

Erlend Sune Rønningen

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

Erlend Sune Rønningen

Feltstudie av klimatiske forhold i luftespalter bak kledning og taktekning

Juni 2020



Kunnskap for en bedre verden

Feltstudie av klimatiske forhold i luftespalter bak kledning og taktekning

Erlend Sune Rønningen

Bygg- og miljøteknikk, 5-årig

Innlevert: Juni 2020

Hovedveileder: Tore Kvande, Institutt for bygg- og miljøteknikk, NTNU

Medveileder: Lars Gullbrekken, SINTEF Community

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for bygg - og miljøteknikk

Forord

Denne oppgaven er en avsluttende masteroppgave ved NTNU skrevet våren 2020. Arbeidet med oppgaven utgjør det siste semesteret på det femårige studieprogrammet Bygg- og miljøteknikk. Oppgaven tilsvarer 30 studiepoeng og tilhører hovedprofilen Bygnings- og materialteknikk.

Det har vært spennende og lærerikt å jobbe med denne oppgaven. Jeg har satt stor pris på å få jobbe med en feltstudie, og dermed «ekte bygg». Personlig synes jeg at ZEB-laboratoriet er et svært spennende byggeprosjekt, som skiller seg klart fra de fleste andre byggeprosjekter. Jeg anser det som ganske sannsynlig at det kun er et spørsmål om tid før dette blir den normale måten å bygge på. Derfor har det vært veldig spennende å få være med å undersøke hvor godt denne byggemetoden fungerer.

Dette semesteret har selvsagt vært sterkt preget av COVID-19. Jeg føler meg imidlertid heldig, siden jeg akkurat hadde rukket å skru opp de siste sensorene før landet stengte ned. Etter dette har all veiledning forgått digitalt, noe som har fungert overraskende greit.

Jeg ønsker å rette en stor takk til hovedveileder Tore Kvande ved NTNU og biveileder Lars Gullbrekken ved SINTEF. Dere har gitt svært god hjelp til selve instrumenteringen og tolkningen av dataene. Jeg vil også rette en takk til Nora Schjøth Bunkholt for svært god hjelp med databehandlingen generelt og beregningene av underkjøling spesielt. Tilslutt vil jeg også takke venner og familie som har lest i oppgaven og kommet med gode tilbakemeldinger.

Nå gleder jeg meg til å ta masterskjegget/koronaskjegget, og nyte en kald pils i solstråler med 800 W/m^2 . Jeg skal sette meg på verandaen på sørfasaden av huset, og dermed kjenne den konvektive varmen fra kledningen.

Tønsberg, Juni 2020

Erlend Sune Rønningen

Sammendrag

Luftespalter bak kledninger og tekninger brukes mye i nordiske land. Hensikten med luftespalter er å ventilere og drenere ut fukt, og dermed beskytte den bakenforliggende konstruksjonen. Drivkreftene for ventilering er vind og termisk oppdrift. På tak skal luftespalten i tillegg bidra til å transportere bort varmen på vinteren for å unngå ising ved takfoten. De klimatiske forholdene i luftespalter vil ofte variere sterkt fra forholdene i uteluften. Materialene i spaltens tilgrensende sjikt, samt utformingen av selve luftespalten er parametere som vil påvirke disse forholdene.

Hensikten med denne masteroppgaven er å studere temperatur- og fuktforhold i luftespalter bak kledninger og tekninger. Fire grunner til at slike studier under norske forhold er blitt mer interessante den siste tiden er: 1) Et pågående forskningsprosjekt ved SINTEF kalt TightEN har et mål om å studere bestandigheten av tettelsesninger brukt i vindsperresjiktet. Følgelig er det behov for å vite hva skal klima tettelsesningene utsettes for. 2) Det blir stadig vanligere å bruke Bygningsintegreerte Solceller (BIPV) i nordisk klima. Ettersom strømproduksjonen blir høyere ved lavere temperaturer, medfører dette at luftespalten også bør bidra til å transportere bort varme om sommeren. 3) Dagens retningslinjer (Byggforskserien) for spalteutforming på skrå tretak gjelder bare for taklengder < 15 m med takvinkler > 18 grader, og det er derfor ønskelig å oppdatere disse på sikt. 4) Økende isolasjonstykkelser i yttervegger og tak bidrar til at luftespalten mottar et mindre varmetilskudd, og dermed forverrede fuktforhold. Til sammen medfører de fire nevnte grunnene at mer kunnskap om klimatiske forhold i luftespalter er ønskelig.

Metoden i denne oppgaven baserer seg på en feltstudie av de klimatiske forholdene i luftespaltene på to bygg i Trondheim. De to byggene, ZEB-laboratoriet og ZEB Test Cell Laboratory, er forskningsbygg som ligger på Campus Gløshaugen på NTNU. ZEB-laboratoriet er i dag under bygging (juni 2020). Bygget har et stort skrått tretak med lengde over 18 m. Hele taket og store deler av fasadene er dekt med BIPV. Luftespaltene har blitt instrumentert med termoelementer og trådløse fuktsensorer høsten 2019 og vinteren 2020. Gjennomføringen av dette arbeidet er en del av denne oppgaven. ZEB Test Cell Laboratory ble bygget i 2014, og instrumenteringen som ble utført den gangen beskrives kort. På de to byggene er det studert ulike enkeltperioder på ulike årstider, der de lengste periodene er på 38 dager.

Resultatene fra ZEB-laboratoriet viste temperaturer opptil 20-25 grader høyere enn utetemperaturer i perioden på våren. Temperaturdifferansene mellom spalteluften og uteluften korrelerte godt med solstrålingen. Videre viste resultatene fra taket på våren at spaltetemperaturer var lavere enn utetemperaturer 42 % og 63 % av tiden for henholdsvis toppen og bunnen av taket. Resultatene viste også at trelektene på taket tørket fra omtrent 37 vekt-% til omtrent 25 og 27 vekt-% i løpet av 38 dager, og taket har dermed en stor evne til uttørking. Trefuktnivåene på fasadene var relativt stabile eller svakt uttørkende.

Resultatene fra ZEB Test Cell Laboratory viste temperaturer omtrent 40 grader høyere enn utetemperaturer om sommeren. Temperaturdifferansene mellom spalteluften og uteluften korrelerte godt med solstrålingen. Videre viste resultatene fra taket på våren at spaltetemperaturer var lavere enn utetemperaturer 58 % og 63 % av tiden for henholdsvis søndre og nordre del av taket. En egen analyse viste at taket har lengre perioder med kondenspotensial som følge av undertemperaturer. En analyse av perioder med lite vind og mye sol om sommeren viste større korrelasjon mellom spaltehastigheten og vindhastigheten enn mellom spaltehastigheten og solstrålingen.

Abstract

Air cavities behind cladding and roofing are common in Nordic countries. The purpose of air cavities is to ventilate and drain moisture, and by doing so protect the internal structure. The driving forces for ventilation are wind and thermal buoyancy. Roofs should also have an air cavity to transport heat away in the winter to avoid icing at the eaves. The climatic conditions in air cavities will often vary significantly from the conditions in the outdoor air. The materials in the adjacent layers of the air cavity and the design of the cavity itself are parameters that will influence these conditions.

The purpose of this master's thesis is to study the temperature and humidity conditions in the air cavities behind cladding and roofing. Four reasons why such studies in Norwegian conditions have become more interesting recently are: 1) An ongoing research project at SINTEF called TightEN has a goal to study the durability of sealing solutions used in the wind barrier layer. Therefore, it is necessary to know what climatic conditions these sealing solutions are exposed to. 2) It is becoming increasingly common to use Building Integrated Photovoltaics (BIPV) in Nordic climates. As electricity production increases with lower temperatures, this means that the air cavity should also help to transport heat away in the summer. 3) Today's guidelines ("Byggforskserien") for cavity design of sloped wooden roofs only apply to roof lengths < 15 m and roof angles > 18 degrees, and it is therefore desirable to update these guidelines in the future. 4) Increasing insulation thickness in exterior walls and roofs results in less heat transfer to the air cavity, and thus worse moisture conditions. The four abovementioned reasons imply that more knowledge about climatic conditions in air cavities is desirable.

The method in this thesis is based on a field study of the climatic conditions in the air cavities in two buildings in Trondheim. The two buildings, the ZEB Laboratory and the ZEB Test Cell Laboratory, are research buildings located on Campus Gløshaugen at NTNU. The ZEB Laboratory is currently under construction (June 2020). The building has a large sloped wooden roof with a total length of more than 18 m. The entire roof and most of the facades are covered with BIPV. The air cavities were instrumented with thermocouples and wireless moisture sensors in autumn 2019 and winter 2020. This work is a part of this thesis. The ZEB Test Cell Laboratory was built in 2014, and the instrumentation that was done at the time is described briefly. The two buildings are studied in different individual periods in different seasons, the longest periods being 38 days.

The results from the ZEB Laboratory showed temperatures 20-25 degrees higher than the outdoor air temperature during the spring period. The temperature differences between the cavity air and the outdoor air correlated well with the solar radiation. Furthermore, the results from the roof during the spring period showed cavity temperatures lower than the outdoor temperature 42 % and 63 % of the time for the top and bottom of the roof, respectively. The results also showed that the wooden battens on the roof dried from about 37 weight-% to about 25 and 27 weight-% in 38 days, and thus the roof has a significant drying effect. The wood moisture contents on the facades were relatively stable, or with a small tendency of drying.

The results from the ZEB Test Cell Laboratory showed temperatures about 40 degrees higher than the outdoor temperature during the summer period. The temperature differences between the cavity air and the outdoor air correlated well with the solar radiation. Furthermore, the results from the roof during the spring period showed cavity temperatures lower than the outdoor temperature 58 % and 63% of the time for the southern and northern part of the roof respectively. A separate analysis showed that the

roof has longer periods of condensation potential due to the sub-temperatures. An analysis of periods with low wind speeds and high solar radiation in the summer showed a more significant correlation between the cavity airspeed and wind speed than between the cavity airspeed and the solar radiation.

Innhold

Figurer	xiv
Tabeller	xvii
Forkortelser/symboler	xvii
1 Innledning	19
1.1 Bakgrunn	19
1.2 Formål	22
1.3 Begrensninger	22
1.4 Oppbygning av oppgaven	22
2 Teori	23
2.1 Luftespalte – Prinsipp og retningslinjer	23
2.1.1 Luftede kledninger	23
2.1.2 Luftede skrå tretak	24
2.2 Drivkrefter	26
2.3 Varme- og fuktoverføring i luftespalten	27
2.3.1 Varmeoverføring	27
2.3.2 Fuktoverføring	28
2.4 Trefuktighet	29
2.5 Tidligere feltstudier av klima i luftespalter	32
3 Metode	35
3.1 Beskrivelse av byggene og værstasjonen	35
3.1.1 ZEB-laboratoriet	36
3.1.2 ZEB Test Cell	38
3.1.3 Værstasjonen	38
3.2 Instrumentering av ZEB-laboratoriet	39
3.2.1 Plassering på bygget	39
3.2.2 Måleutstyr	42
3.2.3 Detaljplassering i luftespaltene	43
3.2.4 Montering	45
3.3 Instrumentering av ZEB Test Cell	47
3.3.1 Plassering på bygget	47
3.3.2 Måleutstyr	47
3.3.3 Detaljplassering i luftespaltene	48
3.4 Analysering av data	49
3.4.1 ZEB-laboratoriet	49
3.4.2 ZEB Test Cell	49

3.4.3	Analyse av underkjøling	49
3.5	Begrensninger og feilkilder	50
4	Resultater	53
4.1	ZEB-laboratoriet.....	54
4.1.1	Nordfasaden – Høyt felt	55
4.1.2	Nordfasaden – Korte felt	57
4.1.3	Tak	59
4.1.4	Tak – Underkjøling	64
4.1.5	Sørfasaden	66
4.1.6	Øst- og vestfasaden	69
4.2	ZEB Test Cell	72
4.2.1	Sommer.....	72
4.2.2	Vinter - Underkjøling	76
4.3	Erfaringer fra databehandlingen	78
5	Diskusjon.....	81
5.1	Høy temperatur øverst på nordfasaden	81
5.2	Forskningsspørsmål 1.....	83
5.3	Forskningsspørsmål 2.....	85
5.4	Forskningsspørsmål 3.....	87
6	Konklusjon	89
	Referanser.....	91
	Vedlegg 1	95

Figurer

Figur 1: ZEB-laboratoriet. Illustrasjon: LINK Arkitektur (LINK Arkitektur, 2020)	21
Figur 2: ZEB Test Cell. Foto: Tore Kvande	21
Figur 3: Prinsippskisse av totrinnstetting av fasade med ventilert og drenert luftespalte (SINTEF anvisning 542.003, 2013)	23
Figur 4: Illustrasjon av de to hovedtypene luftede skrå tretak (SINTEF anvisning 525.002, 2018)	24
Figur 5: Illustrasjon av prinsippene for luftede skrå tretak (SINTEF anvisning 525.002, 2018). Til venstre: Kombinert undertak og vindsperre. Til høyre: Separat undertak og vindsperre	25
Figur 6: Mekanismer for varmetransport i et ventilert tak (Lee et al, 2008). Prinsippet er overførbart til en fasade med luftet kledning.	28
Figur 7: Terminologi om treets ulike lag (Skaug, 2007)	29
Figur 8: Skjematisk illustrasjon av fuktinnholdet i trevirkets celler (SINTEF anvisning 571.523, 2015)	30
Figur 9: Farekart for soppangrep i trevirke (Tronstad, 2006b, s. 15)	31
Figur 10: Kartutsnitt fra Statkart, orient mot nord. Røde ringer viser plasseringen til byggene. ZEB-laboratoriet er det røde bygget som er plassert litt under midten av utsnittet. ZEB Test Cell er det lille blå bygget med «knekk» til høyre i utsnittet.	35
Figur 11: ZEB-laboratoriet sett fra sørvest 01.06.20. Bildet er tatt med kamera fra byggekamera.no.	36
Figur 12: ZEB-laboratoriet sett fra nordøst 01.06.20. Bildet er tatt med kamera fra byggekamera.no	36
Figur 13: Takoppbygningen vist på egenprodusert tegning av detaljsnitt. Tegningen er basert på en kombinasjon av tegninger fra LINK Arkitektur og befaring av bygget.	37
Figur 14: ZEB Test Cell sett fra syd. Foto: Tore Kvande	38
Figur 15: Sensorplassering på nordfasaden (øverst) og sørfasaden og taket (nederst) på ZEB-laboratoriet. Firkanter med M viser de trådløse fuktsensorene og ringer med T viser termoelementene. De røde rette strekene viser kablene til termoelementene. Plasseringen er illustrert på fremsiden av fasadetegninger av bygget laget av LINK Arkitektur. NB: Tegningene er ikke i målestokk.	40
Figur 16: Sensorplassering på østfasaden (øverst) og vestfasaden (nederst) på ZEB-laboratoriet. Firkanter med M viser de trådløse fuktsensorene og ringer med T viser termoelementene. De røde rette strekene viser kablene til termoelementene. Plasseringen er illustrert på fremsiden av fasadetegninger av bygget laget av LINK Arkitektur. NB: Tegningene er ikke i målestokk.	41
Figur 17: Trådløs fuktsensor av typen Omnisense S-160 (Finisterra, 2020)	42
Figur 18: Plassering av fuktsensoren MR2 vist på egenprodusert tegning av detaljsnitt. Tegningen er basert på en kombinasjon av tegninger fra LINK Arkitektur og befaring av bygget.	43
Figur 19: Plassering av fuktsensoren MR3 vist på egenprodusert tegning av detaljsnitt. Tegningen er basert på en kombinasjon av tegninger fra LINK Arkitektur og befaring av bygget.	44
Figur 20: Sensorbilder fra nordfasaden. Foto: Undertegnede, desember 2019	45
Figur 21: Sensorbilder fra taket og sørfasaden. Foto: Undertegnede, desember 2019 og februar 2020	46
Figur 22: Sensorbilder fra øst- og vestfasaden. Foto: Undertegnede, februar og mars 2020	46

Figur 23: Plantegning med oversikt over de instrumenterte luftespaltene med navn. N antyder nordre del av taket, S antyder søndre del. Lektene som omrammer spalten A er gjeret sammen ved mønet slik at spalten blir helt tett. Plantegningen er laget av Luca Finocchiaro.	47
Figur 24: Snittegning av takkonstruksjonen og plasseringen av termoelementer og lufthastighetsmålere (Gullbrekken, Kvande og Time, 2017)	48
Figur 25: ZEB-laboratoriet sett fra sørvest 25.02.20. Bildet er tatt med kamera fra byggekamera.no.	51
Figur 26: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MN1, MN4 og MN5 og solstråling [W/m ²] i perioden 14. februar til 23. mars.	55
Figur 27: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MN1, MN4 og MN5, utetemperatur [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 14. februar til 23. mars.	56
Figur 28: Trefuktighet [vekt-%] og relativ luftfuktighet [%] og for sensorene MN1, MN4 og MN5 i perioden 14. februar til 23. mars.....	56
Figur 29: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MN2 og MN3 og solstråling [W/m ²] i perioden 14. februar til 23. mars.	57
Figur 30: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MN2 og MN3, utetemperatur [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 14. februar til 23. mars.	58
Figur 31: Trefuktighet [vekt-%] og relativ luftfuktighet [%] for sensorene MN2 og MN3 i perioden 14. februar til 23. mars.	58
Figur 32: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MR2 og MR3, utetemperatur [°C] og solstråling [W/m ²] i perioden 14. februar til 23. mars.....	60
Figur 33: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MR2 og MR3, utetemperatur [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 14. februar til 23. mars.	60
Figur 34: Absolutt fuktinnhold [g/kg] for sensorene MR2, MR3 og uteluften og solstråling [W/m ²] i perioden 14. februar til 23. mars.	62
Figur 35: Absolutt fuktinnhold [g/kg] for sensorene MR2, MR3 og uteluften og solstråling [W/m ²] i perioden 15. mars til 23. mars.	63
Figur 36: Trefuktighet [vekt-%] og relativ luftfuktighet [%] for sensorene MR2 og MR3 i perioden 14. februar til 23. mars.	63
Figur 37: Kondenspotensial Cpi [Pa] for MR2 og MR3 og andel av taket dekt med snø [%] i perioden 14. februar til 23. mars.	65
Figur 38: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MS2 og MS3, utetemperatur [°C] og solstråling [W/m ²] i perioden 1. april til 22. april.	67
Figur 39: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MS2 og MS3, utetemperatur [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 1. april til 22. april.	67
Figur 40: Trefuktighet [vekt-%] og relativ luftfuktighet [%] for sensorene MS2 og MS3 i perioden 1. april til 22. april.....	68
Figur 41: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene ME1 og MW1, utetemperatur [°C] og solstråling [W/m ²] i perioden 1. april til 22. april.	69
Figur 42: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene ME1 og MW1, utetemperatur [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 1. april til 22. april.	70
Figur 43: Trefuktighet [vekt-%] og relativ luftfuktighet [%] for sensorene ME1 og MW1 i perioden 1. april til 22. april.....	71
Figur 44: Temperaturer midt i spalteluften [°C], på baksiden av taktroa [°C], utetemperaturen [°C] og solstråling [W/m ²] i perioden 8. juni til 16 juli.....	73
Figur 45: Temperaturer midt i spalteluften [°C], på baksiden av taktroa [°C], utetemperaturen [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 8. juni til 16 juli.	73

Figur 46: Kondenspotensial Cpi [Pa] for luftespalte SA i perioden 14. februar til 23. mars.	77
Figur 47: Kondenspotensial Cpi [Pa] for luftespalte NA i perioden 14. februar til 23. mars.	77

Tabeller

Tabell 1: Anbefalt sløyfehøyde (mm) avhengig av takvinkel og taklengde (SINTEF anvisning 525.102, 2012).....	25
Tabell 2: Sammenligning av fire relevante feltstudier	33
Tabell 3: Plassering av termoelementene og fuktsensorene på ZEB-laboratoriet	39
Tabell 4: Informasjon om måleinstrumentene hentet fra Gullbrekken, Kvande og Time (2017)	47
Tabell 5: Temperaturforhold på sørsiden av taket hos Gullbrekken, Kvande og Time (2017) og i denne studien. Resultatene fra Gullbrekken, Kvande og Time (2017) er hentet fra posisjonene midt mellom mønet og raft. Resultatene fra denne studien er hentet fra posisjonene 0,5 m fra mønet for luftespaltene SB, SD og SE.	74
Tabell 6: Data fra værstasjonen og termoelementene i perioder på mer enn 3 timer som i hovedsak har vind < 1m/s og solstråling > 100 W/m ²	75

Forkortelser/symboler

BIPV	Building Integrated PhotoVoltaic
CP _i	Kondenspotensial (Pa)
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
RF	Relativ luftfuktighet
ZEB	Zero Emission Building

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Et kjennetegn ved nordisk byggeskikk er bruk av luftespalter i yttervegger og skrå tretak. Hensikten med en luftespalte er å adskille regnskjermer og vindskjermer til bygget ved trykkutligning. Luftespalten bidrar med å ventilere og drenere ut fukt. Drivkreftene for ventilering er vind og oppdrift. Drenering foregår ved at fritt vann kan renne ut i bunnen av konstruksjonsdelen. På tak er det også viktig at luftespalten bidrar til å transportere bort varme, slik at ising ved takfoten unngås. Luftespaltens funksjoner gjør at det er en egnet byggemetode i nordiske land. Norge har et ekstremt variert klima som følge av landets varierte topografi og lange kystlinje. Ettersom det er forventet et enda mildere og fuktigere klima i fremtiden, er det grunn til å forvente at luftespalte som prinsipp vil forbli svært relevant i Norge og andre nordiske land i fremtiden.

Bruk av luftespalter er og har vært hovedprinsippet for fuktsikring av fasader og tak på norske trehus i lang tid. Ifølge Kvande, Lisø og Time (2007) har SINTEF forsket på løsninger med luftespalter i fasader siden 50-tallet. Skadearkivet til SINTEF viser imidlertid at skrå tretak og yttervegger over terreng står for 51 % av det totale antall skader (SINTEF anvisning 700.110, 2010). I mange tilfeller skyldes skadene manglende lufting, mens i andre tilfeller oppstår skader til tross for at lufteprensippene er ivaretatt. Både lekter og vindtettende sjikt er utsatt for skader. 76 % av alle byggskader fra arkivet skyldes fukt. Følgelig er det relevant med kunnskap om de klimatiske forholdene i luftespalter, slik at påkjenningsmaterialene blir utsatt for blir kjent. Både temperaturer og fuktforhold er sentrale i denne sammenhengen. Det kan for øvrig nevnes fire viktige grunner til at klima i luftespalter under norske forhold er blitt mer interessant de siste årene. I de neste fire avsnittene vil disse grunnene beskrives.

Den første grunnen er relatert til et pågående forskningsprosjekt hos SINTEF og NTNU som heter TightEN (SINTEF, 2020). Et viktig mål i TightEN er å utvikle nye og/eller forbedrede testmetoder for bestandighetsprøving av teip og andre klebeprodukter. Bakgrunnen for dette prosjektet er at dagens nybygg bygges langt tettere enn for noen år siden. Dette er som følge av skjerpede krav til energibruk i Byggteknisk forskrift. For å oppnå denne tettheten brukes det mye teipprodukter, både på varm og kald side av konstruksjonen. Teip på kald side av konstruksjonen brukes gjerne i vindspærreskjøter og rundt vinduer og andre gjennomføringer. Denne teipen er følgelig utsatt for de klimatiske forholdene i de aktuelle luftespaltene. Det er knyttet stor usikkerhet til bestandigheten av disse teipproduktene, ettersom de er ganske nye på markedet. Dersom teipløsningen aldres raskere enn bygget for øvrig, vil dette kunne føre til at energibruken øker over byggets levetid. Samtidig vil det fort bli ulønnsomt å utbedre problemet, siden teiping er bygd inn i konstruksjonen. For å forutsi bestandigheten av ulike bygningsmaterialer benyttes det tester for akselerert aldring i laboratorium. I TightEN er det et mål å forbedre disse testmetodene. I denne sammenheng vil mer informasjon om hvilke påkjenninger teipproduktene er utsatt for være avgjørende for å utvikle disse testmetodene. Dermed vil studier av klimatiske forhold i luftespalter kunne bidra til dette.

Den andre grunnen er fremveksten av mer innovative kledninger og tekninger, der særlig bygningsintegreerte solceller (BIPV) har fått mye oppmerksomhet de senere årene. Hensikten med BIPV er at panelene brukes som selve kledningen eller tekningen, og at det dermed oppnås materialbesparelser. Dette kan gi store økonomiske besparelser og reduserte klimagassutslipp, samt kortere byggetid. I tillegg er det et poeng at BIPV gjerne

oppfattes som mer estetisk enn tradisjonelle solceller, da integrasjonen gjør at panelene går mer i ett med bygget. Bruk av BIPV forutsetter at det er en luftespalte bak panelene av to grunner. Den ene grunneren er den samme som for tradisjonelle kledninger og tekninger som beskrevet over. Den andre grunnen er at solcellepaneler får høyere virkningsgrad ved lavere temperaturer, slik at de kan produsere mer strøm (Jelle, Breivik og Røknes, 2012). Utifra denne grunnen er det viktigst at luftespalten har evne til å ventilere bort varme i sommerhalvåret, da det meste av strømproduksjonen foregår. Det eksisterer få eller ingen norske retningslinjer for hvordan en luftespalte skal utformes for å imøtekomme dette sistnevnte kravet, og følgelig vil mer kunnskap om temperaturer og luftskifte bak BIPV-anlegg være av interesse.

Den tredje grunnen er at det synes å mangle retningslinjer for store tretak og tretak med lave takvinkler. Dagens retningslinjer setter en øvre begrensning på takets lengde på 15 m og en nedre begrensning på takhelningen på 18° (SINTEF anvisning 525.102, 2012). Etersom klimafotavtrykket til tre er lavere enn for andre materialer brukt til bærekonstruksjoner, er det ønskelig å bygge større og slakere tretak enn det som er vanlig i dag. Slike takkonstruksjoner vil muligens kreve en annen utforming av luftespaltene enn det som er vanlig praksis for tradisjonelle tretak. Følgelig vil mer kunnskap om klima i luftespalter også kunne bidra til å opprette retningslinjer for store og slake tretak på sikt.

Den fjerde grunnen er at vegger og tak stadig isoleres mer for å redusere varmetapet. Dette er som følge av skjerpede energikrav og økende fokus på lavutslippsbygg og nullutslippsbygg. Isoleringen medfører imidlertid at luften i luftespalten blir kaldere enn ved dårligere isolerte bygg. Dette er gunstig med tanke på å redusere faren for snøsmelting på tak, men det medfører også at uttørkingsforholdene for fukt i luftespalten blir dårligere. Dette kan i ytterste konsekvens føre til skade på luftespaltens tilgrensende materialer, da særlig lekter, vindsperrer og tettelsninger. På nattetid kan temperaturene i luftespalter på godt isolerte bygg bli lavere enn utetemperaturen i lengre perioder. Dette kan medføre kondensproblemer. Mer kunnskap om temperatur og fuktforhold i luftespalter i godt isolerte bygg kan bidra til å kartlegge dette farepotensialet.

Denne oppgaven omhandler en feltstudie av de klimatiske forholdene i luftespalter på to NTNU-bygg på Campus Gløshaugen i Trondheim. De to byggene som studeres er ZEB-laboratoriet og ZEB Test Cell Laboratory, som er vist i henholdsvis Figur 1 og Figur 2. ZEB står for Zero Emission Building, som betyr at byggene skal produsere nok fornybar energi til å kompensere for klimagassutslipp gjennom byggenes levetid (SINTEF anvisning 473.020, 2017). Dette muliggjøres i hovedsak ved bruk av solceller.

ZEB-laboratoriet er et nytt 2000 m² kontor- og forskningsbygg som er under bygging, og skal stå ferdig i oktober 2020 (NTNU og SINTEF, 2020). Bygget har et stort skrått tretak og stor andel bygningsintegreerte solceller (BIPV). Solcellene dekker nesten hele taket og store deler av fasadene. Panelene på taket monteres i et tett kassettsystem, mens panelene på fasadene monteres med åpne fuger. De resterende delene av fasadene har trekledning. På taket og fasadene benyttes krysslekting, slik at luftespaltene blir store felt som spenner over hele bredden. Luftespaltene er instrumentert med termoelementer og trådløse fuktsensorer, og gjennomføringen av instrumenteringen med trådløse fuktsensorer er en del av denne oppgaven.

ZEB Test Cell Laboratory, heretter forkortet til ZEB Test Cell, er et lite forsøksbygg som ble bygget i 2014. Bygget brukes til testing av lavenergi integrerte byggsystemer (ZEB Forskningsssenter, 2020). Bygget har et saltak uten åpning av luftespalten i toppen, der lekter med senteravstand på 60 cm danner separate luftespalter som er gjennomgående fra raft til raft. Disse luftespaltene er instrumentert med termoelementer, i tillegg til at det

er fire lufthastighetsmålere og to trykkmålere i to av spaltene. Det er en værstasjon 1,5 m over mønet på bygget (se Figur 2). Instrumenteringen av bygget ble gjennomført i forbindelse med byggingen, og følgelig vil detaljer rundt dette kun gjengis kort.



Figur 1: ZEB-laboratoriet. Illustrasjon: LINK Arkitektur (LINK Arkitektur, 2020)



Figur 2: ZEB Test Cell. Foto: Tore Kvande

1.2 Formål

Hensikten med denne oppgaven er å øke kunnskapen om klima i luftespalter i felt. Dette er ønskelig av grunnene som er nevnt i kapittel 1.1. Det er videre et mål å forstå mer om sammenhengen mellom værforholdene ute og de klimatiske forholdene i luftespaltene. Oppgaven forsøker å svare på følgende forskningsspørsmål:

- *Hvilke temperatur- og fuktforhold kan oppstå i luftespalten bak kledning og tekning?*
- *Hvordan henger temperatur- og fuktforhold i luftespalten sammen med værforhold på stedet?*
- *Hva betyr klimaet i luftespalten for materialvalg og design?*

1.3 Begrensninger

Oppgaven begrenser seg til å studere og analysere data fra de instrumenterte luftespaltene på de to byggene og fra værstasjonen. Det er analysert ulike enkeltperioder. På Zeb-laboratoriet er det analysert data fra vinter og vår, mens det på ZEB Test Cell er analysert data fra sommer og vinter. Analysene begrenser seg til de enkelte periodene, og de lengste analyseperiodene er på 38 dager. Det er viktig å understreke at andre årstider, lengre perioder og andre værforhold ville kunne gitt annerledes resultater.

Det presiseres også at en stor del av denne oppgaven har vært planlegging, gjennomføring og oppfølging av instrumenteringen på ZEB-laboratoriet. Eksempelvis har det gått med en del tid til å undersøke om sensorene virker, samt igangsetting av tiltak for å minimere datahullene. Det har også vært en del koordineringsarbeid knyttet til driften av byggeplassen.

Strømningsforhold i spaltene og estimering av luftskifte er ikke behandlet. Lufttetthet av bygninger og teipløsninger i seg selv er heller ikke behandlet, selv om dette er en viktig del av TighetEN. Videre vil heller ikke problemstillinger knyttet til gjennomføring av akselerert aldring på teip bli studert. Problemstillinger knyttet til brann er heller ikke behandlet selvom dette er viktig for design av luftespalter, særlig der BIPV benyttes.

1.4 Oppbygning av oppgaven

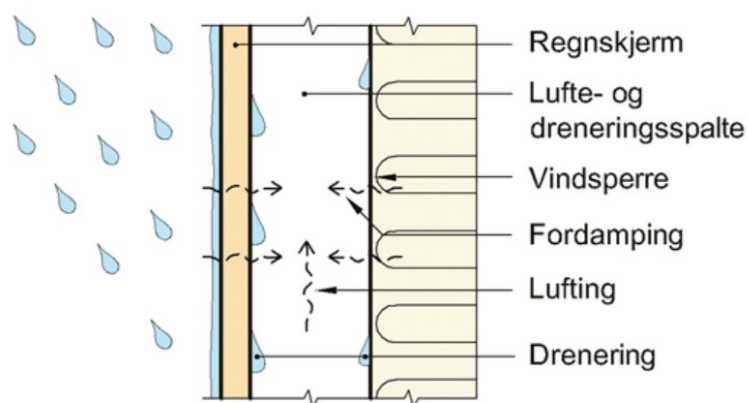
I kapittel 2 presenteres teori som er ansett å være relevant for resten av oppgaven. Dette inkluderer blant annet teori om luftespalter i fasader og tak, varme- og fuktoverføring i luftespalter og trefuktighet. Til slutt inkluderes et underkapittel om enkelte tidligere feltstudier av hygrottermiske forhold i luftespalter. I kapittel 3 beskrives metoden som er benyttet i feltstudien. Dette inkluderer en detaljert beskrivelse av instrumenteringen av ZEB-laboratoriet og en kort beskrivelse av instrumenteringen av ZEB Test Cell. I tillegg beskrives deler av dataanalysene som er gjort for begge byggene kort. Enkelte beregninger som er gjort i resultatdelen blir gjennomgått. I kapittel 4 presenteres resultatene sammen med tilhørende kommentarer. Enkelte av kommentarene omhandler mulige årsaker til det som observeres, og inkluderer derfor litt diskusjon. Resultatene består av forholdsvis mange diagrammer som viser data fra måleinstrumentene og værstasjonen. I kapittel 5 blir et uventet funn fra resultatene diskutert nærmere, og deretter diskuteres forskningsspørsmålene på en helhetlig måte hver for seg. I kapittel 6 konkluderes det på bakgrunn av de 3 forskningsspørsmålene.

2 Teori

2.1 Luftespalte – Prinsipp og retningslinjer

2.1.1 Luftede kledninger

Luftede kledninger defineres i SINTEF anvisning 542.003 (2013) som yttervegger som har en ventilert og drenert luftespalte mellom kledningen (regnskjermen) og vindsperra. For fasader kalles dette prinsippet for totrinnstetting (Thue, 2019). Totrinnstetting baser seg på at fukt både skal ventileres og dreneres ut. Ventilering foregår ved hjelp av trykkforskjeller mellom innløp og utløp av spalten. Drenering foregår av at vann i spalten kan renne nedover og ut i bunn. Figur 3 viser en prinsippskisse av en luftet kledning med ventilert og drenert luftespalte.



Figur 3: Prinsippskisse av totrinnstetting av fasade med ventilert og drenert luftespalte (SINTEF anvisning 542.003, 2013)

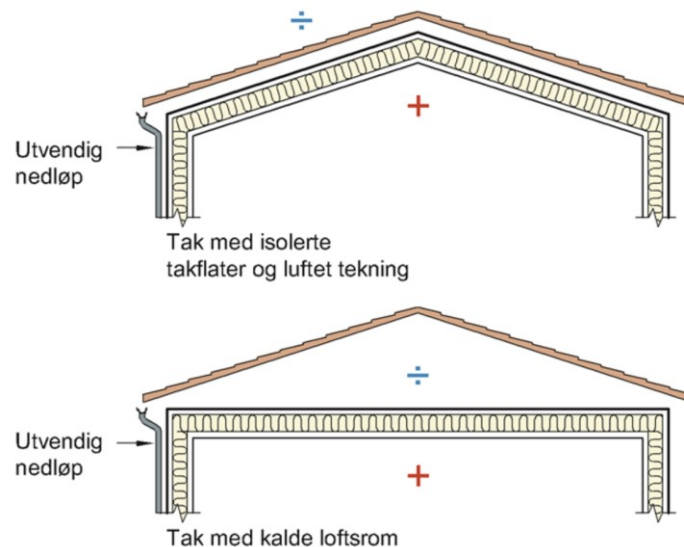
Et viktig poeng med luftede kledninger er å hindre at regn i kombinasjon med vind (slagregn) fukter opp bakveggen. Slagregn defineres som horisontalkomponenten av skrått innfallende regn (Sivle, 2009). Mengden slagregn på et sted er avhengig av klimaet. Slagregn viser seg også å være en svært viktig parameter for fuktforholdene til en luftet kledning. Følgelig er det utarbeidet retningslinjer for utforming av luftespalter basert på slagregnsmengder (Kvande, Lisø og Time, 2007). Disse retningslinjene brukes til å gi differensierte anbefalinger til blant annet type utlekting og åpningsbredder i topp og bunn. Inndelingen baseres på tre nivåer av slagregnsmengder, 1) liten, 2) moderat og 3) stor.

Luftede kledninger brukes for en rekke ulike kledningsvarianter. Dette inkluderer stående og liggende trekledning, platekledninger i metall, plast, naturstein og sementbaserte produkter samt murt forblending og skallmur. Detaljer om utforming av luftespalter bak disse kledningsvariantene kan finnes i Kvande, Lisø og Time (2007) samt i Byggforskserien.

Totrinnstetting brukes også som prinsipp for fugetetting. Prinsippet er å adskille regnskjermen og vindskjermen på samme måte som for luftede kledninger. Regnskjermen består da typisk av beslag, dekklister eller lignende. Vintettingen består gjerne av fugemasse, bunnfyllingslister og lignende. Ved å opprettholde en luftespalte mellom disse to sjiktene kan ventilering og drenering av fukt sikres på samme måte som for luftede kledninger.

2.1.2 Luftede skrå tretak

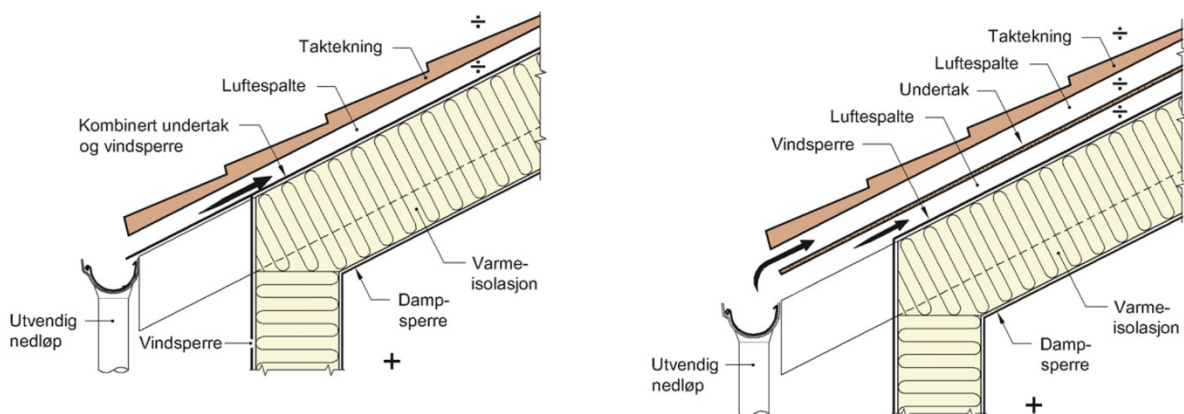
Luftede skrå tretak defineres i denne oppgaven som skrå tak med bærekonstruksjon av tre og prinsipp for lufting. Det er to hovedtyper av slike skrå tak, og disse er illustrert i Figur 4 (SINTEF anvisning 525.002, 2018). Den ene er tak med isolerte takflater og luftet tekning, der luftingen ivaretas med en luftespalte under tekningen. Den andre metoden er tak med kalde loftsrom. Slike tak baserer seg på at store luftvolum på taket brukes for å ivareta luftteprinsippene. Dermed er det ingen smal luftespalte i disse takene. Slike tak er ikke benadlet i denne oppgaven.



Figur 4: Illustrasjon av de to hovedtypene luftede skrå tretak (SINTEF anvisning 525.002, 2018)

Hensikten med luftespalten i tak med isolerte takflater og luftet tekning er å ventilere og drenere ut fukt, på samme måte som for fasader. I tillegg til dette skal luftespalten også bidra til å ventilere bort varme slik at ising ved takfoten unngås. Tak mottar langt mer nedbør enn en fasade. Dette medfører at tekningen på et tak må tåle langt mer vann enn kledningen på en yttervegg. Tilsvarende må det vindtettende sjiktet til taket tåle langt mer fukt enn vindsperrer på yttervegger, ettersom noe fukt som regel vil trenge gjennom tekningen. Det er ikke vanlig å bruke begrepet tottrinnetting for tak med isolerte takflater og luftet tekning, selv om prinsippet er nokså likt prinsippet for luftede kledninger.

Det er to hovedkategorier av tak med isolerte takflater og luftet tekning. Figur 5 viser illustrasjoner av disse oppbygningene. Det ene prinsippet er å benytte kombinert undertak og vindsperre, og er beskrevet i SINTEF anvisning 525.102 (2012). Det andre prinsippet er å benytte separate vindsperrer og undertak, og er beskrevet i SINTEF anvisning 525.101 (2007). Det sistnevnte prinsippet er det mest tradisjonelle, mens det førstnevnte prinsippet er en nyere variant. Det presiseres at tak med isolerte takflater og luftet tekning kan ha utforminger som avviker en del fra illustrasjonene i Figur 5. Eksempelvis er dette tilfelle for de to instrumenterte byggene i denne oppgaven, ZEB-laboratoriet og ZEB Test Cell. Detaljer om oppbygningen av disse takene er vist i metodekapittelet (kapittel 3).



Figur 5: Illustrasjon av prinsippene for luftede skrå tretak (SINTEF anvisning 525.002, 2018). Til venstre: Kombinert undertak og vindsperre. Til høyre: Separat undertak og vindsperre

Retningslinjene for utforming av luftespaltene til tak med kombinert undertak og vindsperre finnes i SINTEF anvisning 525.102 (2012). I anvisningen vises en tabell over anbefalt størrelse på luftespalten (sløyfehøyde) utifra taklengde og takvinkel. Tabellen er gjengitt nedenfor i Tabell 1.

Tabell 1: Anbefalt sløyfehøyde (mm) avhengig av takvinkel og taklengde (SINTEF anvisning 525.102, 2012).

Takvinkel	Taklengde (m)		
	7,5	10	15
18-30°	36	36+36 = 72	48+48 = 96
31-40°	30	36	36+23 = 59
≥41°	23	36	36+23 = 59

Det kan observeres at både lavere takvinkel og større tak gir anbefaling om økt sløyfehøyde, altså større luftespalte. Tabellen gir imidlertid ingen retningslinjer for taklengder over 15 m og takhelninger under 18 grader. Det bør også observeres at retningslinjene ikke tar hensyn til klimasted og nedbørsmengder. Tilsammen medfører dette at retningslinjene er lite nyanserte.

2.2 Drivkrefter

Ventilering av fukt i en luftespalte krever et luftskifte i spalten. Slike luftskifter er forårsaket av trykkforskjeller mellom innløp og utløp av spalten. Det er to drivkrefter som kan skape slike trykkforskjeller (Falk, 2014). De to drivkreftene er vind og oppdrift.

Drivkraften fra vind er et resultat av at vind mot en bygning gir ulike vindtrykk på ulike deler av fasaden eller taket, og at det dermed blir ulike vindtrykk mot innløpet og utløpet av luftespaltespalten. Drivtrykket fra vind er gitt som en trykkdifferanse i Formel 1 (Falk, 2014):

$$\Delta p_w = 0,5 * \Delta C_p * \rho_a * v^2 \quad (1)$$

$$\Delta p_w = \text{Drivtrykk fra vind [Pa]}$$

$$\Delta C_p = \text{Formfaktor [-]}$$

$$\rho_a = \text{Luftens densitet [kg/m}^3\text{]}$$

$$v^2 = \text{Vindhastigheten [m/s]}$$

Formfaktoren ΔC_p er et forholdstall mellom innløpet og utløpet av en spalte. Falk (2014) skriver at det er vanskelig å estimere denne størrelsen for luftespalter utifra tester i vindtunnel og feltstudier. Følgelig er beregninger av drivtrykket fra vind mot luftespalter somregel heftet med nokså stor usikkerhet.

Drivkraften fra oppdrift er forårsaket av densitetsforskjeller forårsaket av temperaturforskjeller mellom spalteluften og uteluften. Oppdrift kalles gjerne også for skorsteinseffekt. Drivtrykket fra oppdrift er gitt som en trykkdifferanse i formel 2 (Falk, 2014):

$$\Delta p_b = 3462 * \left(\frac{1}{T_a+273} - \frac{1}{T_c+273} \right) * h \quad (2)$$

$$\Delta p_b = \text{Drivtrykk fra oppdrift [Pa]}$$

$$T_a = \text{Utetemperatur [}^\circ\text{C]}$$

$$T_c = \text{Temperatur i topp av luftespalte [}^\circ\text{C]}$$

$$h = \text{Vertikal avstand mellom innløp og utløp av spalten [m]}$$

I godt isolerte bygg er det i hovedsak solstråling som bidrar til temperaturforskjellene som skaper oppdrift. I dårlig isolerte bygg og bygg med store luftlekkasjer i klimaskallet kan varm luft fra innsiden av bygget varme opp spalteluften. Slike problemstillinger er ikke behandlet i denne oppgaven. De to instrumenterte byggene i denne oppgaven, ZEB-laboratoriet og ZEB Test Cell, er begge godt isolerte bygg. Følgelig antas det at oppdriftskrefter i hovedsak er et resultat av solstråling.

Ofte er begge drivtrykkene tilstede samtidig. I disse tilfellene er det det samlede drivtrykket som avgjør hvordan luftstrømmen blir. Formel 3 gir dette (Falk, 2014):

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_w + \Delta p_b \quad (3)$$

$$\Delta p_{tot} = \text{Totalt drivtrykk [Pa]}$$

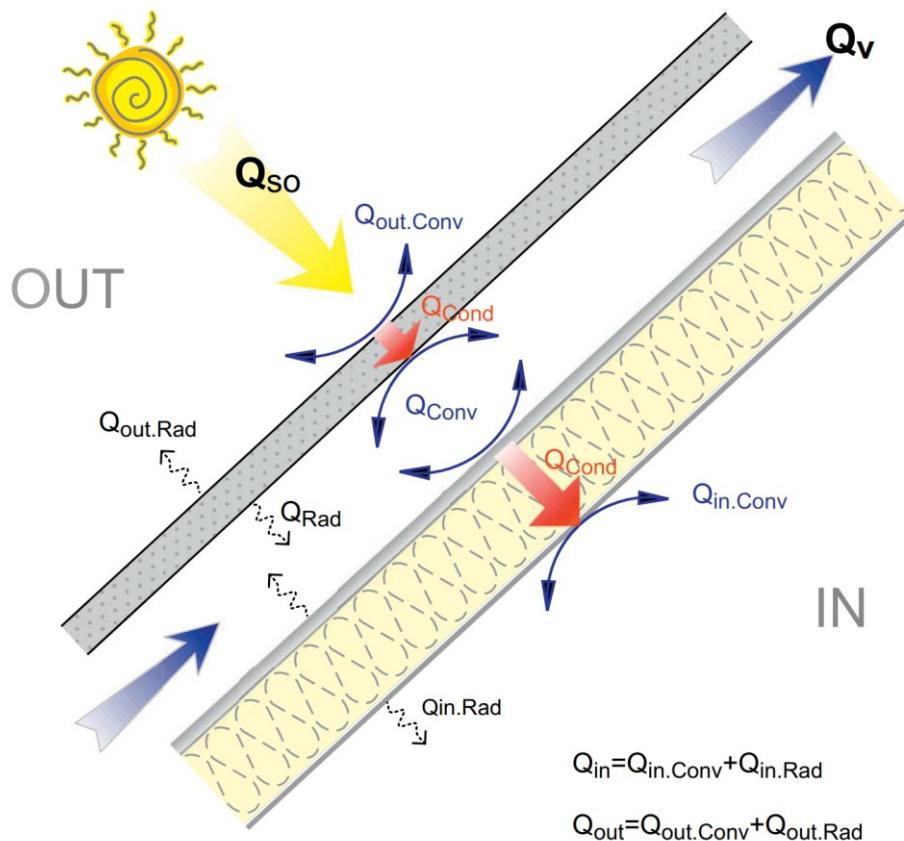
Drivtrykk fra oppdrift vil alltid skape en oppoverrettet luftstrøm. Drivtrykket fra vind kan imidlertid skape luftstrømmer både oppover, nedover, horisontalt og på skrå. Dersom retningen til det totale drivtrykket skal beregnes må Formel 3 brukes vektorielt.

2.3 Varme- og fuktoverføring i luftespalten

2.3.1 Varmeoverføring

De termiske forholdne i en luftespalte er avhengige av varmeoverføringene som finner sted fra begge sider av spalten. Varmeoverføring i en luftespalte er avhengig av værforholdene som er tilstede, utforming av spalten og materialegenskapene til de tilgrensende sjiktene. De tre formene for varmeoverføring er konduksjon, konveksjon og stråling, og drivkraften for disse mekanismene er temperaturdifferanser over sjiktene. Definerings av de tre begrepene vil bli gjort i det følgende basert på Geving og Thue (2002). Konduksjon, også kjent som varmeledning, skyldes at varmen brer seg gjennom et stoff ved molekylbevegelser. Konduksjon foregår både i faste stoffer, væsker og gasser. Konveksjon er varmeoverføring som foregår mellom en overflate og et fluid i bevegelse, når overflaten og fluidet har forskjellig temperatur. Det presiseres at konveksjon en sammensatt og komplisert prosess. Stråling, eller varmestråling, er elektromagnetiske bølger som brer seg rettlinjert. Innenfor byggfaget skilles det mellom kortbølget og langbølget stråling. Kortbølget stråling er i denne sammenhengen solstråling, og den korte bølgelengden skyldes solas høye temperatur. Stråling fra vanlige overflater med normale temperaturer, det vil si alle bygningsdeler, sender ut langbølget stråling.

Figur 6 er hentet fra Lee et al (2008), og viser mekanismene for varmetransport for et ventilert skrått tak. De samme mekanismene vil virke på en yttervegg med totrinnstetting. Solstråling vil varme opp det ytterste sjiktet av bygningen, og består av både kortbølget og langbølget stråling. Konduksjon vil foregå gjennom materialene på begge sider av luftespalten. For en vegg vil det si at konduksjon vil foregå både gjennom kledningen og gjennom bakveggen. For et tak betyr det at konduksjon vil foregå både gjennom tekningen (og eventuell taktro) og gjennom den bærende og isolerte takkonstruksjonen. Konveksjon vil på sin side foregå i overgangen mellom materialene og den omkringliggende luften. Strålingsutveksling mellom materialsjiktene på hver side av luftespalten vil foregå i form av langbølget stråling. Materialsjiktene på hver side av spalten vil også kunne sende stråling henholdsvis ut fra bygget og inn i bygget. Stråling fra det ytterste sjiktet (kledning eller taktekning) mot atmosfæren vil kunne være betydelig når det er kaldt og klart vær, særlig på enkelte vinternetter. Dette fenomenet kan føre til at kledningen/tekningen blir kaldere enn den omkringliggende lufta, og denne effekten kalles gjerne underkjøling. Underkjøling kan være et problem siden det kan føre til at fuktig luft inne i spalten kan kondensere, siden spalteluftens temperatur vil synke som følge av at temperaturen til kledningen/tekningen synker.



Figur 6: Mekanismer for varmetransport i et ventilert tak (Lee et al, 2008). Prinsippet er overførbart til en fasade med luftet kledning.

Spalteluftens temperatur er et resultat av alle de tre mekanismene for varmeoverføring. Konveksjonens betydning er sentral når det kommer til å forstå luftespaltens fysikk. Det finnes to typer konveksjon. Den ene kalles naturlig konveksjon, og skyldes at luft som tilføres varme vil stige, fordi den har lavere densitet. Denne strømmingen setter luften i bevegelse, og lufta vil dermed kunne overføre varme fra et materiale over til lufta. Den andre metoden kalles tvungen konveksjon, og skyldes en ytre påvirkning. Denne ytre påvirkningen kan for eksempel være vind eller vifter. Naturlig og tvungen konveksjon foregår somregel samtidig som blandet konveksjon. De to drivkreftene bak luftveksling i en luftespalte, oppdrift og vind, relaterer seg til henholdsvis naturlig og tvungen konveksjon.

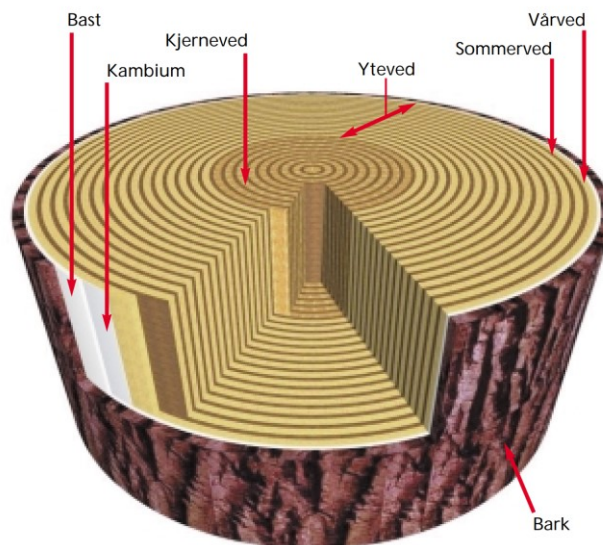
2.3.2 Fuktoverføring

Luftvekslingen i spalten bidrar med transport av både varme og fukt, og i fuktens tilfelle kalles dette konvektiv fukttransport. Det presiseres at fukttransport i en luftespalte ikke er begrenset til konvektiv fukttransport. Fukttransport gjennom materialer, kalt diffusjon, vil også forekomme. Konvektiv fukttransport er analogt med konvektiv varmetransport, mens fuktdiffusjon er analogt med konduksjon. Diffusjon kan forekomme både gjennom kledning/tekning og gjennom bakenforliggende konstruksjon. Det presiseres at fuktforholdene i en luftespalte er en svært komplisert prosess, med mange parametere som påvirker. Dersom man skal regne på fukttilstander i en luftespalte kreves det derfor detaljerte data om mange ulike forhold. Slike beregninger er ikke gjort i denne oppgaven.

2.4 Trefuktighet

De fleste luftespalter i norsk byggeskikk blir laget ved hjelp av trelekter. Trefuktighet er derfor av interesse når hygrotermiske forhold i luftespalter skal vurderes. Trevirke vil bli skadet hvis det utsettes for høy fuktighet over lengre tid. Følgelig er det av interesse å kartlegge hvilke trefuktnivåer som medfører skade.

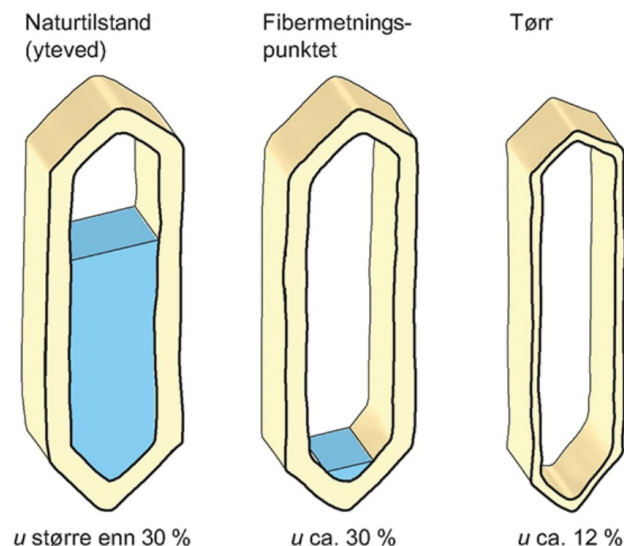
Trevirkets oppbygning er svært komplekst, og skiller seg klart fra andre byggematerialer. Det kan være stor variasjon mellom ulike treslag, og stor variasjon innen et enkelt treslag. Hvert enkelt tre er unikt, og har sin egen veksthistorie med egne forutsetninger. Figur 7 fra Skaug (2007) viser viktig terminologi om treets ulike lag. Det ytterste laget er bark, som består av døde celler som beskytter lagene innenfor. Det nest ytterste laget er bast, som består av levende celler. Disse transporterer byggestoffer nedover i treet. Laget innenfor kalles kambiet, og er vekstlaget. Her foregår celledeling. Størsteparten av cellene settes av innover, mens noen av cellene settes utover og blir til bast. De to siste lagene kalles yteved og kjerneved, der kjerneved er innerst. I yteveden foregår all transport av vann og næringsstoffer oppover i treet. Kjerneveden er på sin side døde celler, og hovedoppgaven er mekanisk styrkebæring av treet. Årringene i trær er noe som oppstår på steder med vinter eller tørkeperioder (Bøhmer og Aarnes, 2016). Det skilles mellom vårved og sommerved, der vårveden består av celler med større diameter og tynnere cellevegger, mens sommerveden har mindre diameter og tykkere cellevegger. Vårveden står for det meste av væsketransporten, mens sommerveden står for størstedelen av den mekaniske styrkebæringen. Fargeforskjellen mellom vårved og høstved er det som gjør at man kan se årringer.



Figur 7: Terminologi om treets ulike lag (Skaug, 2007)

Figur 8 viser en skjematisk illustrasjon av fuktinnholdet i trevirkets celler (SINTEF anvisning 571.523, 2015). Fukt i trevirke forekommer i to former: Bundet vann og fritt vann. Bundet vann er vann som er i selve cellulosen i celleveggene, mens fritt vann er vann som er i cellenes hulrom. Fuktinnholdet angis normalt som prosent av trevirkets masse (vekt) i absolutt tørr tilstand (vekt-%). Yteveden til et levende tre har et fuktinnhold på 110-130 %, der hele cellenes hulrom er fylt med fritt vann. Kjerneveden har på sin side en fuktighet på 35-40 %.

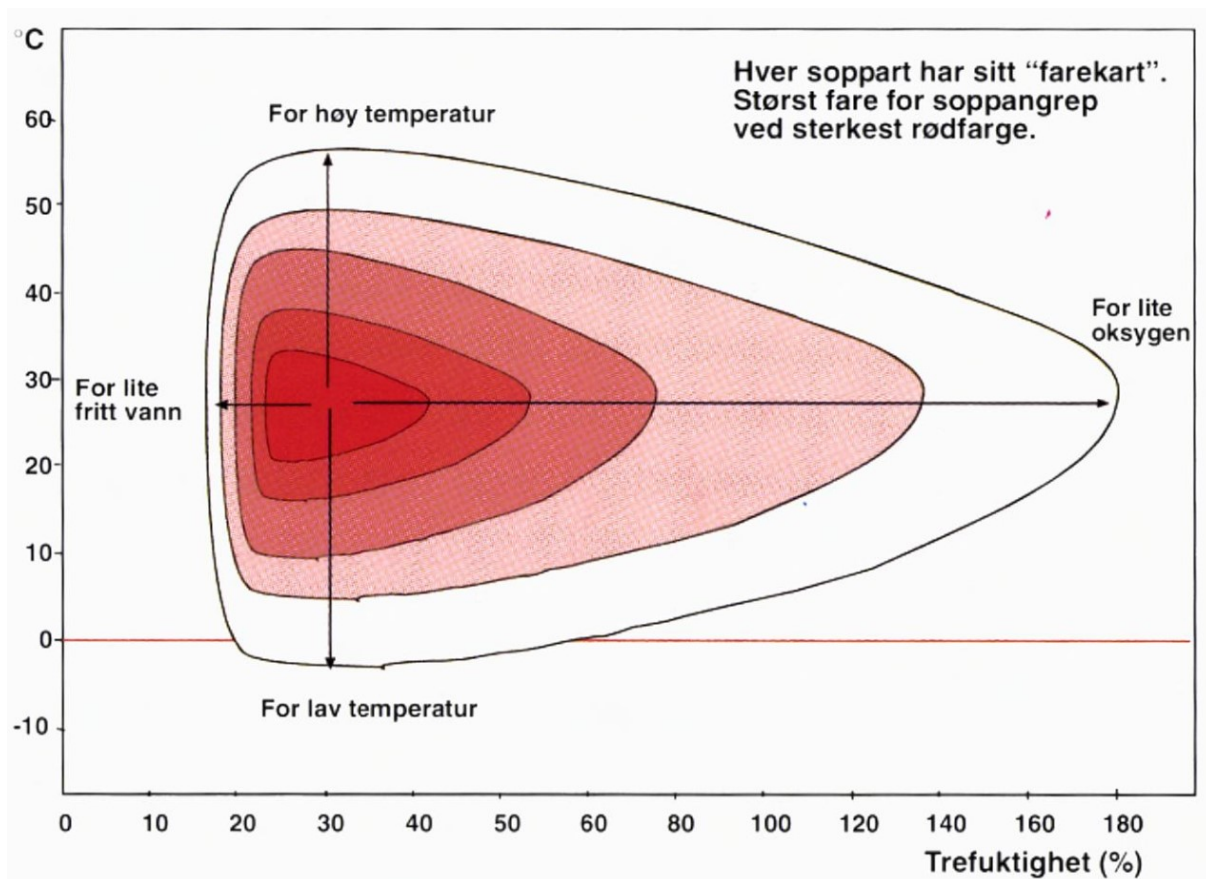
Ved uttørking av trevirket er det først det frie vannet som fordampet. Først når alt det frie vannet har fordampet, begynner det bundne vannet å forsvinne. Det er først når det bundne vannet forsvinner at trevirket begynner å krympe. Trefuktnivået der uttørkingen skifter mellom de to fasene kalles fibermetningspunktet. Fibermetningspunktet er avhengig av både treslag og temperatur. For gran og furu er fibermetningspunktet ca. 30 % (SINTEF anvisning 571.523, 2015).



Figur 8: Skjematisk illustrasjon av fuktninnholdet i trevirkets celler (SINTEF anvisning 571.523, 2015)

Det er viktig å tørke trevirke før det kan brukes til bygningsformål. Hvor tørt trevirket kan bli er imidlertid avhengig av den omkringliggende lufta sin relative luftfuktighet (RF) og temperatur. Avhengigheten av temperatur er mindre viktig for bygningsformål (SINTEF anvisning 571.523, 2015). Når trevirkets fuktninnhold kommer i balanse med fukten i den omkringliggende luften oppnår trevirke sin likevektsfukt. Et gitt likevektsfuktnivå for et gitt treslag oppnås etter lang tids lagring ved en bestemt temperatur og en bestemt RF. Siden årstidene gjør at både temperatur og RF varierer over året for både utendørs- og innendørsforhold, betyr dette at likevektsfuktnivået også varierer over året. Trevirkets fuktninnhold vil variere over året, men med en forsinkelse i forhold til likevektsfuktnivået. Likevektsfuktigheten vil også være lavere for oppfukning (adsorpsjon) enn for nedtørking (desorpsjon), og dette kalles hysteres (Tronstad, 2006a),(SINTEF anvisning 571.523, 2015). Hystereseffekten vil være ulik for ulike treslag.

Trevirke som lagres og tørkes utendørs under tak får som regel et fuktninnhold på 18-20 % (SINTEF anvisning 571.523, 2015). Ofte regnes 20 % som en forenklet øvre kritisk grense for fuktninnhold i bygningsbruk (SINTEF anvisning 571.523, 2015),(Tronstad, 2006b). Grunnen til dette er at mugg- og råtesopper vil utvikle seg ved høyere fuktnivåer. Et likevektsfuktnivå på 20 % tilsvarer omtrent 85 % RF (Geving og Thue, 2002, s. 41). Følgelig blir en tilsvarende kritisk øvre grense for RF omtrent 85 %. I denne oppgaven vil 80 % RF brukes som øvre kritisk grense for å være på konservativ side. Figur 9 fra Tronstad (2006b) viser et eksempel på et farekart for utvikling av soppkader i trevirke brukt til bygningsformål. Det presiseres at hver sopp vil ha sitt eget farekart.



Figur 9: Farekart for soppangrep i trevirke (Tronstad, 2006b, s. 15)

For at biologisk vekst skal forekomme kreves det ikke bare en gitt trefuktighet og temperatur, men også en viss tid med disse vekstvilkår tilstede. Derfor trenger det ikke å være kritisk at RF er over 80 % eller at trefuktnivået er over 20 % i kortere perioder. Det er også viktig å merke seg at trevirke ofte kan ha langt høyere fuktnivåer under byggefasen, hovedsakelig på grunn av påkjenninger fra nedbør. Uttørking av trevirke vil derfor ofte ikke kunne skje før konstruksjonsdelen er bygget inn. For leker brukt i en luftespalte vil uttørkingen normalt sett derfor ikke begynne før kledningen/tekning og beslag er på plass.

2.5 Tidligere feltstudier av klima i luftespalter

I dette underkapittelet vil noen feltstudier av klima i luftespalter beskrives i korthet. Studiene er valgt ut for å gi et innsyn i bredden av disse studiene, samtidig som relevansen til denne oppgaven er ansett som stor. Tabell 2 på neste side viser en sammenligning av fire relevante feltstudier. Disse fire studiene er beskrevet i korthet under.

Langmans et al (2015) har skrevet en belgisk forskningsartikkel fra KU Leuven som omhandler instrumentering av luftespalter bak platekledning og murt forblending. Feltstudien er utført i Leuven i Belgia. I studien studeres åtte ulike fullskala testvegger. Parametere som varieres er kledningstype (plate eller mur), himmelretning (sørvest eller nordøst) og åpningsareal i topp og bunn av spalten. Både estimering av luftskifte og hygrotermiske forhold i spaltene blir vurdert. Studien foregikk over 9 måneder.

Resultatene viste at luftskiftene var i størrelsesordenene $1-10 \text{ h}^{-1}$ for den murte forblendingen og $100-1000 \text{ h}^{-1}$ for platekledningen. Resultatene viste at fuktmengdene bak platekledningen var svært like fuktforholdene i uteluften det aller meste av tiden. For den murte forblendingen var ikke dette tilfelle. Forklaringen som nevnes er at den murte forblendingen har stor evne til å lagre fukt.

Tariku og Iffa (2019) har skrevet en kanadisk forskningsartikkel fra British Columbia Institute of Technology som omhandler instrumentering av luftespalter bak platekledning. Feltstudien er utført i Vancouver i Canada. Det studeres tre ulike veggtyper: Én vegg uten luftespalte, én vegg med luftespalte med åpning i topp og bunn og én vegg med luftespalte med åpning kun i bunn. To himmelretninger ble studert: sørøst og nordvest. Både estimering av luftskifte og hygrotermiske forhold i spaltene blir vurdert. Det ble laget en regresjonsmodell for estimering av luftskifte i spalten som følge av drivkreftene fra både vind og oppdrift. I den hygrotermiske modelleringen ble både temperatur- og fuktforhold studert i en 15 måneders periode.

Resultatene ga en regresjonsmodell med en R^2 -verdi på 0,912. Modellen kan brukes på bygg med én etasjes høyde med vind i intervallet 0-5 m/s og solstråling i intervallet 0-800 W/m². Resultatene fra analysene av de hygrotermiske forholdene viste at veggene uten luftespalte fikk høye fuktverdier i løpet av perioden og hadde større svingninger enn veggene med luftespalte. I veggene med luftespalte var det nokså like hygrotermiske forhold mellom veggene med åpning i topp og bunn og veggene med åpning bare i bunn.

Falk (2014) har skrevet en svensk doktoravhandling fra Lunds Universitet som omhandler instrumentering av luftespalter bak plater. Feltstudien er utført i Lund i Sverige. Bakgrunn for studien er at det har vært mange fuktskader i visse typer yttervegger uten luftespalter i Sverige. De skadeutsatte ytterveggene har puss på isolasjon med bakvegger av bindingsverk. Studien går ut på å vurdere om puss på plater som utlektes, og dermed inkluderer en luftespalte, kan gi bedre hygrotermiske forhold. Feltstudien er beskrevet i detalj i en tilhørende artikkel (Falk og Sandin, 2013). Det er brukt fire ulike veggtyper med utlektede plater, der alle veggene er vent mot sør. Den ene veggene har vertikale trelekter, mens de tre andre veggene har horisontale metallekter med varierende hullareal i profilene. Både estimering av luftskifte og hygrotermiske forhold i spaltene blir vurdert, men førstnevnte mål vies langt mer oppmerksomhet. Feltforsøket foregikk i 5 måneder (Oktober-Februar).

Resultatene viste at beregnet luftskiftet bak veggene med vertikale trelekter var i størrelsesordenen $230-310 \text{ h}^{-1}$. For veggene med horisontale metallprofiler med hull ble luftskiftet beregnet til å være omtrent 100 h^{-1} . Det høyeste luftskiftet i perioden var et

resultat av oppdrift (solstråling). Luftsiftet fra vind ble funnet å være svært uregelmessig med hyppige forandringer av både retning og hastighet.

Nore (2009) har skrevet en norsk doktoravhandling fra NTNU som omhandler instrumentering av luftespalter bak trekledning. Feltstudien er utført på Voll i Trondheim. Målet med avhandlingen har blant annet vært å bidra til å lage anbefalinger og retningslinjer for luftede trekledninger som er bedre tilpasset ulike klimasteder i Norge. Totalt er 14 ulike testvegger instrumentert. Parameterne som varieres er: Himmelretning (øst og vest), vekstrate på treverket (hurtigvoksende eller saktevoksende), overflatebehandling av kledningen (ingen overflatebehandling, hvit alkydmaling eller hvit akrylmaling) og åpningsareal i topp og bunn (ingen åpning, 4 mm åpningsbredde eller 23 mm åpningsbredde). Både estimering av luftsifte og hygrotermiske forhold er behandlet, der det sistnevnte er viet stor plass. Feltforsøket gikk over 4 år, og er dermed svært omfattende sammenlignet med mange tilsvarende studier.

Resultatene viste at den største mengden slagregn kom fra vest, men at østfasaden hadde langt flere timer med fuktmengder over kritisk nivå. Dette blir forklart med at østfasaden har mottatt langt mindre soltilskudd. Dette bekreftes også at temperaturene på utsiden av kledningen viste at østfasaden sine temperaturer var svært lik utetemperaturen, mens vestfasaden sine temperaturer korrelerte med solstrålingen. Resultatet fra RF-målingene viste at det generelt er lavere RF i spalten enn i uteluften, men at nivåene fluktuerer på samme måte. For vestfasaden ble det observert svært like RF verdier for veggene med 4 mm åpningsbredde og veggene med 23 mm åpningsbredde. For østfasaden viste beregninger derimot at veggen med lukkede spalter hadde det største uttørkingspotensialet. Det nevnes av forfatteren at funnene i studien åpner for å gi ulike anbefalinger til spalteutforminger for ulike himmelretninger. Resultatene viste at årsmiddeltemperaturene på baksiden av kledningen var 0,1 - 0,2 °C varmer enn uteluften. Årsmiddelmålingene viste også at fuktnivåene i treverket steg for alle de fire årene, fra 18,9 % til 20,9 %. Dette blir forklart med aldringen av kledningsbordene.

Tabell 2: Sammenligning av fire relevante feltstudier

Studie	Langmans et al (2015)	Tariku og Iffa (2019)	Falk (2014)	Nore (2009)
Type konstruksjon	Fasader med mur og plater	Fasader med plater	Fasader med plater	Fasader med trekledning
Studerer effekten av				
Størrelsen på luftsiftet	X	X	X	X
Hygrotermiske forhold	X	X	X	X
Vind vs oppdrift	X	X	X	X
Feltstudie inkluderer				
Parameterstudie med > 3 parametere	X			X
Mer enn én himmelretning	X	X		X
Mer enn én årstid	X	X	X	X
Mer enn én type spalteutforming	X	X	X	X
Værstasjon	X	X	X	X
Bruk av gass/røyk-metode	X		X	
Måling av trykk	X	X		
Måling av RF i spalten	X	X	X	X
Måling av fuktinnhold i lekt/vindsperre		X		
Måling av fukt i trekledning				X

To andre feltstudier er svært relevante for denne oppgave, ettersom de omhandler hygrottermiske forhold i de instrumenterte luftespaltene på taket av ZEB Test Cell. Ettersom dette er et av de to byggene som er studert i denne oppgaven vil de to studiene bli referert til mange ganger. Metoden for instrumentering av ZEB Test Cell, som er beskrevet i kapittel 3.3, er i stor grad basert på disse studiene. Studiene vil også bli referert til i resultatkapittelet. Ettersom studiene ligner på studien av ZEB Test Cell i denne oppgaven vil de to studiene kun omtales kort her.

Gullbrekken, Kvande og Time (2017) har skrevet en studie som omhandler temperatur og lufthastigheter i luftespaltene i tre perioder på vår, sommer og høst. I resultatene er det funnet en sterk korrelasjon mellom vindhastigheten og lufthastigheten i spaltene. Korrelasjonen viste seg å være større om våren og høsten enn om sommeren. Det nevnes at en årsak til dette kan være at vindhastighetene om sommeren generelt var lavere enn i de andre årstidene. Temperaturmålingene viste en maksimal temperatur på 60 °C på baksiden av taktraa til det sørvendte taket. Det ble også observert temperaturer lavere enn utetemperaturen omtrent halvparten av tiden om våren og høsten.

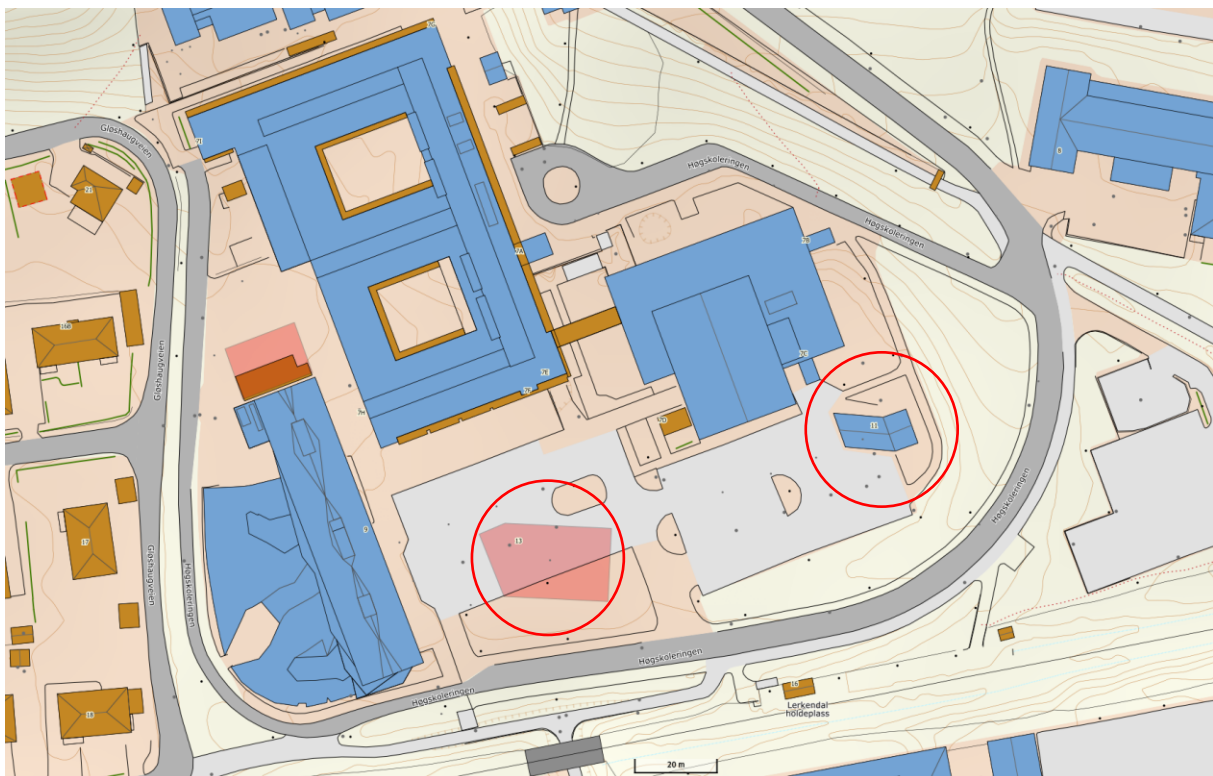
Bunkholt, Gullbrekken og Kvande (2020) har skrevet en studie som omhandler potensialet for kondens i perioder med underkjøling på taket. Totalt studeres fem ulike perioder på ulike årstider. Dette inkluderer én periode uten snø på taket på vinteren og én periode med snø på taket på vinteren. Resultatene viste betydelige perioder med undertemperaturer i tre av de fem periodene. Det er funnet et nokså stort kondenspotensial i perioden på vinteren uten snø. Videre er det påvist en relasjon mellom lavere vindhastigheter og større kondenspotensial.

3 Metode

Denne oppgaven baserer seg på en feltstudie, der luftspalter på to ulike bygg i Trondheim er instrumentert. De to byggene er ZEB-laboratoriet og ZEB Test Cell. I kapittel 3.1.1, kapittel 3.1.2 og kapittel 3.1.3 beskrives henholdsvis ZEB-laboratoriet, ZEB Test Cell og værstasjonen kort. Videre beskrives instrumenteringen av byggene. I kapittel 3.2 beskrives metoden for instrumenteringen av ZEB-laboratoriet. Denne instrumenteringen har delvis blitt utført av undertegnede og veilederne i perioden desember 2019 – mars 2020, og vil følgelig bli beskrevet mer i detalj. I kapittel 3.3 beskrives instrumenteringen av ZEB Test Cell. Denne instrumenteringen ble foretatt under byggingen av bygget i 2014, og vil følgelig bli gjengitt relativt kort. Deretter beskrives metoden for analysing av data, for både ZEB-laboratoriet og ZEB Test Cell, i kapittel 3.4. Dette inkluderer metoden til enkelte av beregningene som er utført. Avslutningsvis beskrives begrensinger og mulige feilkilder i kapittel 3.5.

3.1 Beskrivelse av byggene og værstasjonen

De to instrumenterte byggene i denne studien befinner seg sør på Campus Gløshaugen på NTNU i Trondheim. Figur 10 viser et kartutsnitt som viser plasseringen til de to byggene.



Figur 10: Kartutsnitt fra Statkart, orient mot nord. Røde ringer viser plasseringen til byggene. ZEB-laboratoriet er det røde bygget som er plassert litt under midten av utsnittet. ZEB Test Cell er det lille blå bygget med «knekk» til høyre i utsnittet.

3.1.1 ZEB-laboratoriet

ZEB-laboratoriet er under bygging på det som før var en parkeringsplass. Bygget er på ca. 2000 m² fordelt på fire etasjer. Det er et stort pulttak med takvinkel på 30 grader, som vender mot sør. Tre av fasadene vender mot henholdsvis nord, øst og sør, mens den siste fasaden vender mot vest-sørvest (se Figur 10). Det er relativt fri horisont mot sør og øst. Figur 11 og Figur 12 viser to bilder fra byggeplassens webkameraer datert 01.06.20.



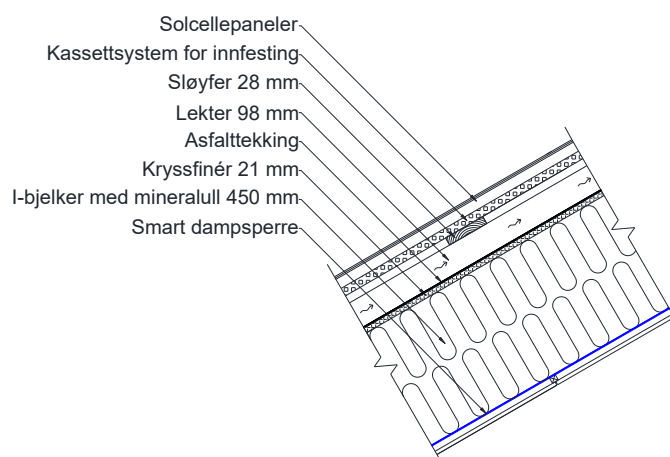
Figur 11: ZEB-laboratoriet sett fra sørvest 01.06.20. Bildet er tatt med kamera fra byggekamera.no.



Figur 12: ZEB-laboratoriet sett fra nordøst 01.06.20. Bildet er tatt med kamera fra byggekamera.no

Det er to typer kledning på ZEB-laboratoriet: Bygningsintegrerte solceller (BIPV) og trekledning. Nordfasaden har trekledning på hele fasaden med unntak av en stripe med BIPV i toppen. Sørfasaden har BIPV-kledning på hele fasaden, mens øst- og vestfasaden har i hovedsak BIPV-kledning og resten trekledning. BIPV-kledningen på fasadene monteres med åpne fuger. Der BIPV-kledningen møter trekledningen er det slik at kledningenes ytterkant går i flukt med hverandre. Lektene som brukes nærmest vindsperrsjiktet er like store for begge kledningsvariantene. Disse er 36 mm dype. Bak trekledningen er det krysslektet med horisontale bord som er 75 mm dype. For delen med BIPV er det et innfestningssystem med horisontale og vertikale metallprofiler. Dette gir også en krysslekting. Alle luftespaltene har åpning i både bunn og topp. Det er ingen brannbeslag som bryter luftespaltene på noen av fasadene. Dermed er det helt kontinuerlige luftespalter på alle de fire fasadene, både fra bunn til topp og fra side til side. Utsparinger til vinduer, dører og kanaler bryter opp luftespaltene, men hindrer det ikke fra å være et stort kontinuerlig felt. Den største uavbrutte høyden på luftespaltene finnes på nordfasaden, i et vertikalt felt helt uten utsparinger (se Figur 12).

Taket er bygget opp med et BIPV-system som dekker hele takflaten. Systemet er av leverandøren IRFTS, og klassifiseres av BIPV Status Report 2017 (Supsi og Seac, 2020) som et "Mounting System". Selv om systemet dekker hele taket er det benyttet enkelte metallplater istedenfor solceller, referert til som "dummies" i BIPV Status Report 2017. På Figur 11 sees disse langs kanten av taket med en litt annen farge enn panelene. På Figur 13 er oppbygningen av taket vist på en egenprodusert detaljtegning. Festesystemet til panelene baserer seg på tette plastkassetter som panelene legges oppi. Disse plastkassettene festes til underliggende krysslekting i tre. Trelektenes høyde er 28 mm og 98 mm, henholdsvis nærmest og lengst unna panelene. Trelektene på 98 mm er festet til undertaket og taksperrene. Undertaket består av kryssfinérplater med asfaltteking. Ergo er det i utgangspunktet to vannrette sjikt på taket, et på hver side av luftespalten. Det er ingen luftespalte under asfalttekingen, slik det vanligvis er. Årsaken er at det er benyttet en smart dampsperre på varm side av konstruksjonen. Krysslektingen sørger for at hele taket har en stor kontinuerlig luftespalte som spenner fra bunn til topp og fra side til side. Ved nedre gesims er det en varm innvendig renne som samler opp vann som renner både oppå solcellene og vann som eventuelt renner inni luftespalten (dvs. oppå asfalttekingen). Ved øvre gesims er det en beslagsløsning som i utgangspunktet hindrer regninndrev, samtidig som åpningen er stor nok til å sikre tilstrekkelig utlufting i toppen.



Figur 13: Takoppbygningen vist på egenprodusert tegning av detaljsnitt. Tegningen er basert på en kombinasjon av tegninger fra LINK Arkitektur og befaring av bygget.

3.1.2 ZEB Test Cell

ZEB Test Cell ble bygget i 2014, og har én etasje. Bygget har et saltak med takvinkel på 40 grader. Det er en karakteristisk «knekk» i byggets planløsning. Bygget har en del som er orientert slik at mønet spenner rett øst-vest, og en del der mønet spenner i en litt forskjøvet vinkel i tilpasning til eksisterende bebyggelse på Gløshaugen (se Figur 10). Gavlveggene vender mot sør-sørvest og øst-nordøst. Det er relativt fri horisont mot sør og øst. I nordvest ligger et stort bygg. Figur 14 viser et bilde av bygget tatt fra sør.



Figur 14: ZEB Test Cell sett fra syd. Foto: Tore Kvande

3.1.3 Værstasjonen

Det er en værstasjon plassert 1,5 m over mønet på ZEB Test Cell (se Figur 14). Høyden over bakken er totalt 10 m. Loggeintervallet til værstasjonen er ett minutt. Denne værstasjonen benyttes til datanalysene både for ZEB Test Cell og ZEB-laboratoriet. Værstasjonen måler ikke snødybder. For å samle inn data om snø har det derfor blitt benyttet webkamerabilder av ZEB-laboratoriet for å finne ut hvor store deler av taket som er dekket av snø på de ulike dagene. Det har ikke vært mulig å bruke data om snømengder på ZEB Test Cell, da det ikke er noe webkamera som viser dette.

3.2 Instrumentering av ZEB-laboratoriet

ZEB-laboratoriet er et forskningsbygg, som blir instrumentert på flere ulike måter og i flere ulike konstruksjonsdeler. I de neste delkapitlene vil instrumenteringen av luftespaltene med termoelementer og trådløse fuktsensorer beskrives nærmere. Instrumenteringen med termoelementer er utført av Veidekke Entreprenør i samarbeid med SINTEF, mens instrumenteringen med de trådløse fuktsensorene er utført av undertegnede i samarbeid med veilederne. I denne oppgaven er ikke data fra termoelementene benyttet. Dette er fordi loggeren ikke var klargjort i tide til at analyser kunne utføres. Følgelig vil termoelementene kun bli omtalt i kapittel 3.2.1 som omhandler plasseringen på bygget. Resten av kapittel 3.2 går ut på å beskrive instrumenteringen med de trådløse fuktsensorene.

3.2.1 Plassering på bygget

Tabell 3 gir en oversikt over byggets instrumentering med termoelementer og trådløse fuktsensorer i luftespaltene. Figur 15 og Figur 16 viser en grov skisse over plasseringene på byggets fasader og tak. I Vedlegg 1 vises en oversikt over nøyaktig sensorplassering. Måleinstrumentene er gitt navn med tre tegn, som gir relevant info om type og plassering. Første tegn beskriver type instrumentering, der T angir termoelement og M angir fuktsensor (moisture). Andre tegn angir plasseringen, der N, S, E og W angir fasadene mot henholdsvis nord, sør, øst og vest, mens R angir taket (roof). Tredje tegn angir nummereringen. Det er samme nummerering på termoelementene og fuktsensorene, slik at for eksempel TN1 befinner seg nært MN1. Alle fasadene og byggets tak er instrumentert med både termoelementer og fuktsensorer i luftespalten.

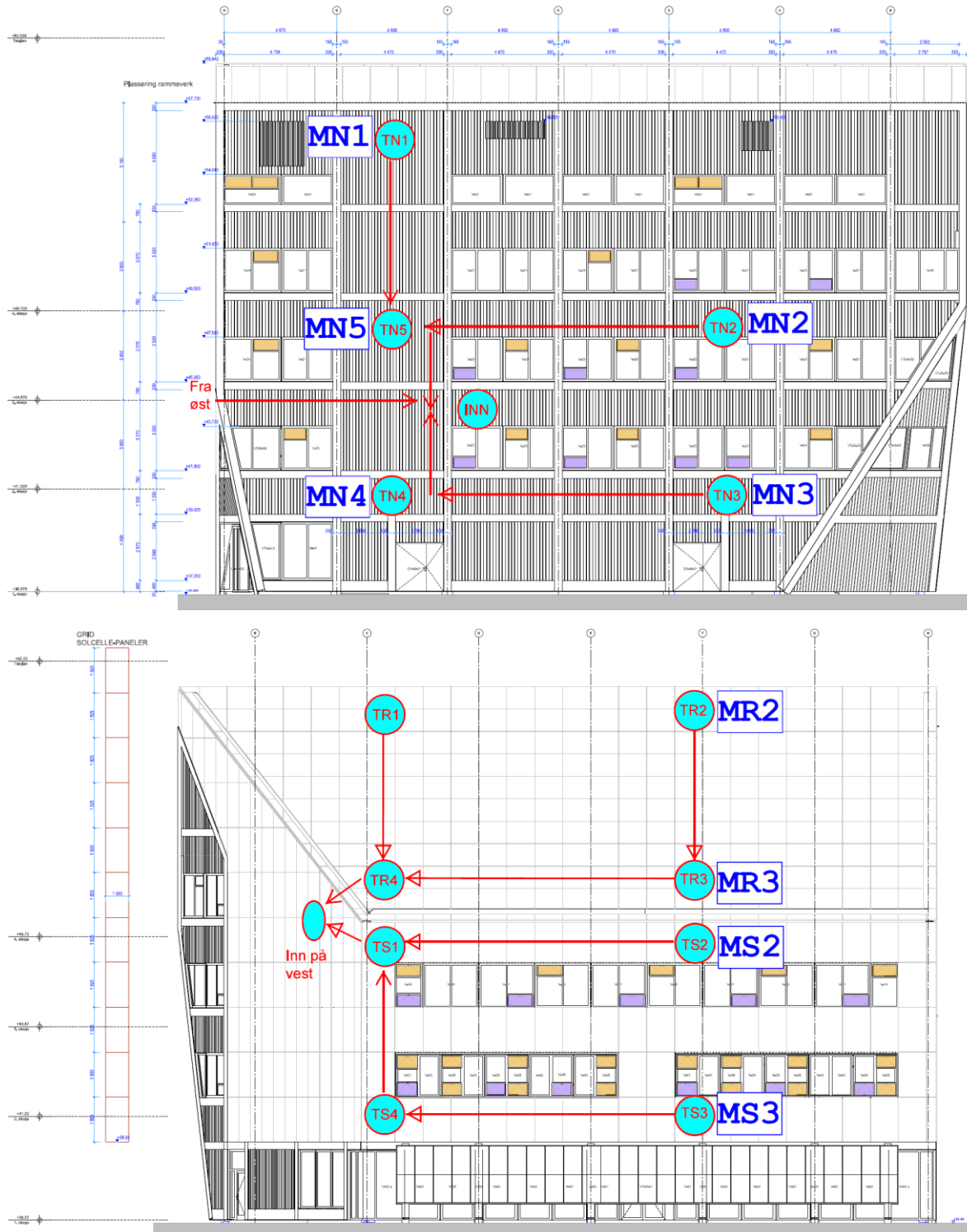
Tabell 3: Plassering av termoelementene og fuktsensorene på ZEB-laboratoriet

	Kledning/tekning	Termoelement	Fuktsensorer
Fasade nord	Trekledning	TN1, TN2, TN3, TN4, TN5	MN1, MN2, MN3, MN4, MN5
Fasade sør	BIPV	TS1, TS2, TS3, TS4	MS2, MS3
Fasade øst	BIPV	TE1, TE2, TE3, TE4	ME1
Fasade vest	BIPV	TW1, TW2, TW3, TW4	MW1, MW4
Tak	BIPV	TR1, TR2, TR3, TR4	MR2, MR3
	Totalt antall:	21*3=63	12

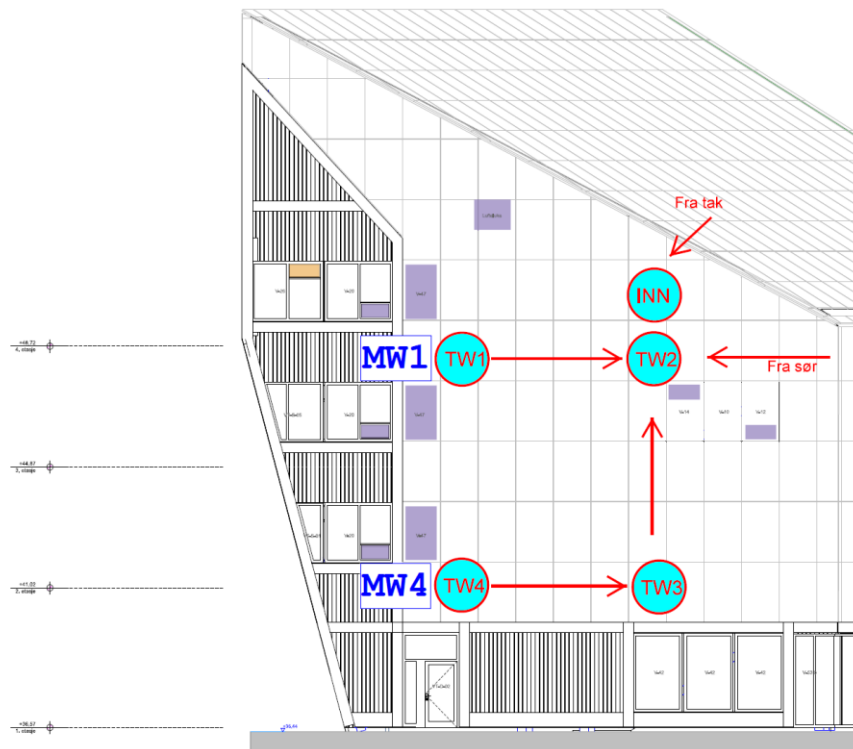
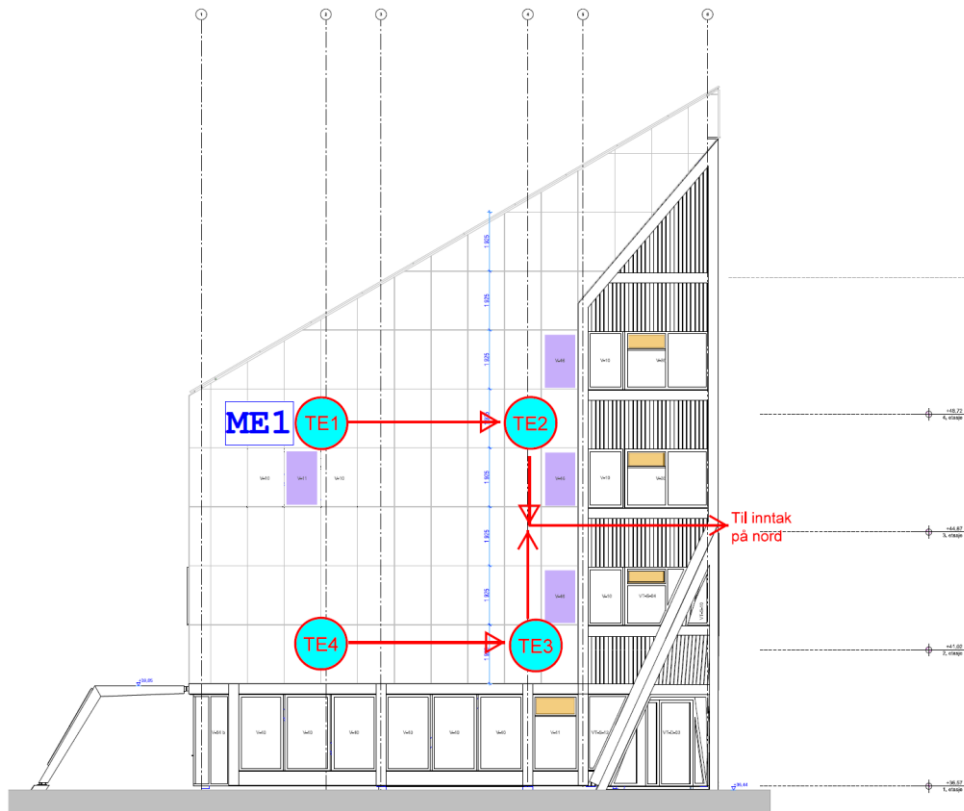
Plasseringen av termoelementer ble bestemt først, og dette ble dermed premissgivende for plasseringen av fuktsensorene senere. Det er totalt 63 termoelementer i byggets luftespalte, med 21 ulike plasseringer. For hver av de 21 ulike plasseringene er det 3 termoelementer. For fasadene er det et termoelement på overflaten av vindspærren, et midt i luftespalten og et på baksiden av trekledningen/solcellene. For taket er det et termoelement på undertaket/asfalttekningen, et midt i luftespalten og et på baksiden av solcellene. Plasseringen av termoelementene er bestemt både utifra hvor det er mest interessant å overvåke temperaturer, og hvor det er praktisk med hensyn på å minimere kabellengder og antallet kabelgjennomføringer. Termoelementenes kabler er koblet til en mottaker inne i bygget.

Det er totalt 12 trådløse fuktsensorer i byggets luftespalte, som alle er skrudd inn i lektene. På fasadene er de plassert nærmest mulig vindspærren, og på taket er de plassert nærmest mulig undertaket/asfalttekningen. Alle fuktsensorene er i nærheten av tilhørende

termoelementer. Siden fuktsensorene er trådløse, kan de plasseres uten hensyn til gjennomføringer. Plasseringen av sensorene er følgelig valgt utifra hvor det er antatt å gi mest interessante resultater, samt ønsket om jevn fordeling på bygget. Det var viktig å sørge for at det var fuktsensorer både bak trekledning på nordfasaden og bak solcellene på de andre fasadene og på taket.



Figur 15: Sensorplassering på nordfasaden (øverst) og sørfasaden og taket (nederst) på ZEB-laboratoriet. Firkanter med M viser de trådløse fuktsensorene og ringer med T viser termoelementene. De røde rette strekene viser de røde kablene til termoelementene. Plasseringen er illustrert på fremsiden av fasadetegninger av bygget laget av LINK Arkitektur. NB: Tegningene er ikke i målestokk.



Figur 16: Sensorplassering på østfasaden (øverst) og vestfasaden (nederst) på ZEB-laboratoriet. Firkanter med M viser de trådløse fuktsensorene og ringer med T viser termoelementene. De røde rette strekene viser kablene til termoelementene. Plasseringen er illustrert på fremsiden av fasadetegninger av bygget laget av LINK Arkitektur. NB: Tegningene er ikke i målestokk.

3.2.2 Måleutstyr

Fuktsensorene er av typen S-160 fra Omnisense (Omnisense, 2020a), og kan sees på Figur 17. Sensorene er trådløse, og måler lufttemperatur, relativ luftfuktighet (RF) og trefuktighet. Måling av trefuktighet fungerer ved elektrisk motstandsmåling der sensorene skrues inn i aktuelt trevirke med to skruer som fungerer som elektroder. Måleintervallet for trefukt er fra 7 til 40 % WME (Wood Moisture Equivalent). Temperatur og RF blir målt for den omkringliggende lufta, som i denne studien vil si temperatur og RF i luftespalten. Usikkerheten til temperatur og RF-målingene er oppgitt til å være henholdsvis $\pm 0,3$ °C og $\pm 2,0$ % RF. Sensorene bruker Litium-batterier, og batteritiden er estimert av produsenten til å være 15+ år. Den store fordelen med slike sensorer er altså at de kan bygges inn i konstruksjoner, for eksempel i en luftespalte slik det er gjort i denne studien.

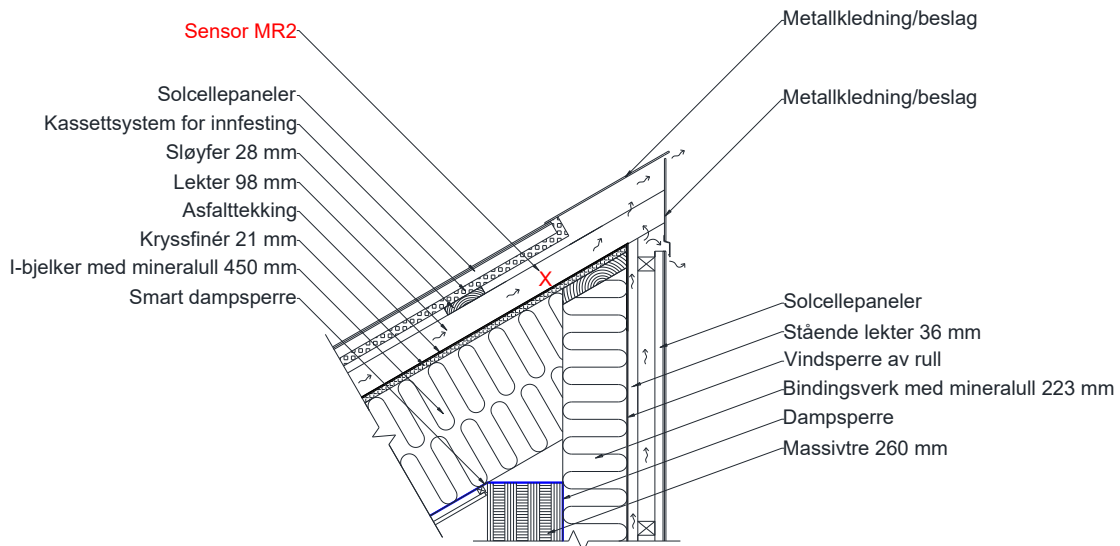


Figur 17: Trådløs fuktsensor av typen Omnisense S-160 (Finisterra, 2020)

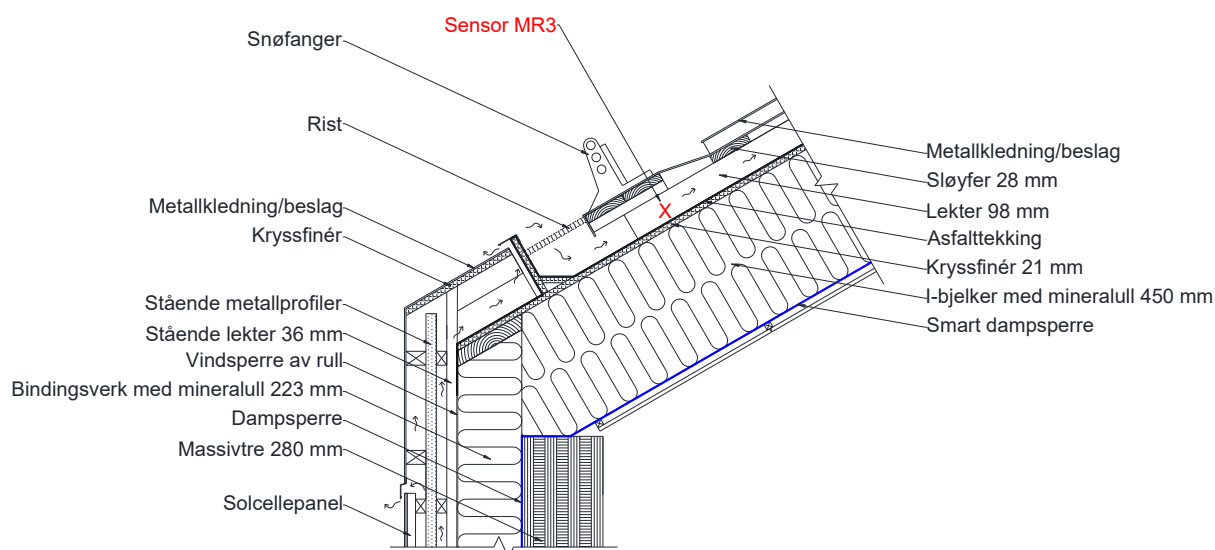
Dataene blir logget kontinuerlig og sendt til en Gateway. Gatewayen sender dataene videre til en server via internett. Gatewayen som brukes er også fra Omnisense (Omnisense, 2020b). Sensorene har 64 kb internt minne, slik at de kan lagre data i perioder uten forbindelse, for deretter å sende dataene når forbindelsen kommer tilbake. På denne måten kan hull i datasettene unngås selv om signalet uteblir i perioder. Dataene hentes ut på Omnisense sin nettside. Gatewayen ble først plassert i nabobygget til ZEB-laboratoriet, før den senere ble flyttet inn i selve bygget. Etter hvert ble det også koblet opp en ekstra Gateway. Detaljer rundt dette er beskrevet i kapittel 4.3.

3.2.3 Detaljplassing i luftespaltene

Fuktsensorene er skrudd inn i lektene i luftespaltene. I Figur 18 og Figur 19 er detaljplassingene til de to fuktsensorene på taket, MR2 og MR3, vist på egenproduserte tegninger. Det er valgt å plassere fuktsensorene nærmest mulig det vindtettende sjiktet i luftespaltene. For ytterveggene sin del betyr dette at plasseringen er nærmest mulig vindsperran, og for taket sin del betyr dette at plasseringen er nærmest mulig undertaket/asfalttekingen. For fasadene sin del er det valgt å plassere sensorene nærmest mulig vindsperran fordi det vil gjøre resultatene mest mulig overførbare til forskningsprosjektet TightEN, der påkjenningerne til teipede skjøter i vindsperrer og rundt vinduer blir studert. For taket sin del er det valgt å plassere sensorene nærmest mulig undertaket/asfalttekingen fordi det er der det er antatt at lektene vil være fuktigst. Årsaken til dette er at eventuelt fritt vann inne i luftespalten vil renne på dette sjiktet, og dermed er det naturlig at lektenes nedre del som er i kontakt vil bli mer oppfuktet enn den øvre delen som er lengst unna. Fritt vann i luftespalten kan forekomme som følge av regn og snøsmelting gjennom eventuelle lekkasjer i solcellenes sjikt samt kondensvann.



Figur 18: Plassering av fuktsensoren MR2 vist på egenprodusert tegning av detaljsnitt. Tegningen er basert på en kombinasjon av tegninger fra LINK Arkitektur og befaring av bygget.



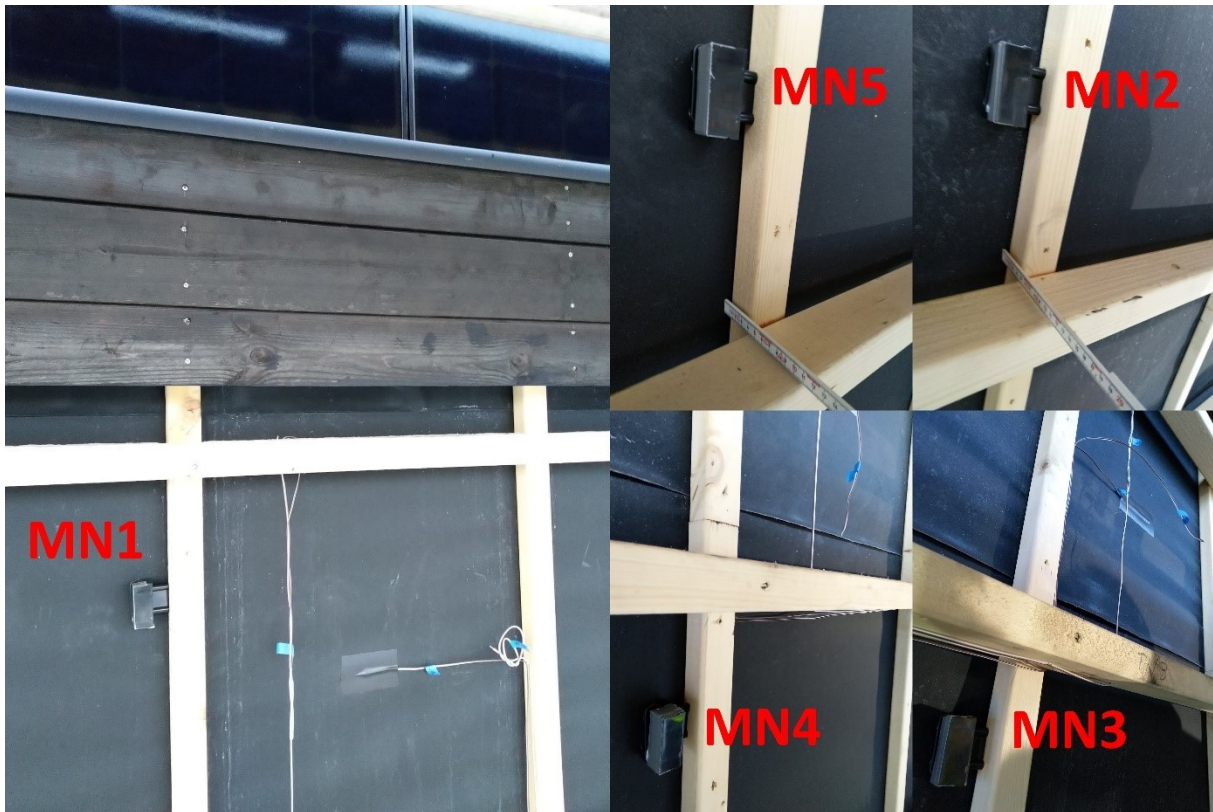
Figur 19: Plassering av fuktsensoren MR3 vist på egenprodusert tegning av detaljsnitt. Tegningen er basert på en kombinasjon av tegninger fra LINK Arkitektur og befaring av bygget.

Det er valgt å skru fuktsensorene ca. 2,5 cm inn i lektene, ved bruk av de medfølgende skruene og skivene. Isoleringen til elektrodene/skruene er ikke banket inn i trevirket, slik at elektrodene dermed er uisolerte inne i trevirket. Siden fuktig trevirke leder strøm bedre enn tørt trevirke, vil trefuktmålingene gi den høyeste fuktigheten uavhengig av om denne er langs kanten av treverket, 2,5 cm inn i trevirke, eller et sted imellom. I denne studien er det av større interesse å identifisere den høyeste fuktigheten enn å måle fuktigheten i en bestemt dybde, og dette er bakgrunnen for hvorfor isoleringen ikke er banket inn.

3.2.4 Montering

Før sensorene ble montert ble det satt inn nye batterier og batterilokket ble teipet igjen for å beskytte mot fritt vann. Fuktsensorene er montert på ulike dager fra desember 2019 til mars 2020. Tidspunktene har blitt valgt utifra fremdriften i prosjektet, slik at sensorene har blitt eksponert for uteklima med direkte nedbør, vind og sol i kortest mulig tid. Sensorene på fasadene har blitt montert kort tid før trekledningen og solcellekledningen har kommet på. De to sensorene på taket ble imidlertid montert etter at solcellene var på plass. Dette var mulig å gjøre fra stillas på nord- og sørfasaden, siden sensorene er plassert nær kantene (se Figur 18 og Figur 19). Beslagene i toppen ble ikke ferdigstilt før ca. en måned senere, og de ble derfor utsatt for en del fuktpåkjenninger i begynnelsen. Det var nødvendig å bruke stillas for å skru inn alle de 12 sensorene.

I Figur 20, Figur 21 og Figur 22 er det vist bilder av alle de 12 fuktsensorene. På enkelte av bildene kan termoelementer og tilhørende kabler også sees. Bildene er tatt på 3 ulike dager i henholdsvis desember 2019, februar 2020 og mars 2020. Det kan sees at sensorene er plassert på høykant og nærmest mulig henholdsvis vindspærren og undertaket/asfalttekingen. Det anbefales å se bildene i sammenheng med Figur 15, Figur 16 og Vedlegg 1 samt Figur 18 og Figur 19. Alle bildene er tatt av undertegnede.



Figur 20: Sensorbilder fra nordfasaden. Foto: Undertegnede, desember 2019



Figur 21: Sensorbilder fra taket og sørfasaden. Foto: Undertegnede, desember 2019 og februar 2020



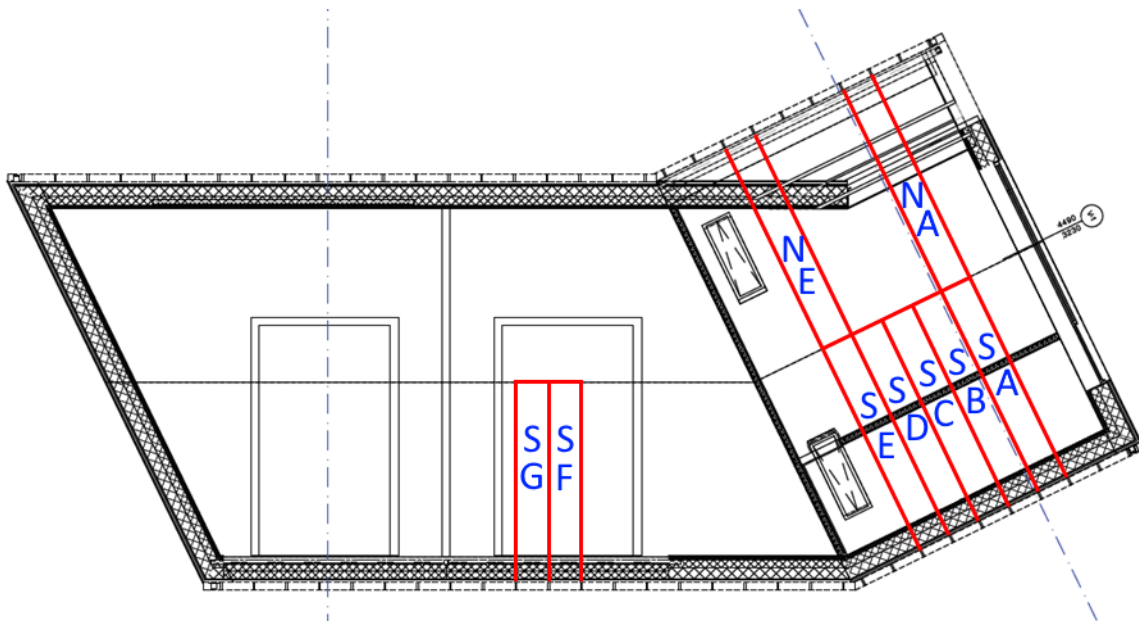
Figur 22: Sensorbilder fra øst- og vestfasaden. Foto: Undertegnede, februar og mars 2020

3.3 Instrumentering av ZEB Test Cell

ZEB Test Cell er et forskningsbygg, som har blitt instrumentert på flere ulike måter og i flere ulike konstruksjonsdeler. I de neste delkapitlene vil instrumenteringen av luftespaltene på taket beskrives nærmere. Instrumenteringen ble gjennomført i forbindelse med byggingen av bygget i 2014. Gjengivelsen under baserer seg i stor grad på studien til Gullbrekken, Kvande og Time (2017).

3.3.1 Plassering på bygget

Måleinstrumentene er plassert i luftespaltene på taket av bygget. Taket har kontinuerlige luftespalter med åpning ved hver raft, men uten åpning ved mønet. Hver luftspalte har en bredde på 552 mm, høyde på 48 mm og total lengde på 10,8 m. Det er totalt 9 luftespalter på taket som er instrumentert. Figur 23 viser disse luftespaltene på en plantegning, og hvilke navn de ulike spaltene er gitt. N antyder nordre del av taket, mens S antyder søndre del av taket. Navnene på spaltene blir benyttet i resultatdelen.



Figur 23: Plantegning med oversikt over de instrumenterte luftespaltene med navn. N antyder nordre del av taket, S antyder søndre del. Lektene som omrammer spalten A er gjeret sammen ved mønet slik at spalten blir helt tett. Plantegningen er laget av Luca Finocchiaro.

3.3.2 Måleutstyr

Det er 9 termoelementer i hver av de 9 spaltene, til sammen 81 termoelementer. Videre er to av spaltene instrumentert med lufthastighetsmålere og trykkmålere. Informasjon om måleinstrumentene er gjengitt i Tabell 4 som er hentet fra Gullbrekken, Kvande og Time (2017).

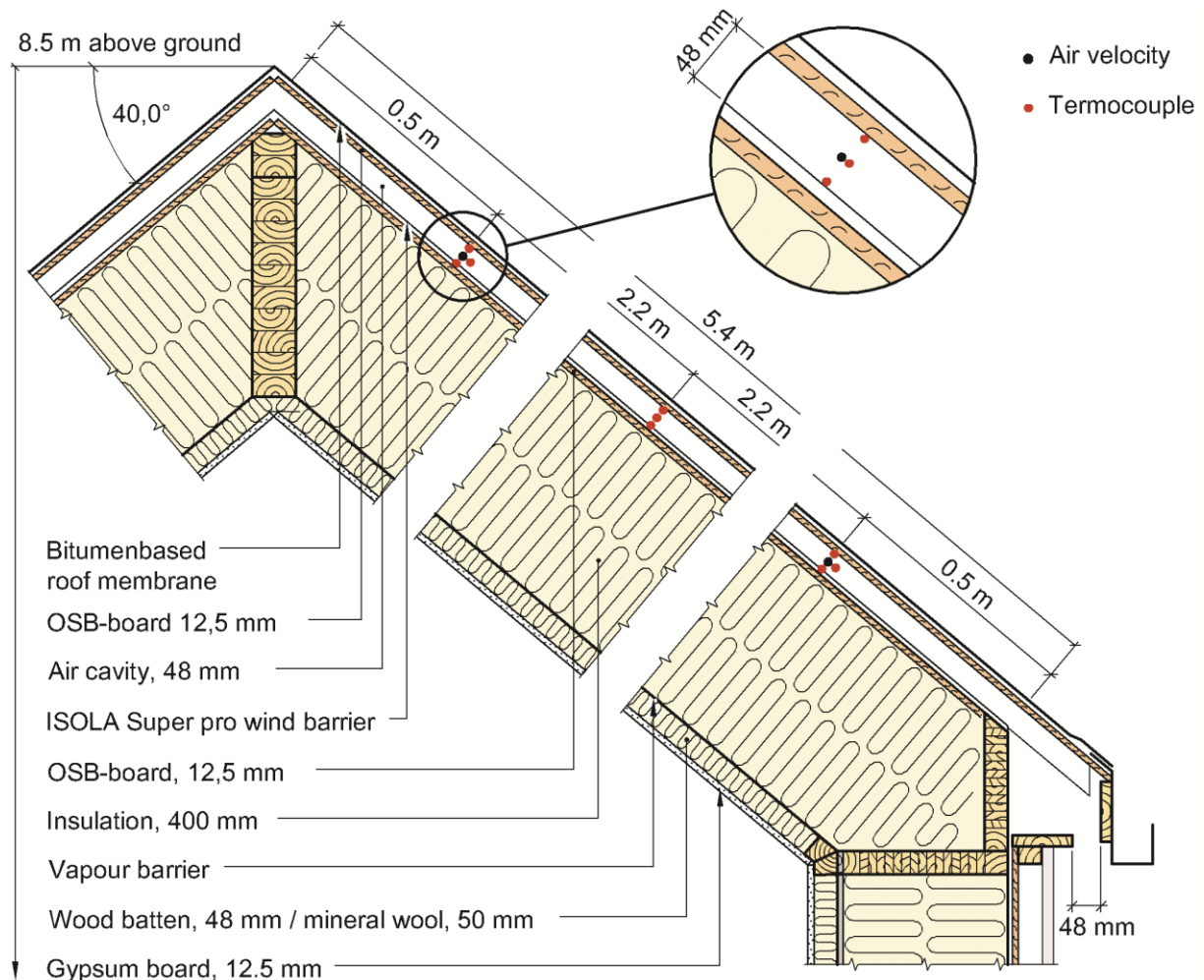
Tabell 4: Informasjon om måleinstrumentene hentet fra Gullbrekken, Kvande og Time (2017)

Måleinstrument	Produsent	Type	Nøyaktighet	Måleområde
Termoelement		Type T	$\pm 0,10$ °C	-20-+60 °C
Trykkmåler	Kimo	SPI2-100	$\pm 0,2$ %	-100-+100 Pa
Lufthastighetsmåler	Kimo	SVO: alle retninger	0,05 m/s eller ± 3 %	0,05-5 m/s

3.3.3 Detaljplassering i luftespaltene

Figur 24 viser et detaljsnitt av taket som inkluderer plassering av måleutstyret (Gullbrekken, Kvande og Time, 2017). Figuren viser at det er OSB-plater på hver side av luftespalten. Den øverste OSB-platen, heretter referert til som taktroa, er tekket med asfaltteknig. Den nederste OSB-platen, heretter referert til som undertak, er dekket med en vindsperrerull. Figuren viser også tydelig at luftespaltene har åpning ved raft, men en lukket løsning ved møne.

I Figur 24 sees også detaljplasseringen av måleinstrumentene. I hver av de 9 luftespaltene er det 3 termoelementer 0,5 meter fra raften, 3 termoelementer 0,5 m fra mønet og 3 termoelementer midt mellom de to plasseringene. De 3 termoelementene per plassering fordeler seg til 1) et på baksiden av taktroa, 2) et midt i spalten og 3) et på overflaten til undertaket/vindsperran. To av spaltene er utstyrt med trykkmålere og lufthastighetsmålere. Både lufthastighetsmålerne og trykkmålerne har én plassering 0,5 m fra raften og én plassering 0,5 m fra mønet.



Figur 24: Snittegning av takkonstruksjonen og plasseringen av termoelementer og lufthastighetsmålere (Gullbrekken, Kvande og Time, 2017)

3.4 Analysering av data

3.4.1 ZEB-laboratoriet

Data fra fuktsensorene er lastet ned som CSV-filer fra nettsiden til Omnisense. Deretter er CSV-filene importert til Excel. Det er valgt å bruke data med timesoppløsning, der verdiene for hver time er midlede verdier fra rådataene. Data fra værstasjonen ved Test Cell er også lastet ned til Excel, slik at sensordata og værdata kan behandles i de samme Excel-arkene. Data fra værstasjonen har 10-minutters-oppløsning.

Produsenten av sensorene oppgir at verdiene for trefukt (WME) er kalibrert til tretypen US douglas Fir, som er en type furu. Lektene på Zeb-laboratoriet som sensorene er skrudd inn i er i norsk gran. Følgelig har det vært nødvendig å bruke en formel fra produsenten for å justere fuktnivået. Til dette er Formel (4) benyttet.

$$\%MC_{Gran} = -0,504256 + 1,1386808 * \%MC_{Furu} + 0,0111586 * (\%MC_{Furu} - 16,5)^2 - 0,0010783 * (\%MC_{Furu} - 16,5)^3 \quad (4)$$

$\%MC = \text{Fuktinnhold} [\%]$

3.4.2 ZEB Test Cell

Dataene fra alle måleinstrumentene er lastet ned i et Excel-ark sammen med værdataene. Både værdataene og dataene fra måleinstrumentene har 10-minutters oppløsning. I flere av analysene er det valgt å midle verdier over flere av de instrumenterte luftespartene, og dette fremkommer for hver enkelt analyse i resultatdelen.

3.4.3 Analyse av underkjøling

Det er gjort studier av underkjøling på tak for både ZEB-laboratoriet og ZEB Test Cell. Underkjøling av tak er en effekt som ofte oppstår på kalde netter, der taket stråler varme mot himmelen slik at takets temperatur blir lavere enn utetemperaturen. Underkjøling kan være et problem siden det kan gi mye kondensvann i luftespalten. Det er gjort to ulike studier av underkjøling for begge byggene, én forenklet og én som analyserer kondenspotensial. For ZEB-laboratoriet er det bare tatt utgangspunkt i temperaturen i luftespalten gitt av de trådløse fuktsensorene. For ZEB Test Cell er det tatt utgangspunkt i både temperaturen i spalten og temperaturen på baksiden av taktroa, gitt av termoelementene.

Den forenklede studien av underkjøling går ut på å finne prosentandel av tiden der temperaturen til luftespalten (og taktroa for ZEB Test Cell sitt tilfelle) har en lavere temperatur enn utetemperaturen. Jo høyere dette tallet er, jo høyere vil kondenspotensialet kunne være. Den andre studien baserer seg på å finne kondenspotensiale i spalten på en mer presis måte. Metoden som er benyttet er basert på studien til Bunkholt, Gullbrekken og Kvande (2020), som har gjort en studie av underkjøling på taket til ZEB Test Cell for tidligere perioder. Denne metoden går ut på å studere differansen mellom damptrykket inne i spalten og det tilhørende metningstrykket i spalten, som vist i Formel (5). Denne differansen, kalt CP_i , gir da kondenspotensialet. Dersom CP_i er positiv (>0) betyr dette at kondens vil utfelles, siden luften ikke klarer å holde på all fuktigheten. Dersom CP_i er negativ (<0) betyr dette at kondens ikke vil utfelles, siden lufta har mer kapasitet til å holde på fuktighet.

$$CP_i = p_v - p_{Sat} \quad (5)$$

$CP_i = \text{Kondenspotensial [Pa]}$

$p_{Sat} = \text{Metningstrykk [Pa]}$

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

Metningstrykket er en funksjon av temperatur, og må finnes gjennom empiriske formler. Det eksisterer mange forskjellige empiriske formler som vil gi litt forskjellig resultat. To formler fra Geving og Thue (2002, s. 437) er benyttet, markert som Formel (6) og (7).

$$p_{Sat} = 611 * \exp(72,5 * 10^{-3} * t - 288,1 * 10^{-6} * t^2 + 0,79 * 10^{-6} * t^3), [0^\circ\text{C} \leq t \leq 40^\circ\text{C}] \quad (6)$$

$$p_{Sat} = 611 * \exp(82,9 * 10^{-3} * t - 288,1 * 10^{-6} * t^2 + 4,403 * 10^{-6} * t^3), [-30^\circ\text{C} \leq t \leq 0^\circ\text{C}] \quad (7)$$

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

For å finne damptrykket i spalten er det brukt to ulike metoder for de to ulike byggene. For ZEB Test Cell er det brukt samme metode som hos Bunkholt, Gullbrekken og Kvande (2020), som baserer seg på å beregne damptrykket som en funksjon av absolutt fuktinnivå og spaltetemperatur. Formelen som brukes til dette er Formel (8) (Thue, 2016, s. 50).

$$p_v = 461,4 * v * (t + 273,15) \quad (8)$$

$v = \text{Absolutt fuktighet i luft [kg/m}^3\text{]}$

Siden ZEB Test Cell ikke har noen målinger av absolutt fukt i spalten, er absolutt fukt i uteluften benyttet istedenfor. Denne metoden bygger altså på antagelsen om at absolutt fukt i uteluften er den samme som absolutt fukt i spalten. Denne antagelsen vil ikke være gyldig dersom luftespalten for eksempel oppfuktes fra lekkasjer gjennom tekningen eller luftlekkasjer fra innsiden av bygget.

For ZEB-laboratoriet er damptrykket funnet ved å bruke RF i spalteluften som er gitt av de trådløse fuktsensorene. Dermed kan damptrykket beregnes ved Formel (9). En begrensning i denne metoden er at de trådløse fuktsensorene har 100 % RF som maksverdi. Ergo vil det ikke være mulig å få en positiv CP_i med denne metoden, men CP_i kan bli 0 dersom $RF = 100\%$.

$$p_v = p_{Sat} * \%RF_{Spalte} \quad (9)$$

$\%RF_{Spalte} = \text{Relativ luftfuktighet i spalteluften [%]}$

3.5 Begrensninger og feilkilder

Analysene av de innsamlede dataene begrenser seg til å studere de hygrotermiske forholdene i luftespaltene på de to byggene. Hull i datasettene er en begrensning. Det er for det meste valgt ut perioder hvor hull i datasettene unngås, men dette har ikke alltid vært mulig.

Værdata er i begge tilfeller hentet fra værstasjonen på ZEB Test Cell, som ligger ca. 60 m fra ZEB-laboratoriet på det korteste. Byggene ligger omtrent på samme høyde. Siden byggene ikke ligger helt ved siden av hverandre, er en potensiell feilkilde at værdataene som brukes i analysen av ZEB-laboratoriet ikke er helt riktig. Det er heller ikke brukt høydekorrigering av vinddataene.

Snødataene er laget manuelt ved å gå gjennom webkamera-bilder av ZEB-laboratoriet. Figur 25 viser eksempel på et slikt bilde der omtrent halvparten av taket er dekket med snø. Her finnes det flere feilkilder. For det første er det vanskelig å se hva snødybden er på et kamerabilde. Dataene dreier seg derfor kun om hvorvidt det er snø eller ikke. Det er imidlertid stor grunn til å forvente at ulike snødybder vil påvirke de hygrottermiske forholdene i ulik grad. Dette er både fordi ulike snødybder vil gi ulike isoleringsverdier og at mengden smeltevann vil bli ulik. For det andre er andelen av taket som er dekket med snø kun bestemt på øyemål, og derfor ikke særlig nøyaktig. Det er også slik at snødybden ikke er kontinuerlig der det er snø, siden store snømengder samler seg opp ved taklets to snøfangere. I tillegg har ikke webkamera-bilder fra lørdager og søndager vært tilgjengelig. Til sammen gjør disse forholdene at snødataene ikke kan tolkes for presist.



Figur 25: ZEB-laboratoriet sett fra sørvest 25.02.20. Bildet er tatt med kamera fra byggekamera.no.

På ZEB-laboratoriet er trelektene bak solcellene brannimpregneret. Dette gjelder taket, samt sør- øst- og vestfasaden. Det er kjent at dette vil endre den elektriske motstanden til trevirket, og følgelig vil dette gi en systematisk feil i trefuktdataene. Det er ikke funnet en formel som kan benyttes til å ta hensyn til denne effekten. Det er likevel grunn til å tro at impregnering gir en offset-feil, altså at feilen blir relativt lik for alle tidspunkt. Dette betyr at hvorvidt trevirket oppfuktes, tørkes eller har konstant fukt over tid kan studeres, til tross for usikkerheten i det absolutte trefuktnivået. I senere studier vil det også være mulig å korrigere målingene hvis en formel blir gjort tilgjengelig.

4 Resultater

Dette kapittelet inneholder 3 underkapitler. I kapittel 4.1 og 4.2 vil temperatur- og fuktmålinger fra henholdsvis ZEB-laboratoriet og ZEB Test Cell presenteres sammen med tilhørende værdata. Det presenteres data i form av grafer og tabeller sammen med tilhørende kommentarer til funnene. Avslutningsvis, i kapittel 4.3, vil det presenteres enkelte praktiske erfaringer fra databehandlingen. Dette kan være nyttig for lignende fremtidige studier.

I denne oppgaven begrenser vindanalysene seg i hovedsak til å studere sammenhengen mellom temperaturforhold og vindhastighet, med to unntak i kapittel 4.1.3 og kapittel 4.2.1. I de øvrige analysene er det flere grafer som viser vindhastigheten fra værstasjonen, men ikke hvilken retning vinden kommer fra. Det opplyses at dominerende vindretning i Trondheim er sørvest. Vind vil kunne bidra til å endre temperaturene i spalten som følge av luftskiftet som oppstår. Dette kan medføre at spalteluften får en temperatur som blir likere utetemperatur enn den ville vært i en situasjon uten vind. Når det er varmere i luftespalten enn i uteluften kan vind sørge for å kjøle ned spalteluften. Når det er kaldere i spalteluften enn i uteluften, altså ved underkjøling, kan vind bidra til å varme opp spalteluften.

Det er ganske vanskelig å observere disse effektene på grafene som presenteres, men det er likevel sannsynlig at vind påvirker temperaturforholdene i nevneverdig grad. Jo sterkere vinden er, jo likere vil spaltetemperaturen og utetemperaturen teoretisk sett bli. Dette er fordi økt vindhastighet gjerne gir et økt luftskifte i spalten, særlig når vinden blåser rett mot den aktuelle fasaden eller det aktuelle taket. Strømningsforhold i en luftespalte som følge av vind er en komplisert prosess, som krever avanserte beregninger for å kvantifiseres. Faktorer som påvirker strømningsforhold i luftespalter er blant annet vindretning, topografi, omkringliggende bygninger, luftespaltens geometri og ruheten på luftespaltens tilgrensende materialer. Dette, kombinert med at vindretningene ikke vises i grafene, gjør at vinddataene i denne oppgaven må tolkes med forsiktighet. Vindhastigheten gir allikevel verdifull innsikt, siden vind er en av to drivkrefter for luftskifte i en luftespalte. Perioder med høyere vindhastighet er derfor en indikasjon på at luftespalten har et høyt luftskifte, selv om dette ikke alltid er tilfelle.

4.1 ZEB-laboratoriet

I dette kapitlet vil de hygrotermiske forholdene i luftespaltene på ZEB-laboratoriet bli presentert sammen med værdata. Det presiseres igjen at værdataene er hentet fra ZEB Test Cell, som ligger ca. 60 m fra ZEB-laboratoriet på det nærmeste. Det er studert data fra to ulike perioder. Den første perioden er fra 14. februar til 23. mars 2020, og den andre perioden er fra 1. april til 22. april. Den første perioden brukes for data fra sensorene på nordfasaden (MN1, MN2, MN3, MN4 og MN5) og taket (MR2 og MR3), mens den andre perioden brukes for data fra sensorene på sørfasaden (MS2 og MS3), østfasaden (ME1) og vestfasaden (MW1). Utgangspunktet for utvelgelsen av periodene har vært knyttet til fremdriften til prosjektet og ønsket om å minimere hull i datasettene. Den 14. februar var beslagene på gesimsen til nordfasaden fullført, og dette ble derfor et naturlig startpunkt for målingene på nordfasaden og taket. Den 1. april var alle solcellepanelene som dekket sensorene på sør-, øst og vestfasaden på plass, slik at dette ble et naturlig startpunkt for målingene på disse fasadene.

Det presiseres at alle målingene av temperatur er hentet fra de trådløse fuktsensorene, og ikke fra termoelementene. Grunnen til dette er at logging av data fra termoelementene ikke begynte før sent på våren 2020, til tross for at termoelementene ble montert høsten 2019. De trådløse fuktsensorene er plassert nær vindspærren og undertaket. Dette gjør at temperaturene vil kunne være litt annerledes enn det temperaturene fra termoelementene midt i spaltene ville vist.

Grafene som presenteres viser de faktiske målingene. De trådløse fuktsensorene har timesdata, mens værstasjonen har 10-minutters-data. Følgelig er det 6 ganger så mange datapunkter fra værdataene enn fra de trådløse fuktsensorene, og dette kan observeres på grafene. Alle grafene som presenteres viser datoer på x-aksen og de ulike parameterne som studeres på en eller to y-akser.

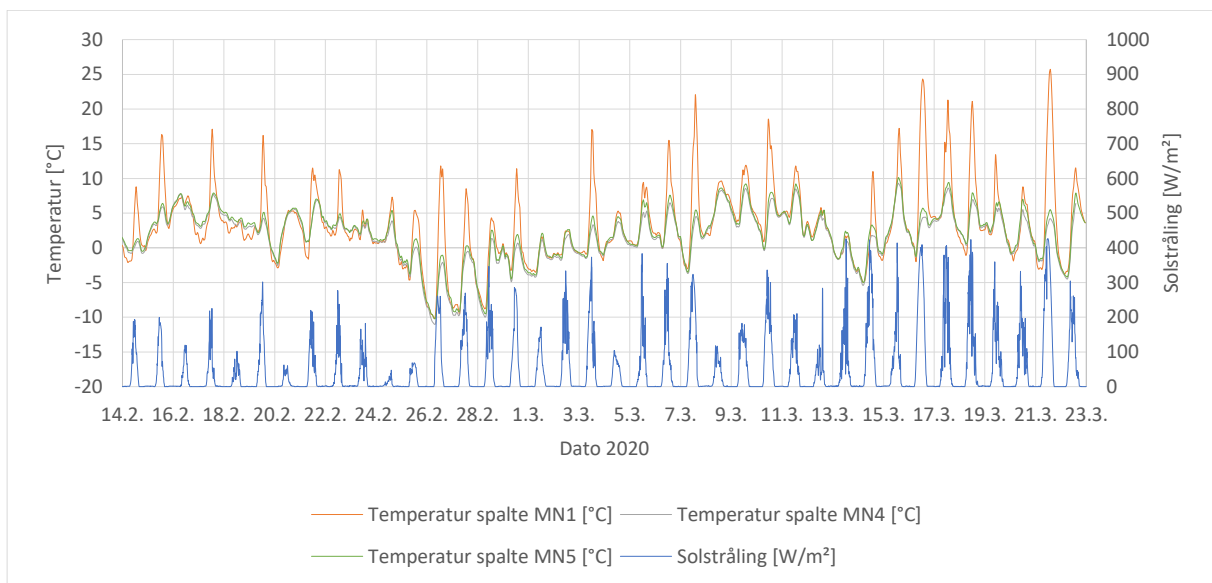
Det er valgt å ha to hovedtyper av grafer som viser temperaturforholdene i spaltene. Den ene er grafer som viser spaltetemperaturene sammen med utetemperatur og solstråling. Den andre er grafer som viser spaltetemperaturene sammen med utetemperatur og vindhastighet. Grunnen til at temperaturene er vist dobbelt opp er fordi det er svært verdifullt å sammenligne med både sol og vind, ettersom det er dette som er de to drivkreftene for luftskifte i luftespalter. For grafene på nordfasaden er ikke utetemperaturen vist på grafene som viser solstrålingen. Årsaken til dette er at utetemperaturen er svært lik flere av spaltetemperaturene. På grafene som viser vind er derimot utetemperaturen med, men det blir derfor overlappende grafer. Dermed gir grafene over vind og sol tilsammen tilstrekkelig informasjon.

4.1.1 Nordfasaden – Høyt felt

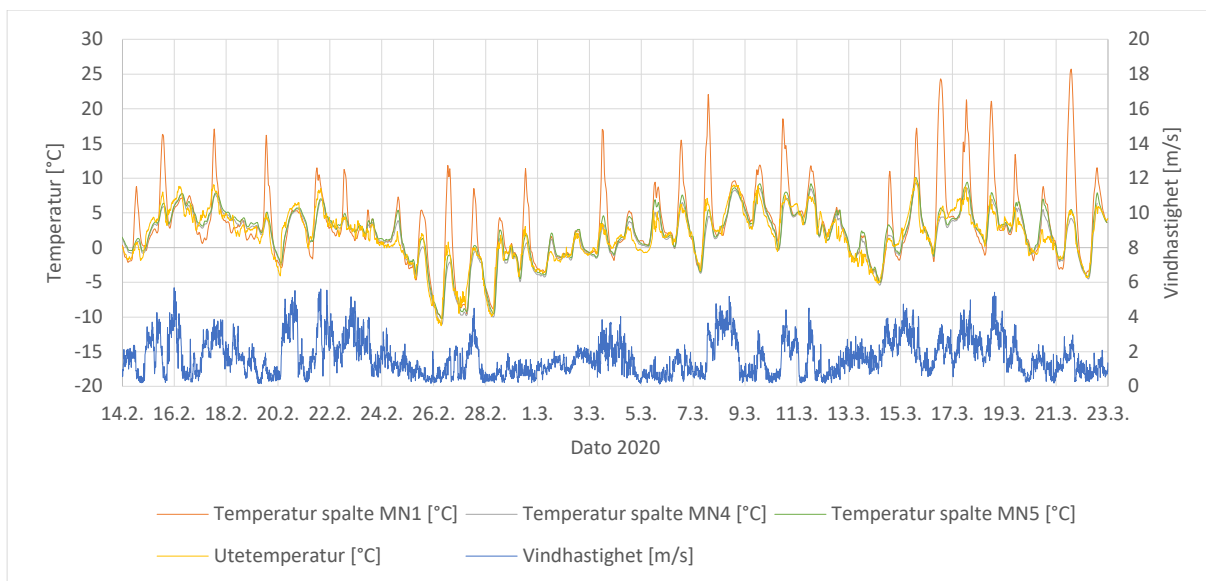
Målingene som presenteres i dette underkapittelet er fra sensorene MN1, MN4 og MN5. Omtrentlig plassering av disse sensorene er vist på Figur 15. For mer nøyaktig plassering av sensorene vises det til Vedlegg 1. MN1 er plassert øverst i feltet, MN5 er plassert omtrent i midten av feltet og MN4 er plassert nederst i feltet. Feltet er kontinuerlig helt fra bunnen til toppen, og totalhøyden på spalten er ca. 22,8 m. Avstanden fra MN4 (nederst) til MN1 (øverst) er ca. 16,5 m. Avstanden fra MN4 til MN5 er omtrent 8,1 m.

Temperaturforhold

Figur 26 viser spaltetemperaturene for de tre sensorene sammen med solstråling målt på værstasjonen. Figur 27 viser spaltetemperaturene for de tre sensorene sammen med utetemperaturen og vindhastigheten fra værstasjonen. Det kan observeres at temperaturene i MN4 og MN5 følger hverandre relativt tett hele perioden, og er svært like utetemperaturen. Temperaturene i MN1, som er øverst i feltet, viser seg imidlertid å ha langt høyere temperaturopper enn de to andre sensorene og utetemperaturen. På det meste er temperaturen øverst i feltet nesten 20 grader høyere enn i midten og nederst i feltet (22. mars). Det er også et betydelig antall dager der temperaturen er 10-15 grader høyere. Dette er uventet, siden fasaden er orientert rett mot nord, og dermed nesten ikke mottar direkte solstråling. Mulige forklaringer på dette fenomenet er behandlet i diskusjonskapittelet (kapittel 5.1). I hovedsak går forklaringene ut på at solstråling bidrar indirekte, eller at varme fra innsiden av bygget varmer opp luftespalten.



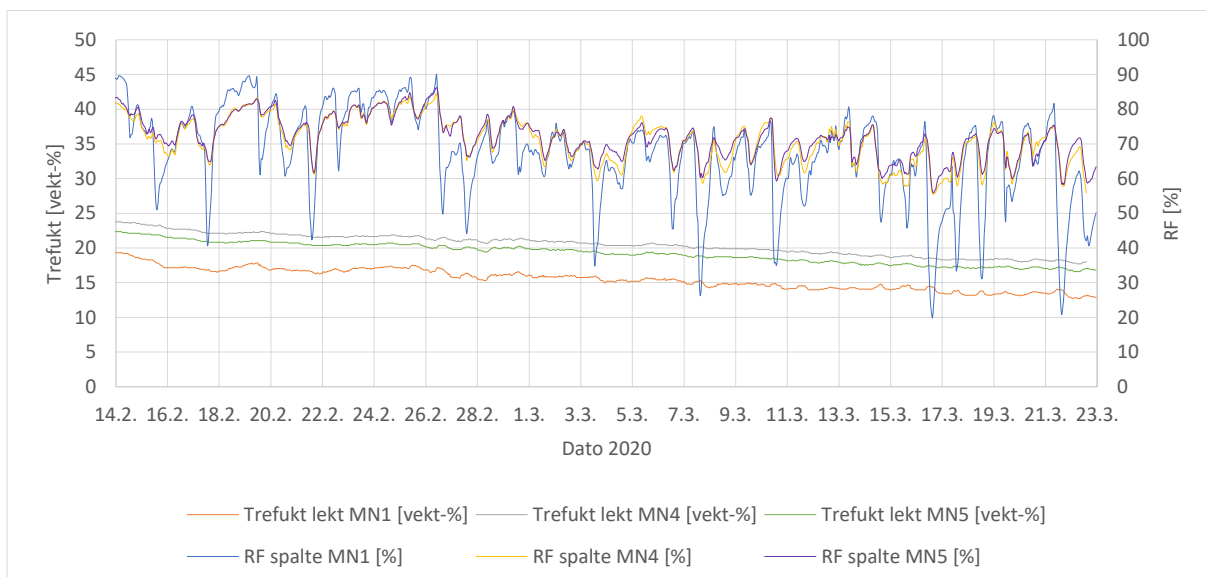
Figur 26: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MN1, MN4 og MN5 og solstråling [W/m²] i perioden 14. februar til 23. mars.



Figur 27: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MN1, MN4 og MN5, utetemperatur [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 14. februar til 23. mars.

Trefukt og relativ luftfuktighet

Figur 28 viser relativ luftfuktighet og trefuktighet målt for de tre sensorene MN1, MN4 og MN5. Frem til 26. februar observeres det RF over 80 %, mens det i hovedsak er RF under 80 % etter dette. Det kan observeres at MN1 har langt lavere RF i perioder med store negative utslag på grafen. Dette sammenfaller med de høye temperaturutslagene til MN1. Trefuktnivået viser en slakt nedadgående trend, som indikerer uttørking. Grafen tyder på at luftespalten utføringsevne fungerer godt, selv om det er kort tid siden beslagsløsninger er fullført. Ved slutten av perioden er trefuktnivået under den kritiske grensen på 20 % for alle de tre sensorene.



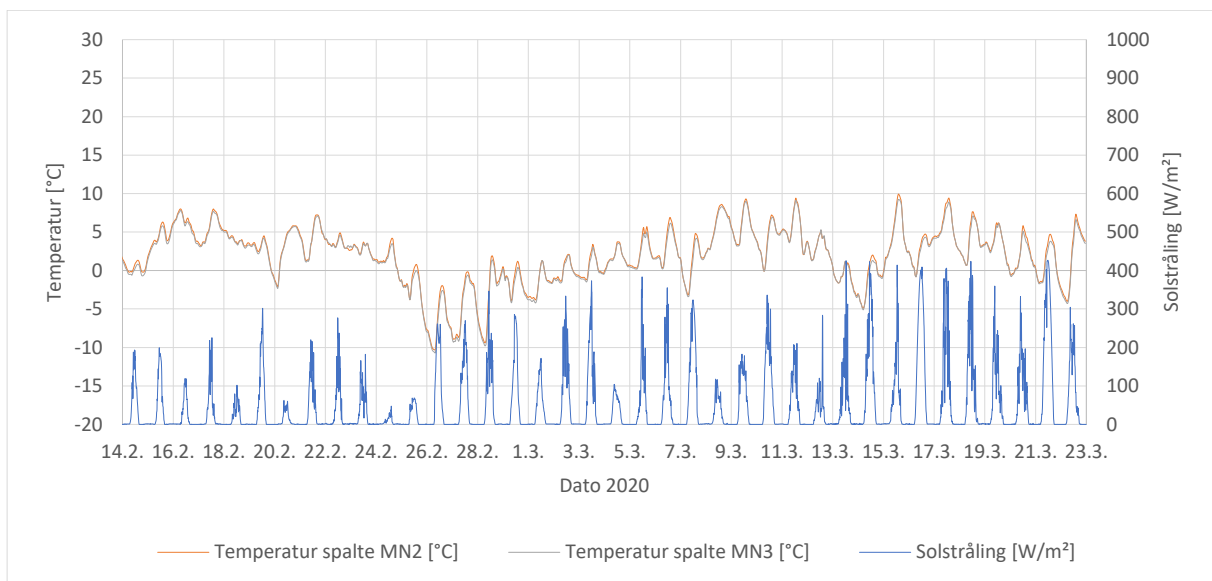
Figur 28: Trefuktighet [vekt-%] og relativ luftfuktighet [%] og for sensorene MN1, MN4 og MN5 i perioden 14. februar til 23. mars.

4.1.2 Nordfasaden – Korte felt

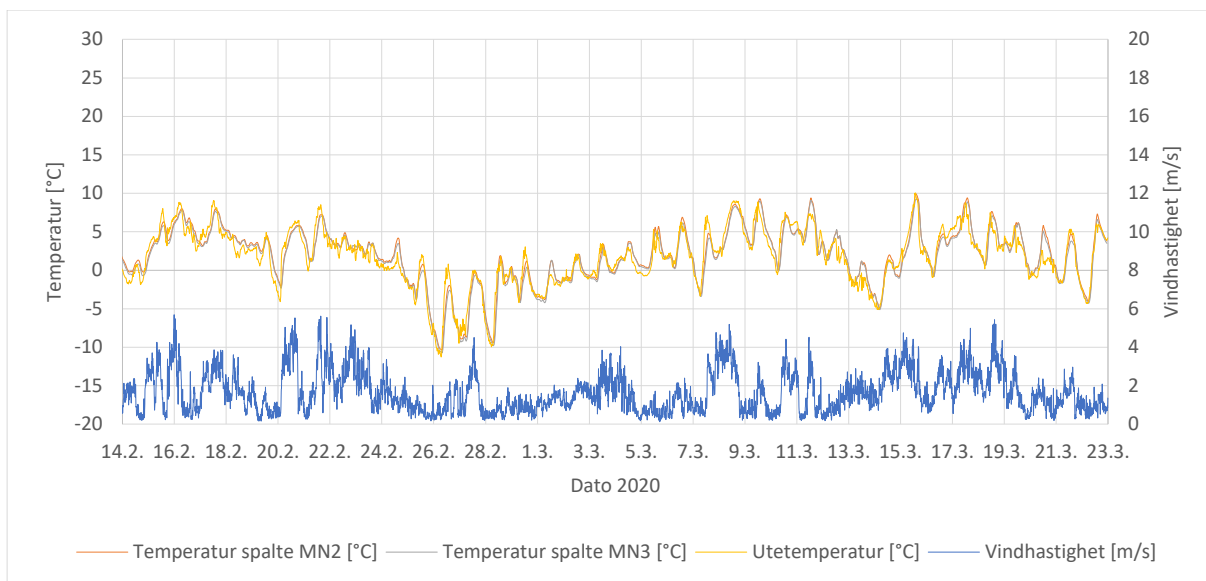
Målingene som presenteres i dette underkapittelet er fra sensorene MN2 og MN3. Omtrentlig plassering av disse sensorene er vist på Figur 15. For mer nøyaktig plassering av sensorene vises det til Vedlegg 1. MN2 er plassert i et kort felt mellom vindusbåndene i 3. og 4. etg. Det er ca. 85 cm fra sensoren til åpningen av luftespalten under vindene i 4. etg. MN3 er plassert i et litt lengre felt, som strekker seg fra bakkenivå til vindusbåndet i 2. etg. Det er ca. 125 cm fra sensoren til åpningen av luftespalten under vindene i 2. etg.

Temperaturforhold

Figur 29 viser spaltetemperaturene for de to sensorene sammen med solstråling målt på værstasjonen. Figur 30 viser spaltetemperaturene for de to sensorene sammen med utetemperaturen og vindhastigheten fra værstasjonen. Det kan observeres at temperaturene til sensorene følger hverandre svært tett, ergo er temperaturforholdene ganske like på de to stedene til tross for at MN2 er på et felt som er en del kortere enn MN3. Det kan også observeres at spaltetemperaturene i stor grad sammenfaller med utetemperaturen. Dette indikerer at påvirkning fra indirekte solstråling er liten, på samme måte som for MN4 og MN5 som beskrevet i det forrige delkapittelet. Alle de fire sensorene, MR2, MR3; MR4 og MR5 er på nedre halvdel av fasaden. Dette indikerer at den høye temperaturen i MN1 kan skyldes forhold som følge av den høye plasseringen på bygget. Videre er det lite sannsynlig at vinden påvirker temperaturene i nevneverdig grad i denne perioden, ettersom temperaturene er så like utetemperaturen.



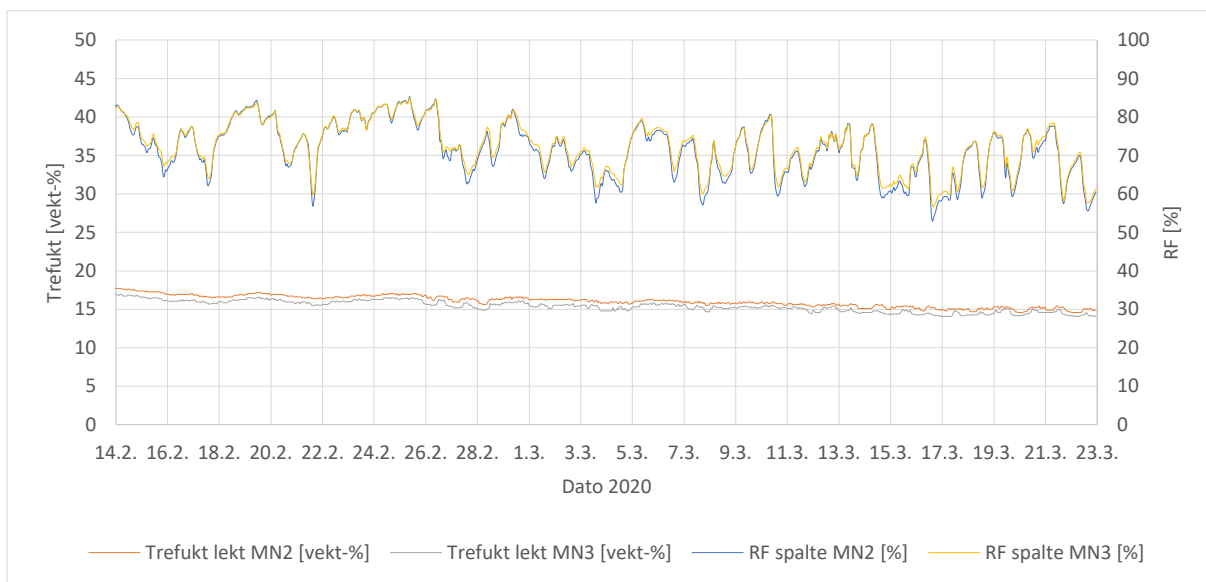
Figur 29: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MN2 og MN3 og solstråling [W/m²] i perioden 14. februar til 23. mars.



Figur 30: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MN2 og MN3, utetemperatur [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 14. februar til 23. mars.

Trefukt og relativ luftfuktighet

Figur 31 viser relativ luftfuktighet og trefuktighet målt for de tre sensorene MN2 og MN3. Det observeres at RF er under 85 % i nesten hele perioden, og under 80 % det meste av tiden. Trefuktigheten er relativt konstant, med en tendens til å være svakt uttørkende. Fuktnivåene er tydelig under 20 % i hele perioden, og den lave utgangsfukten er trolig grunnen til at det ikke registreres vesentlig uttørking.



Figur 31: Trefuktighet [vekt-%] og relativ luftfuktighet [%] for sensorene MN2 og MN3 i perioden 14. februar til 23. mars.

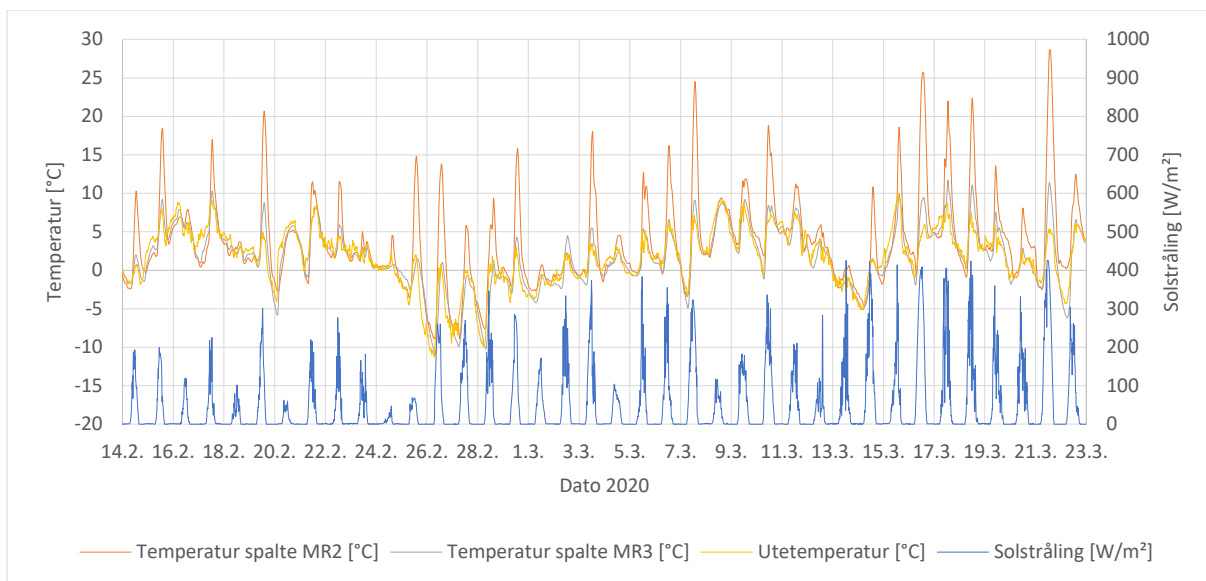
4.1.3 Tak

Målingene som presenteres i dette underkapittelet er fra sensorene MR2 og MR3, som begge er på taket. Omtrentlig plassering av disse sensorene er vist på Figur 15. For mer nøyaktig plassering av sensorene vises det til Vedlegg 1, samt Figur 18 og Figur 19 som viser detaljsnitt med plasseringen til MR2 og MR3. MR2 er plassert øverst på taket, nær den øvre åpningen i luftespalten. MR3 er plassert nederst på taket, nær åpningen til luftespalten i bunnen. Avstanden mellom sensorene er omtrent 18 m.

Temperaturforhold

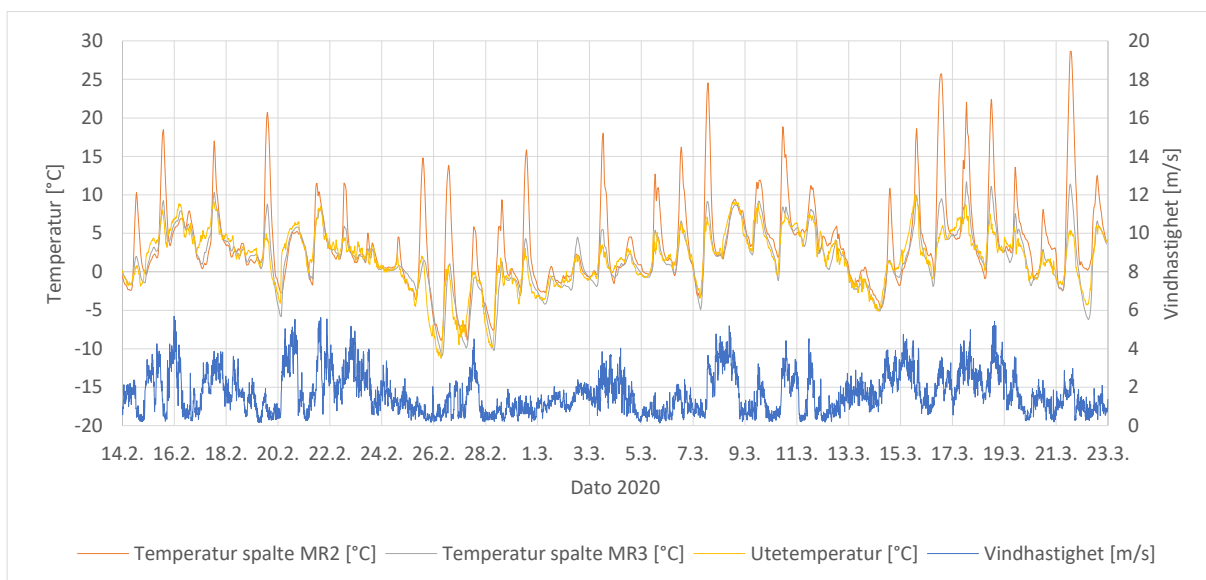
Figur 32 viser spaltetemperaturene for de to sensorene sammen med utetemperaturen og solstråling målt på værstasjonen. Det er tydelig at temperaturen til MR2 (i toppen av taket) er langt høyere enn temperaturen til MR3 (nederst på taket) de fleste dagene. På det meste er temperaturforskjellen mellom sensorene mer enn 15 grader, og det er mange dager der temperaturforskjellen er mellom 10 og 15 grader. Taket har en helning på 30 grader og er vendt mot sør. Taket mottar dermed en betydelig mengde solstråling, og det er derfor sannsynlig at solstrålingen bidrar til temperaturforskjellen. Dette kan foregå både direkte og indirekte. Direkte solstråling vil varme opp solcellepanelene på taket, som dermed vil avgi konvektiv varme til spalteluften. Dersom solcellepanelene øverst på taket mottar mer solstråling enn panelene nederst på taket, vil dette kunne skape de observerte temperaturforskjellene. Solstrålene mot panelene vil imidlertid også bidra indirekte, ved at en skorsteinseffekt i luftespalten vil oppstå. Dersom alle panelene mottar omtrent like mye solstråling, vil dette gi en generell oppvarming av spalteluften. Inne i spalten vil da oppdriftskreftene sørge for at den varme luften med lav densitet stiger, og dermed vil det observeres høyere temperaturer i toppen av spalten enn i bunn. Siden det ikke er bygg i sør som er høyere enn det laveste punktet på taket, er det rimelig å anta at alle panelene mottar omtrent like mye soltilskudd. Følgelig vil det være sannsynlig at en skorsteinseffekt inne i spalten bidrar til de observerte temperaturforskjellene. Det må imidlertid også undersøkes hvilken effekt vinden har på spalteluftenes bevegelser, ettersom dette også kan bidra til å transportere varm luft oppover i spalten.

Det kan observeres at utetemperaturen er nokså lik temperaturen målt av MR3 (nederst på taket). Merk imidlertid at det er enkelte dager der temperaturen til MR3 er rundt 5 grader høyere enn utetemperaturen (for eksempel 22. mars). Dette kan indikere at solstråling mot panelene kan bidra direkte til oppvarming av spalteluften, ved at solcellepanelene avgir konvektiv varme til spalten. Det er spesielt interessant å observere disse temperaturene på MR3, siden sensorene er svært nær den frie uteluften. Dette kan indikere at varmeavgivningen fra panelene til spalteluften kan være betydelig.



Figur 32: Spalttemperaturer [°C] for sensorene MR2 og MR3, utetemperatur [°C] og solstråling [W/m²] i perioden 14. februar til 23. mars.

Figur 33 viser spalttemperaturerne for de to sensorene sammen med utetemperaturen og vindhastigheten fra værstasjonen. Vind som kommer fra en sørlig eller nordlig retning vil teoretisk sett føre til et luftskifte i luftspalten. Dersom vinden kommer fra nord vil luftskifte kunne få en retning nedover taket, mens dersom vinden kommer fra sør vil luftskifte kunne få en retning oppover taket. Teoretisk sett vil sterkere vindhastigheter kunne gi lavere temperaturer i spalten på dagtid, og dermed bidra til å kjøle ned taket. Det er vanskelig å observere denne effekten på grafen.



Figur 33: Spalttemperaturer [°C] for sensorene MR2 og MR3, utetemperatur [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 14. februar til 23. mars.

Drivtrykk

Det er ønskelig å vurdere hvor store drivtrykkene fra vind og oppdrift på taket kan bli. For å vurdere dette er det beregnet maksimale drivtrykk fra vind og oppdrift i den analyserte perioden (12. februar - 23. mars). Beregningene som foretas under er overslagsmessige, og heftet med usikkerhet. Poenget med beregningene er å fastslå størrelsesordenen på drivtrykkene, og dermed kunne undersøke relevansen de to mulige drivtrykkene har på dette taket. Til et hvert tidspunkt er det imidlertid det totale drivtrykket som bestemmer luftskiftet til spalten. Det totale drivtrykket er summen av drivtrykket fra vind og oppdrift, som beskrevet i Formel 3. Dersom drivtrykket fra vind virker i motsatt retning av drivtrykket fra oppdrift, vil drivtrykkene få forskjellige fortegn. For dette taket betyr det at vind fra nord vil gi et drivtrykk nedover taket, som dermed vil virke i motsatt retning av drivtrykket fra oppdrift. I mange tilfeller virker imidlertid drivtrykkene i stor grad hver for seg. Eksempelvis vil det om natten i all hovedsak være drivtrykket fra vind som dominerer.

Drivtrykket fra vind er en funksjon av luftens densitet, vindhastigheten og trykkforskjellen mellom inntak og utløp (se Formel 1). Tidspunktet med størst vindhastighet er funnet. Denne vinden har en hastighet på 5,69 m/s. På dette tidspunktet var vindretningen fra syd. Luftens densitet er satt til 1,186 kg/m³, beregnet utifra luftens absolute fuktinnhold (g/m³), relativ luftfuktighet og temperatur. Formfaktoren ΔC_p mellom inntak og utløp er satt til 0,5. Dette er valgt for å gi en konservativ verdi, altså for å unngå å overestimere drivtrykket fra vind. Utregningen blir dermed:

$$\Delta p_w = 0,5 * 0,5 * 1,186 * 5,69^2 = 9,60 Pa$$

Drivtrykket fra oppdrift er en funksjon av temperaturene øverst i spalten og i uteluften, samt høydeforskjellen mellom innløpet og utløpet av spalten (se Formel 2). Tidspunktet med størst temperaturdifferanse mellom sensor MR2 og uteluften er funnet, og disse temperaturene er brukt i beregningen. Disse temperaturene er 28,6 °C og 5,1 °C for henholdsvis MR2 og uteluften. Høyden mellom innløpet og utløpet er omtrent 9,8 m. Utregningen blir dermed:

$$\Delta p_b = 3462 * \left(\frac{1}{5,1 + 273} - \frac{1}{28,6 + 273} \right) * 9,8 = 9,50 Pa$$

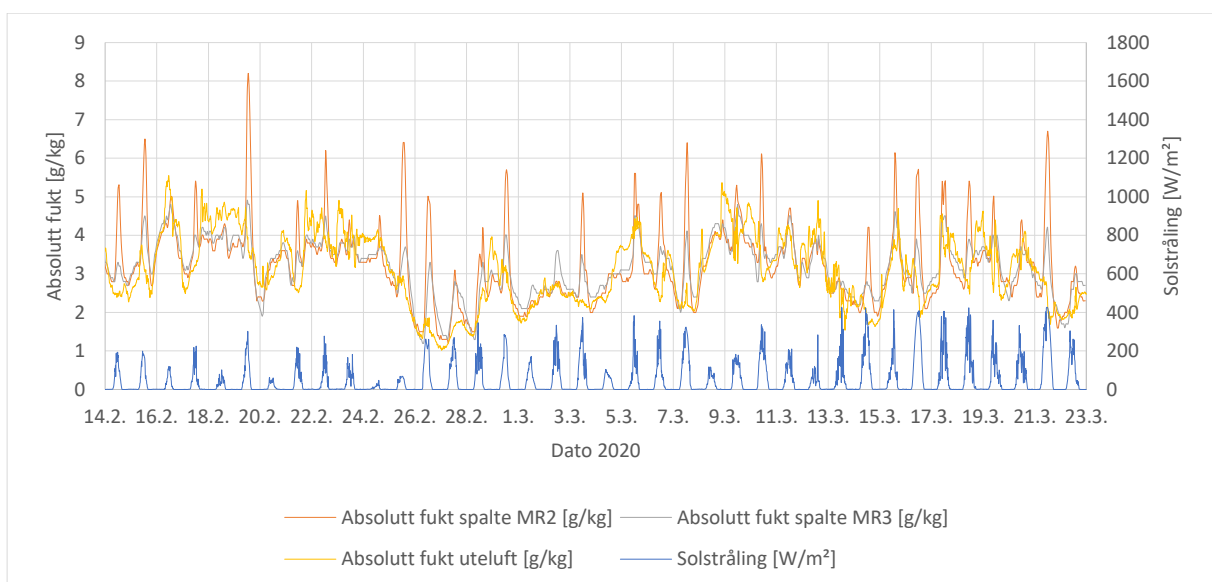
Det observeres at de maksimale drivtrykkene fra oppdrift og vind er svært like. Dette indikerer at begge de to drivkreftene er relevante for studier av luftskifte i dette taket. Beregningene i seg selv sier imidlertid ikke noe om luftskiftes innvirkning på temperaturforholdene.

Absolutt fukt

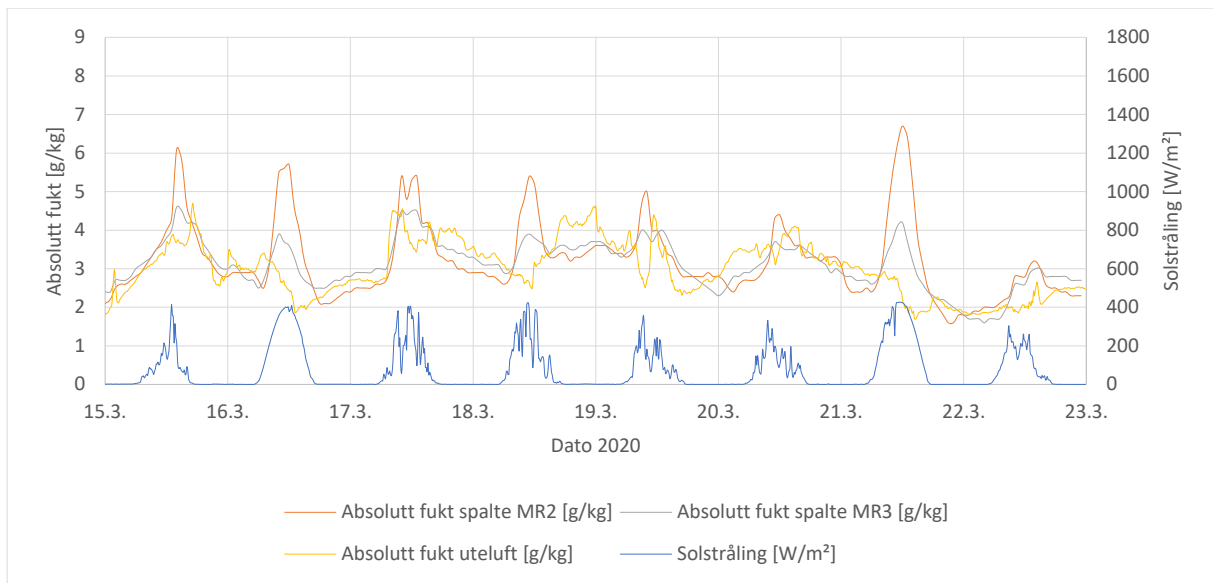
Figur 34 og Figur 35 viser absolutt fukt [g fukt/kg luft] for MR2, MR3 og uteluften sammen med solstrålingen, der sistnevnte figur viser en kortere andel av perioden for at detaljer lettere skal sees. Absolutt fukt i uteluften er beregnet utifra damptrykk og totaltrykk for uteluften, der damptrykket er beregnet som beskrevet i metodekapittelet og totaltrykket er hentet rett fra værdataene. Absolutt fukt i spalten er hentet rett fra fuktsensorene, som bruker RF til å beregne dette. Det observeres at fuktinnholdet i MR2 mange dager er langt høyere enn MR3, og at dette gjerne sammenfaller med mye solstråling (for eksempel 16. og 22. mars). Dette kan tyde på at det er fukt i selve luftespalten eller i lektene som fordamper som følge av solstrålingens oppvarming av spalteluften. Det kan imidlertid også observeres at det er perioder der absolutt fukt i uteluften er høyere enn i spalten. I Figur 35 kan man eksempelvis observere dette om nettene 17.-18. og 18.-19. mars. Dette kan tyde på at luftespalten periodevis har en god utørkende effekt, der fuktig luft om dagen slipper ut, mens fuktig luft om natten ikke trenges inn i spalten. Det er imidlertid mange dager der dette ikke observeres.

Antallet dager med høy absolutt fukt i toppen av spalten (MR2) er relativt høyt. Dette kan vise at luftespaltens evne til å transportere bort fukt fungerer godt, siden det høye fuktnivået raskt går ned igjen. Dette indikerer at den fuktige luften forlater luftespalten gjennom åpningen i toppen, helt i tråd med hensikten til luftespalten. Dersom det er fritt vann i spalten er det imidlertid mest nærliggende å tro at dette forlater luftespalten ved å renne nedover asfalttekningen og ut i bunnen av spalten ved den innvendige rennen.

Hvor mye fritt vann som befinner seg i spalten, altså oppå asfalttekningen, er vanskelig å vite. I utgangspunktet skal solcellepanelene med kassettsystemet danne et tett sjikt, slik at vann ikke trenger igjennom. Dette skal i teorien også hindre snøsmelting i å oppfukte spalten. I tillegg sikrer utformingen av beslaget i toppen at regninndrev unngås. Det er imidlertid knyttet stor usikkerhet til mengden kondensvann som eventuelt felles ut i spalten. Denne problemstillingen er behandlet i kapittel 4.1.4 om underkjøling av taket.



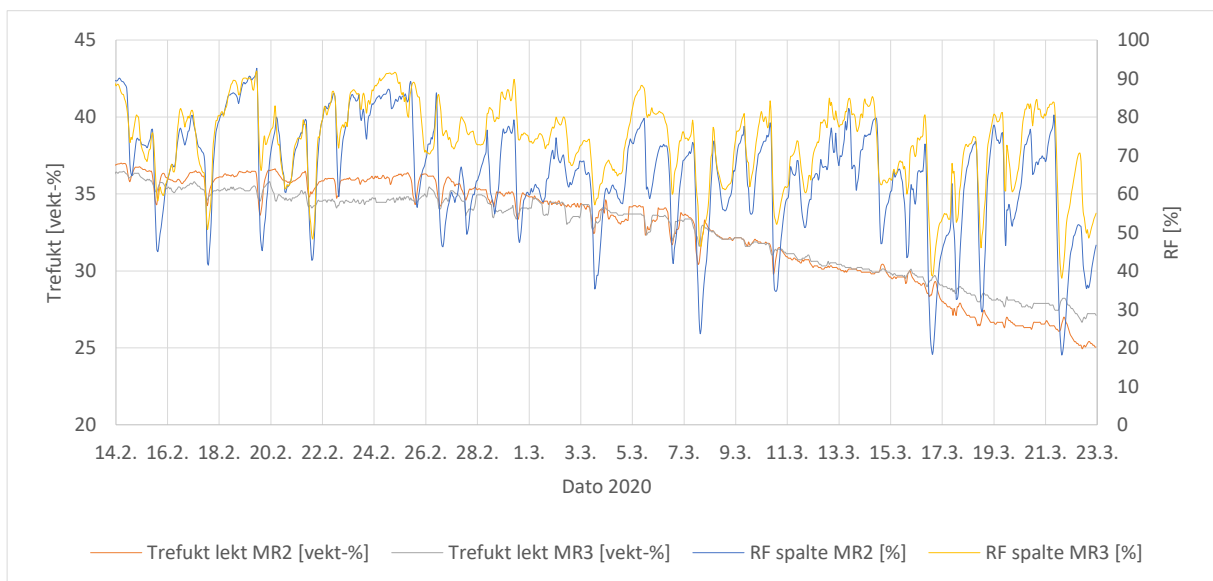
Figur 34: Absolutt fuktinnhold [g/kg] for sensorene MR2, MR3 og uteluften og solstråling [W/m²] i perioden 14. februar til 23. mars.



Figur 35: Absolutt fukttinnhold [g/kg] for sensorene MR2, MR3 og uteluften og solstråling [W/m²] i perioden 15. mars til 23. mars.

Trefukt og relativ luftfuktighet

Figur 36 viser relativ luftfuktighet og trefuktighet målt for de to sensorene MR2 og MR3. Det observeres at RF periodevis er over 80 %, men at disse periodene blir færre og kortere. De store negative bunnpunktene til RF for MR2 skyldes de tilsvarende temperaturstigningene. Trefuktigheten viser klart tegn til uttørking. I begynnelsen av perioden var nivåene svært høye, omtrent 37 %. Dette skyldes trolig at beslagløsningen i toppen ikke var på plass før kort tid før den analyserte perioden, til tross for at solcellepanelene ble montert i desember 2019. Det er også mulig at lektene hadde en ganske høy fuktighet da de ble montert. På slutten av perioden (23. mars) er fortsatt trefuktnivåene høye, omtrent 25 % for MR2 og 27 % for MR3. Begge sensorene viser dermed trefuktnivåer godt over den kritiske grensen på 20% på slutten av perioden. Den store nedgangen i løpet av perioden tyder allikevel på at taket har en stor evne til uttørking.



Figur 36: Trefuktighet [vekt-%] og relativ luftfuktighet [%] for sensorene MR2 og MR3 i perioden 14. februar til 23. mars.

4.1.4 Tak – Underkjøling

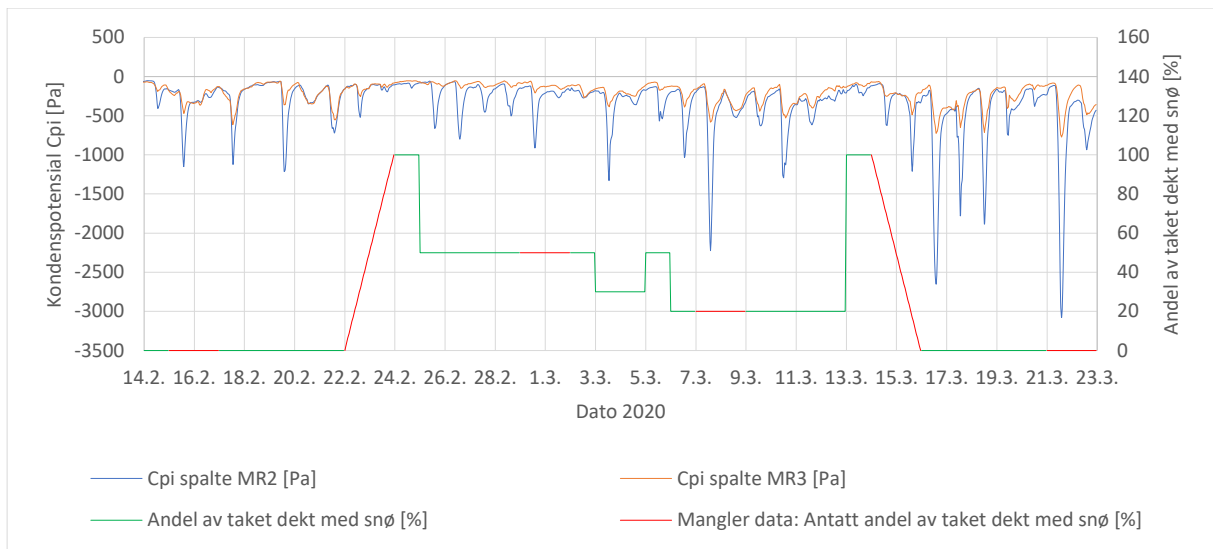
Det er gjort en analyse av underkjøling på taket. En beskrivelse av metoden som er brukt til analysen er vist i kapittel 3.4.3. For øvrig vises det kapittel 4.2.2, der en tilsvarende analyse av underkjøling på taket av ZEB Test Cell er gjort for den samme perioden. Dette gjør at resultatene kan sees i sammenheng, ettersom det er helt like værforhold tilstede.

Det presiseres igjen at temperaturene er hentet fra trådløse sensorer som er plassert nær undertaket/asfalttekningen (MR2 og MR3). Dermed blir ikke resultatene like presise som om det var benyttet data fra termoelementene som er festet til baksiden av solcellepanelene. Det er generelt grunn til å tro at temperaturer fra baksidene av panelene ville gitt resultater som viste mer underkjøling, fordi panelene har et stort potensial til å sende varmestråling mot himmelen på kalde og klare netter. Luftespalten er såpass høy at temperaturen fra de trådløse fuktsensorene måles ca. 10 cm under baksiden av panelene. En studie som sammenligner temperaturene fra termoelementene på baksiden av panelene og temperaturene fra de trådløse fuktsensorene vil kunne si noe om dette.

Den forenklete metoden gir at sensorene MR2 og MR3 på taket har lavere temperaturer enn utetemperaturen henholdsvis 42 % og 63 % av tiden. Tallene indikerer en betydelig periode med underkjøling. Det er imidlertid flere mulige årsaker til et en slik underkjøling kan oppstå. Stråling fra solcellepanelene mot himmelen kan være en årsak. Det kan imidlertid også tenkes at vind i luftespalten kan bidra til å kjøle ned luften i spalten relativt til uteluften.

Resultatet fra den mer avanserte metoden der kondenspotensialet studeres er vist i Figur 37. Det observeres at kondenspotensialet Cpi ikke er positivt eller lik 0 på noe tidspunkt i den analyserte perioden. Maksimal Cpi i perioden er -22 Pa og -14 Pa for henholdsvis MR2 og MR3. Dette indikerer at det teoretisk sett ikke vil være fare for utfelling av kondens. Det er likevel mulig at Cpi ville vært positiv i perioder dersom temperaturdata fra baksiden av solcellepanelene hadde blitt benyttet. Følgelig er det vanskelig å vurdere kondenspotensialet i spalten utifra disse målingene. Det kan for øvrig legges merke til at MR2 har store negative bunner på flere dager, som er langt større enn MR3 sine tilsvarende bunner. Dette sammenfaller med dagene der temperaturen i MR2 er langt høyere enn MR3. Store negative bunner indikerer uttørking av luften.

På Figur 37 er det også vist omtrent hvor stor andel av taket som er dekt med snø. Merk imidlertid at det mangler data for lørdager og søndager, markert med røde rette streker i figuren. Teoretisk sett vil snø på taket redusere faren for underkjøling, siden snøen vil isolere slik at det ikke vil bli like mye stråling mot himmelen som det normalt ville blitt. Hos Bunkholt, Gullbrekken og Kvande (2020) var denne effekten klart synlig i måleperiodene. Fra Figur 37 kan det imidlertid ikke observeres en tilsvarende effekt. En viktig årsak til dette er trolig at det er svært få dager hvor hele taket er dekt av snø. Dermed vil det trolig ikke være en isolerende effekt i lang nok tid til at Cpi blir varig påvirket.



Figur 37: Kondenspotensial Cpi [Pa] for MR2 og MR3 og andel av taket dekt med snø [%] i perioden 14. februar til 23. mars.

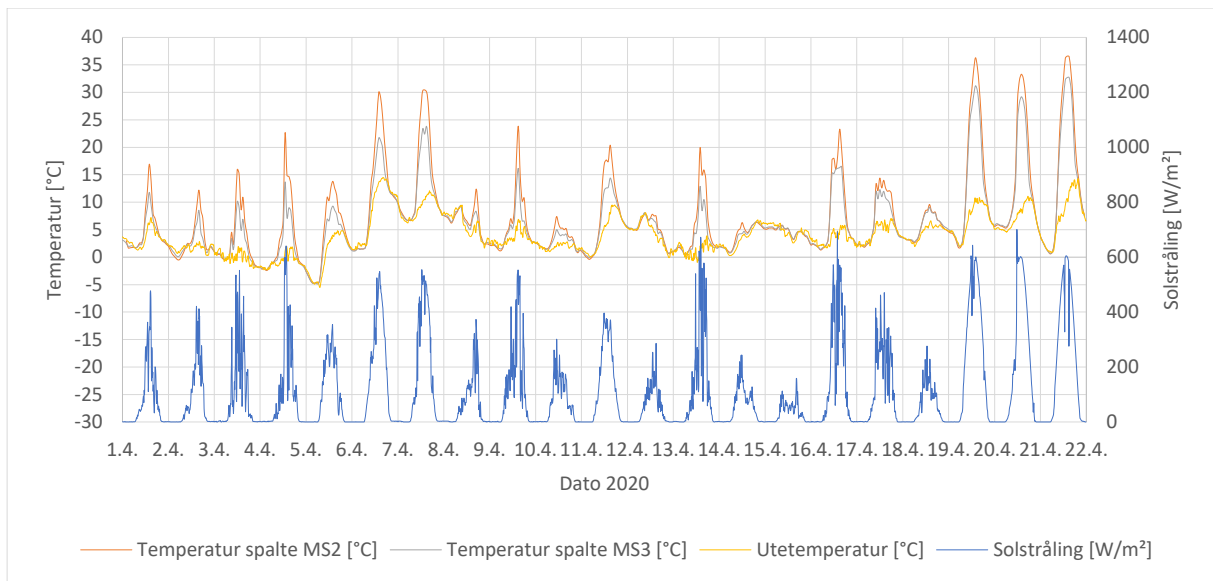
4.1.5 Sørfasaden

Målingene som presenteres i dette underkapittelet er fra sensorene MS2 og MS3 på sørfasaden. Omtrentlig plassering av disse sensorene er vist på Figur 15. For mer nøyaktig plassering av sensorene vises det til Vedlegg 1. MS2 er plassert nesten på toppen av fasaden, ca. 70 cm over vindusbåndet i 3. etasje. MS3 er plassert omtrent på etasjeskilleren mellom 1. og 2. etasje, ca. 115 cm fra overkant av beslaget over vindusrekken i 1. etg.

Temperaturforhold

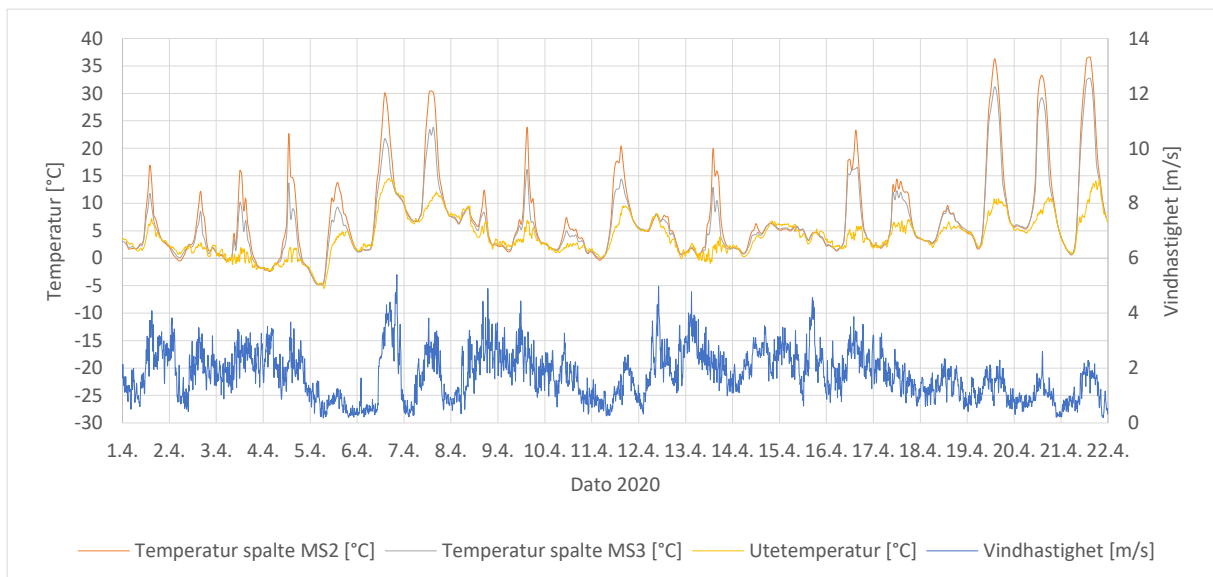
Figur 38 viser spaltetemperaturene for de to sensorene sammen med utetemperaturen og solstråling målt på værstasjonen. Det er tydelig at temperaturene følger hverandre ganske tett, men at MS2 (øverst) har litt høyere temperaturer enn MS3 (nederst) midt på dagen. På det meste er det ca. 7-8 grader forskjell (4. og 6. april). De tre dagene med mest kontinuerlig sol, det vil si de dagene med lite skydekke, er imidlertid temperaturforskjellen bare 3-4 grader (20.-22. april). Det er mulig at det er skorsteineffekten som forårsaker temperaturforskjellen. MS3 er plassert i et kort felt, slik at en nokså begrenset skorsteineffekt oppstår. MS2 er derimot plassert bare en liten avstand fra et felt som strekker seg fra vindusrekken i 1. etg til vindusbåndet i 3. etasje. Siden det er kryssløfting i luftespalten er det mulig at skorsteineffekten sørger for at den oppvarmede spalteluften stiger opp, og luften rundt MS3 vil dermed kunne bli kaldere enn øverst i feltet eller i feltet der MS2 er plassert. Det presiseres at solcellepanelene er montert med åpne fuger. Det er usikkert hvordan dette påvirker oppdriften i spalten. De åpne fugene vil kunne utligne trykket mellom spalteluften og luftespalten, og vil teoretisk sett begrense skorsteineffekten. Det er imidlertid usikkert hvor stor den trykkutlignende effekten av de åpne fugene er.

Temperaturene til både MS2 og MS3 er høyere enn utetemperaturen på dagtid alle dagene i den analyserte perioden. På det meste viser sensorene 20-25 grader høyere temperatur enn utetemperaturen (20.-22. april). Dette er som ventet, ettersom sørfasaden mottar mye direkte solstråling på denne tiden av året. Det er imidlertid ønskelig å transportere bort mest mulig av denne varmen, av hensyn til solcellepanelenes effektivitet. Temperaturforskjellene mellom MS2 og MS3 kan som nevnt være tegn på at skorsteineffekten virker.



Figur 38: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MS2 og MS3, utetemperatur [°C] og solstråling [W/m²] i perioden 1. april til 22. april.

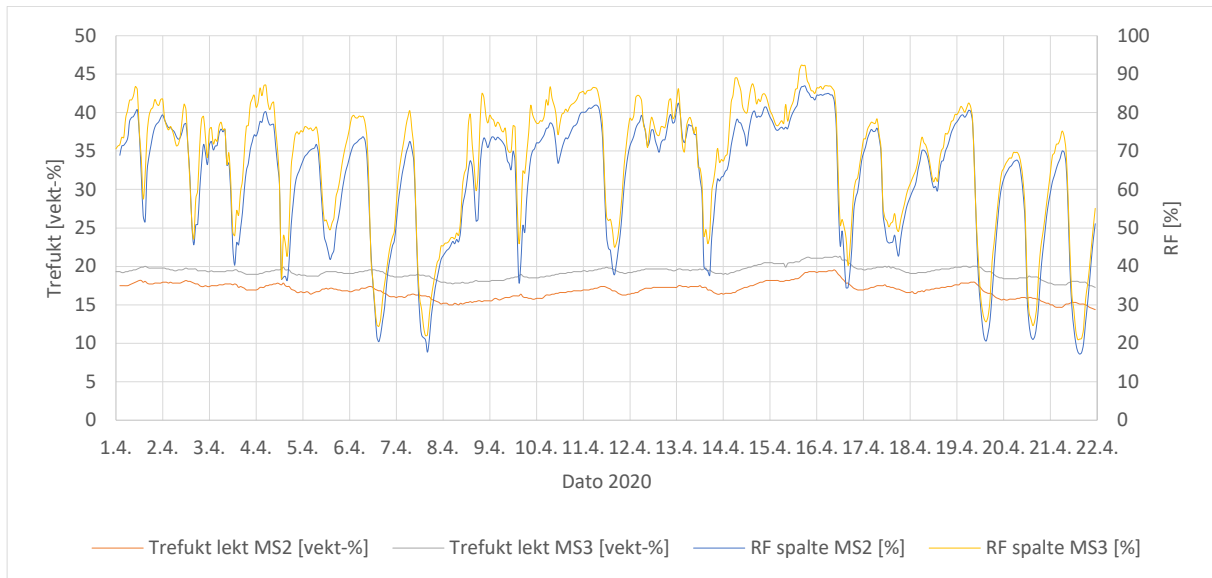
Figur 39 viser spaltetemperaturene for de to sensorene sammen med utetemperaturen og vindhastigheten fra værstasjonen. Det er mulig at vind bidrar til temperaturforskjellene mellom sensorene. Dersom vinden blåser mot sørfasaden, kan det blåse inn i fugene, og dermed skape luftbevegelser mange steder i luftespalten. Det er mulig at det store feltet der MS3 er plassert mottar mer vind og dermed mer luftskifte enn det lille feltet til MS2. Dette vil i teorien kunne gjøre at temperaturen til MS3 blir lavere enn temperaturen til MS2. Luftskifte som følge av vind på en fasade med fuger er en svært kompleks prosess, og det vil ikke være mulig å konstatere hverken at vinden bidrar eller ikke bidrar til temperaturforskjellene utifra analysene i denne oppgaven.



Figur 39: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene MS2 og MS3, utetemperatur [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 1. april til 22. april.

Trefukt og relativ luftfuktighet

Figur 40 viser relativ luftfuktighet og trefuktighet målt for de to sensorene MS2 og MS3. Det observeres at RF er under 80 % det meste av tiden, men at det er flere dager der verdien stiger over dette. Den 16. april er det eksempelvis over 90 % RF ved MS3. Trefuktigheten varierer svært lite gjennom perioden, og det er ingen tegn til verken oppfukning eller uttørking. Det bør presiseres at perioden er for kort til at det kunne forventes tydelige endringer i trefuktnivået. MS3 viser et fuktnivå rundt 20 %, mens MS2 ligger et par prosent lavere. Det er sannsynlig at denne forskjellen skyldes ulikt fuktnivå i lektene allerede før de ble skrudd opp.



Figur 40: Trefuktighet [vekt-%] og relativ luftfuktighet [%] for sensorene MS2 og MS3 i perioden 1. april til 22. april.

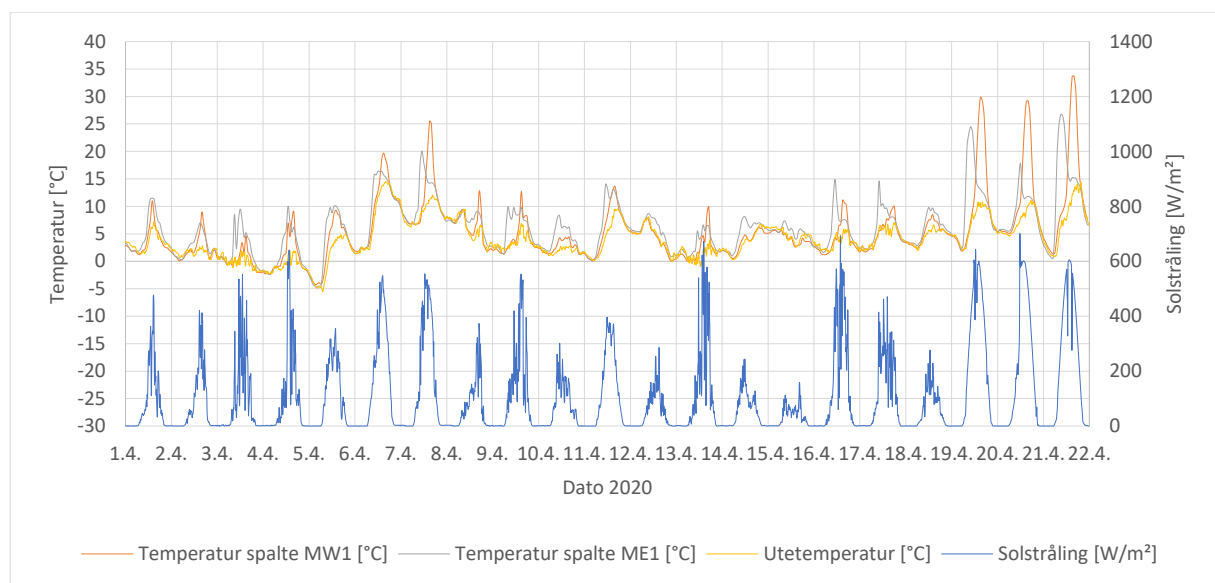
4.1.6 Øst- og vestfasaden

Målingene som presenteres i dette underkapittelet er fra sensorene ME1 og MW1 på henholdsvis øst- og vestfasaden. Omtrentlig plassering av disse sensorene er vist på Figur 16. For mer nøyaktig plassering av sensorene vises det til Vedlegg 1. ME1 er plassert ca. 110 cm over overkanten av beslaget til de tre vinduene i 3. etasje. MW1 er plassert ca. 115 cm sør for vinduene helt i nordre del av fasaden. Det er ingen vinduer hverken under eller over MW1, slik at sensoren er plassert i en høy del av luftespalten. Selv om MW1 og MW4 er på to helt ulike fasader, har de omtrent samme høyde og samme type kledning. Det er valgt å sammenligne disse sensorene for å undersøke effekten av himmelretning på temperatur og fuktforholdene.

Temperaturforhold

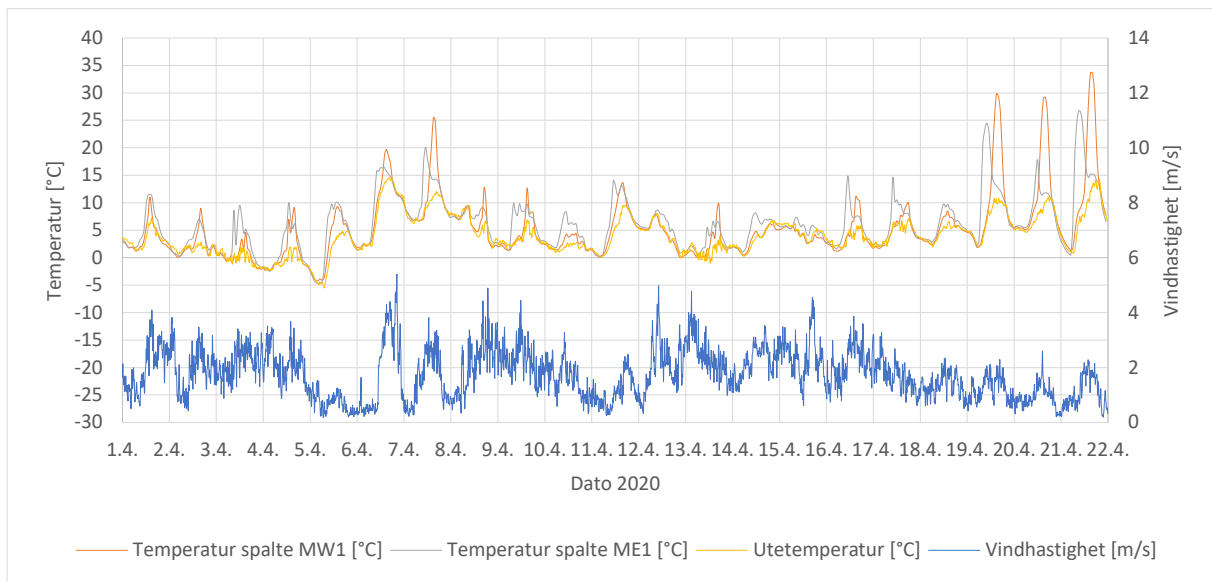
Figur 41 viser spaltetemperaturene for de to sensorene sammen med utetemperaturen og solstråling målt på værstasjonen. Det observeres en faseforskyvning mange av dagene, der MW1 har temperaturtoppene litt senere på dagen enn ME1. Dette er helt som ventet, siden det er et resultat av at vestfasaden mottar sollys senere på dagen enn østfasaden. Det kan for øvrig observeres at MW1 viser litt høyere temperaturer enn ME1, særlig på dager med mye sol (for eksempel 20.-22. april). Dette kan skyldes at vestfasaden ikke er orientert helt mot vest, men heller mot vest-sørvest. Dette gjør at MW1 vil motta sollys i litt lenger tid enn ME1, som er orientert rett mot øst. Det observeres enkelte dager der ME1 viser høyere temperaturer, for eksempel 16. og 17. april. Dette kan skyldes at det var mer sol på formiddagen enn ettermiddagen, men det er også mulig at vind spiller en avgjørende rolle.

Temperaturene til både ME1 og MW1 er høyere enn utetemperaturen på dagtid alle dagene i den analyserte perioden. På det meste viser MW1 temperaturer som er 20 grader høyere enn utetemperaturen (20.-22. april), som er noe mindre enn det MS2 og MS3 viser. De fleste dagene viser sensorene temperaturer som er 5-10 grader høyere enn utetemperaturen, som også er litt mindre enn MS2 og MS3 viser. Resultatene er som ventet, ettersom solstrålingen mot sørfasaden har høyere intensitet enn solstrålingen mot øst- og vestfasaden de aller fleste dagene.



Figur 41: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene ME1 og MW1, utetemperatur [°C] og solstråling [W/m²] i perioden 1. april til 22. april.

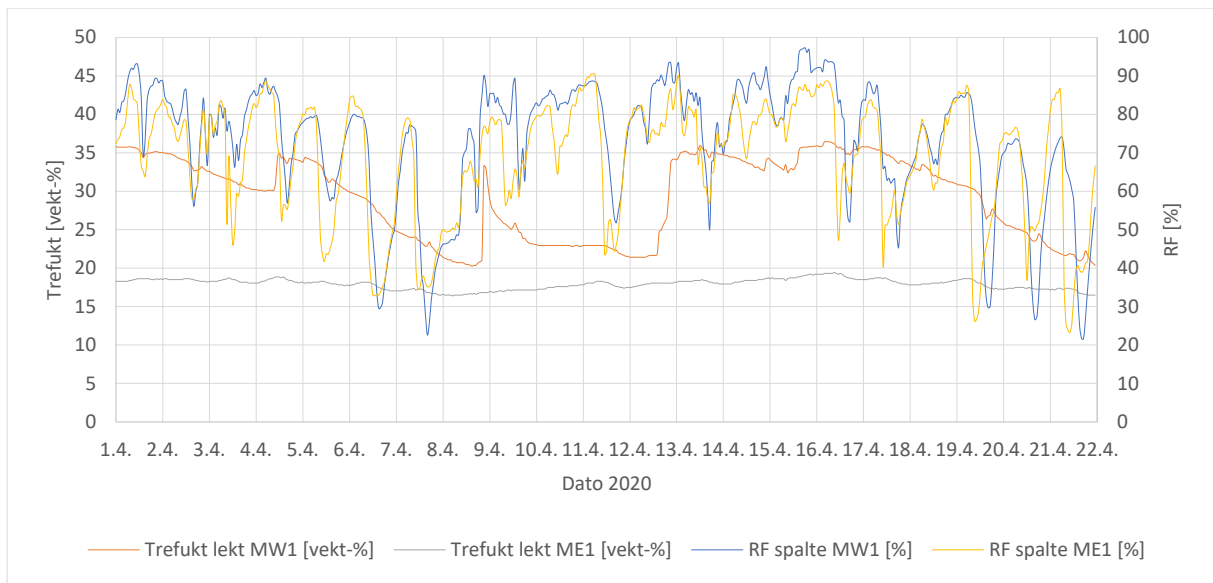
Figur 42 viser spaltetemperaturene for de to sensorene sammen med utetemperaturen og vindhastigheten fra værstasjonen. I likhet med tilfellet for sørfasaden, er solcellekledningen montert med åpne fuger også på øst- og vestfasaden. Dette kan føre til at vind kan blåse gjennom fugene.



Figur 42: Spaltetemperaturer [°C] for sensorene ME1 og MW1, utetemperatur [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 1. april til 22. april.

Trefukt og relativ luftfuktighet

Figur 43 viser relativ luftfuktighet og trefuktighet målt for de to sensorene ME1 og MW1. Det kan observeres at RF tidvis er svært høy for MW1. På det meste er den nært oppunder 100 % (15.-16. april). ME1 er ikke like høy, men har mange perioder med RF over 80 % og opp mot 90 %. Trefuktnivået til MW1 er det mest iøyenfallende. Det er usikkert hvorvidt den brå forandringen i trefuktnivå kan ha noen naturlige forklaringer, eller om det skyldes en feil ved sensoren. Det er mulig at dette er et resultat av saltinnholdet i impregneringen til den aktuelle lekten. Det er imidlertid verdt å merke seg at trefuktmålerne måler den fuktigste delen av treverket, da elektrodene innenfor treverket ikke er isolert (se mer om dette i kapittel 3.2.3). Dermed kunne det være mulig at regninntrenging bidro til denne oppfuktingen. Når regndata for perioden sjekkes opp mot trefuktnivået til MW1 er det imidlertid ingen sammenheng. Dermed er det mer sannsynlig at det er noe feil med sensoren, eller at lektens saltinnhold påvirker. I begge tilfeller er det uansett klart at resultatet ikke er til å stole på, og det vil derfor ikke bli behandlet videre. ME1 viser en relativt konstant trefukt, men tett opptil den kritiske grensen på 20 %. Det presiseres at analyseperioden er litt for kort til å studere trefuktnivåene.



Figur 43: Trefuktighet [vekt-%] og relativ luftfuktighet [%] for sensorene ME1 og MW1 i perioden 1. april til 22. april.

4.2 ZEB Test Cell

I dette kapittelet vil de termiske forholdene samt lufthastigheter i luftespaltene på ZEB Test Cell bli presentert sammen med værdata. Værdataene er hentet fra værstasjonen som er 1,5 m over mønet, slik at værdataene blir svært presise. Det vil bli studert data fra to ulike perioder, sommer og vinter. Periodene har blitt valgt ut med ønsket om å representere ulike årstider, samt ønsket om å minimere hull i datasettene. Sommerperioden er fra 8. juli til 16. august 2019, og fokuserer på temperaturer generelt og forhold ved vindstille perioder spesielt. Vinterperioden er fra 14. februar til 23. mars 2020 (samme periode som er studert for nordfasaden og taket på Zeb-laboratoriet). I denne perioden studeres underkjøling av taket. Siden det er samme periode som studeres for underkjølingen av taket til Zeb-laboratoriet, kan resultatene sammenlignes.

Grafene som presenteres viser de faktiske målingene. Termoelementene og værstasjonen har begge 10-minutters-data. Grafene som presenteres viser datoer på x-aksen og de ulike parameterne som studeres på en eller to y-akser.

4.2.1 Sommer

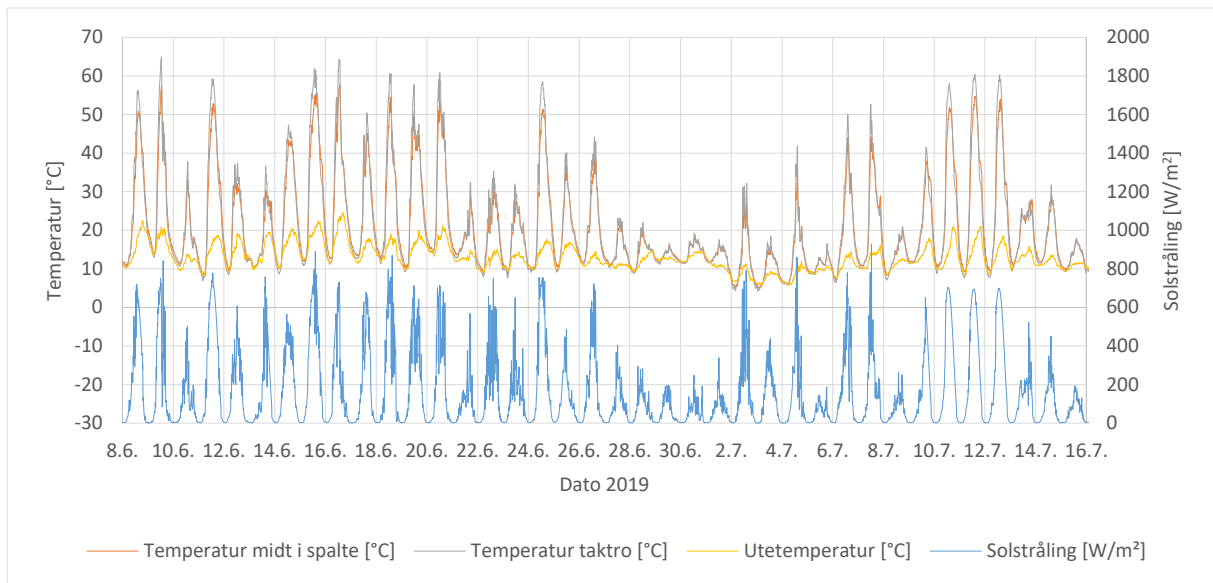
Målingene som presenteres i dette underkapittelet er fra de tre luftespaltene SB, SD og SE, som er på sørsiden (se Figur 23 i kapittel 3.3.1). Luftespalte SC er ikke benyttet fordi det manglet data. Det presenteres verdier fra baksiden av taktroa og fra plasseringen midt i spalteluften. Alle verdiene er hentet fra termoelementene som ligger 0,5 m fra mønet, og verdiene er deretter midlet over de tre spaltene. Temperaturene på overflaten av undertaket er svært lik temperaturen midt i spalteluften til alle tidspunkter. Følgelig er det valgt å ikke vise temperaturen på overflaten av undertaket i diagrammene, siden det ville resultert i to nesten helt overlappende grafer. I kapittelet om de vindstille periodene er det brukt data fra vindhastighetsmåleren som er 0,5 m fra mønet på søndre side.

Hele perioden

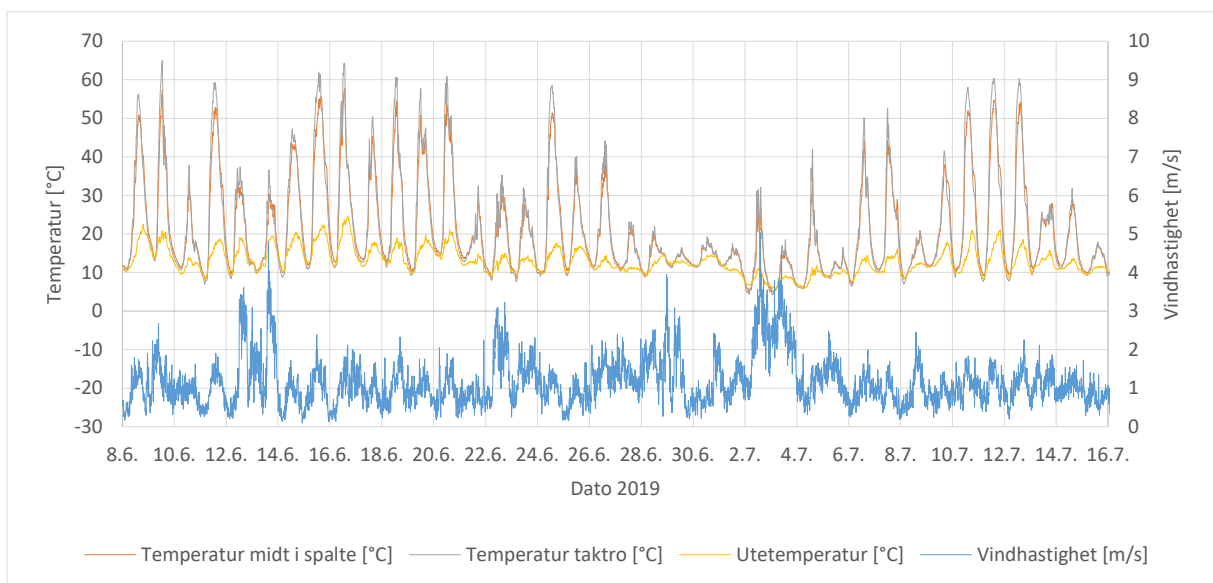
Figur 44 viser temperaturene målt midt i spalteluften og på baksiden av taktroa sammen med utetemperatur og solstråling målt på værstasjonen. Det observeres en klar korrelasjon mellom solstrålingen og differansen mellom spaltetemperaturene og utetemperaturen. Temperaturen på baksiden av taktroa er som regel 5-10 grader høyere enn temperaturen midt i spalteluften på dagtid. Dette er helt som ventet, siden taktekingen er svart og taket generelt mottar mye direkte solstråling. Videre kan det observeres at temperaturene i spalten er langt høyere enn utetemperaturen på dagtid, på det meste over 40 grader høyere. På dager med mindre sol, eksempelvis 28. juni til 1. juli, er spaltetemperaturene bare 5-10 grader høyere enn utetemperaturen. På 11. til 13. juli kan det observeres at det er en relativt jevn og kontinuerlig solstråling, og spaltetemperaturene disse tre dagene har også en jevn og kontinuerlig fordeling sammenlignet med de andre dagene.

Figur 45 viser temperaturene målt midt i spalteluften og på baksiden av taktroa sammen med utetemperatur og vindhastighet målt på værstasjonen. Teoretisk sett vil vind mot luftespalten kunne ha en avkjølede effekt på dagtid, der uteluft erstatter varm spalteluft. Det kan tenkes at denne effekten vil være større ved kraftigere vind, og ved vindretninger rett mot spalten. Den 12. og 13. juni observeres det at det er mer vind enn flertallet av dagene. Disse dagene er spaltetemperaturene merkbart lavere enn omkringliggende dager, til tross for at solstrålingen ikke er så mye mindre enn dager med vesentlig høyere temperaturer. Den 2. og 3. juli forekommer den kraftigste vinden i perioden, og det kan

også observeres her at temperatuere er litt lavere i forhold til dager med tilsvarende solstråling.



Figur 44: Temperaturer midt i spalteluften [°C], på baksiden av taktraa [°C], utetemperaturen [°C] og solstråling [W/m²] i perioden 8. juni til 16 juli.



Figur 45: Temperaturer midt i spalteluften [°C], på baksiden av taktraa [°C], utetemperaturen [°C] og vindhastighet [m/s] i perioden 8. juni til 16 juli.

Resultatene ser ut til å stemme godt overens med resultatene til Gullbrekken, Kvande og Time (2017). I denne studien ble temperaturer og lufthastigheter på sørsiden av taket studert i tre perioder, hvorav den ene perioden var 3. juli til 15. juli 2016. I denne perioden ble det funnet lignende temperaturforhold i spalten, både kvantitativt og med tanke på formen på kurvene. Tabell 5 viser resultater for den analyserte perioden (8. juni til 16. juli) satt opp sammen med data fra Gullbrekken, Kvande og Time (2017). Tabellen er satt opp på samme form som i resultatkapittelet til nevnte studie. Tabellen viser at resultatene er i samme størrelsesorden, til tross for at den analyserte perioden hos Gullbrekken, Kvande og Time (2017) er vesentlig kortere. I studien nevnes det at kondensering som følge av

underkjøling ikke er et veldig stort problem for dette taket på grunn av de hygrottermiske egenskapene til OSB-platene som taktrao består av. Dette nevnes også av Bunkholdt, Gullbrekken og Kvande (2020). Resultatene fra denne studien viser at det ikke er en vesentlig større periode med underkjøling på sommertid enn det som er funnet i de to nevnte tidligere studiene.

Tabell 5: Temperaturforhold på sørsiden av taket hos Gullbrekken, Kvande og Time (2017) og i denne studien. Resultatene fra Gullbrekken, Kvande og Time (2017) er hentet fra posisjonene midt mellom mønet og raft. Resultatene fra denne studien er hentet fra posisjonene 0,5 m fra mønet for luftespaltene SB, SD og SE.

Studie	Periode	Taktro			Undertak		
		Andel av perioden med temp lavere enn utetemp	Største temp-differanse mellom termo-element og utetemp	Maks temp	Andel av perioden med temp lavere enn utetemp	Største temp-differanse mellom termo-element og utetemp	Maks temp
Gullbrekken, Kvande og Time (2017)	3.7-15.7 2016	14%	3°C	60°C	5%	3°C	57°C
Denne studien	8.6-16.7 2019	18%	2°C	65°C	4%	1°C	58°C

Vindstille perioder

Det har vært ønskelig å studere temperatur- og strømningsforhold i luftespalten i vindstille perioder. Teoretisk sett vil vindstille perioder kunne gi et lavt luftskifte, særlig for dette taket. Grunner til det er at det ikke er åpninger i luftespaltene ved mønet, og følgelig er det antatt at solstrålingen som drivkraft for luftskifte vil være nokså begrenset. Teoretisk sett er det likevel mulig å tenke at solstrålingen kan skape et luftskifte ved at luften varmes opp på sørsiden, stiger opp til mønet, og deretter blir kaldere og synker ned på nordsiden. Solstråling vil i teorien dermed kunne føre til et luftskifte drevet fra sør mot nord på dette taket. Teoretisk sett vil sterkere sol forsterke denne effekten.

For å studere forholdene i vindstille perioder med sol har det blitt filtrert ut perioder som varer i mer enn 3 timer som i hovedsak har vind < 1 m/s og solstråling > 100 W/m². Det er lange perioder med vind < 1 m/s på natten, men disse periodene har blitt filtrert bort fordi det ikke er sol tilstede. Tabell 6 viser periodene som er funnet og tilhørende data. Til sammen ble det funnet 7 perioder som tilfredsstilte kriteriene. Spaltehastigheten er målt med vindhastighetsmåleren i øvre plassering på sørsiden. Retningsintervall på vind viser hvilke retninger vinden på værstasjonen hadde i periodene, der 0 grader er rett fra nord og 180 grader er rett fra sør. Orienteringen til delen av bygget med de instrumenterte luftespaltene er slik at vind fra 161 grader kommer rett mot luftespaltene på sørsiden. De to kolonnene lengst til høyre viser korrelasjonskoeffisientene mellom spaltehastigheten og vindhastigheten og mellom spaltehastigheten og solstrålingen.

Tabell 6: Data fra værstasjonen og termoelementene i perioder på mer enn 3 timer som i hovedsak har vind < 1m/s og solstråling > 100 W/m².

Dato	Klokke	Varighet	Gj. Vindhastighet [m/s]	Gj. Solstråling [W/m ²]	Gj. Temp Takrto [°C]	Gj. Temp midt i spalte [°C]	Gj. Spaltehastighet [m/s]	Intervall vindretning	Korrelasjon spaltehastighet og vind	Korrelasjon spaltehastighet og sol
17.06	08:30 - 14:50	6:20	0,80	332	29,7	27,1	0,16	101 - 235	-0,03	0,05
21.06	08:50 - 14:50	6:00	0,84	152	18,4	17,9	0,18	96 - 270	0,44	-0,20
24.06	07:00 - 10:00	3:00	0,76	264	23,5	20,4	0,21	140 - 268	0,76	0,38
04.07	06:10 - 12:30	6:20	0,68	176	12,0	11,0	0,15	99 - 260	0,18	0,01
07.07	16:50 - 21:00	4:10	0,68	166	26,4	27,7	0,08	119 - 271	0,06	-0,00
15.07	11:30 - 17:20	5:50	0,66	138	16,2	15,9	0,13	77 - 268	0,46	-0,17
16.07	12:20 - 16:10	3:50	0,85	237	27,7	26,7	0,11	156 - 249	-0,01	0,09

Dataene i Tabell 6 viser at taktroa hadde en høyere temperatur enn luften midt i spalten i 6 av de 7 periodene. Videre vises det at gjennomsnittlig spaltehastighet varierte mellom 0,08 og 0,21 m/s. Retningsintervallet viser tydelig at vinden i alle periodene kom fra den sørlige halvdelen (mellom 90 og 270 grader). Følgelig kom det meste av vinden i alle periodene fra retninger som teoretisk sett kan gi luftstrømninger inn i luftespalten fra sørsiden.

Korrelasjonskoeffisientene viser at det er klart høyere korrelasjon mellom spaltehastighet og vindhastighet enn mellom spaltehastighet og solstrålingen. Dette kan indikere at vinden er en viktigere drivkraft for luftskifte enn solstrålingen, til tross for at det er valgt ut perioder med så lite vind og så mye solstråling som mulig. Korrelasjonskoeffisienten mellom spaltehastigheten og vindhastigheten varierer imidlertid stort mellom de ulike periodene. Det bør også presiseres at dataene som ligger til grunn for korrelasjonskoeffisientene har 10-minutters-oppløsning. En bedre oppløsning ville gitt bedre korrelasjonskoeffisienter.

4.2.2 Vinter - Underkjøling

I denne perioden er det gjort en analyse av underkjøling på taket. En beskrivelse av metoden som er brukt til analysen er vist i kapittel 3.4.3. For øvrig vises det til kapittel 4.1.4, der en tilsvarende analyse av underkjøling på taket av ZEB-laboratoriet er gjort for den samme perioden. Dette gjør at resultatene kan sees i sammenheng, ettersom det er helt like værforhold tilstede.

Målingene som presenteres i dette underkapittelet er hentet fra luftespaltene SA og NA (se Figur 23 i kapittel 3.3.1). Det presenteres verdier fra baksiden av taktrao og fra plasseringen midt i spalteluften. Verdiene er midlet over de tre plasseringene 1) 0,5 m fra raft, 2) 0,5 m fra mønet og 3) plasseringen midt imellom. Temperaturene på overflaten av undertaket er svært lik temperaturen midt i spalteluften til alle tidspunkter. Følgelig er det valgt å ikke vise temperaturen på overflaten av undertaket i diagrammene, siden det ville resultert i to nesten helt overlappende grafer.

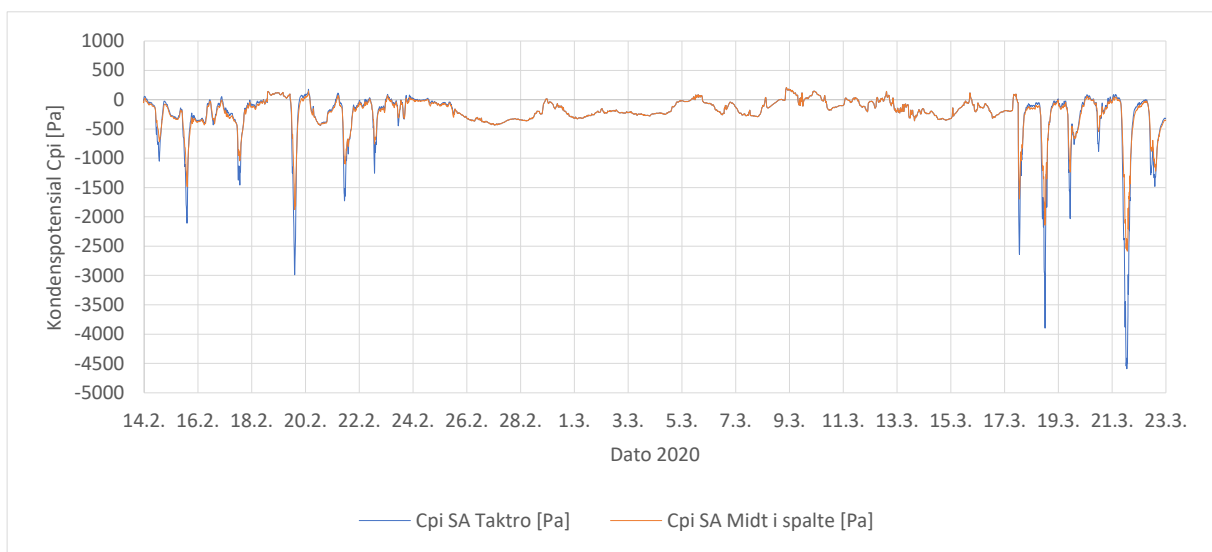
Den forenklete metoden gir at temperaturene på baksiden av taktrao til luftespalte SA og NA er lavere enn utetemperaturen henholdsvis 63 % og 66 % av tiden. Midt i spalteluften er de tilsvarende tallene for luftespalte SA og NA henholdsvis 58 % og 63 % av tiden. Tallene indikerer en betydelig periode med underkjøling, i likhet med funnene for ZEB-laboratoriet (se kapittel 4.1.4).

Størrelsesordenen til tallene ser også ut til å samsvare med funnene til Bunkholt, Gullbrekken og Kvande (2020), som også studerte luftespaltene SA og NA på ZEB Test Cell. Der ble det funnet at tilsvarende andeler av tiden med undertemperaturer var mellom 40 og 50 % i perioden mars 2016. I studien ble det også valgt ut to perioder, en med og en uten snø på taket. I perioden Desember 2017 var det ikke snø på taket, og andelen av tiden med undertemperaturer var over 90 %. I Februar/Mars 2018 var det snø på taket, og her var andelen omtrent 20 % for SA og under 10 % for NA. De to periodene med og uten snø viser er svært tydelig forskjell i tiden med underkjøling. Den mest nærliggende forklaringen er som tidligere nevnt at snøen vil isolere slik at lite varmestråling fra taket mot himmelen vil forekomme. Den isolerende effekten vil selvfølgelig variere med snødybden. I den analyserte perioden for februar/mars 2020 i denne oppgaven er ikke snøforholdene på taket kjent. Det er imidlertid svært sannsynlig at taket har hatt snø deler av perioden. Dette kan sannsynliggjøres ved at webkamera-bilder fra ZEB-laboratoriet viser snø deler av tiden (se kapittel 3.5). Siden ZEB-laboratoriet kun ligger 60 m unna ZEB Test Cell på det nærmeste, er det grunn til å tro at snøforholdene vil være relativt like. Det bør imidlertid merkes at takene har forskjellig takhelning og tekning, og at det derfor kan være ganske ulik mengde snø som sklir av. ZEB-laboratoriet har dessuten to snøfangere, mens ZEB Test Cell ikke har snøfangere. Resultatene viser at perioden februar/mars 2020 har undertemperaturer omtrent 60 % av tiden, som er ganske midt mellom andelene i periodene med og uten snø hos Bunkholt, Gullbrekken og Kvande (2020). Dette er med å sannsynliggjøre at det har vært snø på taket deler av tiden.

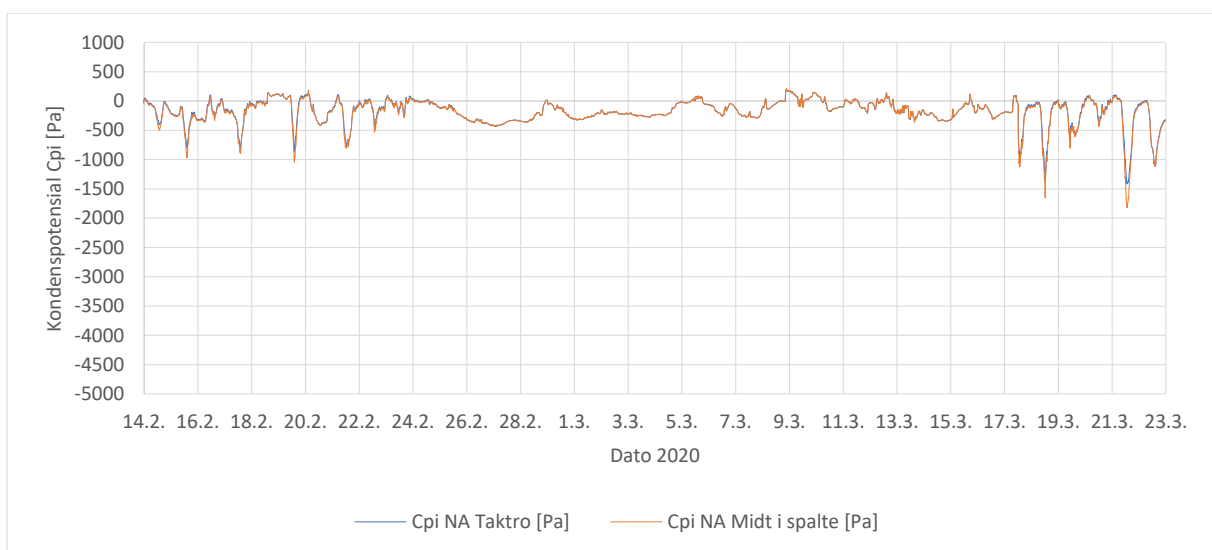
Resultatet fra den mer avanserte metoden der kondenspotensialet studeres er vist i Figur 46 og Figur 47, der førstnevnte viser spalte SA og sistnevnte viser spalte NA. Det observeres for begge spaltene at det er en positiv C_{pi} deler av tiden, som indikerer at det er potensiale for kondens i disse periodene. Det er positiv C_{pi} på baksiden av taktrao til SA og NA henholdsvis 17 % og 18 % av tiden. Det kan også observeres at SA har store negative bunner på enkelte dager. Disse periodene sammenfaller med perioder med høye temperaturer. Dette er som ventet, ettersom taket mot sør mottar betydelig mer solstråling enn taket mot nord. Det kan imidlertid observeres at det er mellomstore bunner

på NA sin graf på de samme dagene som SA sin graf har store bunner. Dette kan indikere at taket mot nord mottar noe solstråling, eller at vind fra sør sørger for at luft med høy temperatur i spalten i sør overføres til spalten i nord. Det sistnevnte er et mulig scenario siden spaltene ikke har åpning ved mønet, og at lektene i spaltene SA og NA er gjeret sammen i toppen slik at det blir helt tett.

Resultatene i Figur 46 og Figur 47 er også i tråd med resultatene til Bunkholt, Gullbrekken og Kvande (2020). I nevnte studie ble det funnet tilsvarende negative bunner som sammenfalt med høye temperaturer i spaltene. Det ble også funnet at dalbunnene var langt dypere for SA enn NA. I tillegg ble det funnet at NA hadde en litt høyere periode med positiv Cpi enn SA. De tre nevnte funnene forfatterne nevner er altså sammenfallende med funnene i denne oppgaven. Bunkholt, Gullbrekken og Kvande (2020) skriver at de tre nevnte forholdene gjør at nordsiden av taket er mer utsatt for kondens enn sørsiden. Forfatterne spesifiserer også at Cpi er funnet å være svært avhengig av temperaturforholdene i spalten. Også dette støttes av funnene i denne oppgaven.



Figur 46: Kondenspotensial Cpi [Pa] for luftespalte SA i perioden 14. februar til 23. mars.



Figur 47: Kondenspotensial Cpi [Pa] for luftespalte NA i perioden 14. februar til 23. mars.

4.3 Erfaringer fra databehandlingen

Under arbeidet med behandlingen og analyseringen av data har det dukket opp noen uforutsette situasjoner. Dette er i korthet gjengitt i de følgende avsnittene. Det er ønskelig å gjøre dette slik at andre som skal gjøre slike analyser er klar over forholdene før man går i gang med arbeidet, slik at feil kan unngås og tid kan spares.

Gateways

Gatewayen har blitt flyttet mange ganger under arbeidet. I begynnelsen var Gatewayen plassert i bygget til SINTEF i Høgskoleringen 7b. På dette tidspunktet var det 7 sensorer på bygget, 5 på nordfasaden og 2 på taket. Loggingen fungerte stort sett fint. Ved plassering av sensorer i sør- og østfasaden begynte det imidlertid å bli ustabile loggninger, og som følge av dette ble det besluttet å flytte Gatewayen inn i selve bygget. Grunnen til dette var antagelsen om at avstanden mellom Gatewayen og sensorene var for stor. Gatewayen ble plassert ved heissjakten i øverste etasje. Denne plasseringen ble valgt av praktiske årsaker, da dette var plasseringen som skapte minst problemer for håndverkerne på bygget kombinert med tilgang på strøm fra strømskap. Loggingene ble mer stabile, og følgelig var det fornuftig å flytte Gatewayen slik at avstanden ble mindre.

Etter dette skulle de to siste sensorene plasseres på vestfasaden (MW1 og MW4). Det viste seg umiddelbart at den nederste av de to (MW4) ikke logget, og den ble derfor skiftet ut med en annen sensor. Den nye sensoren logget imidlertid heller ikke, og følgelig ble det bestemt at det skulle settes ut en til Gateway på bygget, som kunne stå nærmere denne sensorplasseringen. MW4 begynte nå å logge til den nye Gatewayen, og dermed så problemet ut til å være løst. Imidlertid ble det oppdaget at begge Gatewayene logget de fleste av sensorene, men at loggingene ble veldig ustabile. Tre ulike forhold skjedde om hverandre: 1) Begge Gatewayene tok imot signaler fra de samme sensorene samtidig, 2) De tok imot signaler fra hver sine sensorer og 3) Ingen av Gatewayene tok imot signaler. Dermed var det ikke lenger noen systematikk i loggingene, og det ble både situasjoner med hull i dataene samt situasjoner der data måtte sankes fra begge Gatewayene. Dette skapte åpenbart en uønsket situasjon, og det ble derfor besluttet å koble ut den ekstra Gatewayen som ble montert. Dette førte igjen til at sensoren MW4 ikke logget data, men det ble besluttet at det var bedre å ha 11 sensorer som logger bra enn å ha 12 sensorer som logger helt usystematisk.

Produsentene av sensorene oppgir at det interne minnet på 64 kB gjør at sensorene kan lagre data i perioder uten forbindelse med Gatewayen, for deretter å sende dataene når forbindelsen gjenopprettes. Dette viste seg å fungere dårlig når det var to aktuelle Gatewayer å sende til. Det er flere perioder i datasettet med store hull, der det ikke er logget til noen av Gatewayene. Det har også hendt at flere ganger at Gatewayene har blitt koblet ut av strømmen, trolig for å frigjøre strøm til verktøy. Etter disse periodene har det både vært tilfeller av at hullene har blitt tettet og at de ikke har blitt det.

Det er to anbefalinger som gis for fremtidige lignende studier på bakgrunn av erfaringene som er beskrevet over. Det ene er å planlegge plasseringen av Gatewayen nøye på forhånd, og sørge for at denne er plassert mest mulig sentralt mellom sensorene. Det er også viktig å sørge for at plasseringen er minst mulig i veien for håndverkene på byggeplassen, og gjerne sørge for at den har sin egen strømkabel. Det ble observert at rekkevidden var langt kortere enn oppgitt fra leverandør i mange tilfeller. Det ser ut til at bygningsdeler som vegger, tak, vinduer og dører begrenser rekkevidden i betydelig grad.

Den andre anbefalingen er å ikke bruke to Gatewayer til å samle inn data på det samme bygget. Man burde heller planlegge sensorplasseringen slik at alle sensorene kan stå i rimelig avstand fra en sentralt plassert Gateway. Fordelene ved å bruke to Gatewayer blir motvirket av problemene dette skaper.

Tid og klokke

Bruken av to Gatewayer førte imidlertid til oppdagelsen av et nytt problem, som ellers trolig ikke hadde blitt oppdaget. Når målinger fra de to Gatewayene ble sammenlignet for de samme sensorene, ble det observert en faseforskyvning på 1 time. Det ble oppdaget at faseforskyvningen skyldtes at den ene Gatewayen brukte GMT-tid, mens den andre Gatewayen brukte UTC+1 tid. Siden værdataene bruker UTC+1 tid vil det bli feil å sammenligne værdataene med sensordata med GMT-tid. Oppdagelsen av dette problemet var derfor viktig.

Tidspunktene som var hentet fra Gatewayen med GMT-tid ble korrigert med én time i de aktuelle Excel-arkene, slik at det ble oversatt til UTC+1 tid. Etter at dette var gjort kunne man observere at det var svært lite avvik mellom dataene fra de to Gatewayene. Klokken til den aktuelle Gatewayen ble også rettet, slik at man skal unngå å støte på samme problem ved fremtid bruk av denne. Dette viste seg også å ha tilbakevirkende kraft, slik at all data som nå lastes ned blir riktig. Det gjelder uavhengig av om man laster ned data fra perioder før eller etter at klokken til Gatewayen ble fikset. For de som skal utføre lignende studier i fremtiden anbefales det å sjekke klokken til værstasjonen og aktuell Gateway nøye før man går i gang med analysene. Slik kan man unngå å bruke mye tid på å korrigere i etterkant.

5 Diskusjon

Diskusjonsdelen i denne oppgaven består av 4 underkapitler. I kapittel 5.1 vil den høye observerte temperaturen øverst på nordfasaden bli behandlet. Det presenteres noen mulige forklaringer på det overraskende funnet. I de neste tre delkapitlene vil de tre forskningsspørsmålene i denne oppgaven bli behandlet hver for seg. Det presiseres at forskningsspørsmålene evalueres utifra de to instrumentere byggene i denne oppgaven, og at visse begrensinger ligger til grunn. Klimastedet til denne studien er Trondheim, som er et middels hardt klima i norsk sammenheng. Det er gitt ulike analyseperioder fra ulike årstider, der den lengste perioden er 38 dager. Videre opplyses det at ZEB-laboratoriet er under bygging per dags dato, og at dette kan innvirke på resultatene.

5.1 Høy temperatur øverst på nordfasaden

Sensoren MN1 viser seg å måle langt høyere temperaturer enn de fire andre sensorene på nordfasaden. De fire andre sensorene er plassert på nederste halvdel av fasaden, og dette kan gjøre at de høye temperaturene på MN1 skyldes den høye plasseringen. Det viser seg at temperaturdifferansen mellom MN1 og uteluften korrelerer med solstrålingen. Det er funnet tre mulige forklaringer som baserer seg på at solstrålingen bidrar indirekte. Det er imidlertid også foreslått en fjerde mulig forklaring som ikke er relatert til solstråling, og som følgelig baserer seg på at korrelasjonen ikke medfører kausalitet.

En mulig forklaring kan være at varme fra luften i takets luftespalte sprer seg en viss avstand ned i luftespalten på nordfasaden. Dette kan være mulig fordi luftespalten til taket og nordfasaden møtes ved nordre gesims (se Figur 18 i kapittel 3.2.3). Dette er allikevel ikke så veldig sannsynlig, siden MN1 er såpass langt under punktet der luftespaltene møtes, og oppdriftskrefter vil gjøre at varm luft stiger.

En annen mulig forklaring kan være at beslaget helt øverst på taket kan motta mye solstråling, som dermed kan bidra til å varme opp spalteluften en viss avstand nedover nordfasaden. Dette er imidlertid heller ikke så sannsynlig, av sanne grunn som i det foregående avsnittet.

En tredje mulig forklaring kan være at øvre del av nordfasaden kan motta reflektert solstråling fra sørfasaden til et bygg som ligger i nord. Dette bygget (Realfagbygget på Gløshaugen) sin sørfasade består i stor grad av hvit betong og glass. Dette vil gi mye refleksjoner i perioder med mye sol. Mellom ZEB-laboratoriet og Realfagbygget ligger et bygg på 2 etasjer (Lerkendalsbygget), som vil hindre at disse refleksjonene når størstedelen av nordfasaden til ZEB-laboratoriet. Dette kan forklare hvorfor MN1 har så mye høyere temperaturer, siden det kun er den øverste delen av fasaden som kan motta refleksjonene fra Realfagbygget. Når direkte eller reflekterte solstråler treffer en fasade med luftet kledning, vil dette kunne skape termisk oppdrift i spalten (skorsteinseffekt). Hvis hele fasaden hadde vært utsatt for like mye (reflektert) solstråling, ville det være naturlig å forvente en lineær temperaturfordeling som følge av skorsteinseffekten. Følgelig er temperaturfordelingen i seg selv også en indikasjon på at øvre del av fasaden kan motta mer varmestråling enn nedre del. Korrelasjonen mellom temperaturen til MN1 og solstrålingen kan være med å styrke denne hypotesen. For å undersøke hypotesen nærmere har bilder fra byggeplassens webkamera i perioder med sol blitt studert. Det ble ikke observert en fargeforskjell på nordfasaden i perioder med sol, slik det kunne forventes at det var dersom nordre del mottok en større mengde reflektert solstråling mens nedre del ikke gjorde det. Dette er med på å svekke hypotesen. På den andre siden kan det

tenkes at den mørke fargen på kledningen i seg selv kan gjøre det vanskelig å observere denne fargeforskjellen.

En fjerde mulig forklaring kan være at det er varme fra innsiden av bygget som på en eller annen måte lekker ut gjennom konstruksjonen, og dermed kan varme opp spalteluften. Teoretisk sett kan dette foregå gjennom for eksempel kuldebroer eller luftlekkasjer. Større oppvarming av bygget på dagtid enn resten av døgnet kunne forklart hvorfor det ble observert en korrelasjon med solstråling, uten at dette hadde en sammenheng. Informasjon fra byggeprosjektet viser imidlertid at denne mulige forklaringen er lite sannsynlig for denne perioden.

Ettersom alle de mulige forklaringene viser seg å være mindre sannsynlige, forblir dette resultatet heftet med stor usikkerhet. Det kan tenkes at det er en kombinasjon av forklaringer som bidrar til den høye temperaturen. Det er også sannsynlig at forklaringer som ikke er nevnt her kan være med å bidra. Det anbefales å følge med på temperaturen til MN1 nøye. Når data fra de tre termoelementene i nærheten (TN1) kan innhentes vil disse gi svært verdifull data som kan brukes til å sammenligne. Temperaturene på overflaten av vindspærren og baksiden av kledningen vil kunne være med å styrke eller svekke hypotesene som er fremsatt i denne oppgaven.

Dersom reflekterte solstråler fra bygget i nord bidrar til den høye temperaturen i toppen av feltet (MN1), er dette interessant av en annen grunn i tillegg til det som angår forholdene i spalten. På toppen av nordfasaden, like over MN1 sin plassering, er det et felt med solceller. Det er svært uvanlig å installere solceller mot nord, på grunn av den korte tiden panelene får med direkte solstråling. Det er kun i sommerhalvåret paneler mot nord kan motta direkte solstråler, og det er kun snakk om noen få timer på starten og slutten av dagen med svak sol. På ZEB-laboratoriet er det likevel valgt å installere solceller mot nord, hovedsakelig fordi det er interessante forskningsdata å samle inn. Dersom øverste del av nordfasaden faktisk mottar en større mengde reflekterte solstråler slik temperaturmålingene til MN1 kan åpne for, vil dette kunne føre til et vesentlig tillegg i strømproduksjonen på disse panelene. Det er fra før kjent at reflekterte solstråler fra snø kan bidra til at solceller produserer mer strøm. Dersom man senere observerer strømproduksjon fra disse panelene midt på dagen, vil det være mulig å konstatere at øverste del av nordfasaden mottar en nevneverdig mengde reflektert solstråling.

5.2 Forskningsspørsmål 1

Forskingsspørsmål 1 er: *Hvilke temperatur- og fuktforhold kan oppstå i luftespalten bak kledning og tekning?*

På ZEB-laboratoriet er det observert temperaturer opptil 20-25 grader høyere enn utetemperaturer i de analyserte periodene på våren (februar/mars og april). Dette indikerer at solstråling har stor evne til å varme opp spalteluft, også for store og kontinuerlige luftespaltene som det er på ZEB-laboratoriet. Det er grunn til å tro at spaltetemperaturene ville vært varmere enn 20-25 over utetemperaturer på sommeren. I de analyserte periodene på våren er det imidlertid langt vanligere at spaltetemperaturer er 5-10 grader høyere enn utetemperaturer. Resultatene viser også at orientering spiller en avgjørende rolle på temperaturene. Taket og sørfasaden har de høyeste registrerte temperaturene i perioden, mens alle sensorene på nordfasaden unntatt MN1 viser temperaturer som er svært like utetemperaturer. For MN1 sin del viser imidlertid resultatene at spaltetemperaturen kan avvike sterkt fra de andre sensorene med den samme himmelretningen. Dette indikerer at himmelretning alene ikke er nok til å forutsi størrelsesorden på spaltetemperaturene. På den andre siden bekreftes det likevel at himmelretning er en parameter av stor viktighet.

På ZEB Test Cell sitt tak er det observert temperaturer omtrent 40 grader høyere enn utetemperaturer i den analyserte perioden på sommeren. Dette indikerer at taket mottar mye solstråling. Resultatet er som ventet, ettersom luftespaltene bare er 48 mm høye. Dette medfører at luftvolumet som varmes opp er relativt lite, og følgelig kan det oppstå høye temperaturer særlig i vindstille perioder. Den høyeste temperaturen i spalteluften og på baksiden av taktraa ble målt til henholdsvis 58 °C og 65 °C. Dette bekrefter at luftespalter på tak kan bli utsatt for svært høye temperaturer, også så langt nord som Trondheim.

Det observeres imidlertid også perioder med underkjøling. For taket på ZEB-laboratoriet ble det observert lavere temperaturer i spalteluften enn utetemperaturer 42 % og 63 % av tiden for henholdsvis toppen og bunnen av taket. På ZEB Test Cell var de tilsvarende tallene midt i spalteluften 58 % og 63 % for henholdsvis søndre og nordre del av taket i den samme perioden. Lavere temperaturer i spalten enn utetemperaturer er isolert sett ikke et problem for luftespaltens tilgrensende materialer. Problemet er imidlertid at underkjøling kan føre til kondens på luftespaltens ytterste sjikt, som dermed kan dryppe av og fukte opp spaltens lekter og undertak.

Sensormålinger av relativ luftfuktighet på ZEB-laboratoriet viser nivåer over 80 % større andeler av tiden. Dette er over den forenklete kritiske grensen, og viser at RF-nivåene bør følges nøye fremover. Det presiseres at bygget ikke er ferdig bygget, og at det derfor er mulig at utettheter i bygningskroppen kan bidra til noe høyere fuktnivåer enn hva som kan forventes senere.

Verdiene for trefukt gir imidlertid en god indikasjon på om luftespaltene har en uttørkende effekt på lektene eller ikke. Resultatene fra taket viser at det er en stor uttørkende effekt, der trefuktnivået går fra omtrent 37 % til omtrent 25 % og 27 % på slutten av den 38 dager lange analyseperioden. Dette er en betydelig uttørking, og viser at den aktuelle luftespalten på taket fungerer etter hensikten. Det bør imidlertid presiseres at 37 % startfuktighet i lektene er langt høyere enn hva som anbefales. Den høye startfukten skyldes trolig at beslagsløsningen ved nordre gesims ikke var på plass før en stund etter at panelene på taket var montert. Det er derfor sannsynlig at lektenes fuktnivå ved montering var innenfor anbefalingene. Resultatene viser imidlertid viktigheten av å få på

plass beslagstøsnings innen rimelig tid. En mindre og annerledes utformet luftespalte enn den på taket av ZEB-laboratoriet ville muligens ikke kunne gi en tilsvarende uttørking for en tilsvarende periode.

Trefuktnivåene for fasadene viser sakte uttørkende eller stabile nivåer, både litt over og litt under den kritiske grensen på 20 %. Det presiseres at de analyserte periodene ikke nødvendigvis er lange nok til å vurdere uttørkingsforholdene grundig. Det presiseres også at resultatene fra lektene bak solcellene må tolkes med forsiktighet, siden impregneringen i lektene kan påvirke resultatene. Eksempelvis kan ikke resultatet til MW1 brukes, da det er antatt at noe må være galt med målingene. Likevel tyder resultatene fra de andre sensorene på fasadene (alle unntatt MW1) at det ikke er noen oppfukning. Resultatene viser at noen av trefuktnivåene er høyere enn ønskelig, men dersom dette begrenser seg til byggeperioden er det trolig uproblematisk. Det anbefales å følge nøye med på målingene av trefukt.

En analyse av absolutt fuktnivå (g/kg) i luftespalten på taket av ZEB-laboratoriet viste at dette nivået periodevis var både høyere og lavere enn absolutt fukt i uteluften. Ergo viser funnene at luftespaltens tilgrensende materialer blir utsatt for en annen fuktskyklus enn materialene som er direkte eksponert for uteklime. Funnene viste at spalteluften enkelte dager har mange ganger høyere fuktnivå enn uteluften, og forklaringen på dette er trolig at mye solstråling fører til fordamping av fritt vann i luftespalten. Dette viser at store luftespalter som mottar mye soltilskudd, som taket på ZEB-laboratoriet representerer, kan ha en stor evne til å ventilere ut fukt. Dette kan være svært fordelaktig. Det antas imidlertid at en fungerende utlufting i toppen er avgjørende for å sørge for at fukten faktisk ventileres ut. I taket på ZEB Test Cell er det ikke installert måleinstrumenter for å måle fukt. I analysene av underkjøling på ZEB Test Cell er det derfor brukt en antagelse om at absolutt fukt i uteluften er lik absolutt fukt i spalteluften. Resultatene fra ZEB-laboratoriet viste at dette ikke var tilfelle for ZEB-laboratoriet, og at en tilsvarende antagelse der ville gitt en uakseptabel feilmargin. Det er imidlertid grunn til å tro at feilmarginen for ZEB Test Cell blir langt mindre, ettersom luftespaltene er mye mindre i alle dimensjoner. Dermed blir det trolig langt mindre fordamping i spalten. Det er likevel mest fordelaktig å installere sensorer for relativ luftfuktighet dersom mest mulig presise analyser av kondenspotensial skal gjennomføres.

For å oppsummere viser resultatene at luftespalter kan oppnå betydelig høyere temperaturer og fuktnivåer enn uteluften. Det vises også at luftespalter kan oppnå lavere temperaturer og fuktnivåer enn uteluften. Resultatene er i hovedsak som forventet.

5.3 Forskningsspørsmål 2

Forskningsspørsmål 2 er: *Hvordan henger temperatur- og fuktforhold i luftespalten sammen med værforhold på stedet?*

Resultatene viser mange tilfeller der spaltetemperaturene er en del høyere enn utetemperaturer på dagtid. Dette observeres både for ZEB-laboratoriet sitt tak og fasader mot sør, øst og vest, samt ZEB Test Cell sitt tak. Grafene som viser dette viser en klar korrelasjon mellom disse temperaturdifferansene og solstrålingen, altså at økt solstråling gir økende forskjell mellom spaltetemperaturene og utetemperaturer. I godt isolerte bygg, som de to instrumenterte byggene er, er det solstråling som står for det aller største varmetilskuddet til luftespalten. Følgelig er korrelasjonen helt som ventet. Solstilstråling medfører imidlertid også at en skorsteinseffekt oppstår i en luftespalte. Dette vil kunne virke kjøleende på spalteluften, siden varme da ventileres ut i toppen av spalten. Ergo ville temperaturene trolig vært enda høyere i de nevnte luftespaltene dersom det ikke hadde vært mulighet for utlufting, altså at spalten hadde vært helt lukket. Hvor mye høyere temperaturene ville vært, er imidlertid vanskelig å anslå utifra denne studien.

Vind påvirker spaltetemperaturene på flere måter. Dersom spaltetemperaturene er høyere enn utetemperaturer, vil vind ha en kjøleende effekt. Dersom spaltetemperaturene er lavere enn utetemperaturer, vil vind kunne varme opp spalteluften. Sistnevnte effekt vil sannsynligvis være mindre enn førstnevnte. Forenklet sett vil høyere vindhastighet gi et større luftskifte i spalteluften, særlig dersom vinden kommer mot den aktuelle spalten. Dermed vil høyere vindhastighet gjerne medføre at spaltetemperaturene påvirkes. Resultatene viser enkelte grafer der det er mulig å observere at høyere vindhastighet gir lavere temperaturer enn dager med samme mengde solstråling og mindre vind. Dette indikerer at vinden kan ha en viktig avkjøleende effekt.

I analysen av underkjølingen på taket av ZEB-laboratoriet er det vist snødata, som er laget ved å studere byggeplassens webkameraer. I den analyserte perioden er det snø på deler av taket i deler av perioden. Teoretisk sett vil snø på taket redusere faren for underkjøling, da snøen i seg selv vil isolere. Det har imidlertid ikke vært mulig å observere denne effekten i særlig grad. Det er likevel rimelig å anta at denne effekten vil være tilstede.

Beregninger av drivtrykket fra vind og temperaturdifferanser på taket til ZEB-laboratoriet viser at det kan oppstå relativt store drivtrykk fra begge fenomenene, og at drivtrykkene er jevnstore. Følgelig er begge drivtrykkene svært relevante for dette taket. Drivtrykk fra vind kan skape et stort luftskifte hvis vinden kommer fra sør eller nord. Sterkere vinder enn det som er observert i den analyserte perioden vil kunne gi enda større drivtrykk fra vind. Drivtrykk fra temperaturdifferanser, som i hovedsak forårsaket av sol, viser at soltilskudd har en stor evne til å ventilere ut luft på dette taket. På samme måte som for vind vil økt temperaturdifferanse (som følge av økt solstråling) gi enda større drivtrykk fra temperaturdifferanser. Følgelig vil det være interessant å beregne drivtrykkene utifra høye verdier for vindhastighet og solstråling som observeres gjennom et år.

Fuktforhold i en luftespalte er som nevnt i kapittel 2.3.2 en svært kompleks prosess. Nedbør, snøsmelting, sol og vind er eksempler på værforhold som i stor grad påvirker fuktforholdene. Resultatene for absolutt fuktnivå i spalteluften på taket av ZEB-laboratoriet viste at det var stor korrelasjon med solstrålingen. Den mest sannsynlige forklaringen på dette er trolig at solvarmen gjør at fritt vann i spalten fordampes. Resultatene viser også at solstrålingen korrelerer med store negative dropp i kondenspotensial (C_{pi}), samt store tilsvarende dropp i RF. Resultatene er helt som ventet, og viser at solstråling er en viktig parameter for fuktforholdene. Det er likevel viktig å merke seg at

solstrålingens innvirkning på fuktnivåene er indirekte, da det er temperaturene som er det avgjørende for fuktnivåene. Vind vil kunne bidra til å redusere fuktnivåene ved å skape luftskifte i luftespalten. Det er imidlertid ikke gjort noen analyser av sammenhengen mellom vind og fuktnivåer.

For å oppsummere viser resultatene en sterk korrelasjon mellom solstråling og temperaturdifferansene mellom spaltetemperaturer og utetemperaturer. Videre viser resultatene eksempler på at vind har en avkjølende effekt på spaltetemperaturene. Beregning av drivtrykk for luftskiftet i taket på ZEB-laboratoriet bekrefter at både drivtrykket fra vind og sol er relevante for dette taket.

5.4 Forskningsspørsmål 3

Forskningsspørsmål 3 er: *Hva betyr klimaet i luftespalten for materialvalg og design?*

ZEB-laboratoriet har flere utradisjonelle luftespalter, som gjør at det er ekstra interessant å se funnene fra analysene opp mot dette. Det mest karakteristiske med ZEB-laboratoriet er kanskje den store bruken av BIPV. Bruk av BIPV gjør at panelene blir utsatt for klimaet i luftespalten, mens bruk av vanlige solceller gjerne er slik at panelene er omringet av uteluft på alle kanter. Siden effekten til panelene reduseres ved økte temperaturer, er temperaturer bak BIPV av spesiell interesse. For både BIPV og vanlige typer solceller er det ønskelig å orientere panelene slik at de mottar mest mulig solstråling. I begge tilfeller oppnås de mest optimale forholdene med en skrå vinkel mot sør, dersom panelene skal stå i ro. Ettersom mengden skyggende objekter minker i høyden, er tak ofte den beste plasseringen for alle typer solceller på mange bygg. Dersom det er ønskelig med solceller på en fasade, vil det være mest fordelaktig å orientere disse mot sør dersom det ikke er betydelig skyggende objekter der.

Resultatene for fasadene med BIPV viser at temperaturene i luftespaltene bak sørfasaden er høyere enn temperaturene bak øst- og vestfasaden. Dette er som ventet, siden sørfasaden mottar solstråling med høyere intensitet. Med tanke på at panelenes effektivitet reduseres når temperaturene økes, kan dette tyde på at plassering av BIPV på øst- og vestfasader kan være gunstig. Dersom det antas uniforme skjermingsforhold, vil BIPV mot sør imidlertid motta mer solstråling enn BIPV mot øst- og vest. Dette taler i den andre retningen. Det vil derfor være ønskelig å samle inn mer data på spaltetemperaturer bak BIPV på fasader med ulike himmelretninger. Dersom nok data blir tilgjengelig, vil det bli mulig å regne på lønnsomheten av ulike BIPV-plasseringer når luftespaltene evne til å transportere bort varme tas hensyn til.

På ZEB-laboratoriet er det generelt store luftespalter i alle dimensjoner. Luftespaltene er uavbrutte fra topp til bunn, fra side til side, og er opplettet til en stor høyde/dybde. Det er både fordeler og ulemper med denne løsningen. En fordel er at luftvolumet blir stort. Panelene på taket vil motta et stort varmetilskudd i form av solstråling, som delvis vil gå til å varme opp spalteluften gjennom konveksjon. Teoretisk sett vil et større luftvolum medføre at mer luft må varmes opp med den samme mengden solstråling. Dermed vil en stor spalte kunne få lavere temperaturer enn en liten spalte, siden den gitte varmen fra panelene må fordeles på en større mengde luft. Dette resonnetet tar imidlertid kun utgangspunkt i solvarmen som er tilført panelene, men ulik spalteutforming vil også påvirke andre parametere, som for eksempel luftskifte som følge av vind.

En stor luftespalte vil kunne endre drivtrykket fra vind på flere måter. Ettersom luftespaltene på bygget er store felt fra side til side, er det mulig med betydelig luftstrømming sideveis. Dette er en effekt som ofte neglisjeres ved beregning av drivtrykk fra vind i luftespalter. I tillegg skaper krysslektingen mindre strømlinjeformede spalter. BIPV-kledningen på fasadene monteres med åpne fuger. Teoretisk sett gjør dette at vind kan entre luftespalten på mange ulike plasseringer samtidig. Til sammen medfører det nevnte at det er usikkert hvilken effekt vinden vil ha på de store luftespaltene på ZEB-laboratoriet.

Resultatene fra studien viser som nevnt relativt høye temperaturer i luftespaltene som mottar sollys, men det kan ikke fastslås om temperaturene hadde vært høyere eller lavere med mindre spalter. Store luftespalter krever mer materialer og større tykkelser på konstruksjonsdeler. Følgelig er det viktig å vurdere nøye hvilke størrelser på luftespalter som er nødvendig for å sikre akseptable hygrotermiske forhold i hvert enkelt prosjekt. På

sikt vil det være mulig å få på plass retningslinjer for luftespalter på store tretak, slake tretak og luftespalter bak BIPV, men det er da viktig at anbefalingene er basert på avveininger mellom de ulike forholdne.

Resultatene for BIPV-taket til ZEB-laboratoriet viser temperaturer øverst på taket som er svært mye høyere enn utetemperaturen, også når årstiden tas i betraktning. Ettersom det er en stor temperaturforskjell mellom toppen og bunnen av taket er det en stor skorsteinseffekt tilstede. Det er forventet at forskjellene vil være større om sommeren. Strømproduksjonen på panelene er størst når det er mye sol, særlig på sommeren. Dermed ser det altså ut til at den avkjølende effekten av luftespaltene er størst når det er størst behov, altså i perioder med mye sol. Taket er et stort skrått tretak, der lengden mellom luftespaltenes inntak og utløp er omtrent 18,5 meter. Skorsteinseffekten som skapes er en funksjon av høyden mellom inntak og utløp, og følgelig blir den svært stor. Samtidig blir det et stort luftvolum som skal skiftes ut når luftespalter blir så store. Dermed er det to effekter som taler hver sin vei for at store luftespalter er gunstige bak BIPV. Det er mulig at det kunne vært fordelaktig å dele opp luftespalten på midten av taket. Dette er noe det er mulig å regne på, men da er det viktig å også ta hensyn til vindens effekt og strømningsforholdene i spalten. Det bør også presiseres at brannhensyn gjerne taler for oppdelte luftespalter.

Den mer avanserte analysen av underkjøling viste også at taket på ZEB Test Cell har lengre perioder med kondenspotensial, i tråd med funn fra Gullbrekken, Kvande og Time (2017) og Bunkholt, Gullbrekken og Kvande (2020). Underkjøling på taket av ZEB Test Cell er trolig et mindre problem, ettersom taktroa består av OSB-plater som har en viss evne til å lagre fukt som kan tørke ut i varmere perioder. På ZEB-laboratoriet er det imidlertid naturlig å anta at underkjøling vil være et større problem. Dette er fordi solcellepanelene ikke har evne til å lagre fukt, og eventuell kondens på baksiden av panelene derfor vil dryppe ned. Dette vil kunne skape store mengder fukt i luftespalten. På ZEB-laboratoriet har undertaket en asfalttekning, slik at selv store mengder kondensvann vil kunne renne av som på et vanlig tak med asfalttekning. Det anbefales å følge med på situasjonen til taket fremover. Spesielt anbefales det å bruke data fra termoelementene på baksiden av solcellepanelene til å fastslå mengden underkjøling mer presist. Resultatene viser viktigheten av å vurdere alle materialsjikt i luftespalten nøye. Dersom det benyttes taktekning som ikke kan lagre fukt, for eksempel solcellepaneler, er det svært viktig å vurdere materialegenskapene til både lektene og undertaket nøye. Løsningen på ZEB-laboratoriet vil trolig fungere godt, ettersom asfalttekningen på undertaket i utgangspunktet er helt tett og lektene viser en sterk uttørkende tendens. Løsningen på ZEB Test Cell fungerer trolig også godt, ettersom taktroa har evne til å lagre fukt. Kondenspotensialet som er funnet viser imidlertid at undertakets og vindsperrers materialegenskaper må vurderes nøye i tilsvarende takkonstruksjoner for å oppnå en fuktsikker og bestandig løsning.

Resultatene fra studien av de vindstille periodene på sommeren på ZEB Test Cell viste at vinden er en viktig drivkraft, selv i perioder med lite vind og mye sol. Resultatene viste generelt lave spaltehastigheter i disse periodene. Dersom det er ønskelig å bygge tak uten utlufting ved mønet på vindstille steder, kan det vært lurt å vurdere orienteringen av bygget i en tidlig fase. På denne måten kan det sørges for at luftespaltene er orientert slik at vinden blåser mot spaltene en større andel av tiden.

6 Konklusjon

I denne oppgaven har fukt- og temperaturforholdene i luftespaltene på to bygg i Trondheim blitt studert. Det er gjort analyser fra ulike årstider, og resultatene må tolkes på bakgrunn av dette. Under vil det konkluderes på bakgrunn av hvert forskningsspørsmål.

Forskningsspørsmål 1 er: *Hvilke temperatur- og fuktforhold kan oppstå i luftespalten bak kledning og tekning?*

På begge byggene viste resultatene at luftespalter kan oppnå betydelig høyere temperaturer enn uteluften. På ZEB-laboratoriet ble det observert temperaturer 20-25 grader høyere enn utetemperaturen på vinter og tidlig vår. På ZEB Test Cell ble det observert temperaturer 40 grader høyere enn utetemperaturen på sommeren. Det konkluderes derfor med at høye temperaturer kan oppstå i luftespalter på bygg forholdsvis langt mot nord, slik byggene i Trondheim representerer.

På ZEB-laboratoriet viste trefuktmålingene i lektene tidvis høye verdier. Trelektene på taket hadde en fuktighet på 37 % i starten av analyseperioden på vinteren. Disse lektene tørket ut til omtrent 25 % og 27 % iløpet av 38 dager, og det konkluderes dermed med at dette taket har en stor evne til uttørking. Trefuktmålingene på fasadene viste flere verdier over den kritiske grensen på 20 %. Det konkluderes med at trefuktnivåer på over 20 % må kunne forventes i en byggefase som følge av at konstruksjonsdelene ofte ikke er helt lukket.

Resultatene viste også lange perioder med spaltetemperaturer lavere enn utetemperaturen på begge byggene. En beregning for taket på ZEB Test Cell viste et kondenspotensial store deler av tiden. Det konkluderes med at det kan oppstå betydelig underkjøling på tak i Trondheim, og dermed også på steder med lignende klima.

Forskningsspørsmål 2 er: *Hvordan henger temperatur- og fuktforhold i luftespalten sammen med værforhold på stedet?*

På takene og fasadene som mottok sol ble det ble observert en klar korrelasjon mellom solstrålingen og differansen mellom spaltetemperaturene og utetemperaturen. Resultatene viser enkelte grafer der det er mulig å observere at høyere vindhastighet gir lavere temperaturer enn dager med samme mengde solstråling og mindre vind. Dette indikerer at vinden kan ha en viktig avkjølende effekt. Fuktforholdene er også funnet å korrelere med solstråling i flere tilfeller, og bekrefter derfor at solstråling er en relevant værparameter for både temperatur- og fuktforhold. Det konkluderes med at både sol- og vindforhold er viktig for temperatur- og fuktforholdene i en luftespalte. Beregninger av drivtrykket fra vind og oppdrift på taket til ZEB-laboratoriet viser at det kan oppstå relativt store drivtrykk fra begge fenomenene, og at drivtrykkene er jevnstore. Det konkluderes dermed med at begge drivtrykkene er relevante for dette taket.

Forskningsspørsmål 3 er: *Hva betyr klimaet i luftespalten for materialvalg og design?*

Det konkluderes med at de høye temperaturene bak BIPV på ZEB-laboratoriet indikerer at det er viktig å ha luftespalter med åpning i bunn og topp bak BIPV. Videre konkluderes det med at materialene i luftespaltens tilgrensende sjikt bør tåle andre fuktskykluser enn de som er i uteluften. Det konkluderes også det bør velges materialer som tåler tidvis høye temperaturer i luftespalter som mottar mye soltilskudd.

Referanser

- Bøhmer, E. og Aarnes, H. (2016) *Tre -plante*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/tre_-_plante (Hentet 17. mars 2020)
- Bunkholt, N.S., Gullbrekken, L. og Kvande, T. (2020) Influence of Local Weather Conditions on Ventilation of a Pitched Wooden Roof. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 14 (2020), s. 37-45. doi: 10.17265/1934-7359/2020.01.004
- Falk, J. (2014) Rendered rainscreen walls – cavity ventilation, ventilation drying and moisture-induced cladding deformation. Avhandling (ph.d) – Lunds Universitet
- Falk, J. og Sandin, K. (2013) Ventilated rainscreen cladding: Measurements of cavity air velocities, estimation of air change rates and evaluation of driving forces. *Building and environment*, 59, s. 164-176. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.08.017
- Finisterra (2020) *Omnisense S-16 Sensor*. Tilgjengelig fra: <https://www.finisterra.no/produkter/fukt/omnisense-s-2-sensor/> (Hentet 17. februar 2020)
- Geving, S. og Thue, J.V. (2002) *Fukt i bygninger*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt
- Gullbrekken, L., Kvande, T. og Time, B. (2017) Ventilated wooden roofs: Influence of local weather conditions – measurements. *Energy Procedia*, 132 (2017), s.777-782. doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.029
- Jelle, B.P., Breivik, C. og Røknes, H.D. (2012) Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 100 (2012), s. 69-96. doi: 10.1016/j.solmat.2011.12.016
- Kvande, T., Lisø, K.R. og Time, B. (2007) *Luftede kledninger (Rapport 2)*, Trondheim: SINTEF Community. Tilgjengelig fra: https://www.sintefbok.no/book/index/41/luftede_kledninger (Hentet 17. april 2020)
- Langmans, J., Desta, T.Z., Alderweireldt, L. og Roels, S. (2015) Field study on the air change rate behind residential rainscreen cladding systems: A parameter analysis, *Building and Environment*, 95 (2016), s. 1-12. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.09.012
- Lee, S., Park, S.H., Yeo, M.S. og Kim, K.W. (2008) An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment*, 44 (2009), s. 1431-1439. doi: 10.1016/j.buildenv.2008.09.009
- LINK Arkitektur (2020) *ZEB Flexible Lab*. Tilgjengelig fra: <https://linkarkitektur.com/Prosjekter/ZEB-Flexible-Lab2> (Hentet 4. juni 2020)
- Nore, K. (2009) *Hygrothermal performance of ventilated wooden cladding*, Avhandling (ph.d.) - Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim
- NTNU og SINTEF (2020) *Zeb Laboratory*. Tilgjengelig fra: <https://zeblab.no/> (Hentet 2. juni 2020).
- Omnisense (2020a) *S-160 Wireless T, %RH, WME Sensor with 64K Reading Datalogging Memory*. Tilgjengelig fra: <https://www.omnisense.com/Store/s-160-wireless-t-rh-wme-sensor-with-64k-reading-datalogging-memory> (Hentet 20. februar 2020)

- Omnisense (2020b) *G-3 Wireless Gateway with Cellular(optional), WiFi and Ethernet*. Tilgjengelig fra: <https://www.omnisen.com/Store/g-3-wireless-gateway-with-cellularoptional-wifi-and-ethernet> (Hentet 20. februar 2020)
- SINTEF (2020) *TightEN*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/prosjekter/tighten/> (Hentet 30. april 2020)
- SINTEF anvisning 473.020 (2017) *Nullutslippsbygninger (ZEB). Retningslinjer og beregningsmetoder*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/5177/nullutslippsbygninger_zeb_retningslinjer_og_beregningsmetoder (Hentet 29. mars 2020)
- SINTEF anvisning 525.002 (2018) *Takformer, taktyper og oppbygning*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/381/takformer_taktyper_og_oppbygning (Hentet 15. mai 2020)
- SINTEF anvisning 525.101 (2007) *Isolerte skrå tretak med lufting mellom vindsperre og undertak*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/382/isolerte_skr_aa_tretak_med_lufting_mellom_vindsperre_og_undertak (Hentet 5. mai 2020)
- SINTEF anvisning 525.102 (2012) *Isolerte skrå tretak med kombinert undertak og vindsperre*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/383/isolerte_skr_aa_tretak_med_kombinert_undertak_og_vindsperre (Hentet 5. mai 2020)
- SINTEF anvisning 542.003 (2013) *Totrinnetning mot slagregn på fasader. Luftede kledninger og fuger*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/470/totrinnetning_mot_slagregn_paa_fasader_luftede_kledninger_og_fuger (Hentet 5. april 2020)
- SINTEF anvisning 571.523 (2015) *Trevirke. Treslag og materialegenskaper*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/578/trevirke_treslag_og_materialegenskaper (Hentet 3. april 2020)
- SINTEF anvisning 700.110 (2010) *Byggskader. Oversikt*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/629/byggskader_oversikt (Hentet 20. april 2020)
- Sivle, A.D. (2009) *Slagregn*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/slagregn> (Hentet 8. mai 2020)
- Skaug (2007) *Trevirkets oppbygging og egenskaper*. Tilgjengelig fra: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/40-Trevirkets-oppbygging-og-egenskaper.pdf> (Hentet 27. mars 2020)
- Supsi og Seak (2020) *BIPV Status Report 2017*. Tilgjengelig fra: <https://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/bipv-status-report-2017> (Hentet 4. april 2020)
- Tariku, F. og Iffa, E. (2019) Empirical model for cavity ventilation and hygrothermal performance assessment of wood frame wall systems: Experimental study, *Building and Environment*, 157 (2019), s. 112-126. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.04.020

- Thue, J.V. (2016) *Bygningsfysikk - Grunnlag*. Bergen: Fagbokforlaget
- Thue, J.V. (2019) *Totrinns tetting*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/totrinns_tetting
(Hentet 6. mai (2020))
- Tronstad, S. (2006a) *Trefuktighet – tørking*. Tilgjengelig fra:
<http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/38-Trefuktighet-torking.pdf>
(Hentet 27. mars 2020)
- Tronstad, S. (2006b) *Tre og fuktighet – fra produsent til forbruker*. 3. utg. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt
- ZEB Forskningscenter (2020) *Test Cell*. Tilgjengelig fra:
<https://www.zeb.no/index.php/no/laboratorier/281-test-cell-laboratory-pa-norsk>
(Hentet 26. mai 2020)

Vedlegg 1

Dette vedlegget viser nøyaktig plassering av de 12 trådløse fuktsensorene på ZEB-laboratoriet. På denne siden vises informasjon i tabellform, mens de neste fire sidene viser illustrasjoner. Plasseringen er illustrert oppå tegninger laget av LINK Arkitektur (NB: Tegningene er ikke endelige!). Merk også at tegningene ikke er i målestokk. Plasseringene er illustrert med store røde X-er, der midten av X-en viser nøyaktig plassering. I tabellen beskrives plasseringen til hvert enkelt element med tekst, samt hvilken himmelretning sensoren er skrudd inn fra. I tillegg vises SensorID, som blant annet brukes på hjemmesiden til Omnisense.

Sensornavn	SensorID	Plassering høyde og bredde	Skrudd inn fra
MN1	26A302F4	Ca. 30 cm under de tre liggende bordene. Lekt midt i høyt felt.	Øst
MN2	26A3031D	Ca. 85 cm under vindusbeslag. Lekt midt i felt.	Øst
MN3	26A301B5	Ca. 125 cm under vindusbeslag. Lekt midt i felt.	Øst
MN4	26A301ED	Samme høyde som MN3. Lekt midt i høyt felt.	Øst
MN5	26A30402	Samme høyde som MN2. Lekt midt i høyt felt.	Øst
MR2	26A301A4	Se Figur 18. Lekt 60 cm vest for akse F.	Øst
MR3	26A301DA	Se Figur 19. Lekt 60 cm vest for akse F.	Øst
MS2	26A302FF	Ca. 70 cm over vindusbeslag. Lekt akse F.	Øst
MS3	26A30141	Ca. 115 cm over vindusbeslag. Lekt akse F.	Øst
ME1	233000C1	Ca. 110 cm over vindusbeslag. Lekt ca. 60 cm sør for endekanten av beslaget.	Sør
MW1	26A302D9	Ca. 35 cm under vindusbeslag. Lekt ca. 115 cm sør for endekanten av beslaget.	Sør
MW4	24DB028D	Ca. 85 cm under vindusbeslag. Lekt ca. 115 cm sør for endekanten av beslaget.	Sør



- Motoriserte åpningsfelt
- Manuelle åpningsfelt

MN1 G.0 gjelder ikke skjelletepané og vinduer i skjelletefaser.

NO	PROJ	UTGIVNING	UTGIVNINGSDATO	UTGIVNINGSTITTEL	UTGIVNINGSTIL	UTGIVNINGSTIL
01	01	01	01	01	01	01

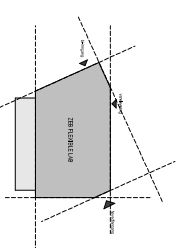
Fasader nord A-F-23-3-01

ARBEDSTEGNING

NTNU & SINTEF

Vedekke

62714 ZEB fleksible løb

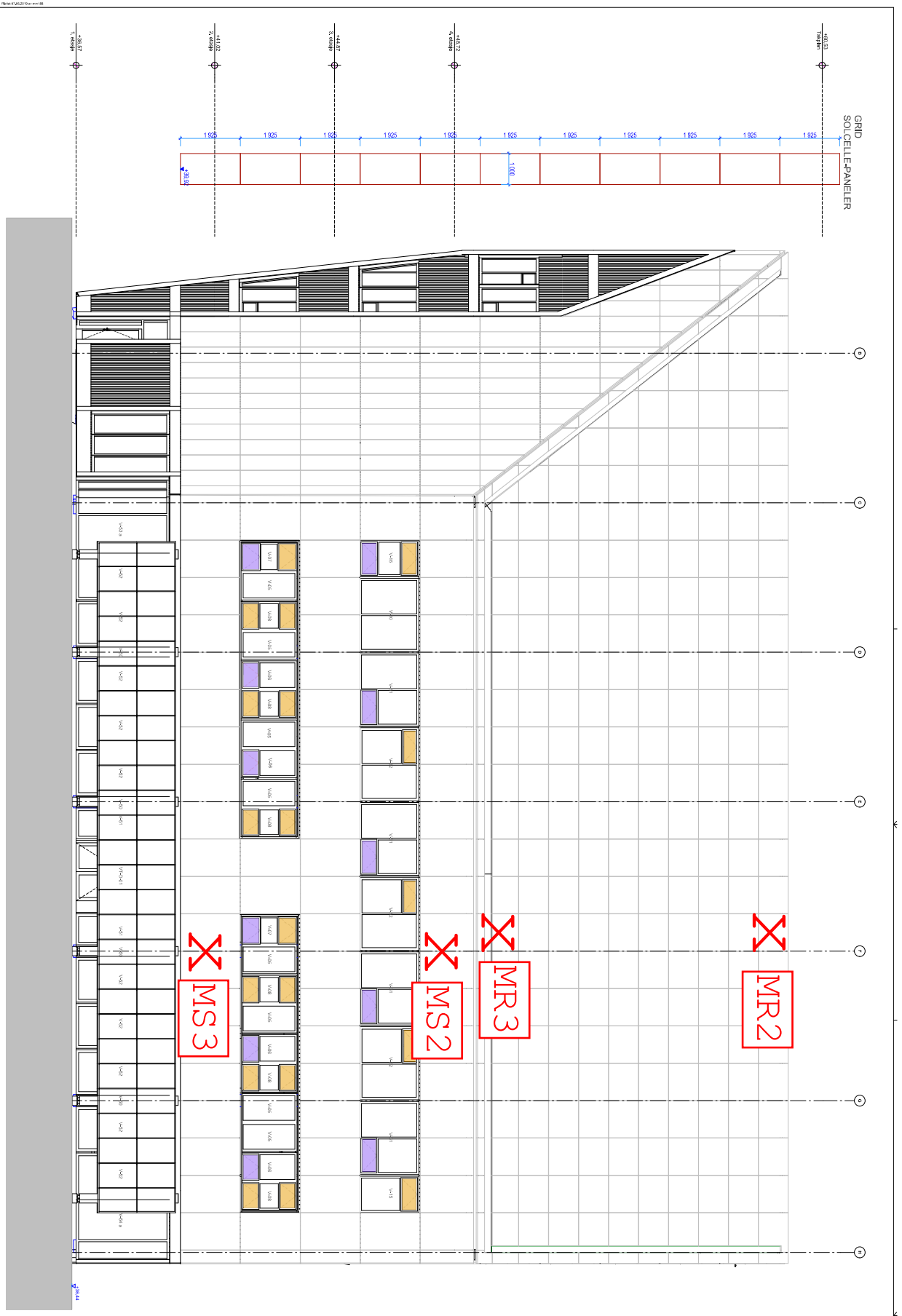


LINK ARKITEKTUR

Fasader nord

Godkj. SIC A-F-23-3-01

LINK ARKITEKTUR
 Fasadeteknikk
 1670 Trondheim
 Telefon: +47 73 50 81 11
 E-post: info@linka.no
 Org.nr: 07099229



MM1 G.0 gjelder ikke solcellerpanel og vinduer i solcellerfasader.

- Motoriserte åpningsstøt
- Manuelle åpningsstøt

NO	PROJEKT	DRUK	UTGIVELSE	CS	CSK	CSX

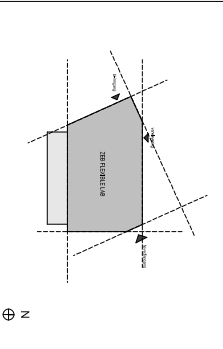
Fasade sør A-F-23-3-02

ARBEIDSTEGNING

NTNU & SINTEF

Vedtak

62714 ZEB fleksible løb



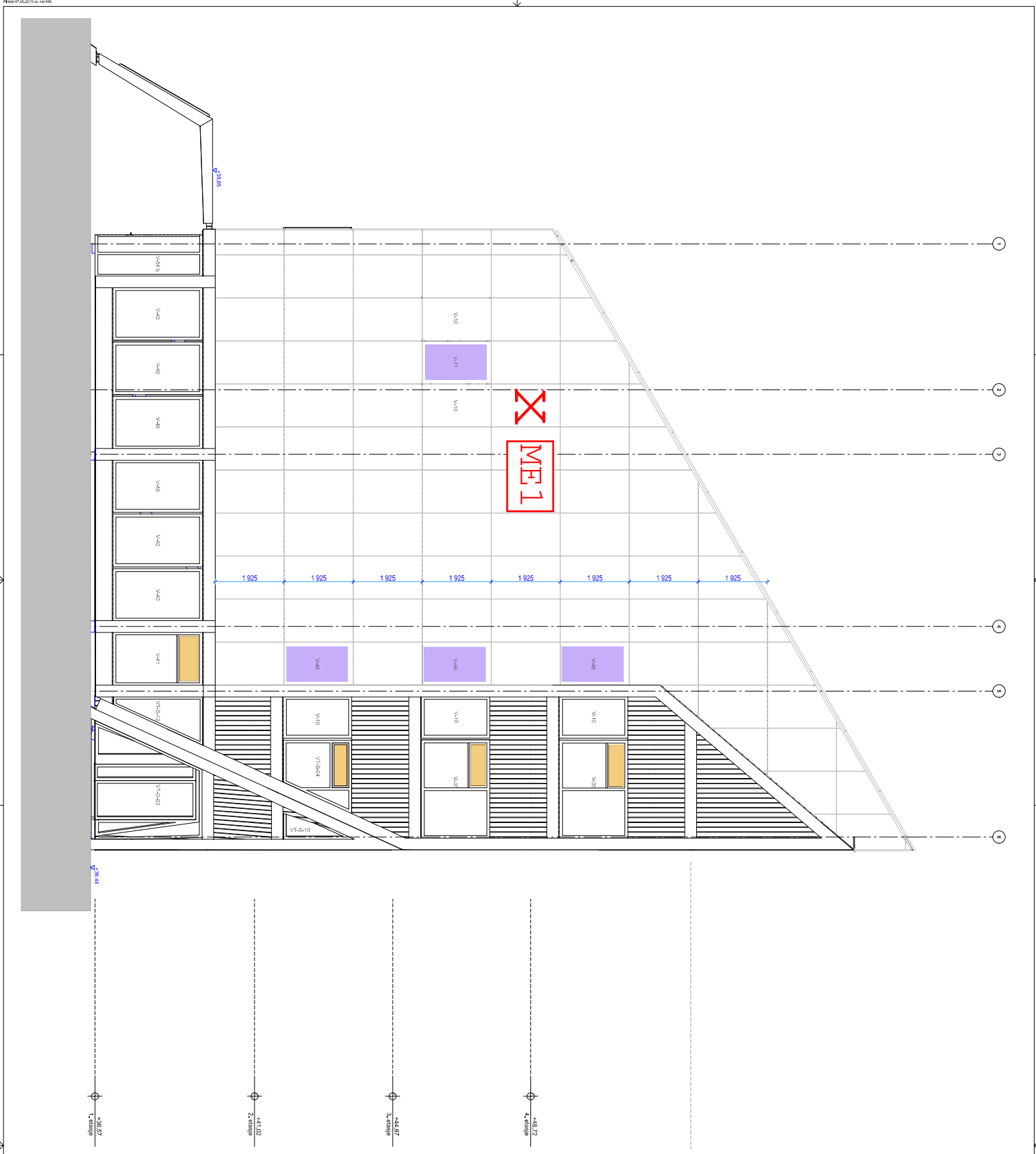
LINK ARKITEKTUR

Fasade sør

A-F-23-3-02

Godkj. SK

Aut. NO



For innede- og utadslående vinduer, samt topp- og bunnhengstet
 se Vinduskjema A-E-234-3-05 og A-E-234-3-06.

- Motoriserte åpningsstøt
- Manuelle åpningsstøt

MMI 6.0 gjelder ikke solcellepanel og vinduer i solcellefasader.

NO	BYGNINGS	Overgang til MMI 6.0. Gjelder ikke utadslående og vinduer i solcellefasader.	CBS	ON
1	Dato	Revisjonsgrunnlag		
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

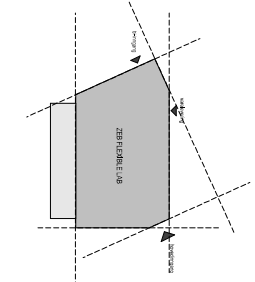
Fasader
Fasade øst

ARBEIDSTEKNING

NTNU & SINTEF

Veidekke

62714 ZEB flexible lab



LINK ARKITEKTUR

Fasader
Fasade øst

Dato: 14.03.2019
 Ansvar: ON

Prosjektnummer / Prosjektnavn: 62714 ZEB flexible lab

Entreprenør: Veidekke AS
 Adresse: Strømsveien 4, 7024 Trondheim
 Telefon: 73 22 33 00
 E-post: info@veidekke.no
 Oppdragsnummer: 62714

Arkitekt: LINK ARKITEKTUR AS
 Adresse: Vognveid 3, 7024 Trondheim
 Telefon: 73 22 33 00
 E-post: info@link.no
 Oppdragsnummer: 62714

For tekniske forhold, se tegningene i prosjektet.

Tegning: **AF-23-3-03**

Dato: 14.03.2019

Ansvar: ON

