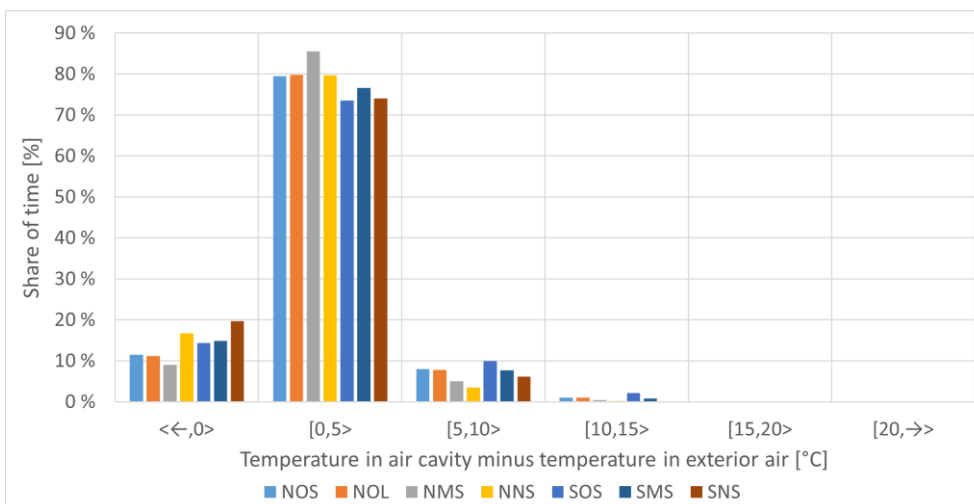


Figure 14: Difference between air cavity temperature and exterior temperature, T_{ext} , for Norgeshus. Exterior temperature retrieved from *Obrestad fyr* weather station, situated 5.04 km away

440
441
442

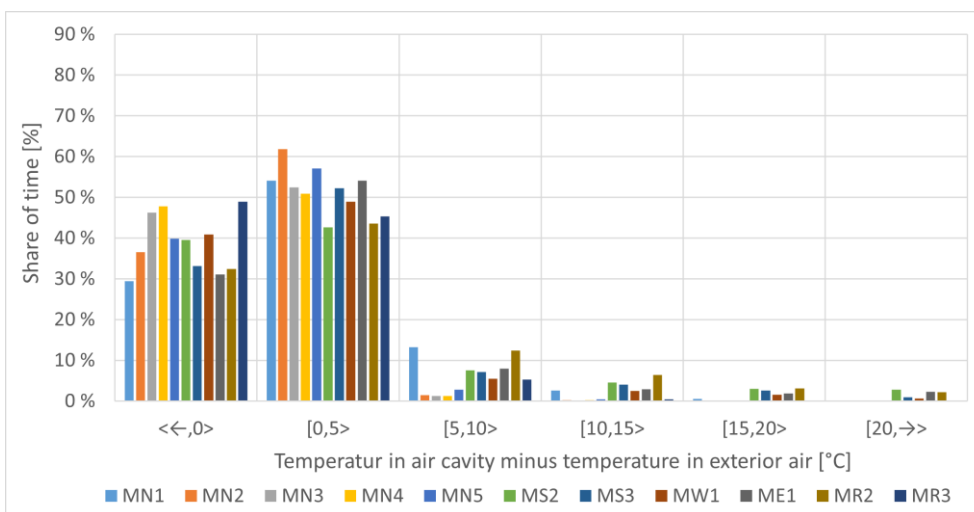


Figure 15: Difference between air cavity temperature and exterior temperature for the ZEB Laboratory. Exterior temperature is measured on-site.

443
444
445

4. Discussion

4.1 Expected microclimate in the air cavity

The measurements indicate that the temperature of the air cavity correlates largely within a few degrees of the exterior air, and that the cavity air temperature may be colder than the exterior air temperature a significant percentage of the time. However, the difference between the climate zones is significant, with the ZEB Laboratory experiencing colder cavity air temperatures than the exterior air 29–49 % of the time, while the cavities in south-west Norway exhibit colder temperatures only 6–25% of the time. As the temperature in the air cavity decreases in comparison to the exterior air, the relative humidity increases. Conversely, however, higher temperatures in the cavity air than the exterior air are also common, and higher temperatures increase the risk of mould growth (up to around 40 °C). For the north-facing façade of the ZEB Laboratory, the share of hours with lower cavity temperatures than the exterior air is largest at the bottom of the façade (MN4), and lowest at the top (MN1). The same is true of the south-facing façade, but the roof (sloped at 32 degrees, facing south) exhibits the opposite behaviour.

The air cavity experiences greater annual temperature amplitudes than the exterior air, with cavity air temperatures sometimes being significantly higher than the exterior. This is seen to a greater degree in the ZEB Laboratory than the other two buildings. It is not known whether this is because of geographical variations, or because the building has a darker cladding than the others.

Cavity air temperatures may also be even colder than the coldest recorded exterior temperatures, although the difference is negligible for the ZEB Laboratory, where exterior and cavity temperatures are recorded at the same site. Local temperature differences may distort the data for the other two locations.

The measured cavity air temperatures appear to be more influenced by the vertical position of the monitoring points than the orientation of the façade. For a tall building like the ZEB Laboratory, this effect is significant, with the higher monitoring positions on the façade and roof displaying temperatures much higher than the monitoring positions lower on the same wall. The top sensor on the north façade displays a maximum temperature 20 °C higher than the lowest sensor on the same façade. This maximum temperature is only 1 °C lower than the maximum temperature recorded on the sun-exposed south façade, whose top sensor is placed one floor below due to the shape of the building. Little correlation is observed between wood moisture content and the humidity of the exterior air. For all monitoring positions presented in this study, data completeness is very high (>95 %). It is therefore unlikely that conditions may have occurred in a way that would change the conclusions without being picked up by the sensors.

4.2 Risk assessment of mould growth

The study has used three different models to evaluate the risk of mould growth and compared the sensor data to three different constant criteria for mould growth risk. All monitoring positions can be considered critical parts of the time, according to some of the methods and criteria. However, some monitoring positions stand out according to all criteria and may be considered highly at risk of organic growth and decomposition.

The various methods indicate different levels of risk for every monitoring position; this may be because most of the methods lack a time component to evaluate whether a critical limit is exceeded for extended durations – allowing mould growth to occur – or whether it is only sporadically.

There is great variation in the indicated mould growth risk, even between monitoring points located close apart within the same façade. A prominent example is that of sensors SNS and SNL in Norgeshus, which are located in almost the same position, but attached to different battens.

Some monitoring positions indicate very high levels of mould growth risk. Both monitoring positions on the southwest façade of Fjogstad-Hus show high levels of moisture and appear vulnerable according to most criteria. Both may be considered critical, but SW-

1 is outstandingly so. It is not within the scope of the present study to investigate why the moisture conditions are so high, but it is evident that some form of control of the wall ought to be performed. The adjoining façade of the same building, facing southwest, exhibits substantially lower risk of mould growth compared to the southwest façade. An in-depth analysis of these or similar façades and their response to the climatic conditions may be the subject of a future study. Overall, the climatic conditions of southwest Norway appear to present a challenge for wooden façades, which is expected to be exacerbated by climate change, and warrants further study.

5. Conclusions

Three buildings have been investigated in two different climatic zones of Norway. The microclimate of air cavities behind ventilated façades and roofs varies greatly, not just according to their geographical positioning, but also the orientation of the façade/roof and the elevation of the monitoring points. Each monitoring point exhibits great variety of cavity temperatures and moisture levels throughout the monitoring period. The cavity air temperature is found to be lower than the exterior temperature a substantial portion of the time. The temperature may also be substantially higher than the exterior.

All monitoring positions exhibit a risk of mould growth according to one or several of the methods. There is great variation among the monitoring positions within each building. There is also great variation in the mould growth risk indicated by the different methods. The overall assessment is that conditions are more critical for mould growth in South-west Norway than in Trondheim.

Future studies of the topic should aim to collect more data of air cavities in these and other buildings in the long term. A more overall understanding of the microclimatic challenges could be pursued by investigating more climatic parameters, notably air flow characteristics, cavity surface temperatures, or temperature distributions through the width of the air cavity. Exterior climate parameters of interest include windspeed, wind direction, wind-driven rain, and solar radiation. A future study could also incorporate several buildings within the same area. It is recommended to source exterior climate data locally using a weather station on site, to improve the accuracy of comparisons between cavity and exterior microclimates. Inspection of the case buildings would also provide valuable input, to assess actual mould growth or uncovering other unknown factors influencing the long-term condition of the microclimate of the air cavity.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: www.mdpi.com/xxx/s1, Figure S1: title; Table S1: title; Video S1: title.

Author Contributions: Conceptualization, S.B.I., L.G., and T.K.; methodology, S.B.I., E.A., L.G., and T.K.; software: S.B.I.; validation: S.B.I. and T.K.; formal analysis, S.B.I.; investigation, S.B.I.; resources: L.G. and T.K.; writing—original draft preparation, S.B.I. and E.A.; writing—review and editing, S.B.I., E.A. and T.K.; visualization: S.B.I.; supervision, E.A. and T.K.; funding acquisition, L.G. and T.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Please add: This research was funded by The Research Council of Norway through the following two projects: *SFI Klima 2050*, grant number 237859, and *Norgeshus – Verktøykasse for klimatilpasning av boliger*, grant number 309400.

Data Availability Statement: Sensor data is available in the spreadsheet attached as supplementary material to this article.

Acknowledgments: The authors would like to extend a thanks to CAD operators Remy Eik and Bjørnar Nørstebø at SINTEF, and to Berit Time (SINTEF) and Snorre Bjørkum (Norgeshus) for support.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. O'Brien, K.; Sygna, L.; Haugen, J.E. Vulnerable or Resilient? A Multi-Scale Assessment of Climate Impacts and Vulnerability in Norway. *Climatic Change* **2004**, *64*, 193–225, doi:10.1023/B:CLIM.0000024668.70143.80. 548
2. Hanssen-Bauer, I.; Førland, E.J.; Haddeland, I.; Hisdal, H.; Mayer, S.; Nesje, A.; Nilsen, J.E.Ø.; Sandven, S.; Sandø, A.B.; Sorteberg, A.; et al. *Klima i Norge 2100 - Kunnskapsgrunnlag for Klimatilpasning Oppdatert i 2015*; Norwegian Environmental Agency/Norwegian Climate Service Center: Oslo, Norway, 2015; 549
3. Pierobon, F.; Huang, M.; Simonen, K.; Ganguly, I. Environmental Benefits of Using Hybrid CLT Structure in Midrise Non-Residential Construction: An LCA Based Comparative Case Study in the U.S. Pacific Northwest. *Journal of Building Engineering* **2019**, *26*, 100862, doi:10.1016/j.job.2019.100862. 550
4. Gullbrekken, L.; Kvande, T.; Time, B. Roof-Integrated PV in Nordic Climate - Building Physical Challenges.; *Energy Procedia*, 2015; Vol. 78, pp. 1962–1967. 551
5. Ingebretsen, S.B.; Andenæs, E.; Kvande, T. Microclimate of Air Cavities in Ventilated Roof and Façade Systems in Nordic Climates. *Buildings* **2022**, *12*, 683, doi:10.3390/buildings12050683. 552
6. Svendsen, S.D. The Principle of One-Stage and Two-Stage Seals. In *Proceedings of the International Symposium on Weathertight Joints for Walls*; Oslo, Norway, September 25 1967; pp. 298–301. 553
7. Birkeland, Ø. The Mechanism of Rain Penetration. In *Proceedings of the International Symposium on Weathertight Joints for Walls*; Oslo, Norway, September 25 1967; pp. 33–34. 554
8. Lexico Dictionaries MICROCLIMATE | Meaning & Definition for UK English | Lexico.Com. *Lexico Dictionaries | English*. 555
9. Bouchair, A. Solar Induced Ventilation in the Algerian and Similar Climates. Ph.D. Thesis, University of Leeds, 1989. 556
10. Van Belleghem, M.; Steeman, M.; Janssens, A.; De Paepe, M. Heat, Air and Moisture Transport Modelling in Ventilated Cavity Walls. *Journal of Building Physics* **2015**, *38*, 317–349, doi:10.1177/1744259114543984. 557
11. Viitanen, H.; Vinha, J.; Salminen, K.; Ojanen, T.; Peuhkuri, R.; Paajanen, L.; Lähdesmäki, K. Moisture and Bio-Deterioration Risk of Building Materials and Structures. *Journal of Building Physics* **2010**, *33*, 201–224, doi:10.1177/1744259109343511. 558
12. Brischke, C.; Bayerbach, R.; Otto Rapp, A. Decay-Influencing Factors: A Basis for Service Life Prediction of Wood and Wood-Based Products. *Wood Material Science and Engineering* **2006**, *1*, 91–107. 559
13. Bunkholt, N.S.; Time, B.; Kvande, T. *Luftede Kledninger. Anbefalinger for Klimatilpasning*; Klima 2050 Report 23, SINTEF Community: Trondheim, Norway, 2021; 560
14. Gullbrekken, L.; Time, B.; Harboe, T.; Kvande, T. *Trekledning - Instrumentering Av Luftede Trefasader Hos Fjogstad Hus*; Klima 2050 Note 128; Trondheim, 2021; 561
15. Edvardsen, K.I.; Ramstad, T.Ø. *Trehus, Håndbok 5*; 4th ed.; SINTEF akademisk forlag: Oslo, 2018; ISBN: 978-82-536-1391-8 562
16. Gradeci, K.; Labonnote, N.; Time, B.; Köhler, J. Mould Growth Criteria and Design Avoidance Approaches in Wood-Based Materials – A Systematic Review. *Construction and Building Materials* **2017**, *150*, 77–88, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.204. 563
17. Nocente, A.; Time, B.; Mathisen, H.M.; Kvande, T.; Gustavsen, A. The ZEB Laboratory: The Development of a Research Tool for Future Climate Adapted Zero Emission Buildings. *Journal of Physics: Conference Series*; IOP Publishing: Copenhagen, Denmark, August 25 2021; Vol. 2069, p. 012109. 564
18. Säwén, T.; Stockhaus, M.; Hagentoft, C.E.; Bunkholt, N.S.; Wahlgren, P. Model of Thermal Buoyancy in Cavity-Ventilated Roof Constructions. *Journal of Building Physics* **2021**, *45*, 413–431, doi:10.1177/1744259120984189. 565
19. Gullbrekken, L. Climate Adaption of Pached Wooden Roofs. Ph.d. Thesis 2018 :124, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2018. 566
20. Kvande, T. Totrinnstetning Mot Slagregn På Fasader. Luftede Kledninger Og Fuger - Byggforskserien 542.003, SINTEF Community, 2013. 567
21. Lisø, K.R.; Kvande, T. *Klimatilpasning Av Bygninger*; 1st ed.; Sintef Community, 2007; ISBN 978-82-536-0960-7. 568
22. Bunkholt, N.S.; Gullbrekken, L.; Kvande, T. Influence of Local Weather Conditions on Ventilation of a Pitched Wooden Roof. *Journal of Civil Engineering and Architecture* **2020**, *37–45*, doi:10.17265/1934-7359/2020.01.004. 569
23. Gaarder, J.E. Skrå, Luftede Tretak Med Isolerte Takflater - Byggforskserien 525.101; SINTEF Community, 2021. 570
24. Blom, P. Venting of Attics and Pitched, Insulated Roofs. *Journal of Thermal Envelope and Building Science* **2001**, *25*, s. 32-50. 571
25. Andenæs, E.; Skagseth, V.A.; Bunkholt, N.S.; Kvande, T.; Lohne, J. Experiences with External Drainage Systems from Compact Roofs in Norwegian Climates.; Tallinn, Estonia, 2020. 572
26. Noreng, K. Kompakte Tak. Byggforskserien 525.207, SINTEF Community, 2018. 573
27. Ramstad, T.; Thommesen, J.E. Takformer, Taktyper Og Oppbygning. Byggforskserien 525.002; SINTEF Community; 2018. 574
28. Lee, S.; Park, S.H.; Yeo, M.S.; Kim, K.W. An Experimental Study on Airflow in the Cavity of a Ventilated Roof. *Building and Environment* **2009**, *44*, 1431–1439, doi:10.1016/j.buildenv.2008.09.009. 575
29. Hagentoft, C.-E. *Introduction to Building Physics*; 1:7.; Studentlitteratur: Gothenburg, Sweden, 2001; ISBN 91-44-01896-7. 576
30. Nore, K.; Blocken, B.; Thue, J.V. On CFD Simulation of Wind-Induced Airflow in Narrow Ventilated Façade Cavities: Coupled and Decoupled Simulations and Modelling Limitations. *Building and Environment* **2010**, *45*, 1834–1846, doi:10.1016/j.buildenv.2010.02.014. 577

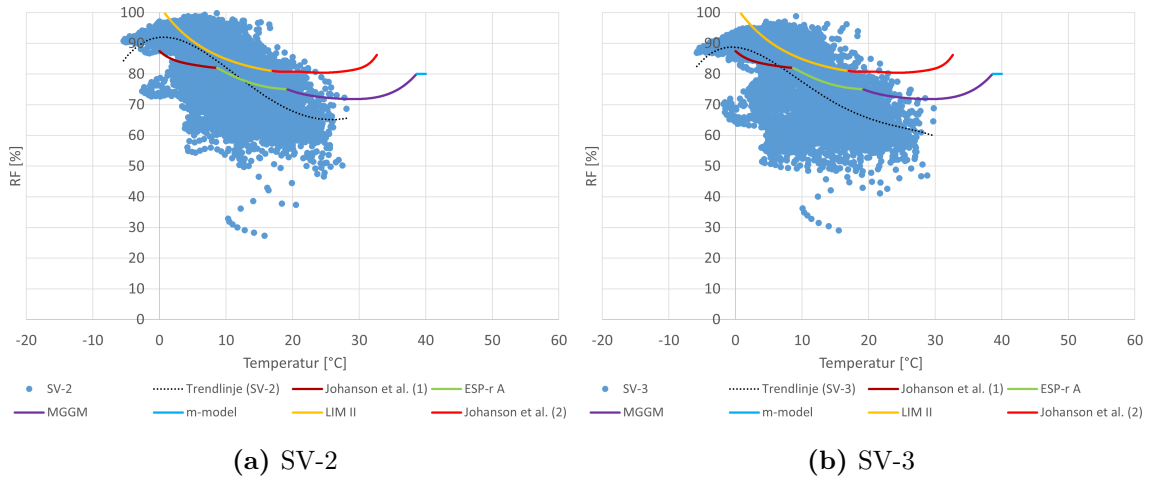
31. Mundt-Petersen, S.O.; Harderup, L.E. Predicting Hygrothermal Performance in Cold Roofs Using a 1D Transient Heat and Moisture Calculation Tool. *Building and Environment* **2015**, *90*, 215–231, doi:10.1016/j.buildenv.2015.04.004. 605
606
32. Gullbrekken, L.; Uvsløkk, S.; Geving, S.; Kvande, T. Local Loss Coefficients inside Air Cavity of Ventilated Pitched Roofs. *Journal of Building Physics* **2018**, *42*, 197–219, doi:10.1177/1744259117740506. 607
608
33. Falk, J.; Sandin, K. Ventilated Rainscreen Cladding: A Study of the Ventilation Drying Process. *Building and Environment* **2013**, *60*, 173–184, doi:10.1016/j.buildenv.2012.11.015. 609
610
34. Mundt-Petersen, S.O.; Harderup, L.E.; Arfvidsson, J. Important Factors Affecting the Risk of Mold Growth in Well-Insulated Wood Frame Walls in Northern European Climates. **2013**, 14. 611
612
35. Støver, E.A.; Sundsøy, M.H.; Andenæs, E.; Kvande, T. Rain Intrusion Through Horizontal Open Joints in Façade Claddings - Experimental Investigation. *To be submitted* **2022**. 613
614
36. Geving, S.; Thue, J.V. *Fukt i Bygninger*; Håndbok 50; Norsk byggforskningsinstitutt: Oslo, 2002; ISBN: 82-536-0747-4. 615
37. Blocken, B.; Carmeliet, J. A Review of Wind-Driven Rain Research in Building Science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **2004**, *92*, 1079–1130, doi:10.1016/j.jweia.2004.06.003. 616
617
38. Kvande, T.; Lisø, K.R.; Time, B. *Luftede Kledninger. Klimapåkjenninger, Erfaringer Og Anbefalinger*; SINTEF Community: Oslo, 2007; 618
39. Falk, J.; Molnár, M.; Larsson, O. Investigation of a Simple Approach to Predict Rainscreen Wall Ventilation Rates for Hygrothermal Simulation Purposes. *Building and Environment* **2014**, *73*, 88–96, doi:10.1016/j.buildenv.2013.11.025. 619
620
40. Evans, F.G. *Soppskader På Tre*; Fokus på tre; TreFokus AS og Norsk Treteknisk Institutt: Oslo, 2009; 621
41. Thue, J.V. *Bygningsfysikk Grunnlag*; Fagbokforlaget, 2016; ISBN 978-82-450-1994-0. 622
42. Tronstad, S. *Tre Og Fuktighet - Fra Produsent Til Forbruker*; Teknisk håndbok; 4. utg.; Norsk Treteknisk Institutt: Oslo, 2013; 623
43. Viitanen, H. Factors Affecting the Development of Biodeterioration in Wooden Constructions. *Materials and Structures* **1994**, 483–493, doi:10.1007/BF02473453. 624
625
44. Geving, S. *Fuktskader: Årsaker, Utredning Og Tiltak*. Håndbok 3; SINTEF akademisk forlag; ISBN: 978-82-536-1228-7; Oslo, 2011; 626
45. Clarke, J.A.; Johnstone, C.M.; Kelly, N.J.; McLean, R.C.; anderson, J.A.; Rowan, N.J.; Smith, J.E. A Technique for the Prediction of the Conditions Leading to Mould Growth in Buildings. *Building and Environment* **1999**, *34*, 515–521, doi:10.1016/S0360-1323(98)00023-7. 627
628
629
46. Johansson, S.; Wadsö, L.; Sandin, K. Estimation of Mould Growth Levels on Rendered Façades Based on Surface Relative Humidity and Surface Temperature Measurements. *Building and Environment* **2010**, *45*, 1153–1160, doi:10.1016/j.buildenv.2009.10.022. 630
631
632
47. Sedlbauer, K. Prediction of Mould Fungus Formation on the Surface of and inside Building Components. *Fraunhofer Institute* **2001**. 633
634
48. Sedlbauer, K. Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation. *Journal of Thermal Envelope and Building Science* **2002**, *25*, 321–336, doi:10.1177/0075424202025004093. 635
636
49. Ayerst, G. The Effects of Moisture and Temperature on Growth and Spore Germination in Some Fungi. *Journal of Stored Products Research* **1969**, *5*, 127–141, doi:10.1016/0022-474X(69)90055-1. 637
638
50. Smith, S.L.; Hill, S.T. Influence of Temperature and Water Activity on Germination and Growth of *Aspergillus Restrictus* and *A. Versicolor*. *Transactions of the British Mycological Society* **1982**, *79*, 558–560, doi:10.1016/S0007-1536(82)80058-2. 639
640
51. Moon, H.J.; Augenbroe, G.L.M. Towards a Practical Mould Growth Risk Indicator. *Building Services Engineering Research and Technology* **2004**, *25*, 317–326, doi:10.1191/0143624404bt101oa. 641
642
52. Togerö, Å.; Tengberg, C.S.; Bengtsson, B. M-Model: A Method to Assess the Risk for Mould Growth in Wood Structures with Fluctuating Hygrothermal Conditions.; In proceedings of *The 9th Nordic Symposium on Building Physics*; Tampere, Finland, 2011; Vol. 2, pp. 883–890. 643
644
645
53. Viitanen, H.; Bjurman, J. Mould Growth on Wood under Fluctuating Humidity Conditions. *Material und Organismen* **1995**, *29*, 27–46. 646
647
54. Hukka, A.; Viitanen, H.A. A Mathematical Model of Mould Growth on Wooden Material. *Wood Science and Technology* **1999**, *33*, 475–485, doi:10.1007/s002260050131. 648
649
55. Viitanen, H.; Ritschkoff, A.-C. *Mould Growth in Pine and Spruce Sapwood in Relation to Air Humidity and Temperature*; Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products: Uppsala, Sweden, 1991; 650
651
56. Viitanen, H. Modelling the Time Factor in the Development of Mould Fungi: The Effect of Critical Humidity and Temperature Conditions on Pine and Spruce Sapwood. *Holzforschung* **1997**, *51*, 6–14, doi:10.1515/hfsg.1997.51.1.6. 652
653
57. Viitanen, H.; Ojanen, T. *Improved Model to Predict Mould Growth in Building Materials*; In Proceedings of the 10th Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Conference, Clearwater Beach, USA; December 2-7, 2007; 654
655
58. Ojanen, T.; Viitanen, H.; Peuhkuri, R.; Lähdesmäki, K.; Vinha, J.; Salminen, K. Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials.; In proceedings of *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference*, December 5-9, 2010, Clearwater Beach, Florida USA; pp. 1–10. 656
657
658
59. Ojanen, T.; Peuhkuri, R.; Viitanen, H.; Lähdesmäki, K.; Vinha, J.; Salminen, K. Classification of Material Sensitivity: New Approach for Mould Growth Modeling.; In proceedings of *The 9th Nordic Symposium on Building Physics*; Tampere, Finland, 2011; Vol. 2, pp. 867–874. 659
660
661

-
60. Fraunhofer IBP WUFI Mould Index VTT Available online: <https://wufi.de/en/2017/03/31/wufi-mould-index-vtt/>. 662
 61. Gullbrekken, L.; Kvande, T.; Time, B. *Instrumentering Av Luftede Trefasader På Orre for Norgeshus Varhaug*; Technical report 102022142; Trondheim, 2021; 663
664
 62. Rønningen, E.S. Feltstudie Av Klimatiske Forhold i Luftespalter Bak Kledning Og Taktekning. M.Sc. thesis, NTNU: Trondheim, Norway, 2020. 665
666
 63. Thodesen, B.; Kvande, T.; Tajet, H.T.T.; Time, B.; Lohne, J. Adapting Green-Blue Roofs to Nordic Climate. *Nordic Journal of Architectural Research* **2018**, *30*. 667
668
 64. NCCS Norwegian Centre for Climate Services Available online: <https://seklima.met.no/> (accessed on 19 May 2022). 669
 65. Bunkholt, N.S.; Time, B.; Kvande, T. *Trefuktmålinger: Litteraturundersøkelse Og Korrelasjonskurver*; Klima 2050 Note 151, 2022; 670
671

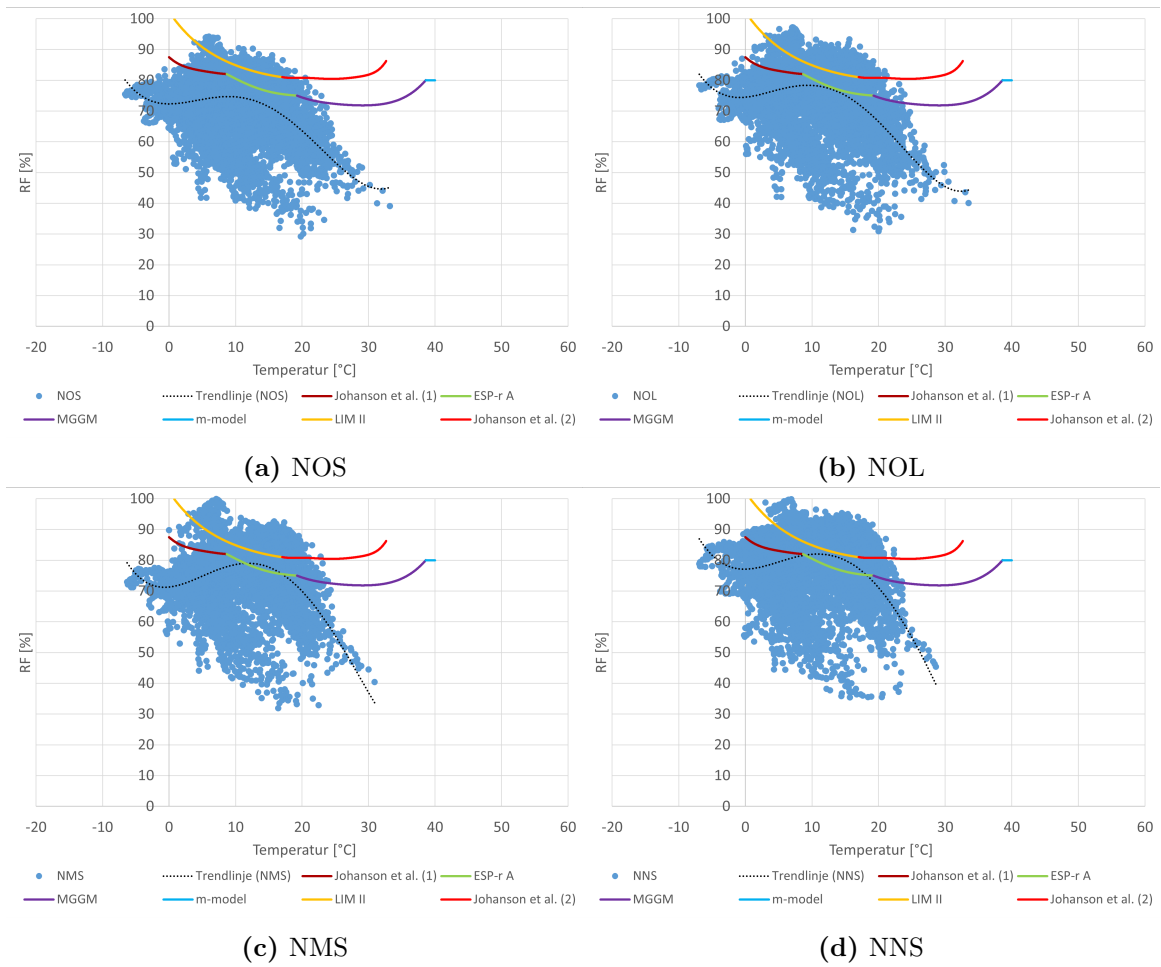
F Punktmålinger av temperatur og RF sett opp mot sammenstilling av ulike muggvekstmodeller



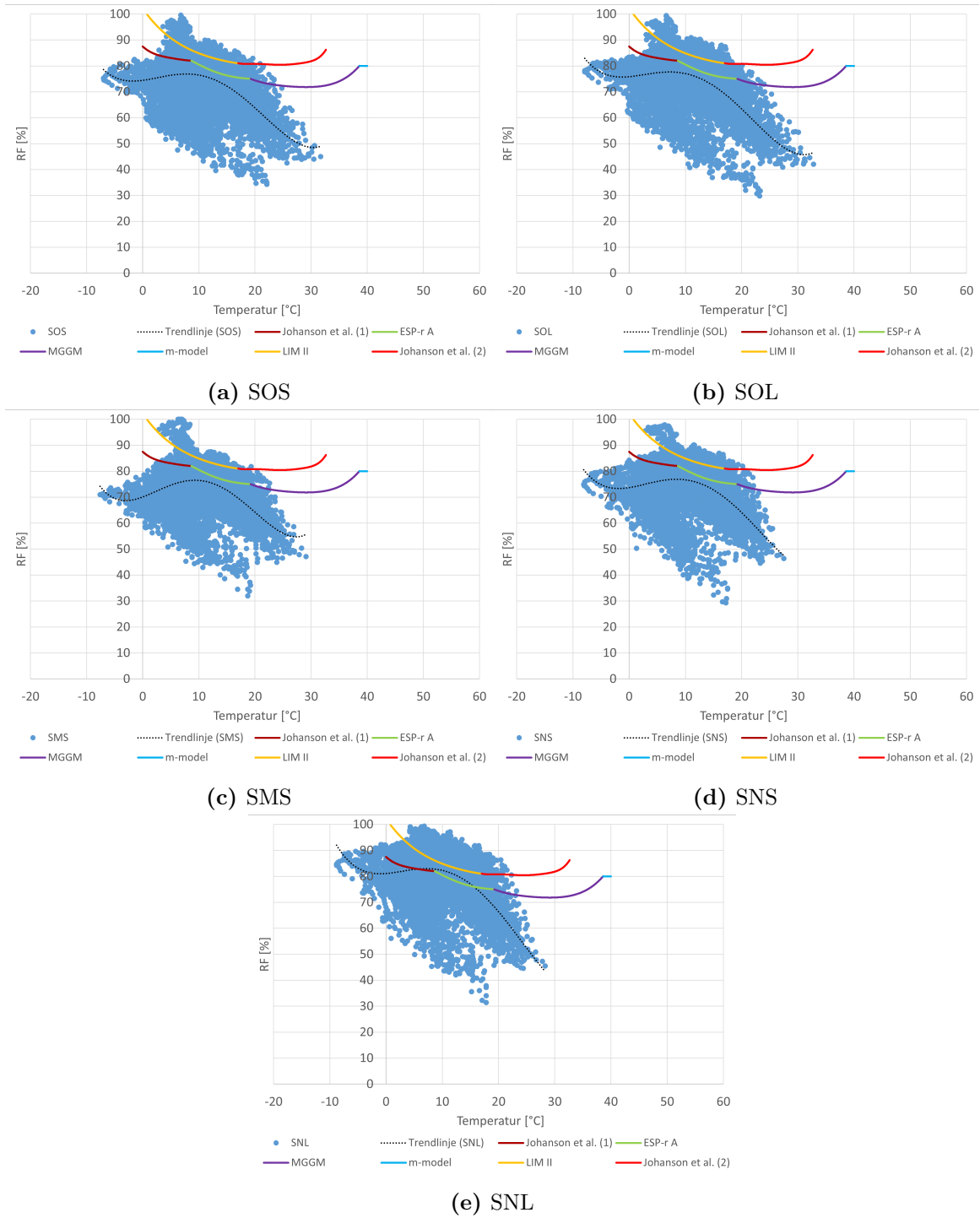
Figur F.1: Fjogstad-Hus del 1/2.



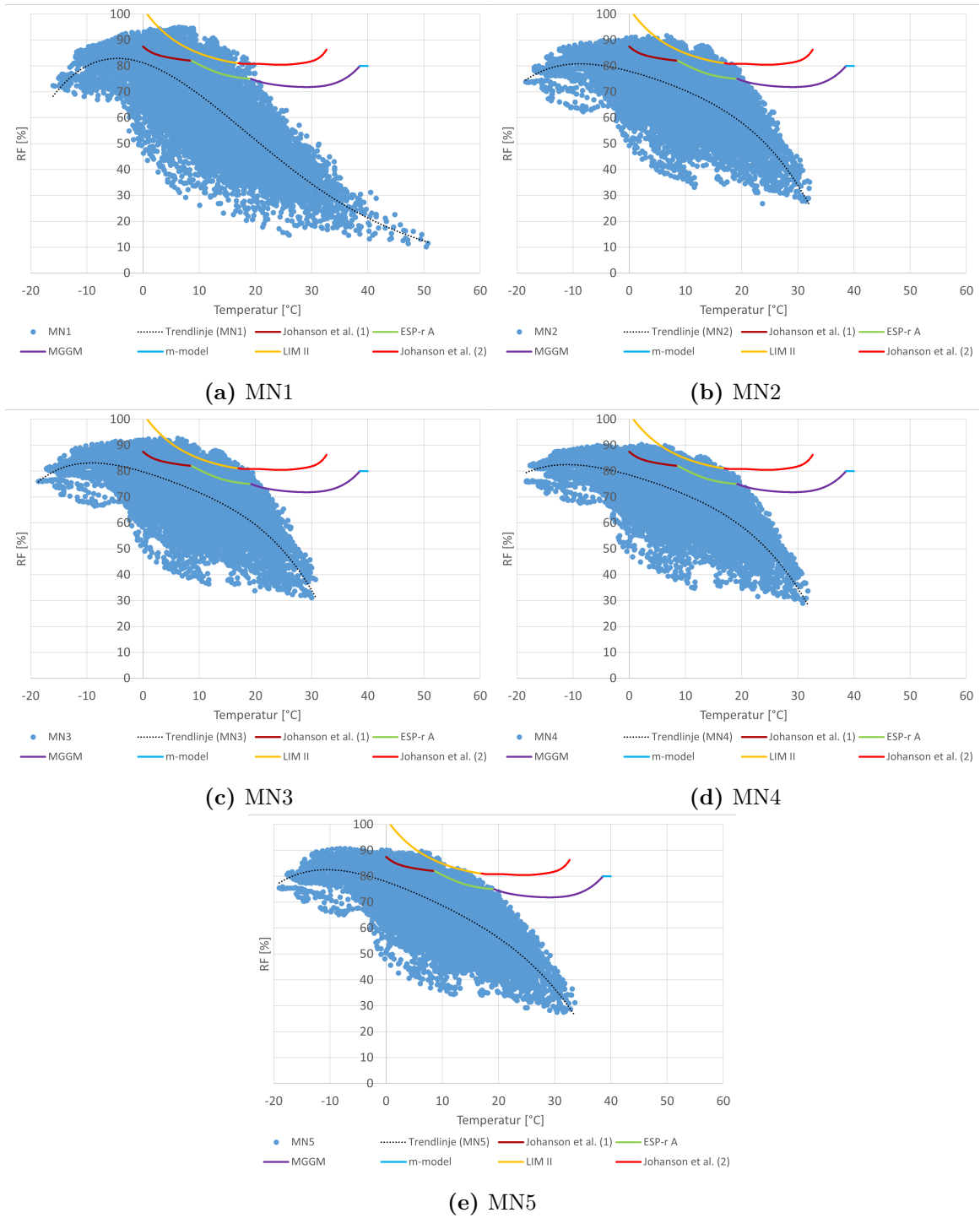
Figur F.2: Fjogstad-Hus del 2/2.



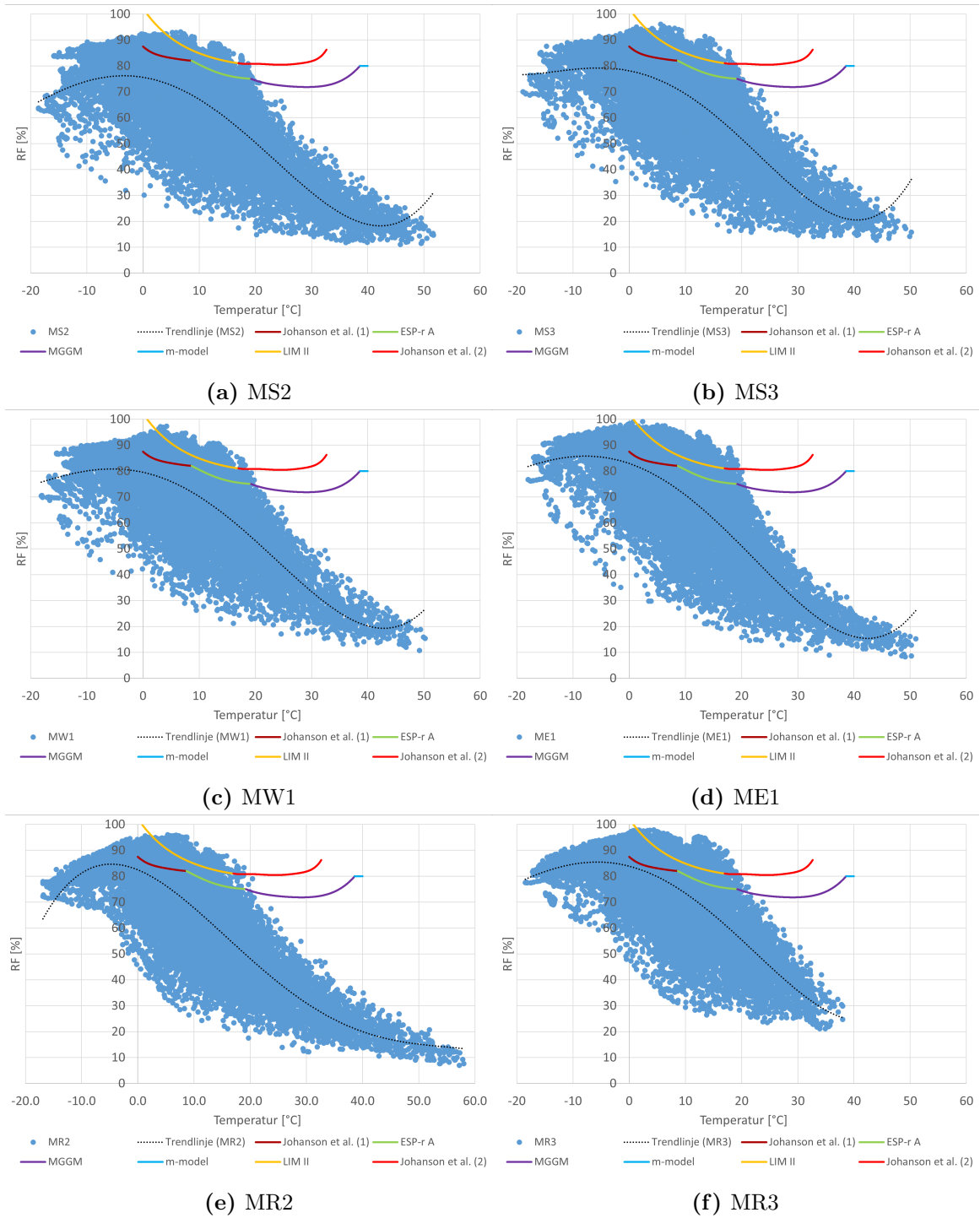
Figur F.3: Norgeshus del 1/2.



Figur F.4: Norgeshus del 2/2.



Figur F.5: ZEB-laboratoriet del 1/2.



Figur F.6: ZEB-laboratoriet del 2/2.

