

Ida-Helene Johnsen

Vanndampgjennomgang i vindsperretape

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Juni 2020

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

Ida-Helene Johnsen

Vanndampgjennomgang i vindsperretape

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Juni 2020

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



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Bruk av tape til bygningsmessige formål har økt de siste årene grunnet strengere krav til lufttetthet og energiforbruk i bygninger. Tape benyttes hovedsakelig til å tette skjøteforbindelser, rørgjennomføringer, overganger mot vinduer og reparering av skader i vind- og dampsperrsjikt. For å unngå en økende trend med fukt- og vannskader er det viktig at bygg prosjekteres for å tåle fremtidige klimapåkjenninger. Et dampåpent vindsperrsjikt er derfor nødvendig for å sikre tilstrekkelig uttørking av byggfukt og lekkasjer. Som følge av økt muggvekstrisiko knyttet til en høyere diffusjonstetthet i vindsperrsjiktet, er vandampmotstanden til vindsperrtape av interesse.

Formålet med denne oppgaven er å studere vandampgjennomgang av vindsperrtape. Et litteratursøk er utført med hensikt å kartlegge forskningslitteratur ved bruk av tape til bygningsmessige formål. Resultatet fra litteratursøket viser at forskningslitteraturen er begrenset til varighet og styrke til tapen, samt lufttettheten av tapede skjøter. Flere studier konkluderer med at tape er den mest lovende tettemetoden for å unngå luftlekkasjer. I tillegg er det gjennomført et laboratorieforsøk for å bestemme vandampmotstanden til bygningstape i henhold til NS-EN ISO 12572:2016. På bakgrunn av de målte s_d -verdiene er det utført videre beregninger for å vurdere hvordan uttørkingsforholdene påvirkes av vindsperrtapens vandampmotstand. Beregningene inkluderer bruk av vindsperrtape benyttet i skjøter av vindsperre og som tettemetode rundt vindu. I tillegg er det gjennomført analyser for å vurdere muggvekstrisiko.

Resultater fra laboratorieforsøket viser at målte s_d -verdier av vindsperrtape overstiger anbefalt vandampmotstand for dampåpne materialer. Målingene viser at s_d -verdien nærmere dobles ved bruk av et dobbelt lag med tape. Dette understreker at vandamppermeabiliteten i stor grad avhenger av hvor mange lag med tape som benyttes. Videre er det observert en redusert s_d -verdi for materialprøvene uten klebefelt. Dette indikerer at limet benyttet er en viktig årsak til vindsperrtapens vandampmotstand. Fuktregninger basert på måleresultatene viser en tregere uttørking av byggfukt ved bruk av vindsperrtape. Det er observert at effekten av en forlenget uttørkingstid er størst i overgangen mot vindsperrsjiktet. Dette skyldes trolig at uttørkingen i dette punktet vil forhindres som følge av vindsperrtapens diffusjonstetthet. Videre er det observert at uttørkingen avhenger av hvor stort sammenhengende areal med vindsperrtape som benyttes. Beregningene viser også at bruk av vindsperrtape gir en forlenget uttørkingstid ved økende fuktinnhold og isolasjonstykkelse. Som følge av en tregere uttørking grunnet dampmotstanden til vindsperrtape viser resultater fra muggvekstanalysen en økt risiko for muggvekst ved bruk av tape. Beregningene i sin helhet viser at muggvekst vil inntreffe ved et høyt startfuktinnhold i treverket.

Studien indikerer at bruk av vindsperrtape øker risikoen for fuktproblemer ved høye nivåer av byggfukt. På bakgrunn av dette anbefales et kritisk fuktinnhold lavere enn 20 vekt% for konstruksjoner hvor vindsperrtape benyttes. Det er viktig å understreke at brukt beregningsmodell ikke tar hensyn til lekkasjer i bygningskonstruksjonen. Blant annet vil vindsperrtape bidra til god lufttetting som vil redusere oppfukning av luftlekkasjer og dermed også risikoen for muggvekst. Til videre arbeid anbefales gjennomføring av ytterligere beregninger og laboratorieforsøk for å øke forståelsen ved bruk av bygningstape og for å undersøke verdien av å utvikle et mer dampåpent vindsperrtapeprodukt.

Abstract

The use of self-adhesive tape for building purposes has increased in recent years due to stricter requirements for airtightness and energy consumption in buildings. The tape is mainly used to seal joint connections, pipe penetrations, transitions around windows and to repair damages in the wind- and vapour barrier layer. To minimize the risk of moisture damage, buildings must be adapted to future climate impacts. A vapour open wind barrier layer is necessary to ensure adequate drying of built-in moisture and leaks. Due to the increased risk of mould growth associated with a higher diffusion density in the wind barrier layer, the water vapour resistance of wind barrier tape is of interest.

The purpose of this master's thesis is to study the water vapour transmission through wind barrier tape. A literature search has been conducted to identify research literature on tape for building purposes. The results show that the research is limited to the durability and strength of tape and the airtightness of taped joints. Several studies conclude that tape is the most promising sealing method for avoiding air leaks. In addition, a laboratory experiment has been conducted to determine the water vapour resistance of construction tape in accordance with NS-EN ISO 12572:2016. Based on the measured s_d -values, further calculations have been made to determine how the drying conditions are affected by the water vapour resistance of the tape. The calculations include the use of wind barrier tape in joint connections in the wind barrier layer, and as a sealing method around windows. In addition, analyses have been carried out to determine the risk of mould growth.

Results from laboratory measurements show that measured s_d -values of wind barrier tape exceed the recommended water vapour resistance for vapour open materials. The results show that the s_d -value is almost doubled by using a double layer of tape. This underlines that the water vapour permeability is greatly affected by the number of layers of tape applied. Furthermore, a reduced s_d -value has been observed for the tape backing without adhesive. This indicates that the glue is an important cause to the water vapour resistance of wind barrier tapes. Moisture calculations based on the results show that the drying time of built-in moisture is extended when wind barrier tape is used. It is observed that the impact of the decreased drying rate is greatest in the transition towards the wind barrier layer. This may indicate that the drying at this point will be prevented due to the diffusion density of the wind barrier tape. Further, it is observed that the drying depends on the size of the continuous area of wind barrier tape applied. Calculations also show that the use of wind barrier tape gives an extended drying time with increasing moisture content and insulation thickness. As a result of an extended drying, the analyses show an increased risk of mould growth when using tape. Calculations show that mould growth will occur when the initial moisture content is high.

The study indicates that use of wind barrier tape increases the risk of moisture problems at high levels of built-in moisture. A critical moisture content of less than 20% is recommended where wind barrier tape is used. It is also important to emphasize that the calculation model used does not include leaks in the building structure. Wind barrier tape contributes to better airtightness which will reduce air leaks and thus the risk of mould growth. Further calculations and laboratory experiments is recommended to increase the understanding of the use of construction tape and to investigate the value of developing a more vapour open wind barrier tape product.

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet som en del av det 2-årige masterstudiet for bygg- og miljøteknikk ved NTNU, våren 2020. Med hovedprofil innen bygnings- og materialteknikk har jeg stor interesse for bygningsfysikk og tekniske løsninger. Med økende bruk av bygningstape er det en stor interesse for videre forskning på feltet. Oppgaven tar for seg laboratorieundersøkelser for å bestemme vanndampgjennomgang til ulike tapeprodukter og konsekvensene av dette. Masteroppgaven er skrevet i samarbeid med NTNU og SINTEF Byggforsk. Oppgavens omfang tilsvarer 30 studiepoeng.

Arbeidet med masteroppgaven har vært både utfordrende og lærerikt. Spesielt gjennomføring av laboratorieforsøkene har vært en veldig spennende prosess og har bidratt til mye ny kunnskap. Jeg har også fått deltatt på flere befaringer ved ZEB-laboratoriet som har gitt meg en bedre forståelse knyttet til bruksområder av bygningstape. Det har også vært utfordringer knyttet til Covid-19. All kommunikasjon har foregått digitalt etter at universitetet stengte fra og med 16. mars. Det har i tillegg vært begrenset tilgang på lab noe som har gjort det vanskelig å gjennomføre alle laboratorieforsøk som planlagt. På grunn av dette er arbeidet med de siste målingene av tape uten klebefelt overtatt av SINTEF. Vedlegg A presenterer foreløpig artikkel og vil bli tilsendt til *Journal of Building Physics* når siste måleverdi er klar i løpet av juni.

Jeg ønsker å rette en stor takk til min hovedveileder Tore Kvande og medveileder Lars Gulbrekken for god oppfølging i arbeidet med oppgaven. De har vist stor interesse for forskningen og kommet med mange verdifulle innspill. Jeg vil også takke Erlend Andenæs for god oppfølging og språklig hjelp i forbindelse med den vitenskapelige artikkelen som følger denne rapporten. I tillegg vil jeg takke Ole Aunrønning, avdelingsingeniør ved Institutt for bygg- og miljøteknikk, for god veiledning og bidrag i gjennomføringen av laboratorieforsøk. Jeg ønsker også å takke seniortekniker ved SINTEF, Stig Roar Rudolfsen, for bistand på laboratoriet i utfordrende tider.

Til slutt vil jeg takke lærere og medstudenter for to kunnskapsrike år som har gitt meg gode minner!

11. juni 2020

Ida-Helene Johnsen

Ida-Helene Johnsen

Definisjoner

Absolutt fuktinnhold: Mengden fritt vann et material inneholder i vektprosent i forhold til materialets vekt i tørr tilstand. (Bøhlerengen, 2018).

Relativ fuktighet: Innholdet av vanndamp i luft ved en bestemt temperatur. Angis i prosent. (Bøhlerengen, 2018).

Kritisk fuktnivå: Grenseverdi for anbefalt maksimalt fuktnivå. Benyttes gjerne for å vurdere hvor tørt et materiale bør være før byggeprosessen kan fortsette. (Bøhlerengen, 2018).

Duggpunkt: Luftas temperatur ved relativ fuktighet lik 100%. Metningstrykket er lik vanndamptrykket i lufta og vanndamp kan utfelles som væske (kondens). (Bøhlerengen, 2018).

Byggfukt: Fuktoverskudd i materialer fra byggeprosessen. Den vannmengden som må avgis slik at materialets fuktinnhold er i likevekt med omgivelsene i bruksperioden (Geving, 2012).

Materialbestandighet: Materialets motstandsdyktighet mot nedbryting som følge av fukt.

Vanndamppermeabilitet: Mål for vanndampgjennomgang i et material på grunn av damptrykkgradienten. [kg/msPa] (Time & Friquin, 2003).

Vanndamppermeans: Mål for vanndampgjennomgang på grunn av forskjeller i vanndamptrykk ved materialsjiktets to sider. [kg/m²sPa] (Time & Friquin, 2003).

Vanndampmotstand: Mål for vanndampmotstand på grunn av forskjeller i vanndamptrykk over materialsjiktet. [m²sPa/kg] (Time & Friquin, 2003).

Ekvivalent luftlagstykkelse/ s_d-verdi: Angir hvor tykt et stillestående luftlag må være for å ha samme diffusjonsmotstand som materialsjiktet. [m] (Time & Friquin, 2003).

U-verdi: Mål for varmeisolasjonsegenskaper for bygningsdeler. Gitt ved varmestrømtetthet delt på lufttemperaturforskjellen på hver side av den aktuelle bygningsdelen. (Thue, 2016).

Kuldebro: Et begrenset område i en konstruksjon med vesentlig høyere U-verdi enn konstruksjonen ellers. (Thue, 2016).

Innhold

SAMMENDRAG	I
ABSTRACT	II
FORORD	III
DEFINISJONER	IV
1 INNLEDNING	1
1.1 BAKGRUNN	1
1.2 FORMÅL	1
1.3 AVGRENSNING	2
1.4 OPPGAVENS STRUKTUR	2
2 TEORETISK RAMMEVERK	5
2.1 BINDINGSVERK AV TRE	5
2.2 LUFTET KLEDNING	6
2.3 INNSETTING AV VINDU	6
2.4 FUKTPROBLEMATIKK	7
2.5 FUKTTRANSPORT	7
2.6 FUKT I MATERIALER	9
2.7 FOREBYGGENDE TILTAK MOT FUKTSKADER	10
2.8 MUGGVEKST	11
3 METODE	13
3.1 VALG AV FORSKNINGSMETODE	13
3.2 LITTERATURSTUDIE	13
3.3 LABORATORIEFORSØK	14
3.4 FUKTBREGNINGER	17
3.5 MUGGVEKSTANALYSE	25
4 RESULTATER OG VURDERINGER	27
4.1 BINDINGSVERKVEGG I 1D	27
4.2 BINDINGSVERKVEGG I 2D	30
4.3 VINDUSKARM I 2D	32
4.4 MUGGVEKSTANALYSE	35
5 DISKUSJON	41
6 KONKLUSJON	45
7 FORSLAG TIL VIDERE ARBEID	47
A VITENSKAPELIG ARTIKKEL	53
B ARTIKKEL I BYGGEINDUSTRIEN	79
C BEREGNINGSRISULTATER FRA WUFI	85
D MUGGVEKSTANALYSE	93

Figurliste

Figur 1: Prinsipiell oppbygning av en bindingsverkvegg. Illustrasjon hentet fra Einstabland (2007).	5
Figur 2: Hovedalternativer for plassering av vindu. Illustrasjon hentet fra Asphaug (2018).	6
Figur 3: Sorpsjonskurve for tre og trebaserte materialer. Hentet fra Bøhlerengen (2018).	10
Figur 4: Relativ muggveksthastighet med varierende temperatur og RF. Hentet fra Geving & Holme (2010).	11
Figur 5: Prosedyre for måling av vanndampgjennomgang av bygningstape.	15
Figur 6: Vertikalsnitt av bindingsverkvegg i 1D. Illustrasjon hentet fra Geving & Holme (2010).	18
Figur 7: Horisontalt snitt av bindingsverk i WUFI 2D.	22
Figur 8: Vertikalsnitt av vinduskarm i WUFI 2D.	23
Figur 9: Varighetskurvene i m-modellen for de ulike tidspunkt basert på relativ fuktighet og temperatur.	26
Figur 10: RF i treverket (30 mm fra dampsperran) for vindsperretape med s_d -verdi på hhv. 8.9 m, 1.5 m og 1.2 meter sammenlignet med uten bruk av tape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Startfuktnivå for treverket er 25 vekt%. Uteklima er Oslo.	27
Figur 11: RF i treverket (30 mm fra dampsperran) for hhv. 150, 250 og 400 mm varmeisolasjon med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Startfuktnivå for treverket er 20 vekt%. Uteklima er Oslo.	28
Figur 12: RF i treverket (30 mm fra dampsperran) for hhv. 15, 20 og 25 vekt% startfuktninnhold i treverket med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Uteklima er Oslo.	28
Figur 13: RF i treverket (30 mm fra dampsperran) for startfuktnivå i treverket på hhv. 25, 20 og 15 vekt% med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Uteklima er Oslo.	30
Figur 14: RF i treverket (mot vindsperren) for hhv. 25, 20 og 15 vekt% i treverket med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Uteklima er Oslo.	31
Figur 15: RF i treverket (mot vindsperren) for hhv. 150, 250 og 400 mm varmeisolasjon med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Startfuktnivå for treverket er 25 vekt%. Uteklima er Oslo.	31
Figur 16: Illustrasjon for utvalgte beregningspunkter i vinduskarmen. Hentet fra Skogstad & Asphaug (2012).	32
Figur 17: RF i treverket (mot vindsperren) for hhv. 25, 20 og 15 vekt% i treverket med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Uteklima er Oslo.	33

Figur 18: RF i treverket (mot vindsperren) for hhv. 150, 250 og 400 mm varmeisolasjon med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Startfuktnivå for treverket er 25 vekt%. Uteklima er Oslo.	34
Figur 19: Årlig muggvekstindeks for beregningstilfelle 1-4.	35
Figur 20: Oversikt over årlig muggvekstindeks for varierende startfuktighet i treverket med og uten vindsperretape.	36
Figur 21: Gjennomsnittlige verdier for temperatur og relativ fuktighet ved 8 uker sammenlignet med den tilhørende varighetskurven for tilfeller med og uten vindsperretape.	37
Figur 22: Gjennomsnittlige verdier for temperatur og RF for et startfuktinnhold i treverket på 25 og 30 vekt% etter 8 uker sammenlignet med varighetskurvene for 2, 4 og 8 uker.	39

Tabelliste

Tabell 1: Diffusjonstetthet for bygningsmaterialsjikt. Hentet fra Geving (2012).....	8
Tabell 2: Ekvivalent luftlagstykkelse for bygningsmaterialer hentet fra Time & Friquin (2003).....	9
Tabell 3: Oversikt over overordnende og avgrensende søkeord.....	14
Tabell 4: Måleintervaller basert på s_d -verdi.	16
Tabell 5: Måleusikkerhet av s_d -verdi.	16
Tabell 6: Oversikt over materialene som er benyttet i beregningen og materialparametere. Hentet fra materialdatabase fra WUFI, samt målte verdier for vindsperretape fra laboratorieforsøket.....	19
Tabell 7: Beregningstilfeller for bindingsverkvegg 1D, del 1.....	20
Tabell 8: Beregningstilfeller for bindingsverkvegg 1D, del 2.....	21
Tabell 9: Beregningstilfeller for vinduskarm 2D.....	24
Tabell 10: Oversikt over muggvekstindeksene. Hentet fra Fraunhofer IBP & VTT (2018).	25
Tabell 11: Sensitivitetsklasse basert på materialtype. Hentet fra Fraunhofer IBP & VTT (2018).	25
Tabell 12: Oversikt over de ulike beregningstilfellene for den to-dimensjonale bindingsverkveggen sammenlignet med varighetskurvene i m-modellen.	38
Tabell 13: Oversikt over de ulike beregningstilfellene for vinduskarmen sammenlignet med varighetskurvene i m-modellen.	40

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Økt ekstremvær som følge av global oppvarming nødvendiggjør at bygg prosjekteres for å tåle fremtidige klimapåkjenninger (Meld. St. 33 (2012-2013)). Med et ønske om energieffektive bygninger, som passiv- og nullutslippshus, følger også strengere krav til utførelse og funksjonalitet (Meld. St. 28 (2011-2012)). For å oppnå tilfredsstillende energiforbruk kan yttervegger utformes med isolasjonstykkelser opp mot 400 mm. En studie utført av SINTEF Byggforsk (Geving & Holme, 2010) har studert sammenhengen mellom økte isolasjonstykkelser og faren for fuktskader. Studien ser på effektene av at en kaldere ytterkonstruksjon vil øke fuktnivået, samt at uttørkingstid av byggfukt og lekkasjer forlenges som følge av at isolasjonstykkelsen øker. Resultatene viser at en forlenget uttørkingstid gir en større risiko for fuktskader enn effekten av en kaldere ytterkonstruksjon. Studien konkluderer også med at vanddampmotstanden til vindspærren og luftfuktigheten inne kan ha større betydning for muggvekstrisikoen.

Med strengere krav til lufttetthet og energiforbruk i bygninger, har også interessen for bruk av tape til bygningsmessige formål hatt en kraftig økning de siste årene (Fufa et al. 2018). Tape benyttes hovedsakelig til å tette skjøteforbindelser, rørgjennomføringer, overganger mot vinduer og reparering av skader i vind- og dampspærresjikt. For å unngå innestengt fukt i konstruksjonen som følge av byggfukt og lekkasjer er det viktig å sørge for gode uttørkingsforhold. For å sikre tilstrekkelig uttørking kreves det at vindspærresjiktet er diffusjonsåpent. Til tross for økende bruk av tape er forskningen på feltet begrenset til varighet og styrke til tapen, samt lufttetthet av tapede skjøter (Fufa et al., 2018; Langmans et al, 2017; Jacobs et al., 2012). I henhold til en økt muggvekstrisiko knyttet til en høyere vanddampmotstand i vindspærresjiktet, er vanddampmotstanden til vindspærretape av interesse. Mer forskning er derfor viktig for å undersøke fuktegenskapene til tape og hvilke konsekvenser dette kan gi for uttørking av bygningskonstruksjoner.

1.2 Formål

Masteroppgaven er utarbeidet i samarbeid med NTNU og SINTEF Byggforsk. Formålet til oppgaven er å bestemme vanddampgjennomgangen til vindspærretape. Hovedmålet er å undersøke hvordan uttørkingsforhold i en bygningsdel kan påvirkes av tapens vanddampmotstand. I arbeidet med masteroppgaven er følgende forskningsspørsmål utarbeidet og besvart:

1. Hva sier forskningslitteraturen om egenskapene til tape for bygningsmessige formål?
2. Hvilken vanddampmotstand har tape til bygningsmessige formål?
3. Hvordan påvirkes uttørkingsforholdene til bygningskonstruksjoner av dampmotstand til tape?

Både litteraturstudien og laboratorieforsøkene er presentert i en vitenskapelig artikkel. Artikkelen er vedlagt i vedlegg A.

1.3 Avgrensning

For å bestemme vandampgjennomgangen til tape er et utvalg av tapeprodukter blitt testet. Testprøvene består hovedsakelig av vindsperretape, men en dampsperretape er også blitt testet slik at målte resultater kan sammenlignes. Bruk av andre tettemetoder er ikke blitt vurdert i denne studien. Testresultatene som er presentert er avgrenset til laboratoriske forhold og er bestemt i henhold til NS-EN ISO 12572:2016. For å vurdere hvordan uttørkingsforholdene påvirkes av tape er det utført en- og to-dimensjonale simuleringer i WUFI. Beregningsprogrammet er basert på flere forenklinger, men vil kunne gi en indikasjon på forventet fukttransport gjennom konstruksjonen.

1.4 Oppgavens struktur

Denne masteroppgaven består i hovedsak av en vitenskapelig artikkel som utgjør den praktiske delen av den gjennomførte studien. Artikkelen utgjør hoveddelen av oppgaven og omhandler litteratursøk og måling av vandampmotstand til tape. De tre forskningsspørsmålene blir alle presentert i den vitenskapelig artikkelen, men kun forskningsspørsmål 1 og 2 besvares fullt ut. Artikkelen er vedlagt som vedlegg A. Ved hjelp av funnene i arbeidet med artikkelen utgjør denne rapporten en videre studie med tekniske simuleringer og beregninger for å besvare forskningsspørsmål 3. En- og to-dimensjonale simuleringer er utført i WUFI for å vurdere hvordan uttørkingsforholdene påvirkes av vindsperretapens vandampmotstand. I tillegg er det utført muggvekstanalyser ved hjelp av WUFI Mould Index VTT og varighetsmodeller for å vurdere risikoen for muggvekst for samtlige beregningstilfeller. Relevant teori og utdypende informasjon som ikke dekkes av artikkelen er også presentert i denne rapporten. Det er også skrevet en artikkel til Byggeindustrien som blir utgitt i bladets utgave nr. 11-2020. Artikkelen presenterer hovedfunnene fra laboratoriemålingene og er vedlagt i vedlegg B.

Oppgavens struktur er gitt som følgende:

Kapittel 2: Teorikapitlet gjør rede for relevant teori som ikke presenteres i den vitenskapelige artikkelen. I henhold til beregningene som er gjennomført for å vurdere uttørkingsforhold påvirket av dampmotstanden til tape er det tatt utgangspunkt i en bindingsverkkvegg og bruk av tape som tettemetode rundt vinduer. Generell oppbygning og materialsjiktens funksjon er kort beskrevet i dette kapitlet. I tillegg presenteres teori knyttet til fuktproblematikk og fukttransport som danner grunnlaget for videre analyse og vurdering.

Kapittel 3: Metodekapitlet gjør rede for metodevalgene som er benyttet i arbeidet med masteroppgaven. Kapitlet utdypet metodene som er brukt og fokuserer på å presentere informasjon som ikke er presentert i den vitenskapelige artikkelen.

Kapittel 4: Resultatkapitlet presenterer resultatene fra de en- og to-dimensjonale beregningene, samt resultatene fra muggvekstanalysen.

Kapittel 5 og 6: I diskusjonsdelen vurderes måleresultatene fra laboratorieforsøkene opp imot resultatene fra simuleringene og muggvekstanalysen. Videre presenteres konklusjonen i kapittel 6.

Kapittel 7: I kapittel 7 presenteres forslag til videre arbeider.

Vedlegg A: Vedlegg A presenterer den foreløpige vitenskapelige artikkelen. Artikkelen vil bli tilsendt til *Journal of Building Physics*.

Vedlegg B: Vedlegg B presenterer artikkelen tilsendt til Byggeindustrien. Artikkelen vil bli presentert under spalten «Fra ekspertene: NTNU». i bladets utgave nr. 11-2020.

Vedlegg C: Vedlegg C presenterer beregningsresultater fra WUFI fra de ulike beregningspunktene som er benyttet i analysen.

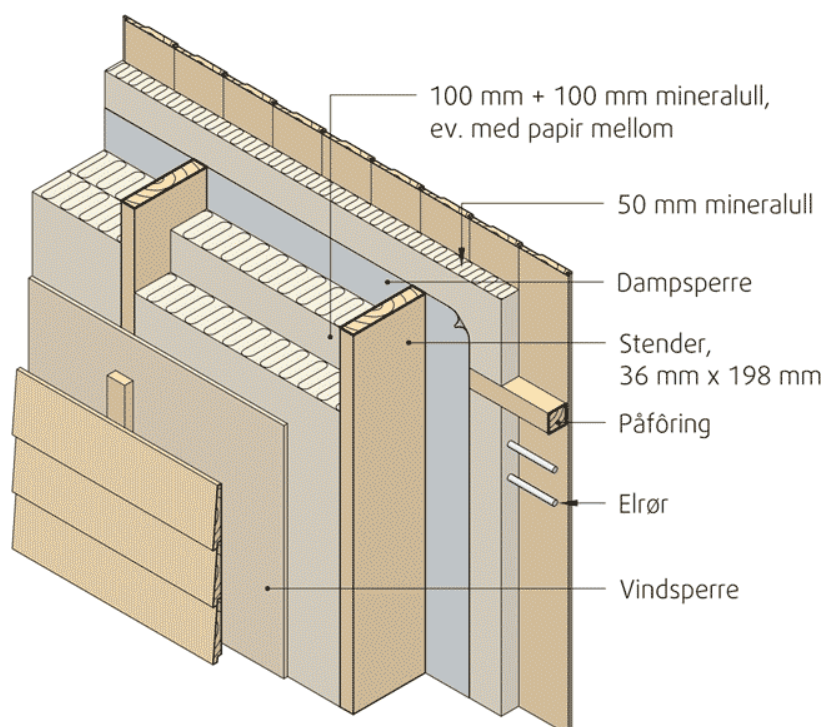
Vedlegg D: Vedlegg D presenterer beregningsresultater fra muggvekstanalysen i WUFI Mould Index VTT som ikke er vist i rapporten.

2 Teoretisk rammeverk

2.1 Bindingsverk av tre

En prinsipiell oppbygning av en yttervegg med bindingsverk er illustrert i figur 1. Stenderverk plasseres med en senteravstand på 600 mm med mellomliggende plater av mineralull som utgjør veggens varmeisolasjon (Einstabland, 2007). Varmeisolasjonens tykkelse avhenger primært av ytterveggenes krav til U-verdi og isolasjonsmaterialets varmekonduktivitet (Edvardsen & Ramstad, 2014). I følge Byggteknisk forskrift (TEK 17) skal yttervegger ha en U-verdi $\leq 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dette tilsvarer en total varmeisolasjonstykkelse på 250 mm. Isolasjonens varmekonduktivitet vil øke med økende fuktinnhold. For å begrense naturlig konveksjon og redusere risikoen for kondens i isolasjonssiktet bør det legges inn en vertikal konveksjonssperre mellom isolasjonslagene (Edvardsen & Ramstad, 2014). Det anbefales at isolasjonen monteres etter at bindingsverket har nådd et fuktinnhold på under 20 vektprosent slik at uttørking av byggfukt ikke forhindres.

På utsiden av isolasjonen monteres en vindsperre enten som plate eller rullprodukt. Vindsperresjiktet har som funksjon å hindre inntrenging av uteluft i varmeisolasjonen (Edvardsen & Ramstad, 2014). I tillegg må vindsperren være vannavvisende slik at regnvann ikke trenger inn i konstruksjonen. Vindsperren bør også være diffusjonsåpen slik at eventuell byggfukt i bygningsmaterialene kan tørke utover. På innsiden av ytterveggen monteres en dampsperre. Dampsperran har som hovedfunksjon å hindre oppfukning av luftlekkasjer og vandampdiffusjon fra innelufta (Thue, 2016). For å hindre varmetap på grunn av luftlekkasjer bør dampsperran ha høy dampmotstand med en ekvivalent luftlagtykkelse på minst 10 meter (Time & Friquin, 2003). På varm side av dampsperran kan innvendig påføring monteres etterfulgt av innvendig kledning. På kald side av vindsperren kan den utvendige kledningen monteres som en lufttet kledning. Prinsippet for utvendig lufttet kledning er nærmere beskrevet i neste delkapittel 2.2.



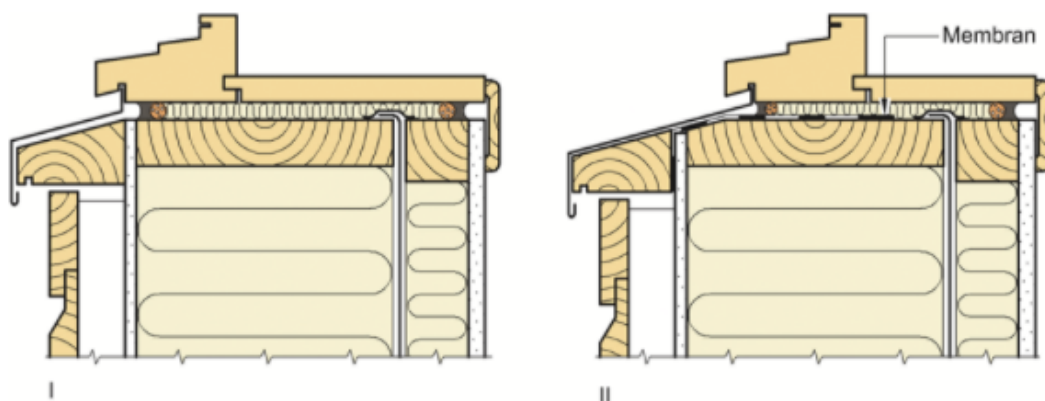
Figur 1: Prinsipiell oppbygning av en bindingsverkvegg. Illustrasjon hentet fra Einstabland (2007).

2.2 Luftet kledning

Slagregn, skrått innfallende regn, betegnes som den mest problematiske klimapåkjenningen for yttervegger (Kvande, 2013). En fasades slagregnbelastning vil avhenge av regn- og vindintensitet, vindretning, topografi og byggets utforming (Edvardsen & Ramstad, 2014). For å oppnå en effektiv og varig beskyttelse mot slagregn kan konstruksjonsprinsippet totrinnstetting benyttes. Den utvendige kledningen fungerer som en regnskjerm, mens vindspærren utgjør luft- og vindtettingen (Elvebakk, 2019). En luftet og drenert luftespalte utformes mellom kledning og vindspærren. Luftespalten fungerer som et skille mellom den utvendige kledningen og vindspærren slik at slagregn ikke suges opp kapillært eller renner innover i konstruksjonen (Edvardsen & Ramstad, 2014). I tillegg bidrar luftespalten til at inntrengende regnvann gjennom kledningen kan dreneres ned og ut ved hjelp av vindtrykk og termisk oppdrift. Luftspalten må være sammenhengende og ha åpning i topp og bunn. Det drenerte hulrommet gir også mulighet for uttørking av regnskjermens bakre side. For å begrense vanninntrengingen må kledningen monteres så tett som mulig (Kvande, 2013). Luftespalten utformes med horisontale lekter og eventuelt sløyfer avhengig hvilken type kledning som anvendes (Edvardsen & Ramstad, 2014). Det er viktig at lektene ikke forhindrer lufting og drenering, samt at materialene som benyttes er fuktbestandige.

2.3 Innsetting av vindu

Vinduets plassering og utformingsdetaljer har stor betydning for byggets totale lufttetthet og energiforbruk. Ulike plasseringsalternativer er illustrert i figur 2. Ved plassering av vinduet i plan med veggens vindspærre begrenses faren for fuktskader ved at inntrengende slagregn kan dreneres i veggens luftespalte (Edvardsen & Ramstad, 2014). Denne løsningen gir også økt dagslys og solvarme. Vinduet bør ikke plasseres enda lenger ut i veggens da dette gir uakseptabelt høyt varmetap. Vinduet kan også plasseres lenger inn i veggens. En slik løsning vil øke faren for lekkasjer og fuktskader (Asphaug, 2018). For sikre tilstrekkelig fuktsikring bør en vanntett membran monteres under vinduets bunnkarm. Løsningen bidrar til en mer komplisert regn- og lufttetting ved at tettesjiktene må føres inn i karmen. I sammenligning med plassering lenger ut vil denne løsningen bidra til en lavere kuldebroverdi og dermed et redusert varmetap. For å unngå utettheter i konstruksjonen er det viktig at fugene mellom karm og vegg er tilstrekkelig lufttette (Edvardsen & Ramstad, 2014). I tillegg bør topp- og bunnkarm ha et vannbrettbeslag slik at rennende vann føres bort fra veggens.



Figur 2: Hovedalternativer for plassering av vindu. Illustrasjon hentet fra Asphaug (2018).

2.4 Fuktproblematikk

Så mye som 75% av alle byggskader antas å ha sammenheng med fukt eller virkningene av det (Bøhlerengen, 2018). Fukt i seg selv er ikke skadelig, men vil ved store mengder og feil plassering kunne gi uheldige konsekvenser som sopp- og muggdannelse, høyere energibruk og dårlig inneklima (Geving, 2012). Framskrivninger fra *Klima i Norge 2100* viser til økte nedbørsmengder og antall dager med kraftig nedbør. Medianframskrivningen viser til en forventet økning i årsnedbør på 18% mot slutten av århundret (Hanssen-Bauer et al. 2009). Rapporten viser også til en dobling av dager med kraftig nedbør med økt nedbørsmengde på 19%. For å unngå en økende trend med fukt- og vannskader er det derfor viktig at bygg prosjekteres for å tåle fremtidige klimapåkjenninger (Meld. St. 33 (2012-2013)).

God fuktsikring av bygninger stiller strenge krav til utforming og design. Hovedprinsipper for å unngå fuktskader involverer en begrenset og kontrollert fukttilførsel, samt nøytralisering av drivkrefter for fukttransport (Geving, 2012). I tillegg er det essensielt med rask oppsporing av fukt slik at fukt ikke blir værende i konstruksjonen over tid. Det er også viktig å være klar over at forhindring av fukttilføring også kan skape problemer med drenering eller uttørking og omvendt. Begrenset byggfukt i forbindelse med lukking av bygget og tilstrekkelig uttørking av konstruksjonen vil redusere risikoen for fuktproblemer (Holøs, 2018). De mest vanlige fuktskadene henger ofte sammen med redusert materialbestandighet. Dersom materialer blir utsatt for høye fuktforhold kan materialets termiske og mekaniske egenskaper påvirkes. I hvilken grad materialet påvirkes vil avhenge av materialets fuktbestandighet. Det er viktig at fuktsikre løsninger utarbeides tidlig i prosjekteringsfasen slik at risikoen for fuktskader kan reduseres.

2.5 Fukttransport

Transport i dampfasen skjer primært ved diffusjon og luftlekkasjer (fuktkonveksjon) (Bøhlerengen, 2018). Fukttransporten avhenger av overflatens struktur/porøsitet, lufthastigheten på overflaten og vindretning. Selv små luftlekkasjer kan føre til en økt mengde fukttransport enn diffusjon. Det er derfor viktig med egnede tettesjikt, spesielt i varmeisolerte konstruksjoner for å unngå ukontrollert fukttransport i dampform fra varm til kald side. Ficks diffusjonslov beskriver netto dampstrøm av partikler fra et området med høy til lav konsentrasjon (Thompson, 2014). Ligning (1) viser hvordan diffusjonsfluksen gitt som netto damptransport per flateareal er proporsjonal med konsentrasjonsgradienten gitt som endring i vandampkonsentrasjon per lengdeenhet. Fluksen avhenger av diffusjonskonstanten som er bestemt ut ifra løseligheten og molekylvekten til en gitt type molekyler.

$$\frac{V}{A} = \frac{(P_1 - P_2)}{T} \cdot D \quad (1)$$

Hastigheten vanddamp kan transporteres gjennom et materiale ved diffusjon bestemmes ut ifra materialets vanddamppermeabilitet (Geving, 2012). Jo større vanddamppermeabilitet, desto hurtigere vanddamptransport. For de fleste materialer vil vanddamppermeabiliteten øke med økende fuktinnhold. Ved et RF-nivå under ca. 60% vil vanddamppermeabiliteten forbli tilnærmet konstant. For å vurdere vanddampmotstanden til tynne materialsjikt som vind- og dampsperrer benyttes gjerne vanddamppermeans, W , vanddampmotstand, Z , og diffusjonsekvivalent luftlagstykkelse, s_d , for å beskrive materialets fuktegenskaper (Geving, 2012).

$$W = \frac{G}{A} \cdot \Delta p \quad (2)$$

$$Z = \frac{1}{W} \quad (3)$$

$$s_d = \mu \cdot d \quad (4)$$

Vanddamppermeansen bestemmes ut fra masseendringshastigheten på grunn av dampstrømmen som oppstår. Ved laboratoriemålinger vil verdien G beskrive gjennomsnittet av masseendringen for fem testprøver av hvert materiale. Δp bestemmes ut ifra temperaturen og den relative fuktigheten i testrommet. Ekvivalent luftlagstykkelse, s_d -verdi, benyttes gjerne for å vurdere hvor dampåpen et materiale er. Parameteren μ er gitt som vanddampmotstandsfaktoren og bestemmes ut ifra vanddamppermeabiliteten til luft og vanddamppermeabiliteten for det aktuelle materialet. s_d -verdien kan så beregnes ved hjelp av materialprøvens tykkelse.

For å vurdere diffusjonstettheten til et materiale kan graderingen som vist i tabell 1 benyttes. Anbefalt s_d -verdi for damp- og vindsperrer er forholdsvis 10 m og 0,5 m (Time & Friquin, 2003). Generelt anbefales en forskjell i dampmotstand på 10 m mellom varm og kalde side (Geving, 2012). Ekvivalent luftlagstykkelse for ulike bygningsmaterialer er presentert i tabell 2.

Tabell 1: Diffusjonstetthet for bygningsmaterialsjikt. Hentet fra Geving (2012).

Diffusjonstetthet	Permeans W_p $g/(m^2hPa)$	Dampmotstand Z_p M^2hkPa/g	s_d -verdi m
Svært diffusjonsåpent	>10	< 0,1	<0,070
Diffusjonsåpent	1-10	0,1-1	0,070-0,700
Diffusjonstett	0,1-1	1-10	7,0-0,700
Svært diffusjonstett	<0,1	>10	>7,0

Tabell 2: Ekvivalent luftlagstykkelse for bygningsmaterialer hentet fra Time & Friquin (2003).

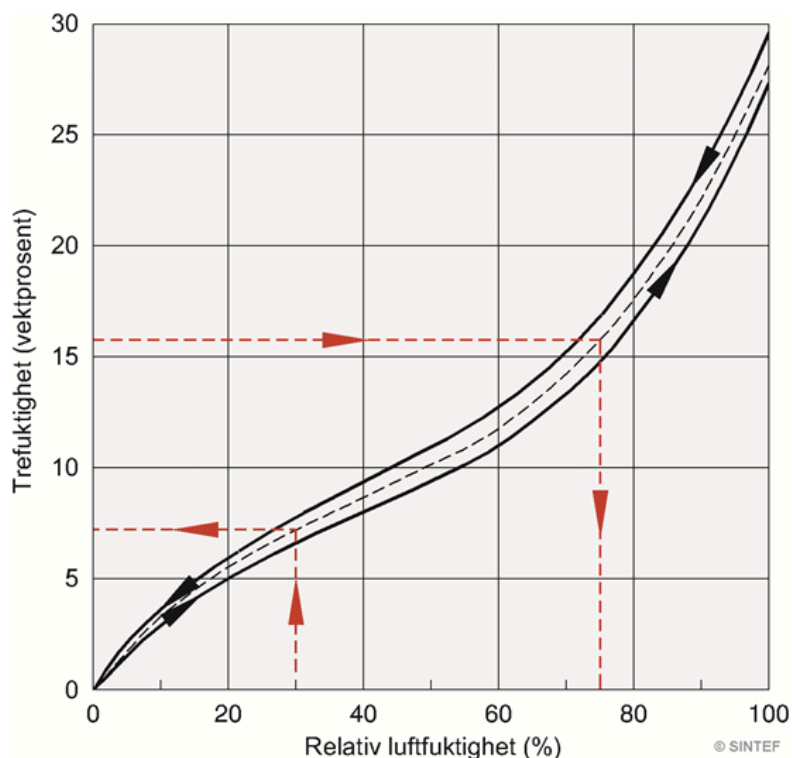
Material	Tykkelse (mm)	s_d -verdi (m) RF% (35-70)
Mineralull	100	0,22-0,33
Betong v/c 0,5	100	13-20
Tre (furu, gran)	10	0,29-1,3
Gipsplate	12,5	0,068
Dampsperre (anbefaling NBI)	-	9,8
Vindsperre (anbefaling NBI)	-	0,5

2.6 Fukt i materialer

Fuktinnholdet i materialer angis som absolutt fuktinnhold eller som luftens RF i materialets poresystem (Bøhlerengen, 2018). Materialets fuktinnhold bestemmes av materialtypen, poresystemets egenskaper og av hvilken type fuktbinding som oppstår (Geving, 2012). Byggematerialer vil alltid inneholde en viss mengde fukt i forbindelse med produksjon av materialet eller ved kontakt med fuktig luft eller fritt vann. Tidligere fuktpåvirkninger vil også vanligvis ha en innvirkning på fuktinnholdet på et gitt tidspunkt. For å måle fuktinnholdet av et materiale veies materialprøver i fuktig og uttørket tilstand (Thue, 2016).

I bygninger opptrer fukt i materialer i det såkalte hygroscopiske- og kapillære området (Bøhlerengen, 2018). I det hygroscopiske området skjer fuktopptaket ved diffusjon av vanddampmolekyler i materialets poresystem. Dersom RF er lav vil den hygroscopiske fukten adsorberes i ett eller flere molekyllag i poresystemet. Ved økende RF opp mot 98% vil de minste porene fylles med vann. Ved ytterligere økning beveger en seg inn i det kapillære området. Det opptrer da et kontinuerlig poresystem hvor væskestrømning kan oppstå. For de fleste porøse materialer vil det tas opp mer fukt i det kapillære området enn i det hygroscopiske (Geving, 2012). Porestørrelsen vil i stor grad påvirke materialets fuktopptak og fukttransport. Store porer vil bidra til en raskere transport av vann og dampmolekyler enn mindre porer, samtidig som flere små porer vil gjøre at vannet bindes fastere i materialet og vil medføre et større fuktinnhold i det hygroscopiske området.

I et porøst materiale vil porene gradvis absorbere vanddampmolekyler fra omgivende luft (Thue, 2016). Dersom luftas RF holdes konstant, vil porenes damptrykk gradvis nærme seg romluftas damptrykk slik at poresystemets vanddampkonsentrasjon samsvarer med omgivelsene. Dette fuktinnholdet tilsvarer materialets likevektsfuktighet (Bøhlerengen, 2018). Dersom materialet plasseres i et rom med samme temperatur, med et annet RF-nivå, vil en ny likevekt innstilles. Ved å kartlegge likevektsfuktigheten for ulike RF-nivåer kan en lage en sorpsjonskurve. Tre er et hygroscopisk materiale og vil derfor kunne oppnå likevekt med omgivelsene. Figur 3 viser sorpsjonskurven for furu med en densitet på 500kg/m^3 hentet fra Bøhlerengen (2018). Ved samme RF vil treverk ha et lavere fuktnivå ved fuktopptak enn ved uttørking. Dette kommer av hystereseeffekten som avhenger av materialets porestruktur (Thue, 2016). Variasjonsområdet illustreres ved de to uthevede kurvene i sorpsjonskurven.



Figur 3: Sorpsjonskurve for tre og trebaserte materialer. Hentet fra Bøhlerengen (2018).

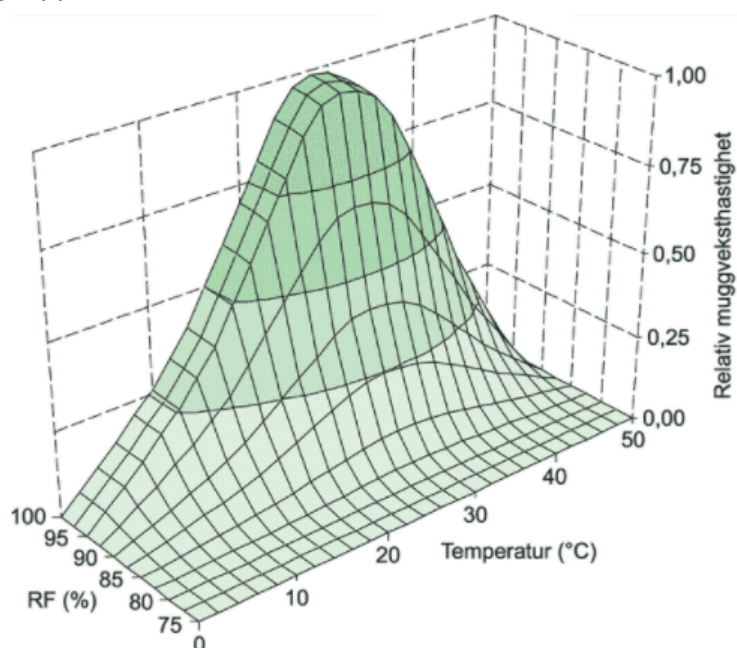
2.7 Forebyggende tiltak mot fuktskader

Det er under prosjekteringsstadiet og planleggingen av et bygg hvor grunnlaget for byggets fuktsikkerhet settes (Holøs, 2018). Bestemmelse av materialtype bør velges i henhold til prosjektets fremdriftsplan, slik at materialene får tilstrekkelig uttørkingstid. En benytter gjerne kritisk fuktnivå som en øvre grense på hvor tørt et materiale bør være før byggeprosessen kan fortsette (Bøhlerengen, 2018). Dersom et bygg lukkes for tidlig, øker dermed faren for innebygd fukt. Ved bruk av fukttolerante materialer vil en også kunne redusere uttørkingstiden. Materialer levert på byggeplass inneholder vanligvis en større mengde fukt enn det som svarer til likevekt med inneklimate når bygningen er i bruk (Geving, 2012). Det er derfor viktig at materialer som blir levert tildekkes slik at de ikke tilføres mer fukt enn nødvendig. Samtidig bør materialer leveres kort tid før montering ettersom lagring vil føre til en økt risiko for oppfukning (Holøs, 2018). Værbeskyttet bygging vil også bidra til å redusere uttørkingstiden av bygget (Holøs, 2018). Rask tetting av tak og vegger reduserer mengden regnvann som trenger inn i bygget som senere må tørkes ut. Bruk av teltsystemer i starten av byggefasen vil også redusere tilføringen av regnvann, men vil i sammenligning være kostnadskrevenende. Utformingen av konstruksjoner med mulighet for uttørking er også viktig slik at konsekvensene av feil eller skader minimaliseres (Holøs, 2018).

2.8 Muggvekst

Muggsopp er en type sporedannende sopper som krever tilgang på næringsstoffer og høy fuktighet for å kunne vokse (Levy, 2019). Muggsoppssporene inneholder skadelige stoffer som kan forårsake allergi og andre helseplager. For å kunne vokse krever de fleste muggsopparter en relativ fuktighet på over 80-85% (Magnussen & Mattsson, 2005). Dette tilsvarer et fuktinnhold i treverk på 20 vektprosent ved 20°C. Ved økende RF vil vekstvilkårene bedres for andre muggsopparter. Muggvekst vil også være temperaturavhengig. For de fleste arter vil en temperatur på 25-30°C gi gode vekstvilkår (Magnussen & Mattsson, 2005). Som illustrert i figur 4 vil veksthastigheten reduseres dersom temperaturen øker eller minker. Mot null grader stopper aktiviteten av muggvekst og muggsoppen går i dvale. Mot 40-50°C vil de fleste muggsopper dø ut.

Fuktinnholdet i lufta er gitt som forholdet mellom vanddamp i lufta og den maksimale vanddampmengden lufta kan inneholde som mettet (Thue, 2016). Ettersom metningstrykket avtar ved lavere temperaturer, vil fuktig luft som avkjøles, få en økende RF. 100% RF nås dersom lufta avkjøles til den temperaturen hvor metningstrykket er lik vanddamptrykket i lufta. Denne temperaturen kalles luftas doggpunkttemperatur eller duggpunktet. Dersom lufta avkjøles ytterligere vil noe av vanddampen utfelles som væske (kondens). Ved kontakt med en overflate med lavere overflatetemperatur enn temperaturen i lufta kan det oppstå overflatekondens (Geving, 2012). Det er spesielt ved varig oppfukting at risikoen for muggvekst er stor. Det er også viktig å være klar over at variasjoner i lufthastighet, strålingsforhold og fuktutveksling kan bidra til store temperaturvariasjoner på overflaten av et materiale. Ved vurdering av risiko for muggvekst er en som regel interessert i ekstremisituasjoner. Selv om hoveddelen av en overflate gir akseptable verdier, vil det kunne være kuldebroer som fører til muggvekst i kroker og hjørner (Geving, 2012). Dimensjonering for å unngå kondens og muggvekst på innvendige overflater er gitt i NS-EN 13788. Beregningsmetoden er basert på en temperaturfaktor og ut ifra kritisk nivå for RF og antatt fuktinnhold kan en beregne akseptabel overflatetemperatur. Videre kan den dimensjonerende temperaturfaktoren beregnes. Dersom RF ved overflaten overstiger 80% over lengre perioder vil dette være gode vekstvilkår for muggsopp.



Figur 4: Relativ muggveksthastighet med varierende temperatur og RF. Hentet fra Geving & Holme (2010).

3 Metode

3.1 Valg av forskningsmetode

En forskningsmetode benyttes for å fremskaffe og analysere relevant data (Dalland, 2012). Innen forskning skilles det vanligvis mellom to forskningsmetoder: kvantitativ og kvalitativ metode. Kvantitativ forskningsmetode viser til kvalifiserbare enheter, mens kvalitative metode vektlegger betydning og innhold. Metodene utfyller hverandre og det blir stadig mer vanlig å kombinere disse i ett og samme prosjekt, betegnet «Mixed Methods design» (Creswell, 2017). Informasjon innhentet fra den kvalitative metoden kan videre benyttes til å forstå og se sammenhenger ved de kvantitative resultatene. Den kvantitative metoden kan på den måten bidra til å gi et generelt bilde av forskningsproblemet, mens den kvalitative metoden vil kunne gi en bedre forståelse eller forklare det generelle bildet.

Generelt for denne masteroppgaven er det valgt å benytte en kombinasjon av kvantitativ og kvalitativ forskningsmetode. Litteraturstudiet og sekundærlitteratur har bidratt til en bredere forståelse av fuktproblematikk og bruk av tape til bygningsmessige formål. Egne data for vandampmotstand av tape er samlet inn gjennom laboratorieforsøk og er videre analysert ved hjelp av fuktberginger. Dette kapittelet vil fokusere på å presentere informasjon om de ulike metodene benyttet som ikke er lagt frem i den vitenskapelige artikkelen vedlagt i vedlegg A.

3.2 Litteraturstudie

En litteraturstudie er blitt gjennomført for å kartlegge forskningslitteratur om bruk av bygningstape og for å svare på gitt forskningsspørsmål: «*Hva sier forskningslitteraturen om egenskapene til tape for bygningsmessige formål?*». Litteraturstudiet er også benyttet for å identifisere eventuelle kunnskapshull. Metoden benyttet for å finne relevant litteratur innebærer en fem-trinns prosedyre beskrevet i Arksey and O'Malley (2005):

- Steg 1: identifisere forskningsspørsmålet
- Steg 2: identifisere relevante studier
- Steg 3: studievalg
- Steg 4: kartlegge dataene
- Steg 5: samle, oppsummere og rapportere resultatene

3.2.1 Søkeord

Valg av søkeord ble basert på forskningsspørsmålet utarbeidet og masteroppgavens overordnede tema. For å identifisere relevante forskningsstudier på feltet ble ulike søkeord benyttet, hovedsakelig på engelsk. Som overordnede søkeord ble i hovedsak «Tape» og «Adhesive tape» benyttet. Disse ble også kombinert med avgrensede søkeord ved bruk av funksjonen «Tape» OR «Adhesive tape» AND ... ». De avgrensede søkeordene er presentert i tabell 3. Avgrensede søkeord ble basert på oppgavens tema, i tillegg til gjentakende opplistede nøkkelord for de mest relevante forskningsartiklene. Det ble også benyttet synonymmer for å utvide søket slik som «vapour resistance» og «vapour permeability».

Tabell 3: Oversikt over overordnende og avgrensende søkeord.

Overordnede søkeord	Tape, adhesive tape
Avgrensende søkeord	Buildings, constructions, building envelope
	Air tightness, Air permeability
	Joints, sealings
	Vapour resistance, vapour permeability
	Wind barrier, vapour barrier, air barrier
	Laboratory measurements, tests
	Humidity, moisture, mould growth

3.2.2 Valg av litteratur

Gjennom litteratursøket ble et regneark opprettet for å få en bedre oversikt over de mest relevante artiklene. Informasjon som forfatter, tittel, type journal eller konferanse, nøkkelord og relevante stikkord ble notert. I tillegg ble et kort sammendrag for de mest relevante artiklene skrevet ned. For å sortere artiklene ble det benyttet en tre-trinns prosess bestående av:

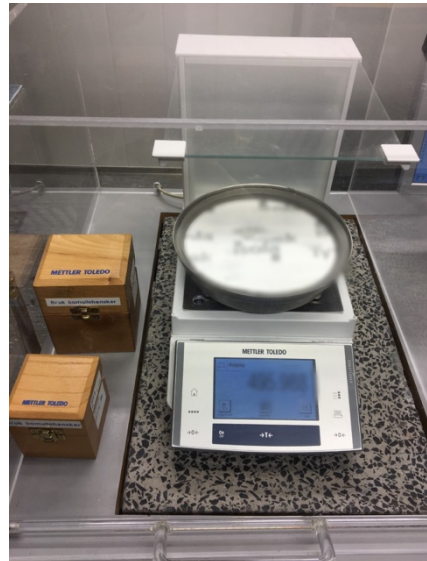
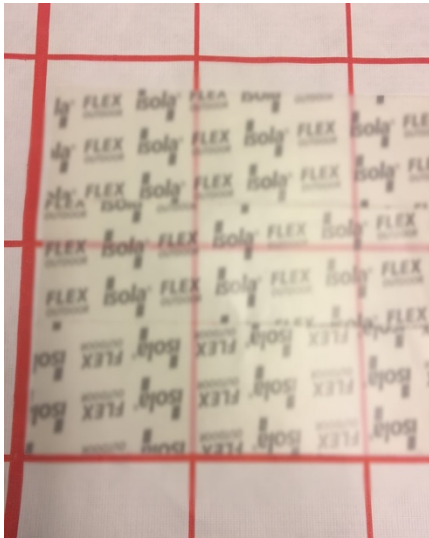
1. Vurdering av relevans basert på artikkelens tittel
2. Gjennomlesing av abstraktet
3. Ytterligere gjennomgang av artikkelen

Flere artikler ble ekskludert på grunn av manglende relevans for oppgaven. I forbindelse med sortering av artiklene var det flere studier hvor ordet «tape» nevnes, men hvor hovedfokuset i studien omhandler noe annet. For eksempel var det flere artikler hvor ordet «tape» ble benyttet, men hvor studien i hovedsak omhandler lufttetthet i bygninger og bruk av andre tettemetoder. Den resulterende listen med litteratur inneholder studier hvor tape er aktivt nevnt og hvor forskningen er rettet mot bruken av tape. 13 artikler ble inkludert i det avsluttende regnearket og danner grunnlaget for litteraturstudiets resultatdel presentert i den vitenskapelige artikkelen i vedlegg A.

3.3 Laboratorieforsøk

3.3.1 Bestemmelse av vanddampgjennomgang

Vanddampgjennomgangstallet er blitt bestemt i henhold til NS-EN ISO 12572:2016- *Byggematerialers og -produkters hygrotermiske egenskaper - Bestemmelse av egenskaper med hensyn til vanddampgjennomgang - Koppmetoden*. Det er hovedsakelig vindsperrtape som er testet, men en dampsperr tape er testet for sammenligning. For å beregne s_d -verdien til tape måles vanddampgjennomgangen sammen med en vindsperr. Dampmotstanden ble først målt med vindsperrproduktet alene. Den resulterende dampmotstanden til tapen ble gitt som differansen av prøveresultatet med tape og vindsperr målt sammen og dampmotstanden av vindsperrproduktet alene. For å feste produktet til testkoppene ble det benyttet smeltet bivoks og plastilina. Det ble laget fem testprøver for hver enkel produktmåling. Testprosedyren er illustrert i figur 5. Bildene er retusjert for å anonymisere testproduktene.



Figur 5: Prosedyre for måling av vanndampgjennomgang av bygningstape.

Oversikt over hvilke testmetoder som er gjennomført er listet under:

1. Måling av vanndampgjennomgang med vindspærren vendt ned mot 50% RF
2. Måling av vanndampgjennomgang med vindspærren vendt opp mot 50% RF
3. Måling av vanndampgjennomgang med et dobbelt lag av tape
4. Måling av vanndampgjennomgang av tape uten lim/klebefelt.

Måleresultatene er presentert i tabell 4 i den vitenskapelig artikkelen i vedlegg A.

3.3.2 Måleintervall

Testkoppene ble tilsatt en mettet saltløsning av kaliumnitrat (KNO_3) med 93% RF. Materialprøvene ble så plassert som et lokk over koppen og plassert i et testkammer med 50 ± 5 % RF og en temperatur på (23 ± 1) °C. På grunn av forskjeller i fuktighet mellom innsiden og utsiden av koppen vil en dampstrøm oppstå i retning fra høy til lav konsentrasjon. Som et resultat av dampstrømmen utføres periodiske veiinger med utvalgte måleintervaller for å bestemme masseendringen over tid. Ut ifra dette kan vanndampgjennomgangen og materialets s_d -verdi beregnes. Testprøvene måles periodisk inntil fem påfølgende målinger av endring i masse per veiintervall er konstant innenfor $\pm 5\%$ av middelverdien for prøven. Måleintervaller basert på materialets s_d -verdi er presentert i tabell 4.

Tabell 4: Måleintervaller basert på s_d -verdi.

s_d -verdi				
$s_d < 0,5$ m	$s_d 0,5 - 2$ m	$s_d < 2- 10$ m	$s_d > 10$ m	$s_d < 50$ m
Morgen og ettermiddag	1 døgn	2-7 døgn	7-14 døgn	14-28 døgn

3.3.3 Måleusikkerhet

Tabell 5 gir en oversikt over forventet usikkerhet i forbindelse med måling av materialers s_d -verdi (Bakken, 2007). Innvirkende forhold av målte s_d -verdier er knyttet til variasjoner av RF og temperatur, og målenøyaktighet ved registrering, usikkerhet forbundet med saltløsningens RF, overlapping mellom prøve og testkopp, temperatur i testkopp under prøving, samt målenøyaktighet på grunn av vekten og variasjon i barometertrykk. Den totale måleusikkerheten er beregnet ut ifra de overnevnte forholdene.

Tabell 5: Måleusikkerhet av s_d -verdi.

Materiale [m]	Total måleusikkerhet [%]
Mindre enn 5	9 %
5-30	11 %
Større enn 30	13 %

3.4 Fuktberegninger

3.4.1 Generelt

For å vurdere i hvilken grad uttørkingsforholdene i bygningskonstruksjoner påvirkes av dampmotstanden til tape er beregningsprogrammet WUFI benyttet. Beregningene som er utført inkluderer både en- og to-dimensjonale simuleringer. De en-dimensjonale simuleringene er gjennomført ved hjelp av WUFI Pro 6.4. Programmet tar hensyn til fuktkapasitet i materialer og beregner forventet fukttransport ved vandampdiffusjon og kapillærtransport (Fraunhofer IBP, 2019). Beregningene er transiente (over tid) av ikke-stasjonære, hygrotermiske forhold. Endring av temperatur, relativ fuktighet og vanninnhold varierer med valgt klimadata. Valgt klimadata er beregnet på timebasis og inkluderer både solstråling og regn. Beregningsprogrammet tar ikke hensyn til varme- og fukttransport grunnet luftlekkasjer i konstruksjonen. Simuleringene i denne oppgaven tar derfor utgangspunkt i uttørring av byggfukt ved at ulike startfuktinnhold er spesifisert for hvert enkelt materiale. For å studere eventuelle to-dimensjonale effekter er det i tillegg utført beregninger i programmet WUFI 2D 4.2. Programmet utfører to-dimensjonale beregninger av koblet fukt- og varmetransport (Fraunhofer IBP, 2019).

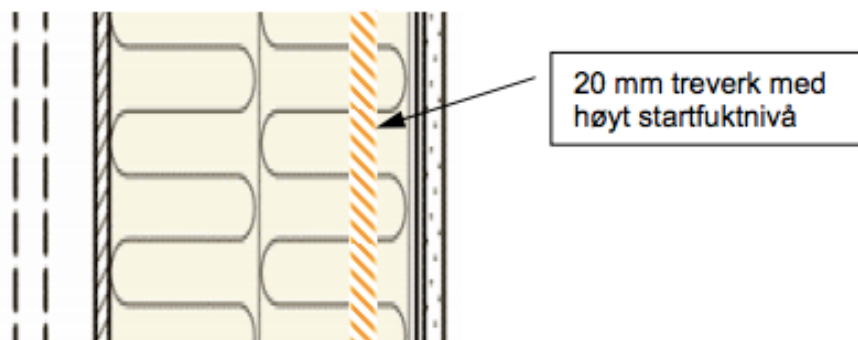
3.4.2 Inputparametere

For uteklimaet er det benyttet såkalte Moisture Design Reference Years (MDRY) for henholdsvis Oslo, Trondheim, Bergen og Karasjok. MDRY er timesbasert og representerer en mer kritisk fuktbelastning sammenlignet med gjennomsnittsklimaet. For alle beregningstilfellene er konstruksjonen vendt mot nord. Valgt inneklime er i samsvar med ISO 13789 for fuktklasse 2 med tilhørende uteklima. Dette tilsvarer et fukttilskudd på 4 g/m^3 for temperaturer under $5 \text{ }^\circ\text{C}$ og et fukttilskudd på 2 g/m^3 for temperaturer mellom $5\text{-}15 \text{ }^\circ\text{C}$. Innetemperaturen er satt til $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Fuktklasse 2 er ifølge standarden klassifisert som normal fuktbelastning. I følge Geving & Holme (2010) representerer valgt inneklime en høyere luftfuktighet enn det som er gjennomsnittlig for norske boliger, men ikke til et ekstremt nivå. Konstruksjonssidene som ikke grenser til ute- eller inneklime er satt til en adiabatisk grense. For beregningstilfellene er det valgt å spesifisere startfuktinnholdet for hvert enkelt materialsjikt. For veggens trestender er det variert mellom tre ulike startfuktinnhold: 25, 20 og 15 vektprosent. For de andre materialene er det lagt inn et startfuktinnhold tilsvarende 80% RF.

3.4.3 Bindingsverkvegg i 1D

En-dimensjonale beregninger av en bindingsverkvegg er utført i WUFI Pro for å studere effekten ved bruk av vindsperrtape. For å etterligne bruken av tape benyttes et egendefinert materiale basert på resultatene fra laboratorieforsøkene. Det er definert tre ulike vindsperrtapeprodukter tilsvarende de som er inkludert i laboratoriemålingene. Siden beregningene er en-dimensjonale legges tapeproduktet inn som et eget en-dimensjonalt sjikt på utsiden av vindsperran. For å vurdere uttørkingen av bindingsverket er det i likhet med Geving & Holme (2010) lagt inn en «fiktiv» trestender på 20 mm i isolasjonssiktet som vist i figur 6. Dette er for å etterligne et reelt tilfelle hvor treverket er oppfuktet under byggeperioden. Ytterveggkonstruksjonen har følgende oppbygning fra innvendig side:

- 12 mm gipsplate
- Dampsperre
- 20 mm mineralull
- 20 mm trestender
- 130 el. 230 el. 370 mm Mineralull
- Vindsperre
- Vindsperre tape
- Luftet kledning



Figur 6: Vertikalsnitt av bindingsverkvegg i 1D. Illustrasjon hentet fra Geving & Holme (2010).

Den luftede kledningen består av en ytterkledning av skandinavisk gran, samt en lufte- og dreningsspalte. For å etterligne effekten av en luftet kledning og for å gi en mest mulig reell fuktlagringskapasitet er luftespalten inndelt i tre deler (Mundt, 2015). Det midtre sjiktet består av en 20 mm luftespalte og er lagt inn som et luftsjikt uten ekstra fuktkapasitet. I realiteten vil lufttransporten i luftespalten styres av vindtrykk og termisk oppdrift. For å etterligne denne situasjonen er det lagt inn en ventilasjonskilde på 20 h^{-1} med luft blandet fra utvendig side. På hver side av den 20 mm luftespalten er det lagt til ett 5 mm tynt luftsjikt. For å representere slagregnbelastningen mot den utvendige kledningen er det lagt til en regnbelastning på 1% i det ytterste luftsjiktet på 5 mm.

I realiteten vil luftskiftet i dreningsspalten varierer over tid i henhold til vindbelastningen. Beregningsprogrammet tar heller ikke hensyn til konveksjon og at luftspalten vil være åpen i topp og bunn. Beregningene som er gjennomført i denne studien inkluderer en konstant luftskiftning og vil derfor kunne avvike noe fra virkelige forhold. Analyser viser likevel at en forenkling som dette vil kunne gi tilfredsstillende resultater dersom luftskiftet er stort nok (Mundt, 2015). Tabell 6 viser en oversikt over materialene som er benyttet i beregningene og deres materialparametere. Materialene er hentet fra WUFI sin egen materialdatabase. Vindsperratapematerialet er lagt inn med materialparametere fra laboratoriestudien som er gjennomført.

Tabell 6: Oversikt over materialene som er benyttet i beregningen og materialparametere. Hentet fra materialdatabase fra WUFI, samt målte verdier for vindsperretape fra laboratorieforsøket.

Materiale	Densitet [kg/m³]	Varmekapasitet [J/(kgK)]	Varmekonduktivitet [W/mK]	Diffusjonsmotstand [-]
Gipsplate	850	850	0,2	8,3
Dampsperre	130	2 200	2,2	70 000
Mineralull	60	850	0,04	1,3
Skandinavisk gran	420	1 600	0,13	50
Vindsperre	130	2 300	2,3	100
Vindsperretape	130	2 300	2,3	8 900, 1 500 og 1 200

For å vurdere hvordan bruk av tape påvirker uttørkingen i bygningskonstruksjonen er det gjennomført ulike parameterstudier. Simuleringene har en beregningstid på ett år og som standard startberegningstidspunkt er det valgt å beregne uttørkingen fra 1. april. I følge Geving & Holme (2010) er det uttørkingen de første 12 ukene som er mest interessante. Det er derfor valgt å ta utgangspunkt i de tre første månedene ved vurdering av hvordan uttørkingsforholdene påvirkes for de ulike beregningstilfellene. Bruk av tape er spesielt av interesse ved prosjektering av energieffektive bygninger hvor det stilles strenge krav til lufttetthet og energiforbruk. For standard beregningstilfelle er det derfor valgt en isolasjonstykkelse på 400 mm for å oppnå minstekravet til U-verdi for passivhus og lavenergibygninger på 0,15 W/(m²K) (Dokka et al. (2009)). I tillegg er det valgt å variere vanndampmotstanden i både vind- og dampsperreresjiktet for å vurdere i hvilken grad fukttransporten påvirkes av endringer i sperresjiktets vanndampgjennomgang. Beregningene er også gjennomført for ulike startberegningstidspunkt for å studere hvordan uttørkingen varierer for ulike årstider i løpet av ett år. Oversikt over de ulike beregningstilfellene for de en-dimensjonale beregningene er presentert i tabell 7 og 8.

Tabell 7: Beregningstilfeller for bindingsverkegg 1D, del 1.

VARIABLE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Uteklima = Oslo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Uteklima = Trondheim											
Uteklima = Bergen											
Uteklima = Karasjok											
Sd vindspærre tape = 8,9 m	x				x		x		x		x
Sd vindspærre tape = 1,5 m		x									
Sd vindspærre tape = 1,2 m			x								
Uten bruk av tape				x		x		x		x	
Startfuktnivå treverk 25%	x	x	x	x					x	x	x
Startfuktnivå treverk 20%					x	x					
Startfuktnivå treverk 15%							x	x			
Isolasjon = 400 mm	x	x	x	x	x	x	x	x			
Isolasjon = 250 mm									x	x	
Isolasjon = 150 mm											x
Beregning fra 1. april	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
Beregning fra 1. juli											
Beregning fra 1. oktober											
Beregning fra 1. januar											
Vindspærre sd= 0,1 m	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Vindspærre sd= 0,5 m											
Dampspærre sd= 70 m	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Dampspærre sd = 2 m											

Tabell 8: Beregningstilfeller for bindingsverkvegg 1D, del 2.

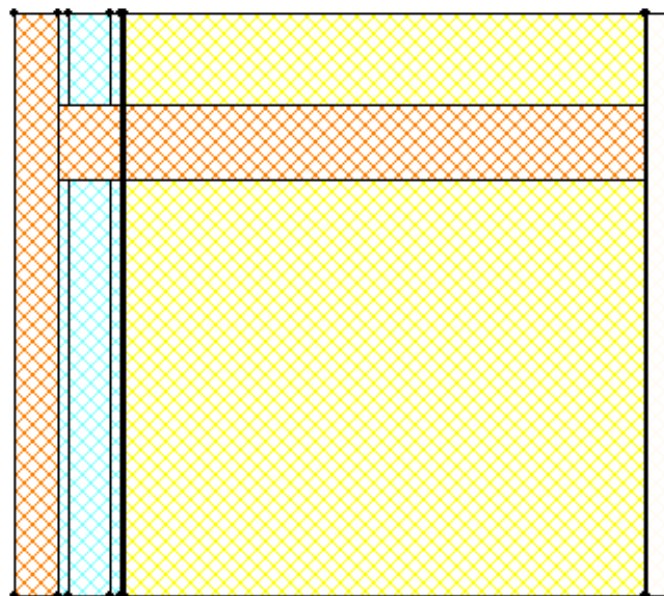
VARIABLE	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Uteklima = Oslo	x				x	x	x	x	x	x
Uteklima = Trondheim		x								
Uteklima = Bergen			x							
Uteklima = Karasjok				x						
Sd vindspærre tape = 8,9 m		x	x	x	x	x	x	x	x	x
Sd vindspærre tape = 1,5 m										
Sd vindspærre tape = 1,2 m										
Uten bruk av tape	x									
Startfuktnivå treverk 25%	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Startfuktnivå treverk 20%										
Startfuktnivå treverk 15%										
Isolasjon = 400 mm		x	x	x	x	x	x	x	x	x
Isolasjon = 250 mm										
Isolasjon = 150 mm	x									
Beregning fra 1. april	x	x	x	x				x	x	
Beregning fra 1. juli					x					
Beregning fra 1. oktober						x				
Beregning fra 1. januar							x			
Vindspærre sd= 0,1 m	x	x	x	x	x	x	x		x	
Vindspærre sd= 0,5 m								x		x
Dampspærre sd= 70 m	x	x	x	x	x	x	x	x		
Dampspærre sd = 2 m									x	x

3.4.4 Bindingsverkvegg i 2D

I likhet med de en-dimensjonale beregningene er det utført to-dimensjonale simuleringer for bruk av tape som tettemetode mellom skjøter av vindsperre. For de en-dimensjonale beregningene ble vindsperrretapen lagt inn som et eget en-dimensjonalt sjikt på utsiden av vindsperran. I realiteten vil tapen rulles ut som tapeproduktets bredde og dermed ikke utgjøre et like stort areal som de en-dimensjonale beregningene tilsier. For å få et mer realistisk bilde på hvordan uttørkingsforholdene påvirkes ved bruk av tape i kun vindsperreskjøtene er det utført to-dimensjonale beregninger av samme konstruksjonsløsning. Det er valgt å simulere bindingsverkvegg som et horisontalsnitt for å illustrere at tapen kun er montert i tapens bredde. Bredden er tilsvarende tapeproduktene benyttet i laboratorieforsøkene med en bredde på 60 mm. I beregningene er vindsperrretapen plassert i overgangen mellom trestenderen og utlektingen i luftespalten. Vindsperrretapen er lagt inn med en tykkelse på 1 mm ettersom beregningsprogrammet ikke kan beregne varme og fukttransport av tynnere materialsjikt. I realiteten har tapen en tykkelse på nærmere 0,5 mm. For å tette hulrommet over og under tapesjiktet er det lagt inn en luftspalte på 1 mm i samsvar med den innerste delen av veggens luftspalte. Den generelle oppbygningen av ytterkonstruksjonen er lik som for de en-dimensjonale beregningene gitt som:

- 12 mm gipsplate
- Dampsperre
- Mineralull 400 mm m/ bindingsverk av gran
- Vindsperre
- Vindsperretape
- Luftet utvendig kledning av gran

Horisontalsnittet slik det er beregnet i WUFI 2D er presentert i figur 7. De ulike beregningstilfellene samsvarer med de en-dimensjonale beregningene gitt i tabell 7 og 8.



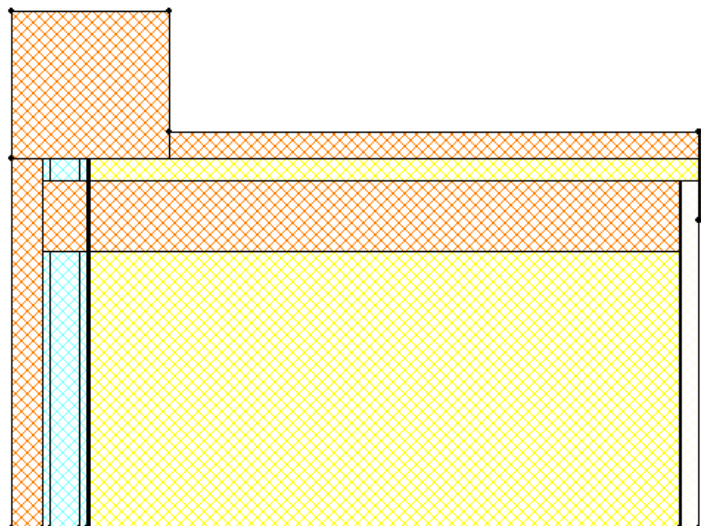
Figur 7: Horisontalt snitt av bindingsverk i WUFI 2D.

3.4.5 Vinduskarm i 2D

Det er gjennomført to-dimensjonale beregninger for å undersøke hvordan uttørkingen av losholten i bindingsverket påvirkes dersom tape benyttes som tettemetode rundt vinduer. For beregningene er det valgt å ta utgangspunkt i et vertikalsnitt av vinduets bunnkarm. Veggkonstruksjonen under vinduet har samme oppbygning og betingelser som den simulerte bindingsverkveggen. Vertikalsnittet slik det er beregnet i WUFI 2D er vist i figur 8. Vinduskarmen består av en 18 mm tykk foring og en bunnkarm forenklet til et rektangel på 100 mm. Hulrommet under foringen er fylt med mineralull etterfulgt av en dampsperrtape ($s_d = 20$ m) og listverk. Oppbygningen fra innvendig side er som følgende:

- 12 mm gipsplate
- Dampsperre ($s_d = 70$ m)
- 400 mm mineralull m/ bindingsverk av gran
- Vindsperre ($s_d = 0,1$ m)
- Vindsperre tape ($s_d = 8,9$ m)
- Luftet kledning

Ulike parameterstudier er gjennomført for å vurdere hvordan vindsperretape som tettemetode rundt vindu påvirker uttørkingsforholdene. Det er i dette tilfellet valgt å ta utgangspunkt i varierende isolasjonstykkelse og startfuktinnhold i treverket. For foringen i vinduskarmen er det lagt inn et lavt fuktinnhold i treverket ettersom foringen monteres senere i byggeprosessen. For dampsperrtapen er det lagt til et egendefinert materiale som samsvarer med resultatet fra laboratorieforsøket. Parameterstudiene som er gjennomført er gjort både med og uten vindsperretape. I tillegg er det undersøkt hvordan uttørkingen påvirkes når flere lag med tape benyttes. Beregningsperioden går over ett år med et starttidspunkt 1. april. Uteklimaet er satt til Oslo. En oversikt over de ulike beregningstilfellene er presentert i tabell 9.



Figur 8: Vertikalsnitt av vinduskarm i WUFI 2D.

Tabell 9: Beregningstilfeller for vinduskarm 2D.

VARIABLE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Uteklima Oslo =	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x
Uteklima Trondheim =												x					
Uteklima Bergen =													x				
Uteklima Karasjok =														x			
Sd vindsperre tape = 8,9 m	x		x		x		x		x			x	x	x	x	x	x
Uten bruk av tape		x		x		x		x		x							
Dobbel tape sd=20 m											x						
Startfuktnivå treverk 25%	x	x					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Startfuktnivå treverk 20%			x	x													
Startfuktnivå treverk 15%					x	x											
Isolasjon 400 mm =	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x	x	x	x
Isolasjon 250 mm =							x	x									
Isolasjon 150 mm =									x	x							
Beregning fra 1. april	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
Beregning fra 1. juli															x		
Beregning fra 1. oktober																x	
Beregning fra 1. januar																	x

3.5 Muggvekstanalyse

3.5.1 WUFI Mould Index VTT

For å vurdere risikoen for muggvekst for de en-dimensjonale beregningene er det gjennomført en muggvekstanalyse ved hjelp av programmet WUFI Mould Index VTT 2.1. Programmet lastes ned som et tilleggsprogram i WUFI Pro. Muggvekstmodellen er basert på en forskningsstudie utført av Hukka & H. A Viitanen (1999) og H. A Viitanen et al. (2000). Modellen baserer seg på varigheten av egnede eksponeringsbetingelser som kreves for at muggvekst skal kunne oppstå. Beregningene er også basert på visuelle funn under kjente fuktighets- og temperaturforhold.

Muggvekstmodellen vurderer risikoen for muggvekst for tre og andre materialer. Ved hjelp av beregningsresultatene i WUFI Pro vurderes muggvekstrisikoen ut ifra ulike muggindeksnivåer. Indeksene tilsvarer en verdi fra 0-6 ut ifra hvor mye muggvekst som oppstår på en overflate både ved hjelp av mikroskop og visuelt. Indeksene er nærmere forklart i tabell 10. Materialer som er i direkte kontakt med innelufta bør ikke overskride muggvekstindeks 1 (Fraunhofer IBP, 2018). Til sammenligning bør overflater mot uteklimaet ha en muggvekstindeks på maksimalt 3. Kriteriene for muggvekst avhenger av materialtype, temperatur, luftfuktighet og tid. Muggvekstmodellen definerer ulike sensitivitetsklasser for materialer fra veldig sensitiv til motstandsdyktig som vist i tabell 11.

Tabell 10: Oversikt over muggvekstindeksene. Hentet fra Fraunhofer IBP & VTT (2018).

Muggvekstindeks	Beskrivelse
0	Ingen muggvekst
1	Små mengder med mugg (mikroskop)
2	Større muggvekstkolonier (mikroskop)
3	Visuelle funn av muggvekst, <10% dekning eller <50% ved mikroskop
4	Visuelle funn av muggvekst, 10-50% dekning eller >50% ved mikroskop
5	God vekst på overflate, >50% dekning visuelt
6	Kraftig vekst av mugg, ca. 100% dekning

Tabell 11: Sensitivitetsklasse basert på materialtype. Hentet fra Fraunhofer IBP & VTT (2018).

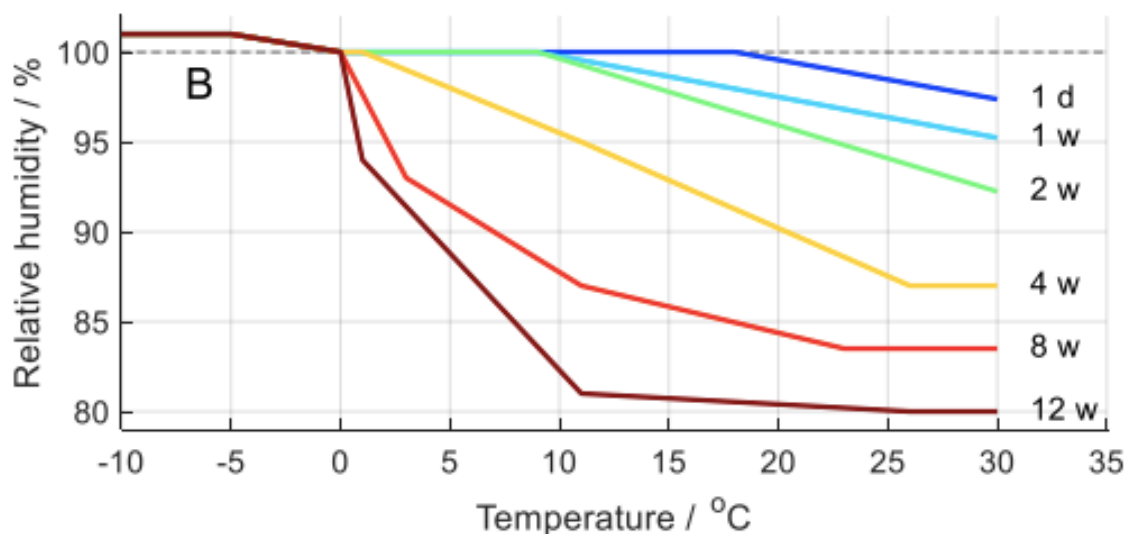
Sensitivitetsklasse	Materiale
Veldig sensitiv	Ubehandlet treverk med næringsstoffer for biologisk vekst
Sensitiv	Høvlet tre, papirbaserte produkter, trebaserte plater
Medium motstandsdyktig	Sement eller plastikk baserte materialer, mineralfiber
Motstandsdyktig	Glass og metall, materialer med effektiv beskyttende behandling

Muggvekstmodellen vurderer risikoen for muggvekst ut ifra ligning 5 som representerer den kritiske relative fuktigheten RH_{crit} . Verdien beskriver den laveste relative fuktigheten som kreves for at muggvekst kan oppstå dersom et materiale blir eksponert over lengre tid. For veldig sensitive byggematerialer som treverk settes RH_{min} lik 80%. For mer motstandsdyktige materialer kreves en høyere verdi av RH_{min} eller en lengre eksponeringsperiode for at biologisk aktivitet kan starte.

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0.00267T^3 + 0.160T^2 - 3.13T + 100.0 & \text{når } T \leq 20 \\ RH_{min} & \text{når } T > 20 \end{cases} \quad (5)$$

3.5.2 M-modellen og varighetskurver for muggvekst

I tillegg til WUFI Mould Index VTT er varighetskurver til den såkalte m-modellen benyttet for de to-dimensjonale beregningene. Modellen er basert på resultatene fra Hukka & H. A Viitanen (1999) og betrakter risikoen for muggvekst over tid basert på målte verdier av relativ fuktighet og temperatur (Johansson et al. (2017)). For å vurdere risikoen benyttes ulike varighetsskurver som beskriver når muggvekst vil kunne oppstå som en funksjon av relativ fuktighet og temperatur ved seks ulike tidspunkt. Tidspunktene er basert på 1 dag, 1-4 uker, 8 uker og 12 uker som vist i figur 9. Modellen tar utgangspunkt i at muggvekst kan oppstå på kort tid ved høye RF-verdier og over lenger tid ved lavere RF-verdier dersom vekstvilkårene er gode nok. Selve datamodellen er ikke offentlig tilgjengelig. Denne oppgaven vurderer derfor kun risikoen for muggvekst ved å ta utgangspunkt i m-modellenes varighetskurver. Ved hjelp av WUFI 2D er det beregnet timesverdier av relativ fuktighet og temperatur for samtlige beregningstilfeller. For å sammenligne beregningsresultatene med varighetskurven i m-modellen er gjennomsnittlige verdier for ett døgn og hver enkelt uke beregnet. Verdiene er så plottet inn for å undersøke om verdiene overskrider den tilhørende varighetskurven. Resultatene er presentert i kapittel 4.4.2.

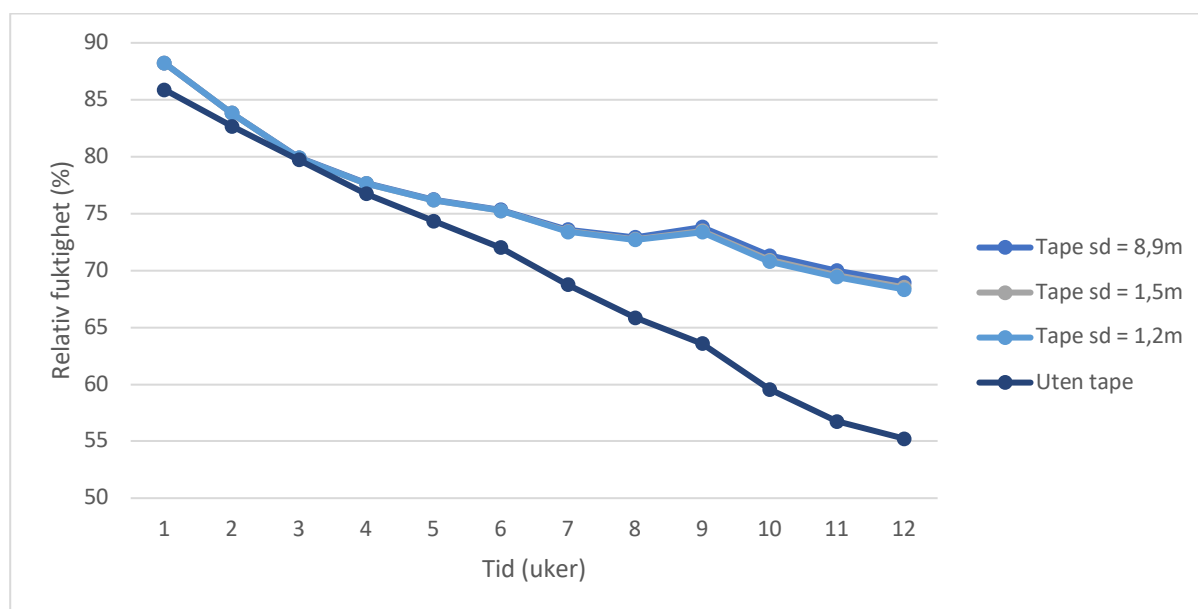


Figur 9: Varighetskurvene i m-modellen for de ulike tidspunkt basert på relativ fuktighet og temperatur.

4 Resultater og vurderinger

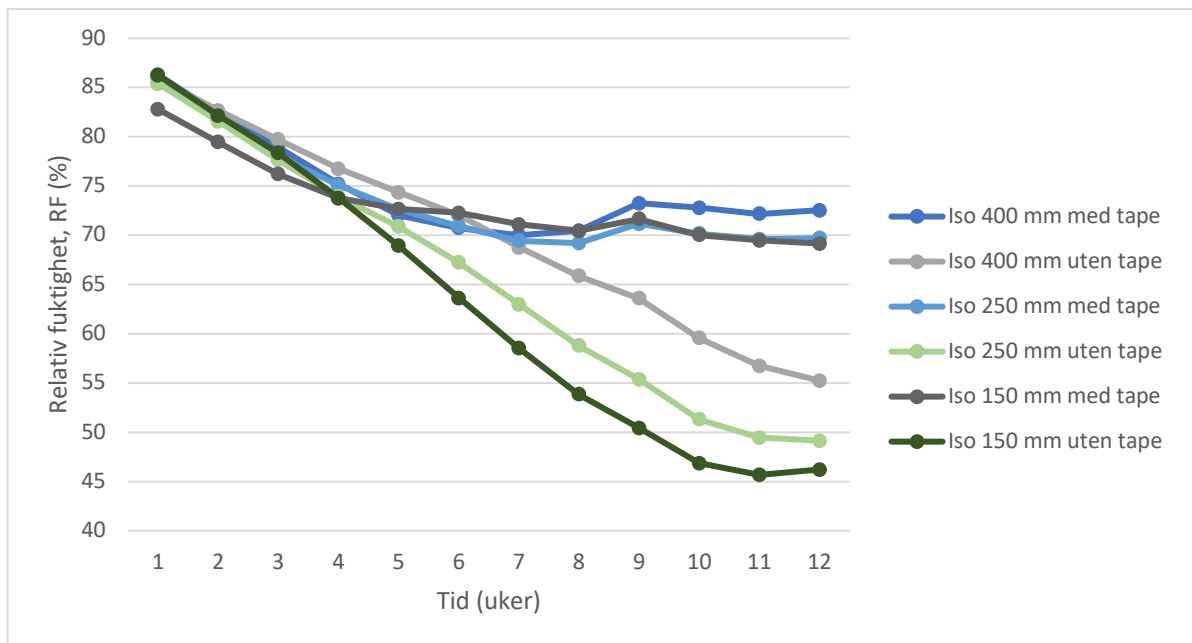
4.1 Bindingsverkegg i 1D

Beregningsforutsetningene er beskrevet i kapittel 3.4.3. Beregningsresultatene er hentet fra midten av den «fiktive» trestenderen, 30 mm fra dampsperreren. Resultatene fra de en-dimensjonale beregningene viser at vindsperretapens vanndampmotstand vil gi en tregere uttørking av treverket som vist i figur 10. Uttørkingen foregår relativt likt de første 3 ukene før uttørkingen bremser for beregningstilfellene hvor vindsperretape er benyttet. I tillegg viser beregningstilfellene for de ulike vindsperreproduktene en lik utvikling for hele beregningsperioden til tross for at en s_d -verdien varierer fra 1,2 m til 8,9 m. Ved et startfuktnivå 25 vekt% vil treverket nå et fuktnivå på 68% RF etter 12 uker når vindsperretape benyttes. For beregningstilfellet uten vindsperretape går uttørkingen betydelig raskere og treverket vil etter 12 uker nå et fuktnivå på 55% RF.



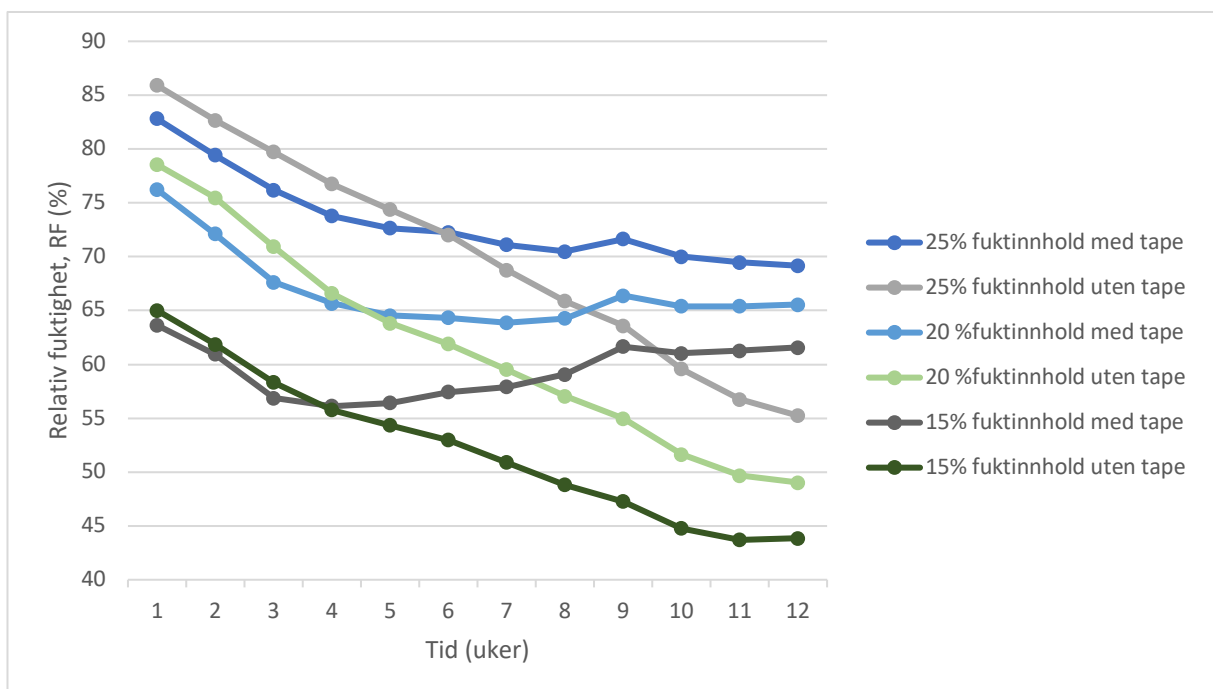
Figur 10: RF i treverket (30 mm fra dampsperreren) for vindsperretape med s_d -verdi på hhv. 8.9 m, 1.5 m og 1.2 meter sammenlignet med uten bruk av tape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Startfuktnivå for treverket er 25 vekt%. Uteklima er Oslo.

I likhet med Geving & Holme (2010) viser beregningene at økt isolasjonstykkelse gir en tregere uttørking av trestenderen. For beregningstilfellene med vindsperretape viser resultatene en generelt tregere uttørking som vist i figur 11. I tillegg viser beregningene at effekten av at økt isolasjonstykkelse gir en tregere uttørking reduseres når tape benyttes. Dette skyldes trolig at damptettheten til tapen i større grad vil kunne forhindre uttørkingen. Uttørkingshastigheten ned til 80% er tilnærmet lik for de ulike beregningstilfellene, noe som er interessant i forhold til risiko for muggvekst. Beregningene viser at effekten av en tregere uttørking vises etter at treverket er tørket ned til under 80% RF. Etersom temperaturen i indre del av vegg vil ha gunstige temperaturforhold gjennom hele året er det spesielt kritisk dersom den relative fuktigheten overstiger 80% over lengre perioder.



Figur 11: RF i treverket (30 mm fra dampsperreren) for hhv. 150, 250 og 400 mm varmeisolasjon med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Startfuktnivå for treverket er 20 vekt%. Uteklima er Oslo.

I forhold til varierende startfukttinnhold i treverket viser beregningene at uttørkingen er relativt lik de tre første ukene med og uten vindsperretape. Videre vil uttørkingen bremse ned for beregningstilfellene med tape som vist i figur 12. For beregningstilfellene med vindsperretape kan en også observere at den relative fuktigheten i treverket stiger etter 5-6 uker. Dette kan skyldes at den utadrettede fukttransporten vil forhindres og at treverket i overgangen mot vindsperreren vil ta opp mye fukt for så og senere å avgi fukten utover i treverket mot en lavere vanndampkonsentrasjon. Beregningsresultatene viser tydelig at startfukttinnholdet i treverket vil ha stor betydning for fukttinnholdet etter 12 uker.



Figur 12: RF i treverket (30 mm fra dampsperreren) for hhv. 15, 20 og 25 vekt% startfukttinnhold i treverket med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Uteklima er Oslo.

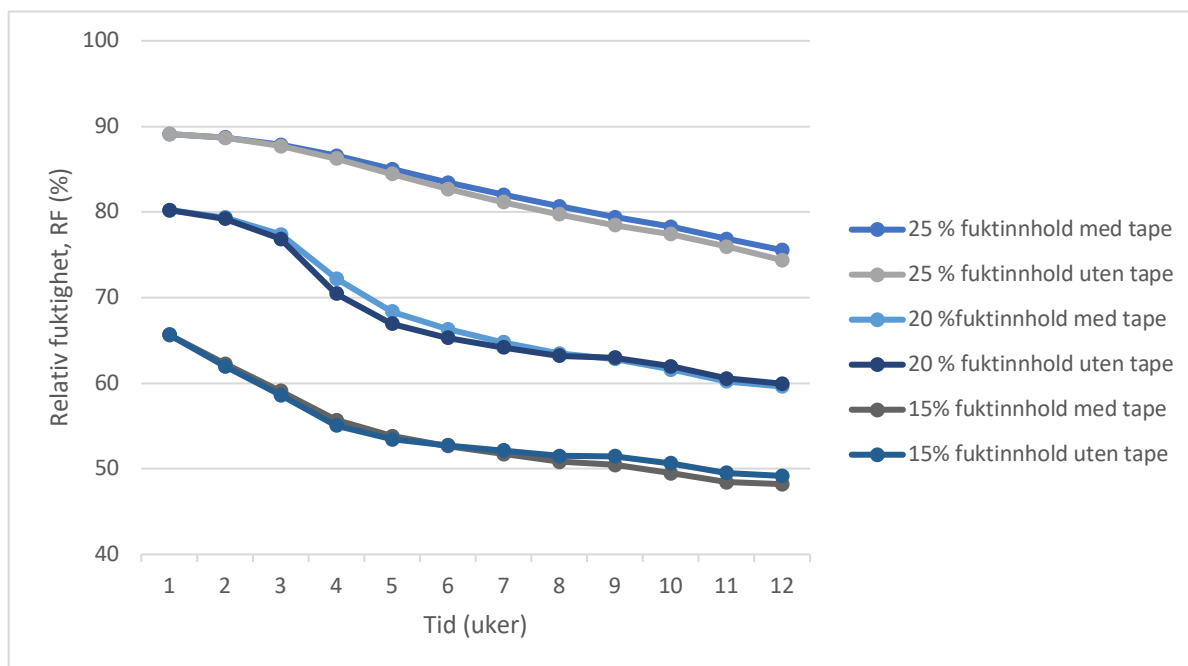
Parameterstudien for de en-dimensjonale beregningene av bindingsverkveggen viser også at en økning i vindsperrrens vandampmotstand ikke vil ha noen påvirkning grunnet vindsperrretapens diffusjonsmotstand. Beregningstilfellet med en mer dampåpen dampsperre med en s_d -verdi på 2 meter viser en raskere uttørking. Dette kommer av at dampsperreren i dette tilfellet vil tillate en innadrettet uttørking slik at treverket kan tørke både mot utvendig og innvendig side av ytterveggen. Forskjellen er likevel minimal og tiden det tar før fuktnivået i treverket er under 80% er 1-1.5 uker for begge tilfeller.

I forhold til ulike startberegningstidspunkt viser resultatene at uttørkingen 30 mm fra dampsperreren i stor grad påvirkes av luftfuktigheten i innelufta. Startpunktet 1. juli gir den tregeste uttørkingen, og fuktnivå i treverket vil ikke nå 80% RF før etter 11 uker. Den raskeste uttørkingen foregår i januar. For de andre beregningstidspunktene i både april, oktober og januar vil fuktigheten ligge over kritisk grense etter en uke etter at bygget er lukket med et startfuktinnhold på 25 vekt% i treverket. Beregningstilfeller for Oslo, Trondheim, Bergen og Karasjok viser en relativt lik uttørkingen av treverket. Oslo som uteklime gir tregest uttørking, etterfulgt av Trondheim og Bergen. Karasjok gir en raskere uttørking for veggens indre del. Dette skyldes hovedsakelig at det kalde klimaet bidrar til en lavere innvendig luftfuktighet.

I tillegg til å undersøke hvordan uttørkingen påvirkes ved bruk av vindsperrretape er det interessant å se hvordan den relative fuktigheten og temperaturen varierer over tid. Generelt viser beregningene at fuktigheten er høyere mot vindsperrresjiktet i ytre del av vegg. Med tanke på vekstvilkårene til muggvekst vil temperaturforholdene i veggens indre del være mer gunstig over lengre perioder. Beregningene viser at temperaturen 30 mm fra dampsperreren aldri vil være lavere enn 17 grader i løpet av ett år.

4.2 Bindingsverkegg i 2D

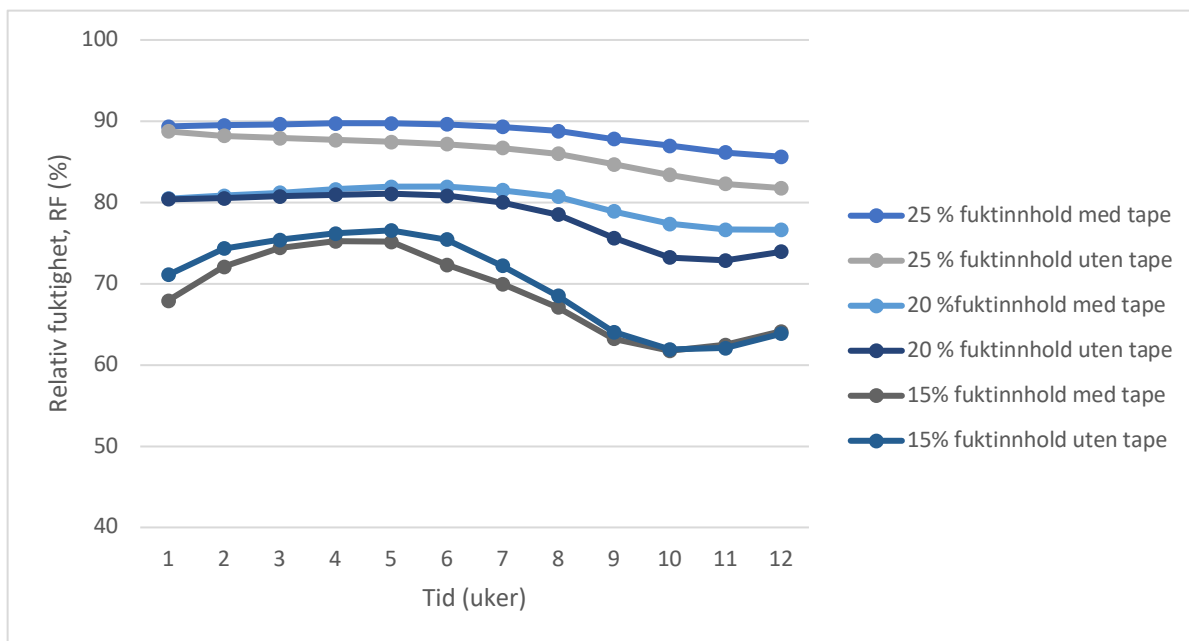
Beregningsforutsetningene er beskrevet i kapittel 3.4.4. Resultatene er hentet fra samme beregningspunkt som for de en-dimensjonale beregningene (nr.1), samt i midten av trestenderens overflate mot vindspærren (nr.2). Resultatene viser at fuktnivået i treverket generelt er høyere for de to-dimensjonale beregningene. Dette skyldes i hovedsak at de en-dimensjonale beregningene kun beregner byggfukt fra den «fiktive» trestenderen på 20 mm og at mer treverk vil gi mer byggfukt. Beregnet relativ fuktighet og temperatur for beregningspunktene er presentert i vedlegg C. Med tanke på uttørkingshastigheten viser de to-dimensjonale beregningene at vindspærretapens diffusjonsmotstand i liten grad påvirker uttørkingen av treverket som vist i figur 13. Dette skyldes trolig at vindspærretapen kun er lagt inn som tapens bredde på 60 mm og at fuktigheten i treverket vil kunne tørke ut på sidene av der tapen er montert. Beregningene viser også at bruk av et dobbelt lag med tape ikke vil påvirke uttørkingen i større grad enn ved bruk av kun ett lag med tape. Dette understreker det faktum at uttørkingen kan foregå på siden av tapens bredde.



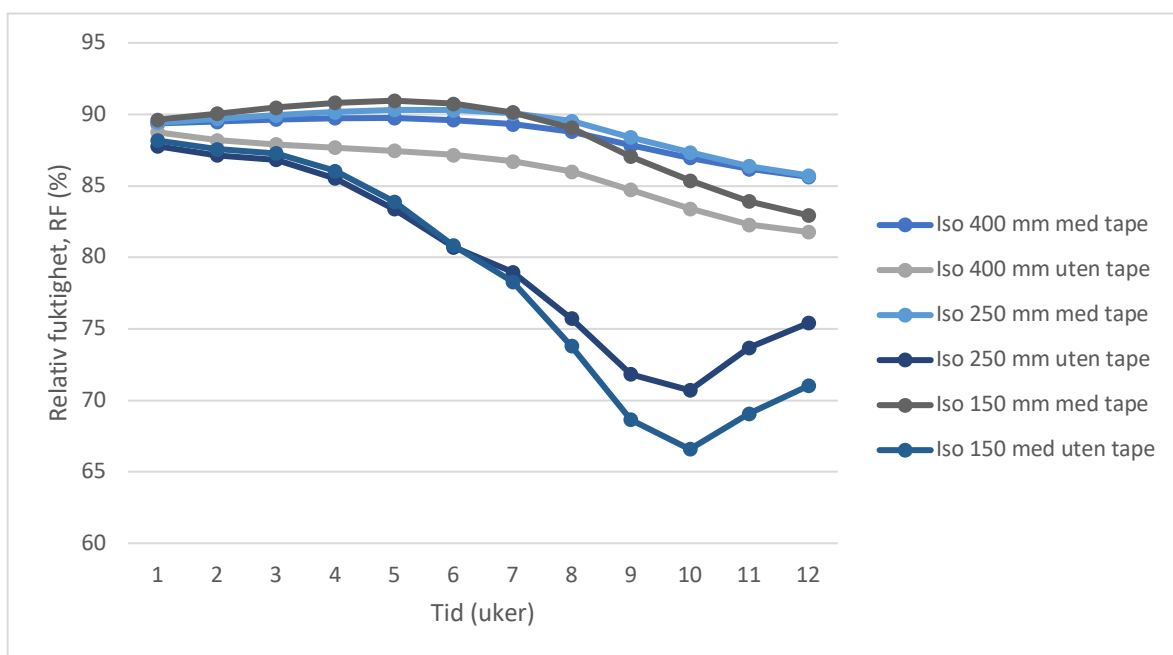
Figur 13: RF i treverket (30 mm fra dampspærren) for startfuktnivå i treverket på hhv. 25, 20 og 15 vekt% med og uten vindspærretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Uteklime er Oslo.

I sammenligning med beregningspunkt nr. 1 viser resultatene fra beregningspunkt nr. 2 at bruk av vindspærretape har en større påvirkning for uttørkingen av trestenderen. Beregningene viser også at tapens betydning for uttørking øker med økende fuktinnhold som vist i figur 14. Årsaken til at tape får større betydning for uttørkingsforholdene ved overflaten mot vindspærren skyldes trolig at uttørkingen forhindres i det aktuelle punktet grunnet vindspærretapens diffusjonsmotstand. Generelt er også den relative fuktigheten høyere ved beregningspunkt nr. 2 grunnet kaldere temperaturer mot veggens ytre del.

Beregningspunkt nr.2 viser også i likhet med de en-dimensjonale beregningene en varierende uttøringshastighet basert på isolasjonstykkelsen. Ved en isolasjonstykkelse på 400 mm viser beregningene at tapens innvirkning er minimal som vist i figur 15. For beregningstilfellene med en isolasjonstykkelse på 250 og 150 mm påvirker dampmotstanden uttørkingen i større grad. Grunnen til at bruk av vindsperretape ikke har så stor innvirkning ved 400 mm isolasjon kan komme av at den relative fuktigheten i stor grad øker på grunn av den økende isolasjonstykkelsen.



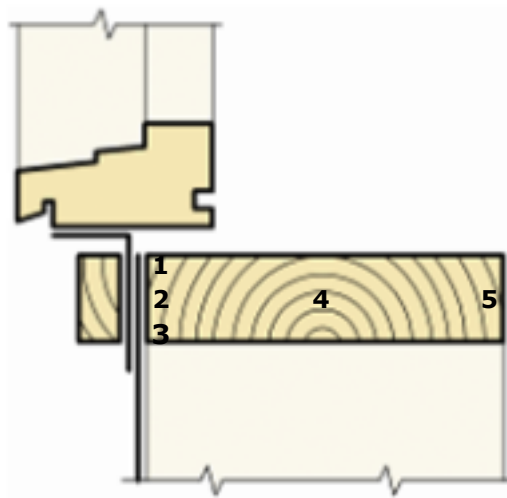
Figur 14: RF i treverket (mot vindsperreren) for hhv. 25, 20 og 15 vekt% i treverket med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Uteklima er Oslo.



Figur 15: RF i treverket (mot vindsperreren) for hhv. 150, 250 og 400 mm varmeisolasjon med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Startfuktnivå for treverket er 25 vekt%. Uteklima er Oslo.

4.3 Vinduskarm i 2D

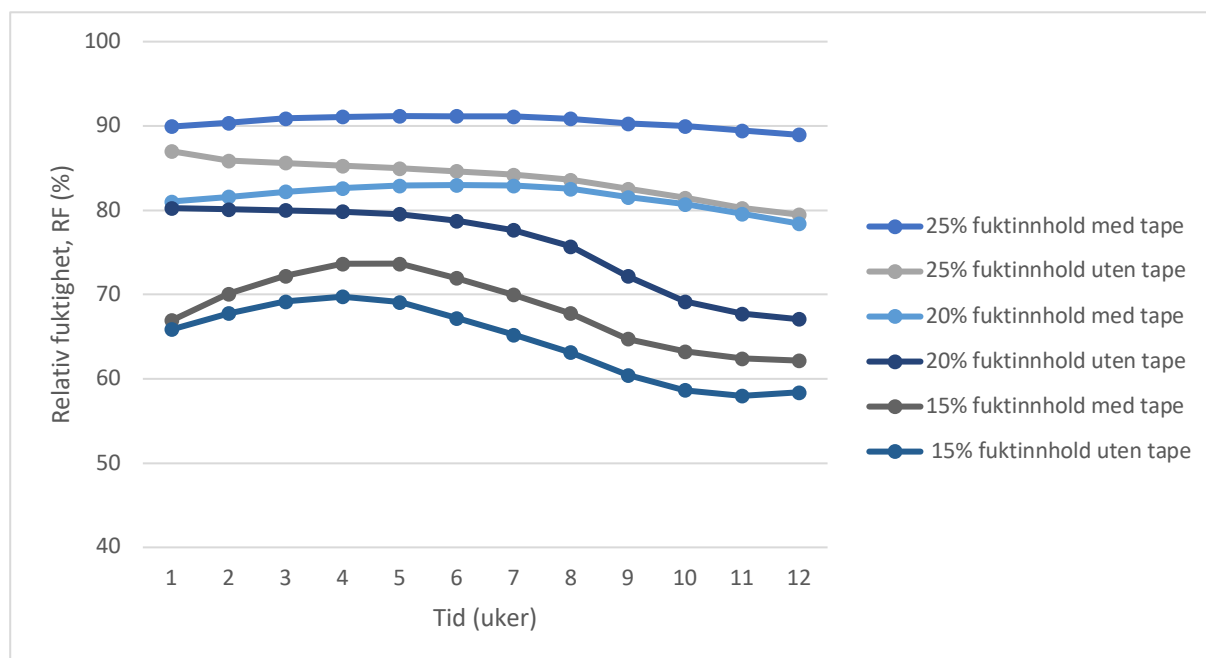
Beregningsforutsetningene er beskrevet i kapittel 3.4.5. For de utførte beregningene er det hentet resultater fra ulike steder av bindingsverkets losholt. De fem beregningspunktene som er vurdert er illustrert i figur 16. Ettersom muggvekst kun vil vokse på overflaten av treverket er det hovedsakelig valgt beregningspunkter ved treverkets overflate mot vindsperrsjiktet. Det er tillegg tatt ut resultater fra midten av losholten. Ettersom temperaturen øker mot varm side av konstruksjonen, vil det også være mer kritisk dersom fuktigheten er over 80% over lengre perioder da vekstbetingelsene for muggvekst krever en temperatur på over 5 °C.



Figur 16: Illustrasjon for utvalgte beregningspunkter i vinduskarmen. Hentet fra Skogstad & Asphaug (2012).

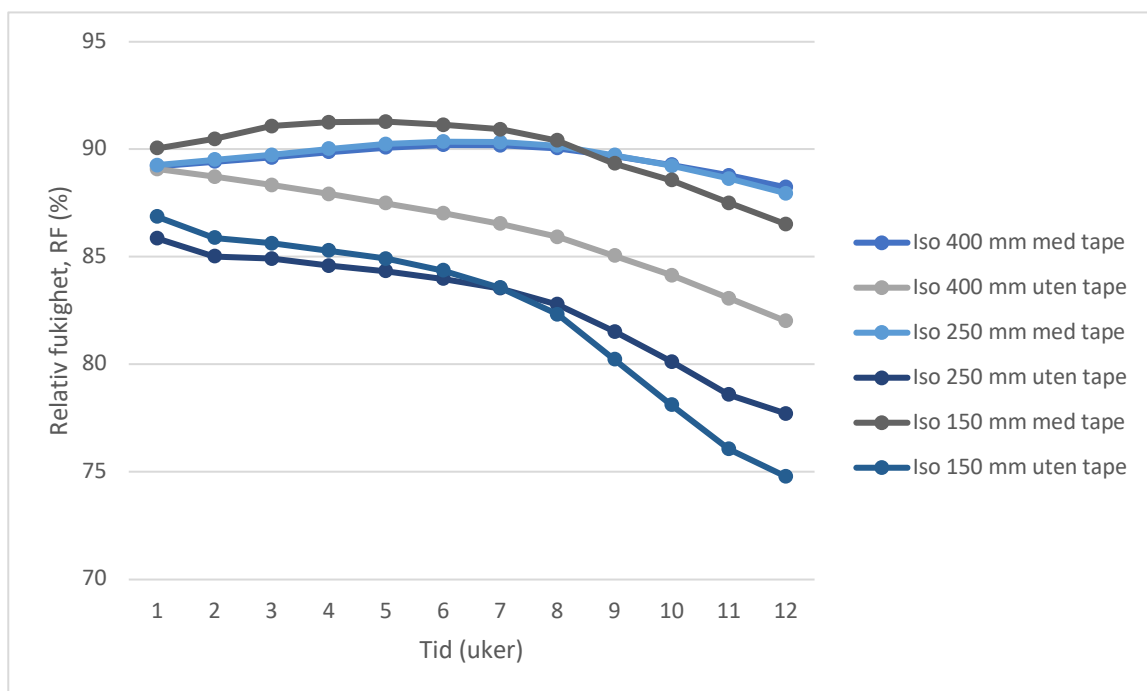
Generelt vil endring av fuktinnholdet i treverket variere fra kald til varm side av konstruksjonen. Resultater fra beregningspunkt nr.5 viser en rask uttørking av treverket og den relative fuktigheten vil ligge under kritisk grense for muggvekst gjennom hele beregningsperioden. Mot midten av losholten avtar fuktinnholdet litt tregere, men RF vil også i dette punktet ligge under kritisk grense. For beregningspunktene mot vindsperran vil RF øke i starten før fuktigheten avtar. Dette skyldes trolig at uttørkingen er utadrettet og at fukt innover i treverket «vandrer» forbi beregningspunktet. Med en startfuktighet i treverket på 20 vekt% viser beregningene at en uttørking ned til 80% RF tar mellom 7-10 uker i overgangen mot vindsperran. Det er i beregningspunkt nr. 2, i midten av losholten mot vindsperran, hvor uttørkingen foregår tregest. Dette skyldes i hovedsak at fukttransport kan foregå mot isolasjonssjikt i losholtens øvre og nedre del. For beregningspunktet i midten vil uttørkingen i større grad hindres som følge av det damptette vindsperrsjiktet. Beregnet relativ fuktighet og temperatur for de ulike beregningspunktene er presentert i vedlegg C. Generelt viser fuktberegningene at beregningspunkt nr. 2 vil ha en tregest uttørking av byggfukt. Derfor er dette beregningspunktet valgt for videre analyse.

For å vurdere hvordan uttørkingen i treverket påvirkes av startfuktinnholdet er det beregnet tilfeller med et fuktinnhold på 15, 20 og 25 vekt%. Resultatene er hentet fra beregningspunkt nr. 2. Beregningene viser at uttørkingen foregår tregere for beregningstilfellene med vindsperretape. Resultatene viser også at effekten av en tregere uttørking ved bruk av tape øker ved økende startfuktinnhold i treverket, som vist i figur 17. Ved et startfuktinnhold i treverket på 25 vekt% vil uttørkingen de første 12 ukene være minimal for beregningstilfellet med tape. Sammenlignet vil beregningstilfellet uten tape ha en relativt rask uttørking ned til under 80% RF i løpet av 12 uker. Ved et startfuktinnhold på 25 vekt% viser beregningene en større forskjell i uttørking for beregningstilfellene med og uten vindsperretape. Tilfellet med tape viser at det tar 11 uker før fuktinnholdet i treverket er under 80%. Sammenlignet tar det 3 uker for beregningstilfellet uten tape. Ved et startfuktinnhold på 15 vekt% viser beregningene at uttørkingen går litt tregere ved bruk av tape. For begge tilfellene vil den relative fuktigheten ligge under kritisk grense for hele beregningsperioden.



Figur 17: RF i treverket (mot vindsperrer) for hhv. 25, 20 og 15 vekt% i treverket med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Uteklime er Oslo.

I likhet med økende startfuktighet viser beregningene at økt isolasjonstykkelse gir en tregere uttørking ved bruk av vindsperretape. Resultatene viser også at uttørkingen er forholdsvis lik for alle beregningstilfellene for tape uavhengig av dampmotstanden til tapen. Dette kommer av at vindsperretape hindrer uttørking i det aktuelle punktet og at effekten av forhindret uttørking vil være større enn at økt isolasjonstykkelse gir økt relativ fuktighet. Parameterstudien viser også at bruk av et dobbelt lag med vindsperretape ikke vil påvirke uttørkingen i større grad. Som vist i figur 18 vil effekten av en tregere uttørking på grunn av tapens damptetthet øke for mindre isolasjonstykkelser. Dette skyldes hovedsakelig at økt mengde isolasjon gir økt relativ fuktighet og at beregningstilfellet for 400 mm generelt vil foregå tregere enn for de andre isolasjonstykkelsene som er beregnet.



Figur 18: RF i treverket (mot vindsperreren) for hhv. 150, 250 og 400 mm varmeisolasjon med og uten vindsperretape. Beregningsperiode 1. april – 30. juni (12 uker). Startfuktnivå for treverket er 25 vekt%. Uteklime er Oslo.

I forhold til valgt uteklime vil den relative fuktigheten for alle beregningstilfellene ha en økning i starten av beregningsperioden. Dette kan skyldes at den utadrettede fukttransporten vil forhindres på grunn av vindsperretapens dampmotstand, og at treverket i overgangen mot vindsperreren vil ta opp mye fukt for så og senere å avgi fukten utover i treverket mot en lavere vanddampkonsentrasjon. Beregningene viser at ved et startfuktinnhold i treverket på 25 vekt% vil uttørkingen foregå tregest i Karasjok. Dette skyldes trolig at Karasjok har det kaldeste uteklimaet og at RF i lufta vil være høyere her sammenlignet med andre byer. For Trondheim og Bergen vil uttørkingen foregå relativt likt. Etter 12 uker er fuktinnholdet i treverket beregnet som lavest med Oslo som uteklime.

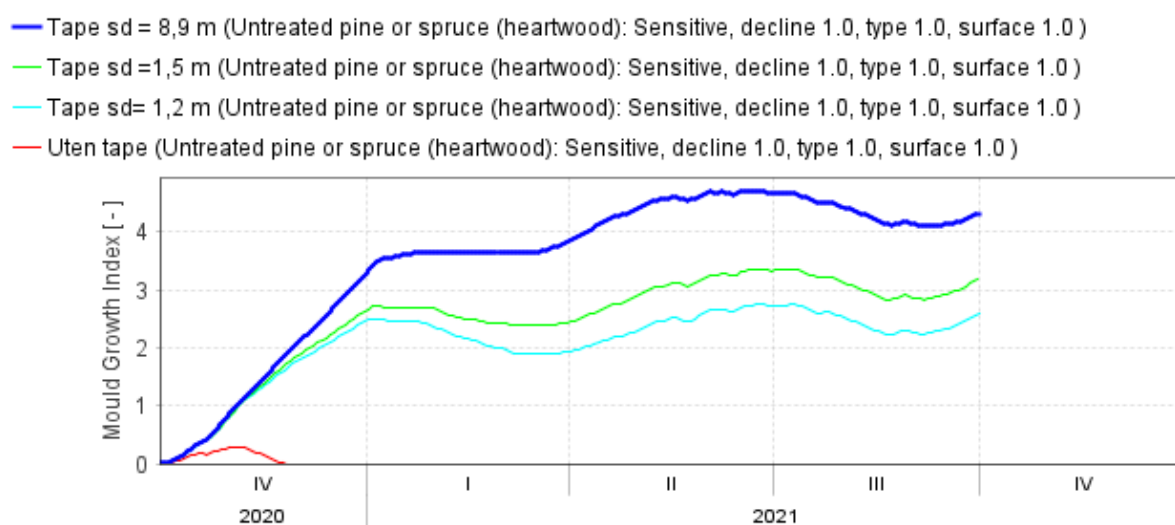
Beregningstilfellene med ulike startberegningstidpunkt viser også til ulik uttørkingshastighet. Ved startberegning 1. april og 1. juli foregår uttørkingen av byggfukt raskest. For beregningstilfellene med starttidspunkt 1. oktober og 1. januar vil ikke treverket tørke de første 12 ukene. Dette skyldes trolig det høye fuktinnholdet i treverket, samt kalde utetemperaturer og høy luftfuktighet i utelufta.

4.4 Muggvekstanalyse

4.4.1 WUFI Mould Index VTT

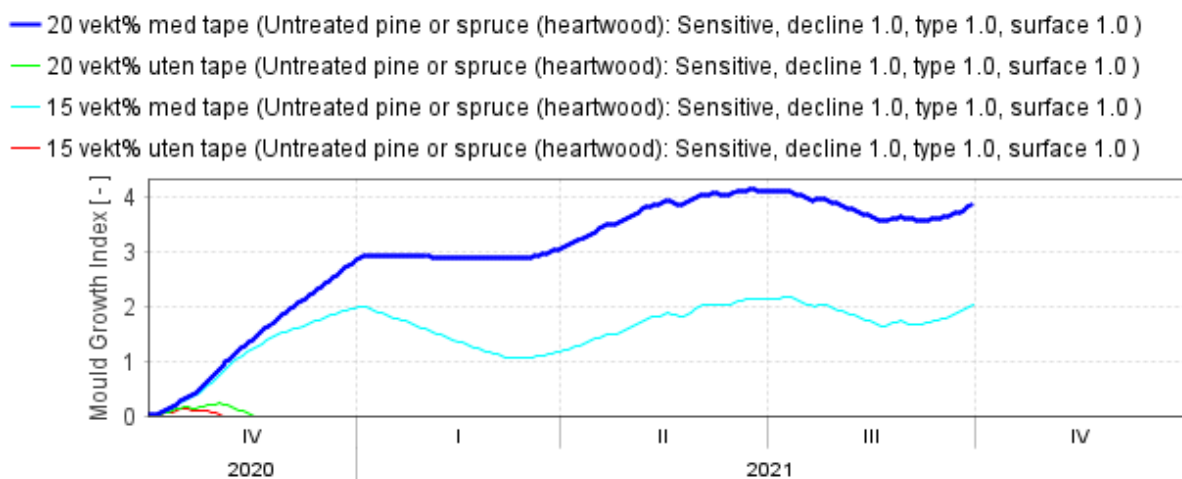
Ved hjelp av WUFI Mould Index VTT er det gjennomført en muggvekstanalyse basert på resultatene fra de en-dimensjonale beregningene. Resultatene i delkapittel 4.1 viste at verdien av RF var høyest i veggens ytre del mot vindspærresjiktet. Dette skyldes trolig at vindspærretapen forhindrer uttørkingen i dette punktet, samt at veggens ytre del er kaldere slik at luftfuktigheten øker. For å vurdere risikoen for muggvekst er det derfor valgt å ta utgangspunkt i resultatene fra innsiden av vindspærresjiktet. Den en-dimensjonale beregningsmodellen er simulert med en «fiktiv» trestender på 20 mm for å etterligne uttørking av byggfukt. I realiteten vil trestenderen være gjennomgående i hele varmeisolasjonssjiktet slik som i den to-dimensjonale beregningsmodellen. Ettersom muggvekst kun vil vokse på overflaten av et materiale som, for eksempel treverk, er det i muggvekstmodellen forenklet valgt å definere materialet på innsiden av vindspærren som tre. Som inputparameter er det spesifisert at beregnet data av temperatur og RF er hentet fra en overflate på innsiden av konstruksjon som ikke har direkte kontakt med innvendig luft. Av materiale er det benyttet ubehandlet gran med sensitivitetsklasse «sensitiv».

Resultatene fra muggvekstanalysen viser at bruk av vindspærretape generelt vil øke risikoen for muggvekst. Som vist i figur 19 vil risikoen for muggvekst variere med tapens vanddampmotstand. Ved bruk av en vindspærretape med en s_d -verdi på 8,9 m vil den årlige muggvekstindeksen ligge på 4,43. Dette tilsvarer synlig muggvekst på en overflate med en dekningsgrad på nærmere 50%. Bruk av vindspærretape med s_d -verdi på 1,5 m og 1,2 m vil gi en lavere risiko for muggvekst og en årlig muggvekstindeks på forholdsvis 3,37 og 2,77. I sammenligning tilsvarer dette en muggvekst som kun er synlig i mikroskop eller som har en dekningsgrad mindre enn 10% av materialets overflate. I sammenligning vil beregningstilfellet uten bruk av vindspærretape ha en årlig muggvekstindeks på 0,23 som tilsvarer ingen muggvekst.



Figur 19: Årlig muggvekstindeks for beregningstilfelle 1-4.

Muggvekstanalysen viser også at bruk av vindsperretape gir en økt risiko for muggvekst for alle de beregnede isolasjonstykkelsene. Risikoen for muggvekst for de ulike tilfellene er relativt like noe som samsvarer med tidligere resultater presentert i delkapittel 4.1. Dette skyldes trolig at damp tettheten til tapen hindrer den utadrettede uttørkingen slik at den relative fuktigheten i punktet øker og at økt isolasjonstykkelse ikke i like stor grad er innvirkende på den relative fuktigheten i det aktuelle punktet. Resultatet fra analysen viser at den årlige muggvekstindeksen for beregningstilfellene med varierende isolasjonstykkelse ligger i overkant av 4. Analysen viser også at risikoen for muggvekst ved bruk av vindsperretape øker med økende startfuktinnhold som vist i figur 20. Ved et startfuktinnhold på forholdsvis 20 og 15 vekt% er den årlige muggvekstindeksen på 4,14 og 2,18. Ved et fuktinnhold på 15 vekt% vil det dermed kunne oppstå flere muggvekstkolonier på materialets overflate selv om det bare vil være synlig med mikroskop. For beregningstilfellene uten bruk av vindsperretape vises ingen risiko for muggvekst uavhengig av isolasjonstykkelsen eller startfuktinnholdet.



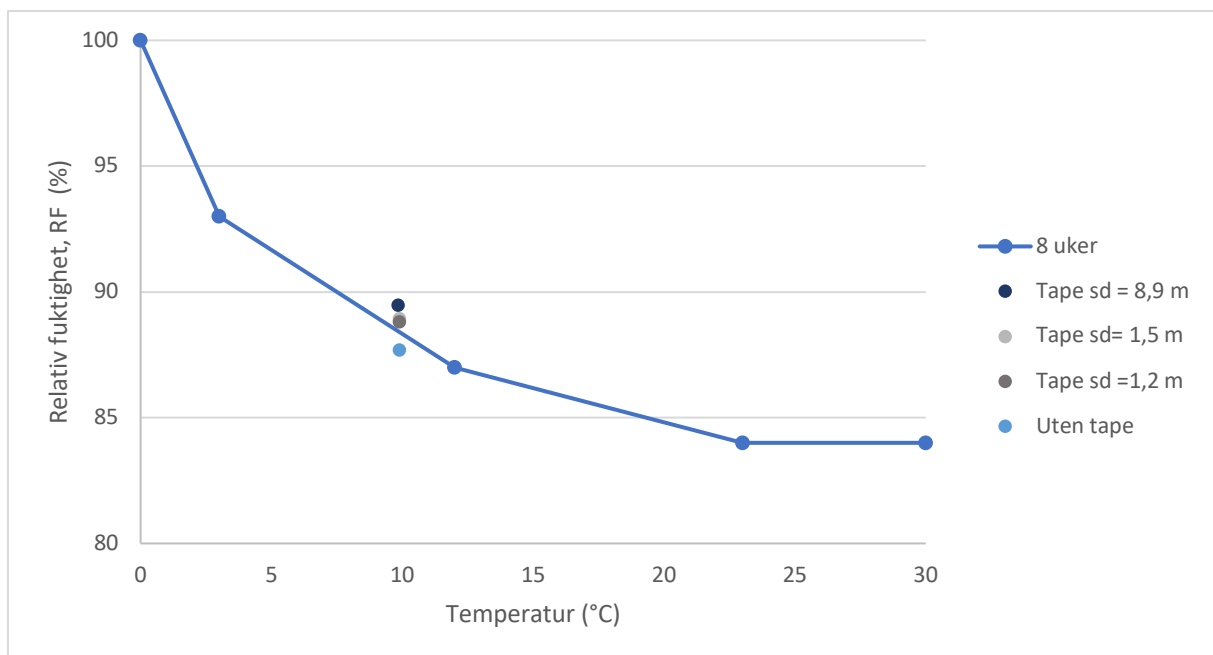
Figur 20: Oversikt over årlig muggvekstindeks for varierende startfuktighet i treverket med og uten vindsperretape.

Muggvekstanalysen viser også at risikoen for muggvekst ved bruk av vindsperretape er størst i Bergen og Trondheim med en årlig muggvekstindeks på 5. Dette tilsvarer relativt mye muggvekst med en dekningsgrad på over 50% av materialets overflate. Analysen viser også at risikoen for muggvekst er størst for startberegningstidspunkt 1. juli sammenlignet med de andre starttidspunktene. I forhold til dampsperrsjiktets diffusjonsmotstand viser analysen at en dampsperre med en s_d -verdi på 2 meter gir en lavere risiko for muggvekst. Dette samsvarer også med resultatene presentert 4.1 og skyldes hovedsakelig at dampsperran tillater en innadrettet uttørking av ytterveggen. En oversikt over alle beregningstilfellene med tilhørende årlig muggvekstindeks er vedlagt i vedlegg D.

4.4.2 Varighetskurver for muggvekst

For å vurdere risikoen for muggvekst for de to-dimensjonale beregningene er det tatt utgangspunkt i temperatur og relativ fuktighet for samtlige beregningstilfeller og varigheten av disse. Ved hjelp av resultatene fra WUFI 2D er gjennomsnittlige verdier beregnet og plottet inn for å undersøke om verdiene overskrider den tilhørende varighetskurven. I likhet med de en-dimensjonale beregningene er det forventet at verdien for RF er høyest ved vindspærresjiktets innvendige side grunnet vindspærretapes dampmotstand. Ved vurdering av muggvekst for bindingsverkkonstruksjonen er det tatt hensyn til temperatur og RF i overgangen mellom vindspærre og trestenderen. For vinduskarmen er temperatur og RF i punktet mellom vindspærren og bindingsverkets losholt benyttet.

Tabell 12 på neste side gir en oversikt over hvilke beregningstilfeller for bindingsverkkveggen hvor muggvekst ifølge varighetskurvene kan inntreffe. Resultatene viser at startfuktinnholdet i treverket kan betraktes som den mest avgjørende faktoren til økt muggvekstrisiko. Ved et startfuktinnhold i treverket på 25 vekt% viser beregningene at muggvekst vil oppstå tidligst 8 uker etter at bygget er lukket. Dette gjelder for beregningstilfellene med en isolasjonstykkelse på 400 og 250 mm. Ved en redusert isolasjonstykkelse på 150 mm vil muggvekst ikke kunne inntreffe før etter 12 uker. I tillegg viser resultatene flere tilfeller av muggvekst hvor vindspærretape er benyttet sammenlignet med beregningstilfeller uten tape. Dette samsvarer med tidligere beregninger som viser at uttørkingen foregår saktere ved bruk av vindspærretape. Som vist i figur 21 vil gjennomsnittlige verdier for temperatur og RF etter 8 uker ved bruk av vindspærretape overstige den tilhørende varighetskurven. Til sammenligning vil det etter 8 uker for beregningstilfellet uten tape ikke være noen risiko for muggvekst. For valgt uteklima vil muggvekst oppstå i både Oslo, Trondheim og Bergen etter 8 uker. Generelt viser beregningene at gjennomsnittlige verdier av RF i vindspærresjiktet er relativt likt etter 8 og 12 uker etter at bygget lukkes uavhengig av de overnevnte byene. Grunnet kalde temperaturer i Karasjok vil muggvekst kun oppstå etter 12 uker når startberedningstidspunkt er satt til 1. april.



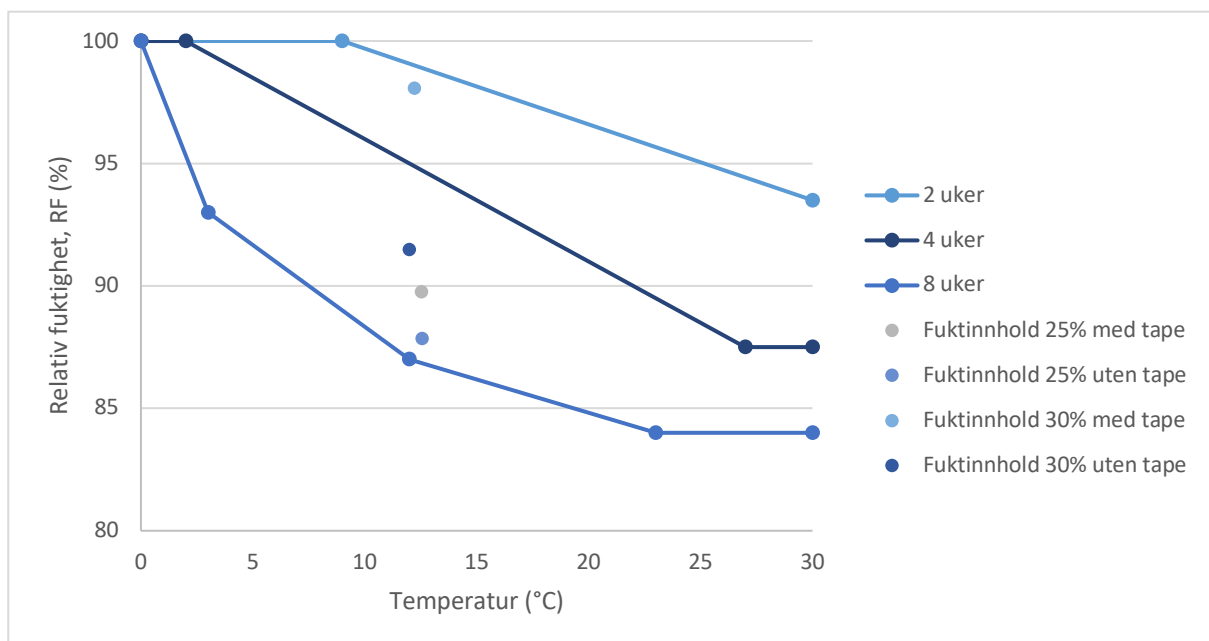
Figur 21: Gjennomsnittlige verdier for temperatur og relativ fuktighet ved 8 uker sammenlignet med den tilhørende varighetskurven for tilfeller med og uten vindspærretape.

Tabell 12: Oversikt over de ulike beregningstilfellene for den to-dimensjonale bindingsverkveggen sammenlignet med varighetskurvene i m-modellen.

Nr.	Kommentar	Muggvekst etter:					
		24 timer	1 uke	2 uker	4 uker	8 uker	12 uker
1	25%, 400 mm iso, med tape sd =8,9m	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
2	25%, 400 mm iso, med tape sd=1,5 m	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
3	25%, 400 mm iso, med tape sd= 1,2	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
4	25%, 400 mm iso, uten tape	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja
5	20%, 400 mm iso, med tape sd= 8,9m	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei
6	20%, 400 mm iso, uten tape	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei
7	15%, 400 mm iso, med tape sd= 8,9 m	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei
8	15%, 400 mm iso, uten tape	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei
9	25%, 250 mm iso, med tape sd= 8,9 m	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
10	25%, 250 mm iso, uten tape	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
11	25%, 150 mm iso, med tape sd= 8,9 m	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja
12	25%, 150 mm iso, uten tape	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei
13	Trondheim	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
14	Bergen	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
15	Karasjok	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja
16	1. juli	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
17	1. oktober	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
18	1. januar	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
19	Vindsperre sd=0,5m	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
20	Dampspærre sd=2m	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
21	Vindsperre sd=0,5 m og dampspærre sd=2 m	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja

I likhet med bindingsverkveggen er gjennomsnittlige verdier av temperatur og RF for vinduskarmen sammenlignet med varighetskurvene for muggvekst. Oversikten over hvilke beregningstilfeller hvor muggvekst vil kunne inntreffe er vist i tabell 13 på neste side. Beregningene viser i likhet med bindingsverkveggen at startfuktinnholdet i treverket vil være den avgjørende faktoren for muggvekst. Ved et startfuktinnhold i treverket på 25 vekt% vil muggvekst kunne oppstå etter 8 uker ifølge den tilhørende varighetskurven. Til sammenligning viser beregninger at et fuktinnhold på 30 vekt% vil føre til at muggvekst kan oppstå etter 4 uker når vindsperretape benyttes som vist i figur 22. Den gjennomsnittlige verdien ligger også nærmere kurven for 2 uker. For samme tilfelle uten bruk av tape viser beregninger at muggvekst tidligst vil kunne inntreffe etter 8 uker. Beregningene viser også en forskjell for beregningstilfellene med og uten vindsperretape når startfuktinnholdet er 20 vekt%. Ved bruk av tape vil muggvekst ifølge varighetskurven oppstå etter 12 uker, mens tilfellet uten tape viser ingen risiko for muggvekst.

Generelt viser beregningene at det vil være flere tilfeller av muggvekst for beregningstilfellene med vindsperretape. Et fuktinnhold på 15 vekt% viser derimot ingen risiko for muggvekst for beregningstilfellene med og uten tape ettersom RF i treverket ikke vil overskride 80% under hele beregningsperioden. Det er også interessant å observere at beregningstilfellet med et dobbelt lag med vindsperretape ikke fører til at muggvekst oppstår tidligere sammenlignet med kun ett lag med tape. For beregningstilfeller med ulikt uteklima og forskjellig startberegningstidpunkt vil muggvekst inntreffe etter 8 uker for alle beregningstilfellene. Dette skyldes hovedsakelig at beregningene er gjort med et startfuktinnhold i treverket på 25 vekt% og at startfuktinnholdet vil ha en større innvirkning på vekstvilkårene for muggvekst sammenlignet med utvendig temperatur og luftfuktighet.



Figur 22: Gjennomsnittlige verdier for temperatur og RF for et startfuktinnhold i treverket på 25 og 30 vekt% etter 8 uker sammenlignet med varighetskurvene for 2, 4 og 8 uker.

Tabell 13: Oversikt over de ulike beregningstilfellene for vinduskarmen sammenlignet med varighetskurvene i m-modellen.

Nr.	Kommentar	Muggvekst etter:					
		24 timer	1 uke	2 uker	4 uker	8 uker	12 uker
1	25%, 400 mm iso, med tape sd =8,9m	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
2	25%, 400 mm iso, uten tape	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
3	20%, 400 mm iso, med tape sd= 8,9m	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja
4	20%, 400 mm iso, uten tape	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei
5	15%, 400 mm iso, med tape sd= 8,9 m	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei
6	15%, 400 mm iso, uten tape	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei
7	25%, 250 mm iso, med tape sd= 8,9 m	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
8	25%, 250 mm iso, uten tape	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja
9	25%, 150 mm iso, med tape sd= 8,9 m	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
10	25%, 150 mm iso, uten tape	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja
11	Dobbel tape sd=20 m	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
12	Trondheim	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
13	Bergen	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
14	Karasjok	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
15	1. juli	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
16	1. oktober	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja
17	1. januar	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja

5 Diskusjon

I arbeidet med denne masteroppgaven er det skrevet en vitenskapelig artikkel som omhandler litteratursøk og måling av vanndampmotstand til tape. Resultatet fra litteratursøket viser at bruk av tape til bygningsmessige formål har hatt en kraftig økning de siste årene (Fufa et al. 2018). Til tross for økningen er forskningslitteraturen begrenset til varighet og styrke til tapen, samt lufttettheten av tapede skjøter (Fufa et al., 2018; Langmans et al., 2017; Jacobs et al., 2012). Forskningslitteraturen konkluderer med at tape som tettemetode er fordelaktig for å redusere energibehovet i bygninger. Laboratorieforsøk viser at styrke og varighet av tapede skjøter i stor grad avhenger av type substrat, limets herdetid og applikasjonen av tape (Ackermann, 2012; Gross & Maas, 2011, Fufa et al. 2018). Utførte laboratorieforsøk viser også at tape er den mest lovende tettemetoden for å unngå luftlekkasjer (Kalamees et al., 2017; Relander et al., 2008). Det er også utført forsøk hvor tapede skjøter er eksponert for temperatursvingninger, frost og UV-stråling hvor resultatene viser en begrenset påvirkning av tapens luftpermeabilitet (Langmans et al., 2017). Uttørking av byggfukt og lekkasjer påvirkes av forholdet mellom veggens indre og ytre vanndampmotstand (Simonson et al., 2005). For å unngå innestengt fukt i konstruksjonen bør vindsperresjiktet være dampåpent slik at fuktighet kan tørke utover. I henhold til en økt muggvekstrisiko knyttet til en høyere vanndampmotstand i vindsperresjiktet, er vanndampmotstanden til vindsperretape av interesse.

Resultater fra laboratorieforsøket viser at ingen av vindsperretapeproduktene som er testet kan defineres som dampåpne med en s_d -verdi mindre enn 0,5 meter. Målte s_d -verdier for de tre vindsperretapeproduktene viste en s_d -verdi på 1,2, 1,5 og 8,9 meter. Målingene viser også at s_d -verdien nesten dobles dersom et dobbelt lag med tape benyttes. Dette understreker at vanndamppermeabiliteten i stor grad reduseres som følge av flere lag med tape. Resultater viser også en redusert s_d -verdi ved måling av tape uten klebefelt. Dette indikerer at limet benyttet er en viktig faktor for vindsperretapens vanndampmotstand. Utførte målinger viser at klebefeltets betydning reduseres med økende s_d -verdi. For tapeproduktet målt til en s_d -verdi på 1,5 m viste målinger uten klebefelt en verdi på 0,02 m. Sammenlignet viser foreløpige resultater fra tapeproduktet med en s_d -verdi på 8,9 m med klebefelt en redusert s_d -verdi på 8,4 m uten lim. Det kan også vurderes at mengden lim benyttet kan ha en stor innvirkning på dampmotstanden. Dette er en usikkerhet som ikke kommer frem i målingene. I sammenligning viser målingene fra dampsperrtapen en s_d -verdi på 22 m. Dampsperrtapen som er testet oppfyller dermed kravet til damp tetthet på 10 m. Med ønske om energieffektive bygninger følger også strengere krav til energiforbruk. Dette har ført til økte isolasjonstykkelser som har vist å forlenge uttørkingstiden av byggfukt (Geving & Holme, 2010). Med tanke på dampmotstanden for de målte vindsperreproduktene er det derfor tenkelig at uttørkingstiden kan forlenges ytterligere. Det er på bakgrunn av dette utført videre beregninger for å vurdere i hvilken grad uttørkingsforholdene påvirkes av tapens vanndampmotstand og om dette vil gi økt risiko for muggvekst.

Fuktberegningene viser at bruk av vindsperretape vil kunne gi en tregere uttørking av byggfukt. For de en-dimensjonale beregningene vil uttørkingen foregå relativt likt de første 3 ukene etter at bygget lukkes for tilfellene med og uten vindsperretape. Videre vil RF avta saktere for beregningstilfellene med tape. Ved et startfuktinnhold i treverket på 25 vekt% viser beregningene med vindsperretape at fuktnivået etter 12 uker tilsvarer en RF på 68%. Til sammenligning vil trestenderen for beregningstilfellet uten tape nå et fuktinnhold på

55% RF. Fuktberegningene viser også en relativt lik uttørkingshastighet blant de tre ulike vindsperreproduktene som er testet.

I sammenligning med de en-dimensjonale beregningene av bindingsverkveggen viser de to-dimensjonale beregningene at bruk av vindsperretape gir minimal påvirkning for beregningspunktene mot veggens indre side. Dette skyldes hovedsakelig at vindsperretapen i den en-dimensjonale beregningsmodellen er lagt inn som et eget horisontalt materialsjikt. For de to-dimensjonale beregningene er tapen lagt inn med en bredde på 60 mm. Ut ifra simuleringene kan det tolkes at fukttransporten vil kunne oppstå på siden av tapens bredde slik at uttørkingen ikke vil påvirkes i like stor grad. En tregere uttørking som følge av tapens vanndampmotstand kommer derimot tydeligere frem i overgangen mellom trestenderen og vindsperrersjiktet. Dette skyldes trolig at uttørkingen i dette punktet forhindres som følge av vindsperretapens diffusjonstetthet. Sammenlignet med de en-dimensjonale beregningene vil likevel ikke uttørkingen påvirkes i like stor grad som for de en-dimensjonale beregningene.

Generelt viser de to-dimensjonale beregningene et høyere fuktinnhold i trestenderen sammenlignet med de en-dimensjonale. Dette skyldes i hovedsak at trestenderen for den en-dimensjonale beregningsmodellen kun er lagt inn som en «fiktiv» trestender på 20 mm. I realiteten vil ytterveggen bestå av en større andel treverk noe som ville resultert i en økt mengde byggfukt. Det kan derfor tenkes at uttørkingen ville gått noe tregere da ytterveggen generelt ville ha inneholdt mer byggfukt enn det beregningsmodellen tar utgangspunkt i. Samtidig viser de to-dimensjonale beregningene at uttørkingen i stor grad vil påvirkes av hvor stort sammenhengende areal med vindsperretape som benyttes. Sett i betraktning at vindsperretape benyttes som tettemetode mellom skjøter av vindsperre vil de to-dimensjonale beregningene gi et mer realistisk bilde på hvordan uttørkingsforholdene vil kunne påvirkes.

I sammenligning med de to-dimensjonale beregningene av ytterveggen viser resultater fra vinduskarmen en tregere uttørking når vindsperretape benyttes. Dette kan skyldes økt byggfukt grunnet en større andel treverk i beregningsmodellen. I realiteten vil også overgangen mellom yttervegg og vindu representere en mer kritisk bygningsdel hvor en høyere diffusjon av vanndamp kan forventes grunnet diskontinuitet i ytterveggenes sperresjikt. I tillegg vil oppfukning av luftlekkasjer øke fuktinnholdet i konstruksjonen og derav øke risikoen for muggvekst.

I forhold til de ulike beregningsparameterne vil startfuktinnholdet ha størst betydning for fuktinnholdet etter at bygget lukkes. For å undersøke hvordan uttørkingen påvirkes ved bruk av vindsperretape er det valgt å ta utgangspunkt i et høyt startfuktinnhold i treverket for å studere effekten ytterligere. Det er viktig å understreke at fuktinnholdet i treverk normalt bør ligge under 20 vekt% før bygget lukkes for å unngå muggvekst og fuktproblemer over tid. Dette krever at byggematerialer får tilstrekkelig uttørkingstid og ikke overskrider kritisk fuktnivå. Dersom materialer oppbevares uten tilstrekkelig beskyttelse mot nedbør i byggeperioden er det likevel ikke uvanlig at slike tilfeller med høyt fuktinnhold kan oppstå.

De to-dimensjonale beregningene av ytterveggen og vinduskarmen viser at effekten av en forhindret uttørking ved bruk av vindsperretape øker med økende fuktinnhold. Ved et startfuktinnhold på 25 vekt% viser beregninger for vinduskarmen en minimal uttørking de første 12 ukene hvor tape benyttes. Sammenlignet vil beregningstilfellet uten tape ha en

relativt rask uttørking ned til under 80% RF i løpet av 12 uker. Ved et fuktinnhold på 20 vekt% vil også uttørkingen gå betydelig raskere for beregningstilfellet uten vindsperretape. Beregningene viser at fuktinnholdet i treverket vil nå en RF under 80% innen 3 uker når tape ikke benyttes. I sammenligning viser beregningene at treverket vil nå samme fuktnivå etter 11 uker ved bruk av vindsperretape. For beregningstilfellene med et startfuktinnhold i treverket på 15 vekt% vil også bruken av tape gi en tregere uttørking, men fuktinnholdet vil for begge tilfellene ligge under kritisk grense for muggvekst under hele beregningsperioden. Den samme tendensen sees også for beregningsresultatene av bindingsverkveggen.

I likhet med økende startfuktinnhold viser beregningene at økt isolasjonstykkelse gir en tregere uttørking. Resultatene viser også at uttørkingen er forholdsvis lik for alle beregningstilfellene hvor tape benyttes uavhengig av isolasjonstykkelsen. Dette skyldes trolig at vindsperretapeens dampmotstand vil hindre en utadrettet uttørking i det aktuelle punktet og at denne effekten vil være større enn at økt isolasjonstykkelse gir økt relativ fuktighet. Beregninger viser også at effekten av en tregere uttørking ved bruk av tape øker ved mindre isolasjonstykkelser. Ved en isolasjonstykkelse på 400 mm vil fuktnivået i vinduets losholt etter 12 uker være 6% høyere når vindsperretape benyttes. I sammenligning vil bruk av vindsperretape ved en isolasjonstykkelse på 150 og 250 mm medføre en redusert uttørking på forholdsvis 12 og 10%.

Fuktberegningene viser et generelt høyere fuktnivå i veggens ytre del. Dette skyldes trolig at veggens ytre del er kaldere slik at luftfuktigheten øker. Med tanke på valgt uteklima vil den relative fuktigheten for beregningstilfellene med vindsperretape ha en økning i starten av beregningsperioden. Dette skyldes trolig at den utadrettede fukttransporten vil forhindres på grunn av vindsperretapeens dampmotstand. I tillegg vil vannmolekylene i kald luft plasseres tettere sammen, noe som vil føre til en høyere fuktkapasitet på kald side av konstruksjonen. Treverket i overgangen mot vindspærren vil ta opp mye fukt for så og senere å avgi fukten utover i treverket mot en lavere vanddampkonsentrasjon. Temperaturforholdene ved vindsperrsjiktet vil i stor grad avhenge av startberegningstidpunkt og valgt uteklima. Ved startberegningstidpunkt i april og juli vil uttørkingen foregå raskere sammenlignet med oktober og januar. Beregningene viser også at fuktinnholdet i treverket avtar raskere i Oslo, Trondheim og Bergen sammenlignet med Karasjøk hvor uteklimaet er kaldere. I forhold til vekstvilkårene for muggvekst vil temperaturforholdene i veggens indre del være mer gunstig over lengre perioder. Beregningene viser at temperaturen 30 mm fra dampspærren aldri vil være lavere enn 17 grader i løpet av ett år. Fuktinnholdet mot veggens indre del viser derimot en relativt rask uttørking av treverket ned mot 80% RF.

Resultatene fra muggvekstanalysen viser at bruk av vindsperretape generelt vil øke risikoen for muggvekst. Muggvekstanalysen basert på de en-dimensjonale beregningene viser også varierende grad av muggvekst for de ulike vindsperretapeproduktene. Ved bruk av en vindsperretape med en s_d -verdi på 8,9 m viser resultatene synlig muggvekst med en dekningsgrad på nærmere 50% av materialets overflate. Til sammenligning viser analysen at bruk av vindsperretape med s_d -verdi på 1,5 m og 1,2 m vil gi muggvekst som kun er synlig i mikroskop eller som har en dekningsgrad på mindre enn 10% av materialets overflate. For beregningstilfellet uten bruk av vindsperretape viser analysen ingen risiko for muggvekst. Analysen viser også økt muggvekst knyttet til økt isolasjonstykkelse og startfuktinnhold. For et startfuktinnhold i treverket på 25 og 20% ved bruk av vindsperretape viser resultatet en årlig muggvekstindeks på over 4. Ved et startfuktinnhold

på 15 vekt% viser analysen en redusert muggvekstindeks og muggvekst vil i dette tilfellet kun være synlig i mikroskop. Resultatene fra muggvekstanalysen samsvarer generelt med vurderingene knyttet til påvirket uttørkingsforhold av treverket.

Ved hjelp av varighetskurvene er risikoen for muggvekst vurdert i henhold til de to-dimensjonale beregningene. Resultatene viser at startfuktinnholdet i treverket kan betraktes som den mest avgjørende faktoren til økt muggvekstrisiko. I tillegg viser beregningene økt muggvekstrisiko knyttet til bruk av vindsperretape. Ved et startfuktinnhold i treverket på 25 vekt% viser beregningene at muggvekst vil oppstå etter 8 uker for beregningstilfellene med tape. I likhet med vurdering av påvirket uttørkingsforhold på grunn av dampmotstanden til tape viser også beregningene en økt muggvekstrisiko når tape benyttes som tettemetode rundt vinduer. Generelt viser beregningene at muggvekst kun vil inntreffe ved et startfuktinnholdet i treverket på 20 og 25 vekt% hvor muggvekst vil kunne inntreffe etter 8 og 12 uker. Beregningene viser også at bruk av et dobbelt lag med tape ikke vil påvirke muggvekstrisikoen ytterligere.

6 Konklusjon

Interessen for bruk av tape i byggesektoren har i de siste årene økt som følge av strengere krav til lufttetthet og energiforbruk i bygninger. Til tross for økende bruk av tape er forskningen på feltet begrenset til varighet og styrke til tapen, samt lufttetthet av tapede skjøter. Forskningslitteraturen viser også til at tape er den mest lovende tettemetoden for å unngå luftlekkasjer. Laboratorieforsøk er utført for å undersøke fuktegenskapene til tape og hvilke konsekvenser dette kan gi for uttørkingen av bygningskonstruksjoner.

Resultatene fra laboratorieforsøket viser at målte s_d -verdier av vindsperretape overstiger anbefalt vanndampmotstand for dampåpne materialer på 0,5 meter. I sammenligning viser målingene fra dampsperretapen en s_d -verdi på 22 m. Målingene viser også at s_d -verdien nesten dobles dersom et dobbelt lag med tape benyttes. Dette understreker at vanndamppermeabiliteten i stor grad reduseres som følge av flere lag med tape. Resultatet fra målingene viser også en redusert s_d -verdi for materialprøvene uten klebefelt. Dette indikerer at limet er en viktig årsak til vindsperretapens vanndampmotstand.

Fuktberegninger basert på måleresultatene viser en tregere uttørking av byggfukt ved bruk av vindsperretape. Resultatene viser at effekten av en forlenget uttørkingstid er størst i overgangen mot vindsperrsjiktet. Dette skyldes trolig at uttørkingen i dette punktet vil forhindres som følge av vindsperretapens diffusjonstetthet. Resultater fra de to-dimensjonale beregningene viser at uttørkingen i stor grad påvirkes av hvor stort sammenhengende areal med vindsperretape som benyttes. Beregningene viser også at bruk av vindsperretape gir en forlenget uttørkingstid ved økende fuktinnhold og isolasjonstykkel.

Som følge av en tregere uttørking grunnet vanndampmotstanden til vindsperretape viser resultater fra muggvekstanalysen en økt risiko for muggvekst ved bruk av tape. Beregningene i sin helhet viser at muggvekst vil inntreffe ved et høyt startfuktinnhold i treverket. Ved et fuktinnhold i treverket på 15 vekt% er det kun de en-dimensjonale beregningene som viser at muggvekst vil kunne inntreffe i små mengder. Grunnet flere forenklinger knyttet til den en-dimensjonale beregningsmodellen er det vurdert at de to-dimensjonale beregningene gir mer troverdige resultater knyttet til bruken av tape.

På bakgrunn av de utførte beregningene anbefales et kritisk fuktinnhold lavere enn 20 vekt% dersom vindsperretape benyttes. Dersom anbefalt kritisk fuktnivå overholdes er det vurdert at bruk av vindsperretape ikke vil føre til fuktproblemer som følge av en tregere uttørking. Dette gjelder både bruk av tape i skjøter av vindsperre og som tettemetode rundt vinduer. Det er også viktig å understreke at beregningsmodellen ikke tar hensyn til lekkasjer i bygningskonstruksjonen. Blant annet vil vindsperretape bidra til god lufttetting som vil redusere oppfukting av luftlekkasjer og dermed også risikoen for muggvekst.

7 Forslag til videre arbeid

På bakgrunn av valgte avgrensninger i oppgaven er det behov for videre arbeider for å studere uttørkingsforholdene ytterligere. Det kan i videre arbeid være aktuelt å utføre flere fuktberegninger av andre konstruksjonsløsninger hvor vindsperretape benyttes. Blant annet kan det være interessant å utføre beregninger hvor tape benyttes som tettemetode rundt kabel- og rørgjennomføringer. Spesielt for tilfeller hvor flere rør og kabler samles på et begrenset området vil arealet av vindsperretape kunne utgjøre et større sammenhengende areal enn det som er beregnet for denne oppgaven. I tillegg kan det være aktuelt å benytte andre beregningsparametere som varierende materialvalg og økt mengde treverk.

Som en videre studie anbefales det også at flere laboratorieforsøk gjennomføres. Ved bruk av plassbygde testkonstruksjoner og sensorer vil en kunne få en bedre forståelse av hvordan uttørkingsforholdene påvirkes ved bruk av tape. Resultatet fra fuktberegningene viste størst påvirkning når tape ble benyttet som tettemetode rundt vinduer. Det anbefales på bakgrunn av dette å utføre laboratorieforsøk av testkonstruksjoner med vindusinnsetting. Beregnet risiko for muggvekst er også i denne oppgaven begrenset til muggvekstanalyse av de en-dimensjonale beregningene og bruk av varighetskurvene til m-modellen. Til videre arbeid bør det gjennomføres en videre analyse ved bruk av m-modellen eller andre analyseverktøy.

Som en avgrensning for denne oppgaven er det kun vurdert tape som tettemetode. Det kan i videre arbeid også være aktuelt å måle vanndampgjennomgangen av ulike tettelsninger rundt vinduer som for eksempel fugemasse og polyuretanskum. I tillegg kunne det vært interessant å undersøke hvordan uttørkingen påvirkes ved bruk av en kombinasjon av vindsperretape og de overnevnte tettemetodene. I arbeidet med oppgaven er det valgt å fokusere på bruk av vindsperretape. Til videre arbeid kan det være aktuelt å teste flere dampsperretapeprodukter og vurdere om andre produkter tilfredsstillende kravet til damptetthet i bygninger. Resultatet fra laboratorieforsøkene presentert i den vitenskapelige artikkelen viser også forskjell mellom målte s_d -verdier for materialprøver med og uten klebefelt. Mer forskning er derfor nødvendig for å kartlegge fuktegenskapene til limet som benyttes i vindsperretape og for å undersøke muligheten for å utvikle et mer diffusjonsåpent klebemateriale.

Referanser

Ackermann, T. (2012). Alternating loads—A method for testing the durability of adhesives in airtightness layers. *In Proceedings of the AIVC-TightVent International Workshop* (pp. 61–66). Brussels, Belgium.

Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: towards a methodological framework. *International journal of social research methodology*, 8(1), 19-32. DOI: <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>.

Bakken, N. (2007). Håndbok for materialprøving – Trondheim.

Bøhlerengen, T. Fukt i bygninger. Teorigrunnlag. Byggforskserien 421.132. SINTEF Byggforsk (2018).

Byggteknisk forskrift (TEK17): § 14-2. Krav til energieffektivitet. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-2/> Hentet 09.05.20.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. Sage publications. ISBN 978-14-129-6557-6.

Dalland, O. (2012). *Metode og oppgaveskriving for studenter*. 5. utgave. Oslo: Gyldendal Norsk Forlag. ISBN: 9788205423985.

Dokka, T. H., Klinski, M., Haase, M., & Mysen, M. (2009). Kriterier for passivhus-og lavenergibygg–Yrkesbygg. Prosjektrapport 42, SINTEF Byggforsk 2009. ISBN 978-82-536-1107-5.

Edvardsen, K. T. & Ramstad T. Ø. (2014) *Trehus*. SINTEF akademisk forlag. ISBN: 9788253613918.

Einstabland, H. Bindingsverk av tre. Varmeisolering og tetting. Byggforskserien 523.255. SINTEF Byggforsk (2007).

Elvebakk, K. (2019) Klimatilpasning med regntett fasadekledning. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/community/fagblogg/poster/klimatilpasning-med-regntett-fasadekledning/> Hentet 09.05.20.

Fraunhofer IBP (2019), WUFI Pro 6.4 Online help.

Fraunhofer IBP (2019), WUFI 2D Online help, Version 4.2.

Fraunhofer IBP (2018). WUFI Mould Index VTT. VTT Help.

Fufa, S. M., Labonnote, N., Frank, S., Rütther, P., & Jelle, B. P. (2018). Durability evaluation of adhesive tapes for building applications. *Construction and Building Materials*, 161, 528-538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.056>.

Geving, S., Thue, J. V., & Geving, S. (2012). *Fukt i bygninger*. Norges byggforskningsinstitutt. ISBN: 9788253607474.

Geving, S., & Holme, J. (2010). Høyisolerte konstruksjoner og fukt. Analyse av fukttekniske konsekvenser av økt isolasjonstykkelse i yttervegger, tak, kryperom og kalde loft. Prosjektrapport 53, SINTEF Community, Trondheim.

Gross, D.R., & Maas, A. (2011). Investigation on the durability of taped joints for airtightness purposes. *In 6th International BUILDAIR*, Berlin, Germany.

Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E. J., Roald, L. A., Børsheim, K. Y., Hisdal, H., ... & Sundby, S. (2009). Climate in Norway 2100. *Background information to NOU Climate adaptation (In Norwegian: Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpasning)*, Oslo: Norsk klimasenter. NCCS report nr. 1/2017.

Holøs, S. Byggfukt. Uttørking og forebyggende tiltak. Byggforskserien 474.533. SINTEF Byggforsk (2018).

Kvande, T. Totrinnetning mot slagregn på fasader. Luftede kledninger og fuger. Byggforskserien 542.003. SINTEF Byggforsk (2013).

Jacobs, W. P., Dolan, J. D., Dillard, D. A., & Ohanehi, D. C. (2012). An Evaluation of Acrylic Pressure Sensitive Adhesive Tapes for Bonding Wood in Building Construction Applications. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 26(10-11), 1349-1381. DOI: 10.1163/156856111X618254.

Johansson, P., Wadsö, L., Johansson, S., Svensson, T., & Bengtsson, B. Utveckling och validering av modeller för att prediktera mögelväxt i byggnader. RISE Rapport 2018:167, ISBN: 978-91-88695-51-2, Borås 2017.

Kalamees, T., Alev, Ü., & Pärnalaas, M. (2017). Air leakage levels in timber frame building envelope joints. *Building and Environment*, 116, 121-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.011>.

Langmans, J., Desta, T. Z., Alderweireldt, L., & Roels, S. (2017). Durability of self-adhesive tapes for exterior air barrier applications: a laboratory investigation. *International Journal of Ventilation*, 16(1), 30-41. DOI: 10.1080/14733315.2016.1252154.

Levy, F. (2019) *Muggsopp*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://sml.sn.no/muggsopp>. Hentet 01.04.2020.

Magnussen, K., & Mattsson, J. Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for inneklimaet. Byggforskserien 701.401. SINTEF Byggforsk (2005).

Meld. St. 28 (2011–2012) Gode bygg for eit betre samfunn.

Meld. St. 33 (2012-2013). Klimatilpasning i Norge.

Mundt Petersen, S. (2015). Moisture Safety in Wood Frame Buildings-Blind evaluation of the hygrothermal calculation tool WUFI using field measurements and determination of factors affecting the moisture safety (Vol. 1021). Lund University.

NS-EN ISO 12572:2016 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method. Standard Norge (2016).

Relander, T. O., Thue, J. V., & Gustavsen, A. (2008, June). Air tightness performance of different sealing methods for windows in wood-frame buildings. *In 8th Nordic Symposium on Building Physics*.

Simonson, C. J., Ojanen, T., & Salonvaara, M. (2005). Moisture performance of an airtight, vapor-permeable building envelope in a cold climate. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28(3), 205-226. DOI: <https://doi.org/10.1177/1097196305048628>.

Skogstad, H. B., & Asphaug, O. (2012). Tetteløsninger rundt vindu-Regntetthet. Prosjektrapport 88, SINTEF Byggforsk 2012. ISBN 978-82-536-1253-9.

Thue, J. V. (2016). *Bygningsfysikk: grunnlag*. Fagbokforlaget. ISBN: 9788245019940.

Time, B., Friquin, K. Materialdata for vanndamptransport. Byggforskserien 573.430. SINTEF Byggforsk (2003).

Thompson, M. (2014). *Intuitive analog circuit design 2nd Edition*. Elsevier. eBook ISBN: 9780124059085.

A Vitenskapelig artikkel

I dette vedlegget er den vitenskapelige artikkelen «Vapour resistance of wind barrier tape» presentert. Artikkelen vil bli sendt til *Journal of Building Physics* når siste måleverdi er klar. Forfatterbidraget er vedlagt først.

To whom it may concern

Confirmation on paper contribution

I.H. Johnsen¹, E. Andenæs¹, L. Gullbrekken² and T. Kvande¹

Vapour resistance of wind barrier tape

To be submitted to Journal of Building Physics

¹Department of Civil and Environmental Engineering,
Norwegian University of Science and Technology (NTNU)

www.ntnu.no

²SINTEF Community

www.sintef.no

ABSTRACT: In the building industry, the interest into adhesive tape to achieve a more tight and robust building envelope has increased rapidly in recent years. With an increasing demand for energy efficiency in buildings, national building authorities are strengthening building requirements in order to mitigate and adapt to future climate impacts. This paper studies the water vapour permeability of adhesive tape for building purposes. A water vapour permeable wind barrier is essential to enable drying of the external side of the building envelope. Laboratory measurements have been conducted in order to evaluate how the drying conditions of the wind barrier layer are affected by the use of wind barrier tape. The results show that all the wind barrier tapes tested can be defined as significantly more vapour tight than the wind barrier itself. The wind barrier used as reference was found to have an s_d -value of 0.03 m while tape ranged between 1.2 and 8.9 m. In order to ensure adequate drying and minimize the risk of moisture damages, the wind barrier layer should be vapour open. In an investigated construction project, the amount of tape constitutes 13 % of the area of the building's wind barrier. Further simulations need to be conducted to accurately determine the drying conditions and the following consequences.

Ida-Helene Johnsen carried out the literature study, was the main responsible for the practical laboratory work, and is the main author of the article. She ensured that the procedure dictated by the standard NS-EN ISO 12572 was followed. She also set up the figures from the results of the research. The article is based on her Master Thesis.

Erlend Andenæs helped design the literature study and has been responsible for an efficient scientific writing process and the analytic cohesion of the analysis. He has been significant in challenging the industrial implications of the work.

Lars Gullbrekken has helped initiate the original research idea from a knowledge gap observed in the industry. He also contributed to the research design and the analysis and interpretation of the results.

Tore Kvande has served as the main supervisor and main contributor to the research design. He outlined the design of the test program, and contributed in the analysis and interpretation of the results.

The co-authors have during the process provided critical comments on the prepared manuscript by *Ida-Helene Johnsen* and they have all given final approval of the version to be published.



Ida-Helene Johnsen



Erlend Andenæs



Lars Gullbrekken



Tore Kvande

Vapour resistance of wind barrier tape

Ida-Helene Johnsen¹, Erlend Andenæs*², Lars Gullbrekken³, Tore Kvande⁴

1. M.Sc. candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, ida-helene8@hotmail.com
2. Ph.D. candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, erlend.andenas@ntnu.no
3. Senior Researcher, PhD, SINTEF Community, Trondheim, Norway, lars.gullbrekken@sintef.no
4. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, tore.kvande@ntnu.no

* Author to whom correspondence should be addressed: erlend.andenas@ntnu.no

Abstract

In the building industry, the interest into adhesive tape to achieve a more tight and robust building envelope has increased rapidly in recent years. With an increasing demand for energy efficiency in buildings, national building authorities are strengthening building requirements in order to mitigate and adapt to future climate impacts. This paper studies the water vapour permeability of adhesive tape for building purposes. A water vapour permeable wind barrier is essential to enable drying of the external side of the building envelope. Laboratory measurements have been conducted in order to evaluate how the drying conditions of the wind barrier layer are affected by the use of wind barrier tape. The results show that all the wind barrier tapes tested can be defined as significantly more vapour tight than the wind barrier itself. The wind barrier used as reference was found to have an s_d -value of 0.03 m while tape ranged between 1.2 and 8.9 m. In order to ensure adequate drying and minimize the risk of moisture damages, the wind barrier layer should be vapour open. In an investigated construction project, the amount of tape constitutes 13 % of the area of the building's wind barrier. Further simulations need to be conducted to accurately determine the drying conditions and the following consequences.

KEY WORDS: adhesive tape, construction tape, wind barrier, water vapour permeability, s_d -value, laboratory measurements

Introduction

Climate adaption

Energy efficiency in the building sector is essential to mitigate greenhouse gas emissions. To reduce energy consumption, national building authorities are strengthening building requirements regarding airtightness and thermal transmittance in building envelopes (Meld. St. 28 (2011–2012)). A major point of focus in the field of climate adaptation of buildings is the reduction of energy use under future climate scenarios (Stagrum et al., 2020). Future climate impacts as a result of global warming necessitate proper and robust building design (Hauge et al., 2017). An increased frequency of extreme weather like intense rainfall and storms, might have major consequences if buildings are not adapted to future loads (Meld.

St. 33 (2012-2013)). An airtight building envelope, achieved by the wind- and vapour barriers, is essential to reduce the energy consumption of the building.

Airtight wind- and vapour barriers

Traditionally there has been a large focus on the airtightness of both the wind barrier and the vapour barrier in Norway. In ordinary wood-frame buildings in Norway, the air barrier system consists of an internal and an external layer, known as a vapour and a wind barrier, respectively (Uvsløkk, 2003). The purpose of the vapour barrier is to prevent indoor air from entering the outer layers of the building envelope, and it should therefore be vapour tight. A wind barrier on the external side of the envelope has several functions: in addition to being wind- and waterproof, the barrier should be vapour permeable, which allows the building envelope to dry out. It is well known that air leakages through the vapour barrier and the wind barrier can be critical and cause moisture problems in the building envelope (Norvik et al., 2019; Fufa et al., 2018; Simonson et al., 2005). Especially in cold climates, air leaks can be critical and lead to condensation damage in the building envelope. Therefore, a strict recommendation is set for the vapour permeability of the wind barrier to be used in Norwegian buildings (Uvsløkk, 2003).

Objective and scope

With increasing demands for lower energy consumption and stricter requirements for airtightness in buildings, the interest and use of adhesive tape to seal joints in wind and vapour barriers have also increased rapidly in recent years (Fufa et al., 2018). The use of adhesive tape is particularly important in the design of passive houses and zero-emission buildings. Despite the widespread use of tape in buildings, the research in the field is mainly limited to durability and strength of the tape and the airtightness of the taped joints (Fufa et al., 2018; Langmans et al., 2017; Jacobs et al., 2012). More research is therefore important to identify the vapour permeability of tape and its implications for building envelopes. This article will attempt to answer the following research questions:

- How are the properties of adhesive tape for building purposes recorded in research literature?
- What is the water vapour resistance of adhesive tape for building purposes?
- How are the drying conditions of building envelopes affected by the water vapour resistance of adhesive tape?

Limitations

To determine the water vapour permeability of adhesive tape, a selection of tape products has been tested. The majority of the tapes tested are wind barrier tapes. However, a vapour barrier tape has also been tested for reference. The results from the measurements are limited to laboratory conditions and are determined according to the standard NS-EN ISO 12572: 2016. An example building is studied to illustrate the extent of adhesive tape usage and the possible implications for drying capacity.

Theoretical framework

Moisture in buildings

Moisture in buildings may cause adverse consequences concerning thermal comfort, energy consumption and microorganism growth. The moisture conditions in a building depend on the moisture load the building is exposed to by supply of ventilation air and internal moisture supplement (Thue, 2016). Climate changes due to global warming necessitates proper building design to prevent increasing cases of moisture damage in the future (Lisø et al., 2017). Leakages in the building envelope should be avoided as even small leaks can have a major impact on the building's air transport (Geving, 2012). This applies in particular to the transport of humid indoor air to the external side of the structure, where the airtightness of the vapour and the wind barrier is important. Air leaks are mainly due to leaks such as cracks, punctures and tears, as well as leaks at connections between building parts (Thue, 2016; Relander et al., 2009). Wetting of building materials may negatively impact their conductivity and insulation performance, depending on the moisture resistance of the material (Geving, 2012). This imposes strict requirements for the use of air barrier systems on the internal and external side of the thermal insulation.

Air tightness and permeability in air barrier systems

Air leakages in joint connections of wind- and vapour barriers can cause condensation damage in exterior structures (Geving, 2012). To prevent heat loss due to air leaks, SINTEF Community (Uvsløkk, 2003) recommends a water vapour diffusion-equivalent air layer thickness (s_d -value) of at least 10 m. To prevent air leakages, it is recommended to reduce the number of joints and clamp, tape or glue the connections (Geving, 2012). In order to ensure adequate drying of the building envelope, the recommended water vapour resistance for the wind barrier is an s_d -value less than 0.5 m (Uvsløkk, 2003).

Adhesive tape in the building sector

Tape products can be used to seal joint connections in wind- and vapour barriers, seal pipe penetrations, ensure tightness of window/wall connections, and repair damages to the barriers. The use of tape for building purposes started as early as in the 1980s and has recently become more important with stricter energy requirements (Munawwar, 1980). Traditionally, mechanical fasteners such as nailed battens have been used in joint connections. In the last 30 years, however, the use of adhesive tape has increased due to improvement in product properties such as continuous bonding, better stiffness, and better durability (Jacobs, 2012). Compared to mechanical fasteners, tape is also easier and faster to assemble, in addition to satisfying stricter requirements for airtightness (Fufa et al., 2018). The adhesive was traditionally made up of rubber but was later developed into acrylic-based, plastic compounds for permanent attachment and increased UV and thermal resistance (Jacobs, 2012).

Adhesive tape can be classified as a viscoelastic material and easily adheres to a surface (Benedek, 2004). The adhesive constituting the liquid part provide the attachment, while the solid part provides shear force stability. The increased use of tape within the building sector can be seen in the context of its total use in an example building project. Data gathered from a construction project at the NTNU campus shows the key figures for material use in the

building presented in Table 1. The building is a pilot laboratory for the Zero Emission Building project (ZEB Laboratory) and represents the state of the art in building envelope design with special focus on airtightness of the facade. The amount of wind barrier tape corresponds to 13% of the total area wind barrier material used in the building. Figures 1-3 show how the wind barrier tape is applied during the construction period before the wood cladding is installed.

Table 1: Key figures for material use in the ZEB Laboratory.

Key figures	Material use
Total gross floor area	2000 m ²
Area of building facade	1715 m ²
Area of wind barrier	1237 m ²
Wind barrier tape 1 on facade	72 m ²
Wind barrier tape 2 on facade	15 m ²
Wind barrier tape 3 around windows	75 m ²
Total wind barrier tape area	162 m ²
Vapour barrier tape 1 in roof	71 m ²
Vapour barrier tape 2 on exterior wall	129 m ²
Total area of tape	362 m²



Figure 1: A taped joint in the wind barrier of the ZEB Laboratory. Tape is also used to repair minor tears in the wind barrier.



Figure 2: Tape used to seal the wind barrier around a window.

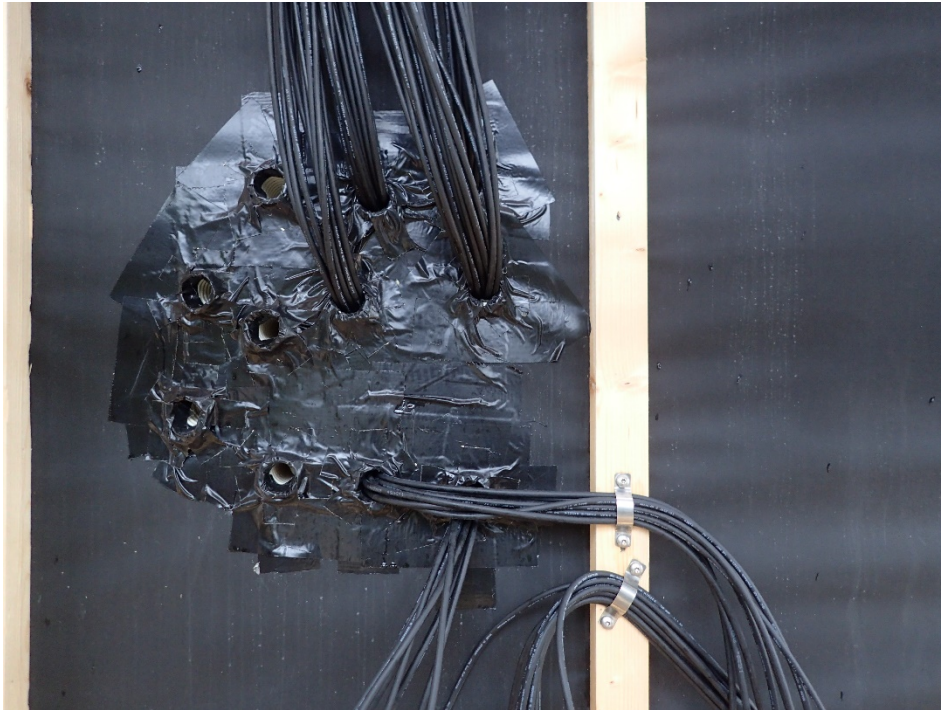


Figure 1: Substantial use of tape to make a seal around cables penetrating the wind barrier.

Building physical basis

Moisture transport occurs through four different mechanisms: fluid flow, capillary suction, vapour diffusion, and moisture convection (Doran, 2013). In the vapour phase, moisture transport happens mainly by diffusion and convection (Hagentoft, 2001). Diffusion occurs due to a difference in water vapour pressure in the air across a material layer, while convection occurs due to a difference in air pressure (Geving, 2012). The moisture transport depends on the porosity of the surface, the air velocity and the wind direction. Fick's law of diffusion describes the net rate of particles moving through an area with high to low concentration (Thompson, 2014). Eq. (1) shows how the diffusion flux is proportional to the gradient where D is the diffusion constant depending on solubility and molecule weight. The water molecules in the gas phase are of high velocity and will be distributed evenly over a defined area over time. Differences in partial pressures will gradually be equalized and the molecular movements will be transported by diffusion in the direction of lower water vapour pressure.

$$\frac{V}{A} = \frac{(P_1 - P_2)}{T} \cdot D \quad \text{Eq. (1)}$$

Where:

V = Rate of particles moving

A = Surface area

P = Partial pressure

T = Thickness

D = Diffusion constant

The water vapour permeability of a material indicates the potential rate of water vapour transport by diffusion (Geving, 2012). The higher the permeability, the faster the transport of water vapour. For thin layers, water vapour permeance, water vapour resistance, and diffusion equivalent air layer thickness – s_d -value are often used to describe the moisture properties of the material. The s_d -value describes how thick a stagnant air layer must be to achieve the same diffusion resistance as the material layer (Geving, 2012). In simplified terms, the s_d -value is used to show how vapour open a material layer is. The s_d -value is given as the water resistance factor multiplied by the thickness of the material.

Method

Literature search

Background and purpose

A literature search has been conducted to identify research literature concerning construction tape. The purpose of the search is to answer the research question “How are the properties of adhesive tape for building purposes recorded in research literature?”. The method used involves a five-step procedure described by Arksey and O’Malley (2005). The steps involve identifying research questions, identifying relevant studies, selecting the most relevant studies, analyzing the data, and summarizing the findings. In addition to examining the extent of research on the field, a literature search will also be able to identify research gaps (Arksey and O’Malley, 2005).

Identification of relevant studies

To find relevant research studies on the field, electronic databases, mainly Google Scholar and Oria (a Norwegian library database), were used. Primarily, English keywords were used for the search. Keywords from the identified articles were collected and sorted according to relevance, as determined by their frequency and use in the most relevant studies found. A further search was then performed using a combination of the most relevant keywords as search terms. Research studies were also identified by reviewing the reference list of selected studies.

Sorting and charting of the studies

To sort and chart the literature found, a three-step process was used. In the first step, articles with obviously irrelevant titles were excluded from further study. For the remaining articles, the abstract was read and considered for further examination. A spreadsheet was created to get a better overview of the most relevant articles. Data such as author, title, year of publication, country, keywords and study highlights were collected. Several articles were then excluded due to the lack of relevance to answering the research questions. The resulting data pool consisted of 13 articles. Key journals, conferences and most relevant keywords to this research are presented in Table 2.

Table 2: Key journals, Conferences and most relevant keywords in conjunction with the literature search.

Key journals	Key Conferences:	Most relevant keywords:	Other keywords:
<ul style="list-style-type: none"> - Journal of Building Physics - Construction and Building Materials - Building and Environment - Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering - Journal of Adhesion Science and Technology - International Journal of Ventilation 	<ul style="list-style-type: none"> - 8th Nordic Symposium on Building Physics - Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference - Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance (AIVC-2014) - IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 	<ul style="list-style-type: none"> Airtightness Joints Tape Durability Building Air leakage 	<ul style="list-style-type: none"> Air permeability, Sealing techniques Temperature Humidity Moisture Air barrier Vapor permeable envelope Mold growth Laboratory test results Design recommendations

Laboratory measurements

In collaboration with SINTEF, laboratory measurements have been conducted to determine the water vapor resistance (equivalent air layer thickness - s_d -value) of various tape products.

Determination of water vapor permeability:

Water vapour transmission is determined according to NS-EN ISO 12572: 2016 *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method*. The cup method is based on placing test samples in a temperature and humidity-controlled test chamber. The sample setup involves a cup containing a saturated salt solution, with the sample placed over the cup as a lid. A saturated salt solution of potassium nitrate (KNO_3) is used to regulate the relative humidity (RH) inside the cup to less than 100%, to avoid condensation on the sample's underside. This ensures that the vapour diffusion remains undisturbed. The saturated salt solution maintains a humidity of 94% RH inside the cup. The temperature in the test room is kept at $(23 \pm 1) ^\circ C$ and the humidity at $(50 \pm 5) \% RH$.

A vapour diffusion will occur through the sample, due to differences in humidity between the inside and outside of the cup. As a result of the vapour diffusion, the cup with the sample will lose or gain mass over time. The samples are periodically weighed along selected time intervals to determine the moisture transport into or out of the cup. With the mass change rate being known, the water vapour permeability and the s_d -value of the sample can be determined. The magnitude of the moisture transport will depend on the difference in vapour pressure, temperature, air velocity above the test sample, the air layer thickness between

the sample and the saturated salt solution, and the density of the material being tested. The samples are cut out to a circle of 174 mm.

To calculate the s_d -value of the adhesive tape, water vapour permeability was measured together with a wind barrier. The vapour resistance was first determined for the wind barrier alone, and then together with the different tape products. The s_d -value of the tape is determined by the difference between the combined s_d -value of the tape and wind barrier and the s_d -value of the wind barrier alone. Measurements of the water vapour permeability are also performed on both sides of the tape (attaching the tape on the underside of the sample) and tape without the adhesive (backing). The purpose of these extra tests is to investigate the effects of high outdoor relative humidity, and how the adhesive affects the vapour resistance of the construction tape. To the author's knowledge, the measurements are performed without deviating from the standard.

Procedure for preparing the samples

The procedure is summarized in Figure 4. The various tape products were first rolled out on the wind barrier, joined tightly but without overlap. For the test samples with a double layer of tape, the top layer of tape overlapped the bottom layer as shown in Figure 5 (For illustration purposes, generic brands of duct tape are shown in the figure). The samples were then cut out to a diameter of 174 mm using a punching machine. The samples were then stored in a room of relative humidity of 50%. The cups were filled with the potassium nitrate solution to the top 15 mm of the cup. A mixture with plasticine and beeswax was melted and used to attach the specimens to the cup. Five samples were created and tested for each tape product.



Figure 2: Procedure for preparing the samples (Brand names have been anonymized).

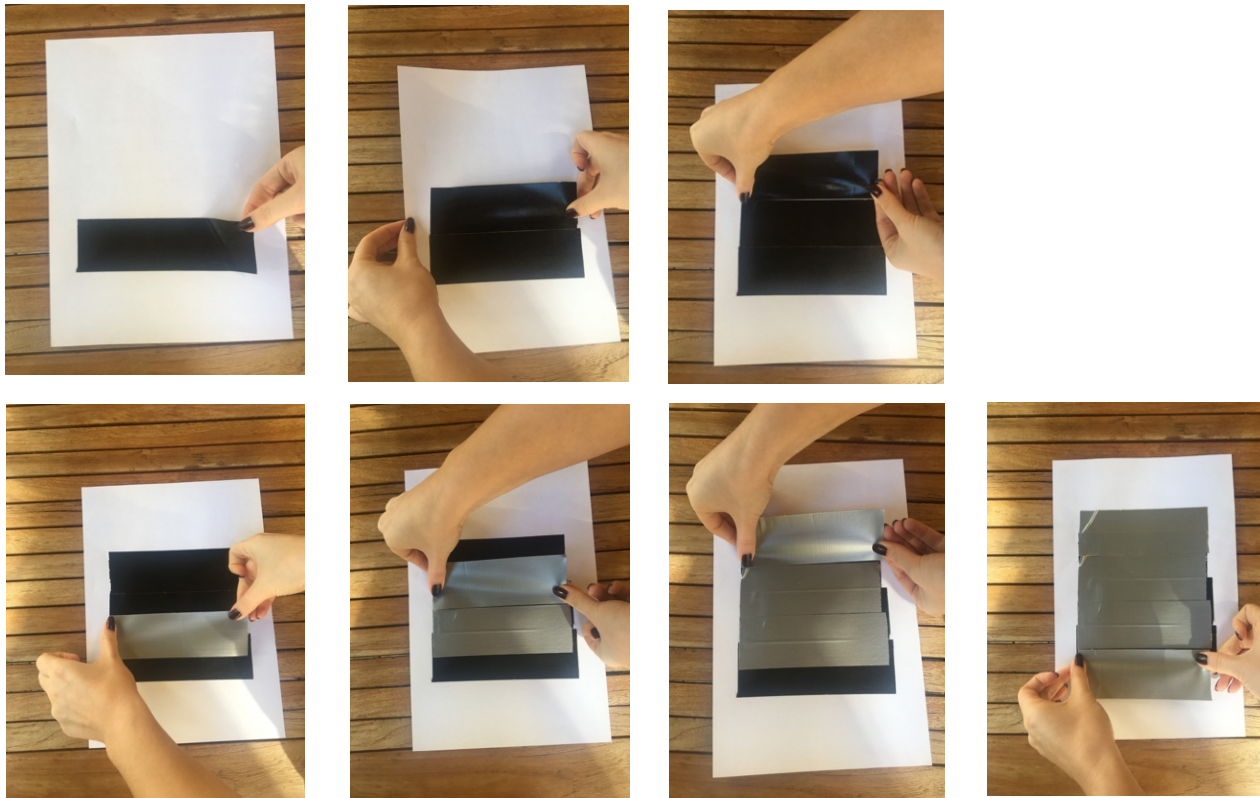


Figure 3: Application method for the tape samples, illustrated with generic brands of tape that were not tested.

Overview of test materials:

The tape products were acquired from local hardware stores, except the backing without the adhesive which was ordered directly from the manufacturer. The specific products used in this study have been anonymized. An overview of the test materials is presented in Table 3.

Table 3: Overview of test materials.

Identification	Product type	The barrier's outside facing 50% RH	The barrier's inside facing 50% RH	Double layer	Backing only
WB	Wind barrier on roll	x	x	-	-
WB-1	Wind barrier tape	x	x	x	-
WB-2	Wind barrier tape	x	x	x	x
WB-3	Wind barrier tape	x	x	x	x
VB-1	Vapour barrier tape	x	x	x	-

Results

Literature search

Resistance and duration of adhesive tape

Research on adhesive tape for building purposes is limited and is largely based on methods for determining duration and strength of tape, and airtightness of taped joints. As the tape generally is not accessible after the building envelope is closed, the tape must be functional throughout the life of the building (Fufa et al., 2018). Wind barrier tape in particular must be able to withstand climatic impacts such as direct rain and UV radiation during the construction period. Heitman (1990) studied the engineering use of acrylic foam tapes and investigated structural properties where creep deformation became the limiting factor (Jacobs et al., 2012). In the late 1990s, several studies were carried out to map the adhesion mechanism of adhesive tape (Jacobs et al., 2012). Geiss and Brockmann (1997) and Brockmann and Grüner (1996) studied the creep resistance of tapes for various materials using a single-lab shear test. The test results indicated that a load of 0,01 MPa could be maintained for 20 years or more (Jacobs, 2012).

Ackermann (2012) and Gross and Maas (2011) developed a method based on a 180° peel test. The method indicates how well the tape is attached to the substrate and what force it takes to break the taped connection. Gross and Maas (2011) investigated the peel force between different types of tape and substrates. The test results indicate that the type of substrate and curing time of the adhesive greatly influence the peel force (Langmans et al., 2017). Research also shows that the stress resistance of tape in combination with the polyethylene (PE) film is lower than with other bonding materials (Langmans et al., 2017). Methods for testing the durability of wind barrier tapes are limited to ageing based on temperature and relative humidity (Langmans et al., 2017). These are conditions that are representative of indoor climate, but the method neglects outdoor climate effects such as rain, UV radiation, high relative humidity and frost. Especially during the construction period when the wind barrier is most exposed, joint connections of tape must be able to withstand large climatic impacts (Langmans et al., 2017).

Similar to Gross and Maas (2011), SINTEF has researched the duration of adhesive tape and how the tape is affected in a Nordic climate. To assess the tape's function over time, test samples were exposed to a two-week climate-aging test and a 24-week heat-aging test. The climate aging test was conducted through a vertical climate simulator where the samples were exposed to climate cycles featuring UV radiation, water spray, freezing temperatures, and ambient indoor conditions (Fufa et al., 2018). Accelerated aging tests can indicate the expected lifespan of a product. In this way, the aging time in the test chamber can be compared to actual outdoor exposure. Since outdoor exposure can vary widely depending on weather conditions where the building is located and how exposed the building is, there will be limitations to this method. Therefore, the studies did not include the lifetime calculation for the tape products but examined how the peel and shear resistance are affected over time. The results from the tests show that the peel- and shear resistance of tape attached to flexible membranes such as wind- and vapour barriers were lower compared to fastening to rigid materials. The study also emphasizes that the tape's performance largely depends on its application (Fufa et al., 2018).

Air permeability and moisture cycles

The tightness of joints represents a vital part of the performance of the building (Hutchinson et al., 1995). Kalamees et al. (2017) measured air leaks from eight different joints using different sealing solutions in a timber-framed building envelope under laboratory conditions. In addition, air leakage levels for four houses were measured outdoors for comparison. The transition between the external wall and inserted floor and corners of the external wall was where the largest air leaks were measured. The smallest air leakage was in the transition between the external wall and window. Results from the measurements show that self-adhesive tape was the most promising solution for avoiding air leaks. The study also shows differences in air leaks measured in the laboratory and in the field and emphasizes that the performance quality is critical to achieving good results (Kalamees et al., 2017). Especially the performance of the insulation can be degraded due to uncontrolled air leaks through the building envelope (Wahlgren and Sikander, 2010). Relander et al. (2008) investigated seven different sealing techniques to reduce air leaks around windows. The results showed that tape was the tightest material and the air leaks were too small to be registered by the measuring equipment. The study also concludes that the most critical aspect for the tape's tightness is the workmanship (Relander et al., 2008).

Studies have also been conducted to investigate how air permeability of taped joints is affected by climate impacts. A study by Langmans et al. (2017) deals with trials of two tape products that are exposed to different conditions. The samples are compared before and after exposure. The results from the tests indicate that the influence of temperature, frost and UV has a limited effect on air permeability with an increase of less than $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}/\text{h}/\text{Pa}$. Norvik et al. (2019) have investigated how clamped overlap joints in a vapour barrier are affected by repeated moisture cycles. The overlap between the joints was fixed with nails of different centre spacing and sealed with adhesive tape. Results from the tests show a notable increase in air leaks after the first moisture cycle. For further moisture cycles, large air leaks were observed with the centre distance between the nails being 450 mm. In comparison, the air leakage was significantly smaller at 300 mm and not present at 150 mm. The study points out that the use of tape had a good effect on air leaks at where the centre distance between nails was large. The results show that the use of tape for a centre distance of 450 mm reduced the air leaks by 58%. In comparison, the measured air leaks were reduced by 22-39% for shorter centre distances. The study concludes that a large part of the air leaks occurs due to the perforations from the nails. The nails contribute to apertures in the membranes and therefore make airtight transitions difficult. Results from the measurements show that the use of adhesive tape can greatly contribute to airtight transitions, but the effect can be reduced by mounting holes through the membrane (Norvik et al., 2019).

Airtightness of building penetrations has also been tested with different sealing solutions (Bracke et al., 2014). The measurements were conducted with a large- and a small-scale setup and with penetrations of varying diameters. Four specimens were tested including two types of tape, PUR, and gasket. The test results show that air leaks were detected around pipe penetrations when a standard tape designed for sealing joints were used. The study emphasizes that the rigidity of the tape makes it difficult to satisfactorily seal a 3-dimensional connection. Further, the measurements show that a flexible tape designed for 3-dimensional connections give a satisfactory airtightness. The air leakages due to gaskets showed to be

less airtight than PUR and flexible tape but are according to the study negligible in absolute values.

Indoor environment and water vapour resistance

Moisture transport between indoor air and the building envelope has, through research, proven to affect the indoor environment in terms of humidity, thermal comfort, and air quality (Simonson et al., 2005; Rode et al., 2001; Simonson et al., 2002). Moisture accumulations are especially critical if construction materials are susceptible to mould, rotting and corrosion (Simonson et al., 2005). Studies show that the drying possibilities of the wall is mainly determined by the relationship between the water vapour resistance of its internal and external layers. To minimize mould growth, the internal vapour resistance should be greater than that of the outside by a factor of at least 1:3 (Simonson et al., 2005).

The majority of the identified literature relates to the duration, strength and airtightness of the tape. Throughout the literature search, information regarding vapour resistance of adhesive tape has not been identified. As the vapour resistance should be different for vapour and wind barriers, it will be interesting to investigate whether the vapour- and wind barrier tapes have a corresponding vapour resistance. More research is therefore important to identify the water vapour permeability of tape and to what degree the use of tape can affect moisture transport through the building envelope.

Laboratory measurements

The laboratory measurements were carried out according to NS-EN ISO 12572: 2016 *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method* as described in the Methods chapter. The test results of the water vapour permeability (equivalent air layer thickness – s_d -value) are summarized in Table 4. The uncertainty of the measurements is in the range of 7-13 %.

Table 4: Results of test materials.

Identification	s_d -value (m)			
	The barrier's outside facing 50% RH	The barrier's inside facing 50% RH	Double layer	Backing only
WB	0.029	0.032	-	-
WB-1	1.200	1.200	2.100	-
WB-2	1.500	1.700	2.600	0.020
WB-3	8.900	9.000	17.000	8.400 ¹
VB-1	22.000	30.000	71.000	-

¹ Provisional value

Discussion

Research literature on adhesive tape for building purposes

The literature search shows that the research on the use of adhesive tape for building purposes is limited. The research primarily focuses on the durability and strength of tape and the airtightness of taped joints. It also concludes that adhesive tape in buildings is advantageous for reducing energy consumption. The need for lasting durability is important due to reduced accessibility to the tape after the building envelope is closed. Several laboratory studies focus on the duration of the tape's strength. Brockmann and Hüther (1996) used a single-lab shear test which indicated that a load of 0.01 MPa could be maintained for 20 years or more. Further, Ackermann (2012) and Gross and Maas (2011) developed a method based on a 180° peel test which has been used to investigate the peel force for different tape products and substrates. The test results show that the type of substrate and curing time of the adhesive greatly influence the peel force. The tests also show that the adhesion to polyethylene (PE) film is weaker compared to other bonding materials. A similar result is given by Fufa et al. (2018) regarding measurements to determine the duration of adhesive tape in a Nordic climate. Tape samples were subjected to a climate-ageing test and a heating-ageing test and showed that the shear resistance of tape attached to flexible membranes such as wind- and vapour barriers was lower compared to tape attached to rigid materials.

Airtightness of the building envelope greatly influences the energy consumption of buildings. Wind- and vapour barriers play an important role in preventing air leakages and are traditionally fixed with clamped overlap joints. In recent years, other sealing methods have become popular and particularly the use of adhesive tape has increased. Kalamees et al. (2017) and Relander et al. (2008) have performed laboratory measurements based on various sealing techniques. The results show that the use of adhesive tape was the most promising solution to avoid air leakages. The studies also emphasize that the tape's performance largely depends on the application, which is also concluded by Fufa et al. (2018). Impacts on the airtightness due to climate impacts have also been researched. Langmans et al. (2017) tested two different tape products to study how the airtightness is affected by exposure to temperature, frost and UV radiation. The study shows that the exposure has a limited effect on the air permeability, with an increase of less than $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}/\text{h}/\text{Pa}$. A similar study was performed by Norvik et al. (2019), where clamped joints of vapour barriers were sealed with adhesive tape. The study points out that the use of tape had a large effect on reducing air leaks in cases where the centre distance between the nails was large. The study emphasizes that the effect of tape is reduced due to mounting holes through the vapour barrier layer. Thus, the necessity of using adhesive tape in the context where mechanical fasteners are needed can be discussed.

Wind- and vapour barriers play a major role in preventing moisture problems in buildings. In particular, moisture transport through the building envelope could result in mould problems that negatively affect the indoor air quality. According to Simonson et al. (2005), the ratio between internal and external water vapour resistance is affecting the drying of the wall. The study also underlines that the vapour resistance of the inside layer should be greater than that of the outside by a factor of at least 1:3 to minimize mould growth. The SINTEF Building

Research Design Guides (Uvsløkk, 2003) recommend a ratio of 1:20. As the vapour resistance should be different for vapour and wind barriers, it is necessary to investigate whether vapour- and wind barrier tapes have a vapour resistance corresponding to that of their respective barriers. More research is therefore important to identify the water vapour permeability of adhesive tape and whether the use of tape can affect the moisture transport in the building.

Water vapour resistance of adhesive tape for building purposes

The water vapour transmission of various tape products is determined according to the cup method described in NS-EN ISO 12572:2016. The test materials consisted of a wind barrier, three wind barrier tapes, and one vapour barrier tape. These were all tested with vapour diffusion going both ways. All tapes were tested as a single layer and a double layer. Besides, adhesive tape was tested using only the tape backing, to study the water permeability properties of the adhesive. The final test results are summarized in Table 4 and show variations between the wind barrier tapes tested. WB-1 and WB-2 were found to have an s_d -value of 1.2 m and 1.5 m respectively, when mounted on the external face of the sample. WB-3 is measured with a greater s_d -value of 8.9 m. Notably, none of the wind barriers can be defined as vapour-open and greatly exceed the recommended s_d -value for wind barriers of 0.5 m (Uvsløkk, 2003). The vapour barrier tape (VB-1), on the other hand, has a measured s_d -value of 22 m which can be defined as highly vapour tight, and comparable to the recommended s_d -value for vapour barriers of >10 m (Uvsløkk, 2003). The results also show that the permeability of a sample mounted with the reverse face up differs little from that of a conventionally mounted sample, with an increase in s_d -values of less than 12%. The measurements also indicate that the s_d -value of a double layer of tape is slightly less than twice that of a single layer. This underlines that the water vapour permeability is decreased significantly when several layers of tape are applied. Furthermore, a reduced s_d -value is observed for the measurements with the tape backing only. This indicates that the adhesive is an important factor for the total water vapour resistance of the wind barrier tape. Measurements also show that the importance of the adhesive is reduced with higher s_d -values. For WB-2 with a measured s_d -value of 1.5 m, the measurements without the adhesive show a reduced s_d -value of 0.02 m. In comparison, provisional results from the tape backing of WB-3 show a reduced s_d -value from 8.9 m to 8.4 m. Uncertainty regarding the amount of adhesive can be significant for the result. The uncertainty in the measurements is in the range of 7 - 13%.

Drying conditions affected by the water vapour resistance of adhesive tape

The laboratory measurements conducted show that none of the tested wind barrier tapes can be defined as vapour-open with an s_d -value less than 0.5 m. The wind barrier layer should be vapour-open to ensure adequate drying of the structure. However, if the layer is vapour tight to the extent that water vapour does not pass through, moisture can remain in the wall and cause persistent problems.

The test results show that the vapour barrier tape can be defined as highly vapour tight. As the vapour barrier itself needs to have a high vapour resistance, its functionality would not be as affected by the resistance of the tape compared to the wind barrier layer. On the other hand, it will impose stricter requirements on the water vapour resistance where the tape is used to seal existing holes in the barrier, as where the moisture transport at that point will

depend solely on the vapour resistance of the tape. The water vapour resistance of the tape is also especially critical between building elements, e.g. around windows where the vapour barrier is not continuous, and a larger water diffusion is expected. The measured s_d -value of the vapour barrier tape suggests that the tape is sufficiently vapour tight to complement the vapour barrier and will prevent water vapour diffusion from the indoor air.

The extent to which the water vapour resistance of the tape will affect the drying conditions of the structure will depend on several factors. First and foremost, the amount of tape used will affect the total water vapour resistance through the wall. In addition to sealing joint connections in the wind barrier, the tape is also used to repair damages in the wind barrier as well as sealing pipe penetrations. The tape might also be used in several layers, increasing the amount of tape and subsequently the overall water vapour resistance of the barrier in that area. The drying conditions will also be affected by the amount of moisture in the structure due to leakages or built-in moisture. The higher the amount of moisture, the longer the drying time and the more severe the consequences if the wall is vapour tight. By using materials with a higher water vapour resistance than recommended, the tolerance of built-in moisture and leakages decreases. For critical building parts like windows, SINTEF Community recommends strict requirements for sealing details which reduces the risk of leaks and the need for drying (Asphaug, 2018). According to Geving and Holme (2010), it is observed that the relative humidity in the wind barrier layer increases with increasing insulation thickness. Stricter requirements for insulation and the need for lower U-values contributes to increased insulation thicknesses which further increases the risk of high relative humidity. Where excessive use of tape makes the structure more vapour tight, the drying time will be extended, increasing the risk of mould growth (Geving and Holme, 2010). Mould risk is considered high if the relative humidity exceeds 80% and if the temperature is above 0-5 °C, which corresponds to a wood moisture content of 20 %. To mitigate the risk of mould growth, it is therefore desirable to achieve good drying conditions in the building structure, by keeping the wind barrier layer vapour open.

To determine to what extent the drying conditions are affected due to the water vapour resistance of the tape, further simulations of critical building details should be conducted. Using simulation programs like WUFI, the moisture transport within the different material layers can be determined. Due to the high s_d -value of wind barrier tapes, it is conceivable that the relative humidity will increase where adhesive tape is applied to the wind barrier layer. To evaluate the potential consequences, further simulations and physical tests are needed to observe developments in relative humidity and the temperatures over time. Regardless, it is recommended to use a vapour-open wind barrier tape to ensure adequate drying and minimize the risk of moisture damage to the structure.

Conclusion

The use of self-adhesive tape in the building sector has increased rapidly in recent years, but the research in the field has primarily concerned the durability and strength of tape, as well as the airtightness of taped joints. However, in order to assess drying conditions and minimize the risk of moisture problems in buildings, it is also necessary to determine the water vapour resistance of adhesive tape. Laboratory measurements have been conducted to study the water vapour resistance of various tape products. The results show that none of the wind

barrier tape products can be defined as vapour-open, with s_d -values ranging from 1.2 to 8.9 m, and thus do not fulfil the recommended s_d -value for wind barriers of <0.5 m. The vapour barrier tape, on the other hand, has a measured s_d -value of 22 m and can be defined as highly vapour tight. The results also show that permeability of a sample mounted with the reverse face up differs little from that of a conventionally mounted sample, with an increase in s_d -values of less than 12%. The measurements also demonstrate that the s_d -value of a double layer of tape is almost twice that of a single layer. This underlines that the water vapour permeability is highly decreased when several layers of tape are utilized. A reduced s_d -value is observed for the measurements with the tape backing only. This indicates that the adhesive is an important factor for the total water vapour resistance of the wind barrier tape. It is conceivable that the relative humidity in the building structure will increase when joints in the wind barrier are made more vapour tight by the use of wind barrier tape. To what extent the drying conditions will be affected will depend on the amount of tape used and the moisture content in the structure due to built-in moisture and leakages. In addition, the risk of mould growth will increase as a result of increased relative humidity. Further simulations and tests need to be conducted to accurately determine how the drying conditions are affected. Regardless, it is recommended to use a vapour-open wind barrier tape to ensure adequate drying and minimize the risk of moisture damage to the structure.

Acknowledgement

This research was funded by the Research Council of Norway through two different research projects. One is the Centre of Research-based Innovation "Klima 2050" (www.klima2050.no), funded with the grant number 237859. The second is the project "TightEN — Durable adhesive airtight solutions for energy efficient building envelopes" (www.tighten.no), funded with the grant number 294894.

References

- Ackermann, T. (2012). Alternating loads—A method for testing the durability of adhesives in airtightness layers. In *Proceedings of the AIVC-TightVent International Workshop* (pp. 61–66). Brussels, Belgium.
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: towards a methodological framework. *International journal of social research methodology*, 8(1), 19-32. DOI: <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>.
- Asphaug, S. Innsetting av vindu i vegger av bindingsverk. [Insertion of window into walls of timber] SINTEF Building Research Guide 523.701. SINTEF Community (2018).
- Benedek, I. (2004). *Pressure-sensitive adhesives and applications*. CRC Press. ISBN-13: 978-0824750596.
- Bracke, W., Van Den Bossche, N., & Janssens, A. (2014). Airtightness of building penetrations: air sealing solutions, durability effects and measurement uncertainty. In *The*

35th Conference: Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance (AIVC-2014), AIVC.

Brockmann, W., & Hüther, R. (1996). Adhesion mechanisms of pressure sensitive adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 16(2), 81-86. DOI: [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(96\)89797-1](https://doi.org/10.1016/0143-7496(96)89797-1).

Bøhlerengen, T. Fukt i bygninger [Moisture in buildings]. SINTEF Building Research Guide 421.132. SINTEF Community (2018).

Doran, P. M. (2013). *Bioprocess engineering principles 2nd Edition*. Elsevier. eBook ISBN: 9780080917702.

Fufa, S. M., Labonnote, N., Frank, S., Rütther, P., & Jelle, B. P. (2018). Durability evaluation of adhesive tapes for building applications. *Construction and Building Materials*, 161, 528-538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.056>.

Geiss, P. L., & Brockmann, W. (1997). Creep resistance of pressure sensitive mounting tapes. *The Journal of Adhesion*, 63 (4), 253-263. DOI: <https://doi.org/10.1080/00218469708017222>.

Geving, S., Thue, J. V., & Geving, S. (2012). *Fukt i bygninger*. Norges byggforskningsinstitutt. ISBN: 9788253607474.

Geving, S., & Holme, J. (2010). Høyisolerte konstruksjoner og fukt. Analyse av fukttekniske konsekvenser av økt isolasjonstykkelse i yttervegger, tak, kryperom og kalde loft. Prosjektrapport 53, SINTEF Community, Trondheim.

Gross, D.R., & Maas, A. (2011). Investigation on the durability of taped joints for airtightness purposes. *In 6th International BUILDAIR*, Berlin, Germany.

Hagentoft, C. E. (2001). *Introduction to building physics*. Studentlitteratur, Lund. ISBN-13: 978-9144018966.

Hauge, Å. L., Flyen, C., Almås, A. J., & Ebeltoft, M. (2017). Klimatilpasning av bygninger og infrastruktur–samfunnsmessige barrierer og drivere. *Klima 2050* nr. 4. ISBN: 978-82-536-1532-5. SINTEF Building and Infrastructure.

Heitman, B. T. (1990). Structural engineering properties of acrylic foam tapes. M.S. thesis, Michigan Technological Univ., Houghton, MI.

Hutchinson, A. R., Pagliuca, A., & Woolman, R. (1995). Sealing and resealing of joints in buildings. *Construction and Building Materials*, 9(6), 379-387.

Jacobs, W. P., Dolan, J. D., Dillard, D. A., & Ohanehi, D. C. (2012). An Evaluation of Acrylic Pressure Sensitive Adhesive Tapes for Bonding Wood in Building Construction

Applications. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 26(10-11), 1349-1381. DOI: 10.1163/156856111X618254.

Kalamees, T., Alev, Ü., & Pärnalaas, M. (2017). Air leakage levels in timber frame building envelope joints. *Building and Environment*, 116, 121-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.011>.

Langmans, J., Desta, T. Z., Alderweireldt, L., & Roels, S. (2017). Durability of self-adhesive tapes for exterior air barrier applications: a laboratory investigation. *International Journal of Ventilation*, 16(1), 30-41. DOI: 10.1080/14733315.2016.1252154.

Lisø, K. R., Kvande, T., Time, B. (2017). Climate Adaptation Framework for Moisture-resilient Buildings in Norway. *11th Nordic Symposium on Building Physics*, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.698>.

Meld. St. 28 (2011–2012) Gode bygg for eit betre samfunn, white paper on good buildings for a better society, Ministry of Finance.

Meld. St. 33 (2012-2013)). Klimatilpassing i Norge, white paper on Climate adaptation in Norway, Ministry of Finance.

Munawwar, S. M. (1980). Insulation Facing Pressure Sensitive Tapes: General Review: Technical and Application Requirements. *Journal of Thermal Insulation*, 4(1), 45-60.

Norvik, Ø., Geving, S., & Gullbrekken, L. (2019). The Effect of Repeated Moisture Cycles on the Air Tightness of Traditional Clamped Vapour Barrier Joints. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering* 1:44-51. Lithuania. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.sace.24.1.23232>.

NS-EN ISO 12572:2016 *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method*. Standard Norge (2016).

Relander, T. O., Thue, J. V., & Gustavsen, A. (2008, June). Air tightness performance of different sealing methods for windows in wood-frame buildings. *In 8th Nordic Symposium on Building Physics*.

Relander, T. O., Thue, J. V., Aurlen, T., Kvande, T., & Time, B. (2009). Airtightness and air leakages of Norwegian wood-frame houses. *In 4th International Building Physics Conference*.

Rode, C., Grau, K., & Mitamura, T. (2001, December). Model and experiments for hygrothermal conditions of the envelope and indoor air of buildings. *In Proceedings of Performance of Exterior Envelope of Whole Buildings VIII International Conference* (pp. 1-12). ASHRAE publications, Atlanta (2001).

Simonson, C. J., Ojanen, T., & Salonvaara, M. (2005). Moisture performance of an airtight, vapor-permeable building envelope in a cold climate. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28(3), 205-226. DOI: <https://doi.org/10.1177/1097196305048628>.

Simonson, C.J. Salonvaara, M. And Ojanen, T. (2002). The Effect of Structures on Indoor Humidity – Possibility to Improve Comfort and Perceived Air Quality. *Indoor Air*, 12: 1–9. DOI: 10.1034/j.1600-0668.2002.01128.x.

Stagrum, A.E.; Andenæs, E.; Kvande, T.; Lohne, J. (2020) Climate Change Adaptation Measures for Buildings—A Scoping Review. *Sustainability* 2020, 12, 1721. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12051721>.

Thompson, M. (2014). *Intuitive analog circuit design 2nd Edition*. Elsevier. eBook ISBN: 9780124059085.

Thue, J. V. (2016). *Bygningsfysikk: grunnlag*. Fagbokforlaget. ISBN: 9788245019940.

Uvsløkk, S. Materialer til luft- og damptetting. [Materials for air and vapour sealing]. SINTEF Building Research Guide 573.121. SINTEF Community (2003).

Wahlgren, P., & Sikander, E. (2010, December). Methods and materials for an airtight building. In *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference* (pp. 5-9). Corpus ID: 107664151.

B Artikkel i byggeindustrien

I dette vedlegget er artikkelen «Kan vi tape bygninger?» presentert. Artikkelen vil bli presentert i Byggeindustrien nr. 11-2020 under spalten «Fra ekspertene: NTNU». Forfatterbidraget er vedlagt først.

Forfatterbidrag

Bekreftelse på forfatterbidrag

I.H. Johnsen¹, E. Andenæs¹ og L. Gullbrekken²

Kan vi tape bygninger?

«Fra ekspertene: NTNU» i Byggeindustrien nr. 11-2020.

¹Institutt for bygg- og miljøteknikk,
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU)

www.ntnu.no

²SINTEF Community

www.sintef.no

INGRESS: Tape-produkter brukes i stadig større grad til å tette skjøter, overganger og gjennomføringer i damp- og vindspærre. En masteroppgave ved NTNU undersøker hvordan tapens dampmotstand påvirker fuktegenskapene til disse sjiktene. Laboratoriemålinger av enkelte typer vindspærretape viser at dampmotstanden er høyere enn SINTEF sine anbefalinger for vindspærre og at klebesjiktet er en viktig årsak til den høye dampmotstanden.

Innlegget gir et sammendrag av masteroppgaven til *Ida-Helene Johnsen* og er skrevet av *Ida* og *Erlend Andenæs* med veiledning fra *Lars Gullbrekken*

Ida-Helene Johnsen

Ida-Helene Johnsen

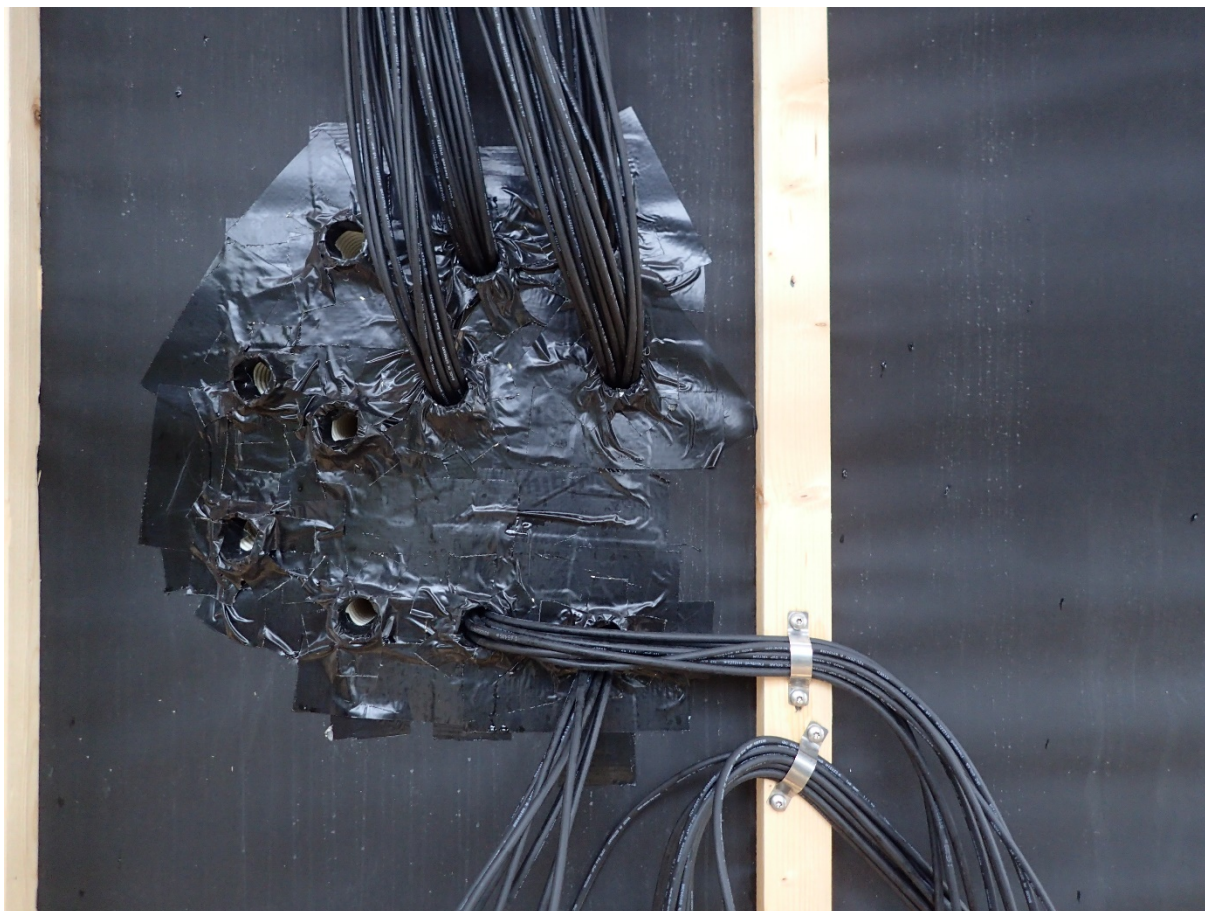
Erlend Andenæs

Erlend Andenæs

Lars Gullbrekken

Lars Gullbrekken

Kan vi tape bygninger?



Tape brukt til å tette rundt gjennomføringer i vindsperre i forbindelse med et solcelleanlegg. Foto: Tore Kvande.

Tape-produkter brukes i stadig større grad til å tette skjøter, overganger og gjennomføringer i damp- og vindsperre. En masteroppgave ved NTNU undersøker hvordan tapens dampmotstand påvirker fuktegenskapene til disse sjiktene. Laboratoriemålinger av enkelte typer vindsperrretape viser at dampmotstanden er høyere enn SINTEF sine anbefalinger for vindsperre og at klebesjiktet er en viktig årsak til den høye dampmotstanden.

Ida-Helene Johnsen og Erlend Andenæs

Institutt for bygg- og miljøteknikk

Lars Gullbrekken

SINTEF Community

Tape i bygninger

I Norge har det tradisjonelt blitt anbefalt å bruke klemming med lekter for lufttetting av skjøter og overganger i damp- og vindsperrsjikt. Siden 90-tallet har derimot bruk av bygningstape som tettemetode blitt mer vanlig. Tape til bygningsmessige formål

produseres tilpasset bruksområde som damp- eller vindsperretape. Sammenlignet med klemlister er tape både raskere og enklere å montere. Som et kontinuerlig tettesjikt bidrar også tape til økt lufttetthet.

Økt bruk av bygningstape illustreres godt i ZEB-laboratoriet som bygges av NTNU og SINTEF. Fotoet over viser en detalj hvor tape er benyttet som tettemetode rundt gjennomføringer i vindsperre. I forbindelse med byggeprosjektet er det benyttet over 360 m² (ca. 5,8 km) med tape over et totalt fasadeareal på 1715 m².

Sperresjikt

Bygningsskallet består av ett innvendig og ett utvendig sperresjikt kjent som damp- og vindsperre. Sperresjiktene skal holde (vanligvis kald og tørr) uteluft adskilt fra (varm og fuktig) inneluft. Varm luft kan holde på mer fuktighet enn kald luft, og fukten avsettes i form av kondens når luften kjøles ned. Dette er uønsket i bygninger da kondens kan føre til soppvekst og råte. En dampsperre benyttes for å hindre oppfukning på grunn av luftlekkasjer og vandampdiffusjon fra innelufta. Dampsperrsjiktet må derfor være kontinuerlig, lufttett og dampnett, med en dampmotstand tilsvarende 10 meter stillestående luft – dette kalles s_d -verdi.

Vindsperran er plassert på kald side av varmeisolasjonen og skal hindre inntrenging av uteluft i isolasjonen. Vindsperrsjiktet må være både lufttett og vannavvisende. I tillegg må sjiktet være dampåpent. Fukt i konstruksjonen grunnet innbygget fukt fra byggematerialer eller lekkasjer må ha anledning til å tørke ut gjennom vindsperrsjiktet. Vindsperran bør derfor ha en s_d -verdi mindre enn 0,5 meter.

Tape og fukt

Ideelt sett skal tapen ha samme fuktegenskaper som sjiktene den skjøter. På bakgrunn av dette bør dampsperretape være dampnett og vindsperretape dampåpen. Målinger utført i masteroppgaven til Ida-Helene Johnsen gjennom de Forskningsrådsfinansierte prosjektene *Klima 2050* og *TightEN*, viser at s_d -verdien til et enkelt lag med vindsperretape varierer mellom 1,2 og 8,9 meter avhengig av produkt. Dette tilsvarer en dampmotstand 2,5 til 18 ganger høyere enn det som er anbefalt for vindsperre.

Målinger viser at to lag med tape gir litt under dobbelt så høy s_d -verdi som et enkelt lag. Det er også observert en s_d -verdireduksjon for målinger av tape-bånd uten lim. Dette indikerer at klebefeltet er en viktig faktor for den høye dampmotstanden. For den ene vindsperretapen viser resultater uten lim en redusert s_d -verdi fra 1,5 meter til 0,02 meter. For den mest damptette vindsperretapen viser målinger en s_d -verdi på 8,9 meter for tape-bånd med lim og 8,4 meter uten lim. Tykkelsen på klebesjiktet kan ha stor innvirkning på dampmotstanden. Dampsperretape ble målt å ha en s_d -verdi på 22 meter, som er i tråd med anbefalingene for dampsperre. Målingene er utført for tre typer vindsperretape og en type dampsperretape kjøpt i vanlig byggevarehandel.

Implikasjoner

Bruk av tape i overganger, skjøter, gjennomføringer og til reparasjoner av vindsperre gjør sjiktet mer dampnett enn forutsatt. Dette kan spesielt bli et problem der mye tape benyttes på et større område, slik at fukt ikke kan tørke ut rundt tapen. Som følge av dette kan det bygge seg opp et fuktnivå bak vindsperran som gir grobunn for sopp. Ved bruk av tape i vindsperrer bør en derfor passe på å ikke overdrive mengden tape. Der det er nødvendig med mye tape, for eksempel ved tetting rundt vinduer, anbefales det å gjennomføre ytterligere fuktregninger for å vurdere risikoen for fuktskader.

C Beregningsresultater fra WUFI

I dette vedlegget presenteres beregnet relativ fuktighet og temperatur for de ulike beregningspunktene i den to-dimensjonale bindingsverkveggen og vinduskarmen som ikke er presentert i rapporten. Beregningene tar utgangspunkt i de 12 første ukene etter at bygget lukkes med en beregningsperiode fra 1. april – 30. juni.

Vedlegg C.1 - *Beregningspunkt nr.1 bindingsverkvegg*

Vedlegg C.2 - *Beregningspunkt nr.2 bindingsverkvegg*

Vedlegg C.3 - *Beregningspunkt nr.1 vinduskarm*

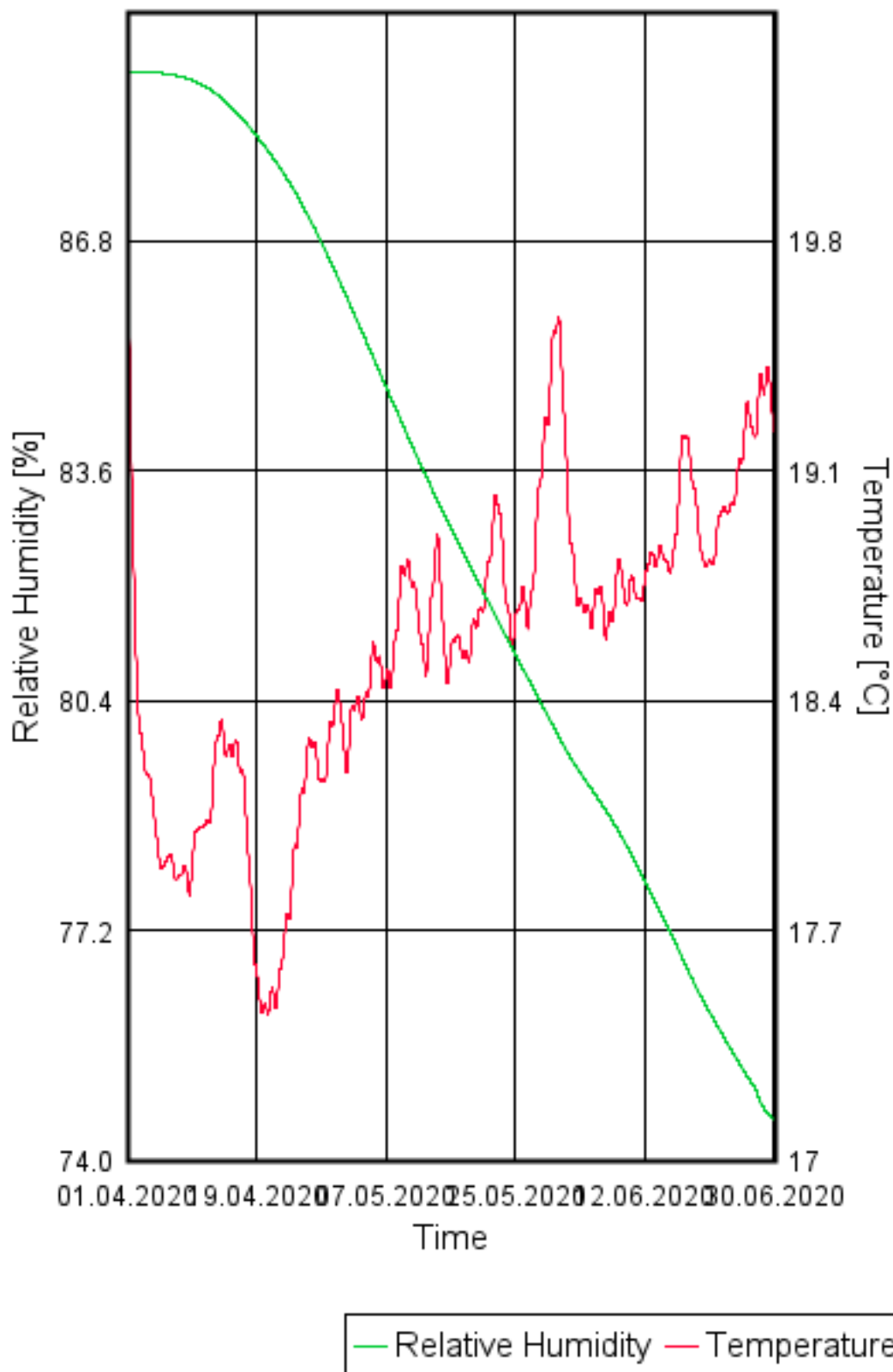
Vedlegg C.4 - *Beregningspunkt nr.2 vinduskarm*

Vedlegg C.5 - *Beregningspunkt nr.3 vinduskarm*

Vedlegg C.6 - *Beregningspunkt nr.4 vinduskarm*

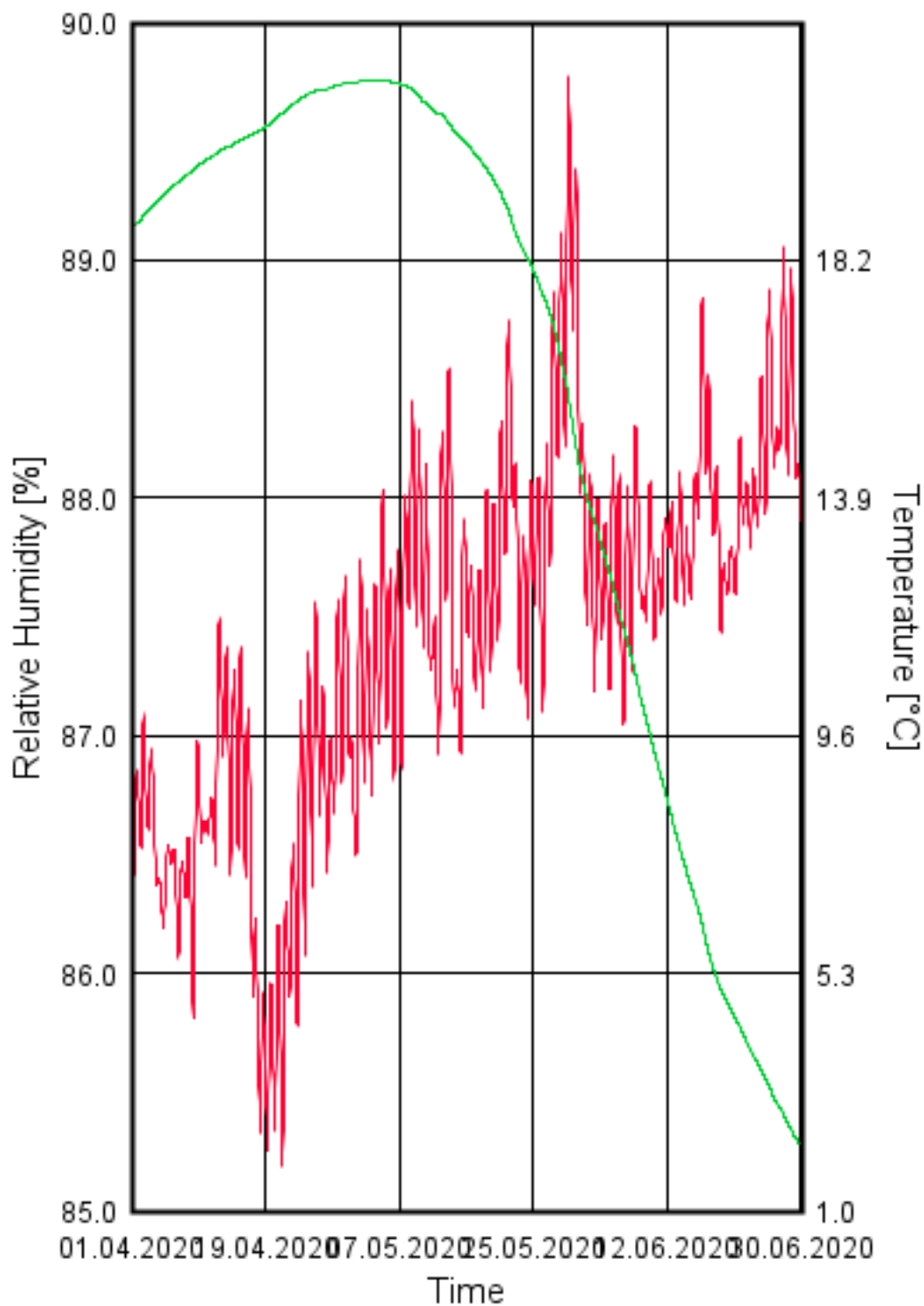
Vedlegg C.7 - *Beregningspunkt nr.5 vinduskarm*

Relative Humidity



Figur V- C.1 Relativ fuktighet og temperatur for beregningsperioden 1. april til 30. juni for beregningspunkt nr.1 av den to-dimensjonale bindingsverkveggen

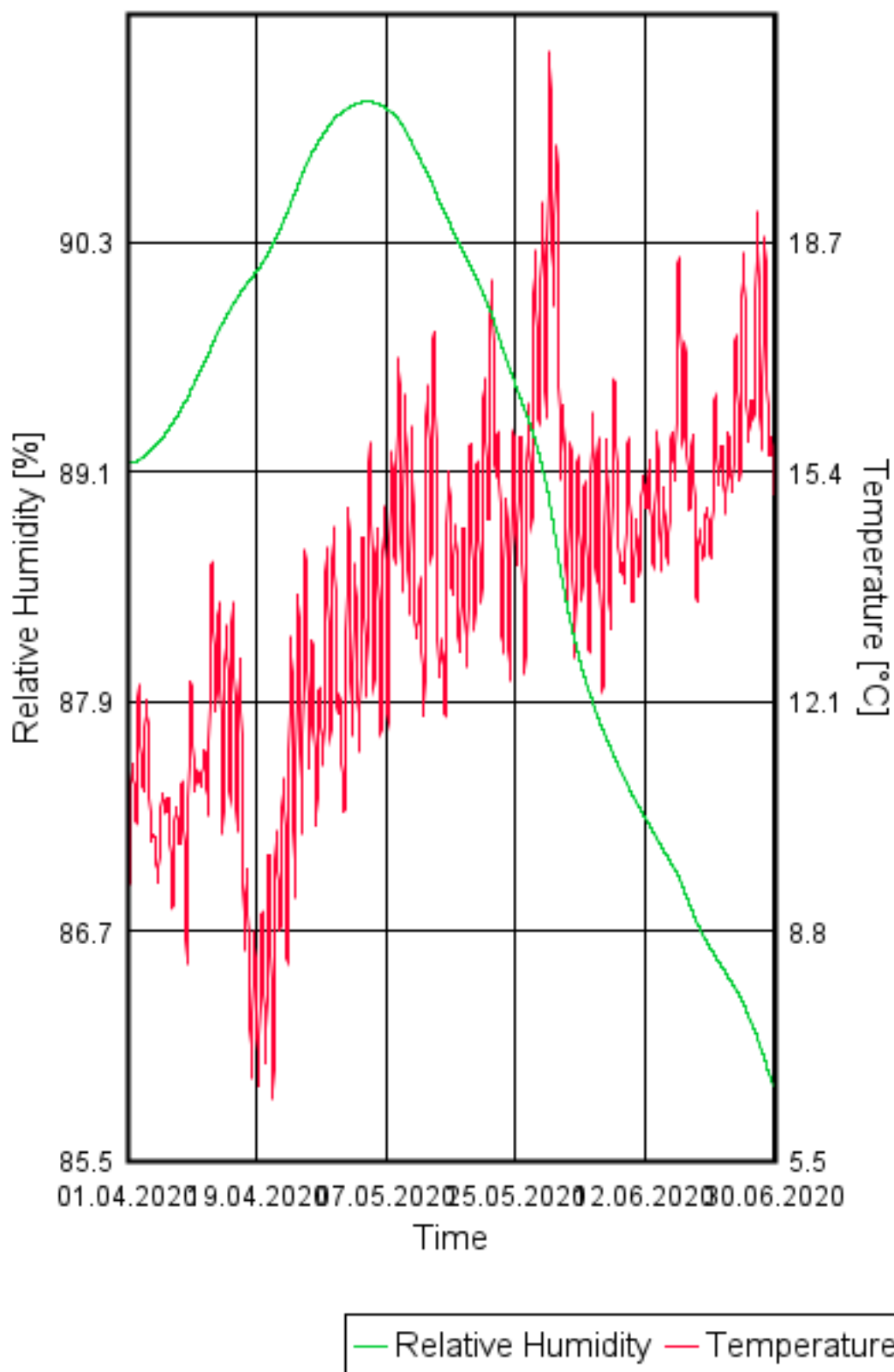
Relative Humidity



— Relative Humidity — Temperature

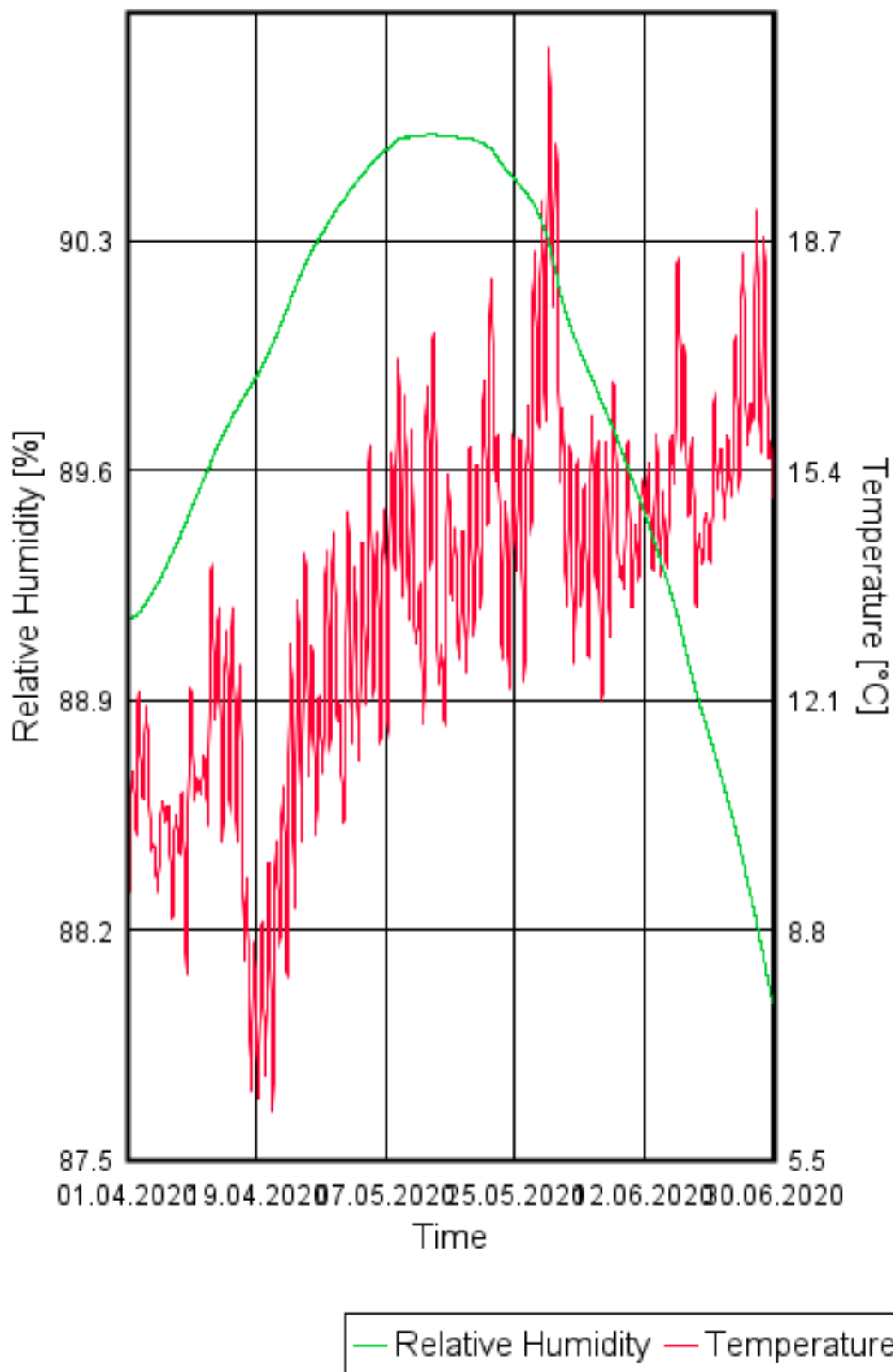
Figur V- C.2: Relativ fuktighet og temperatur for beregningsperioden 1. april til 30. juni for beregningspunkt nr.2 av den to-dimensjonale bindingsverkeveggen.

Relative Humidity



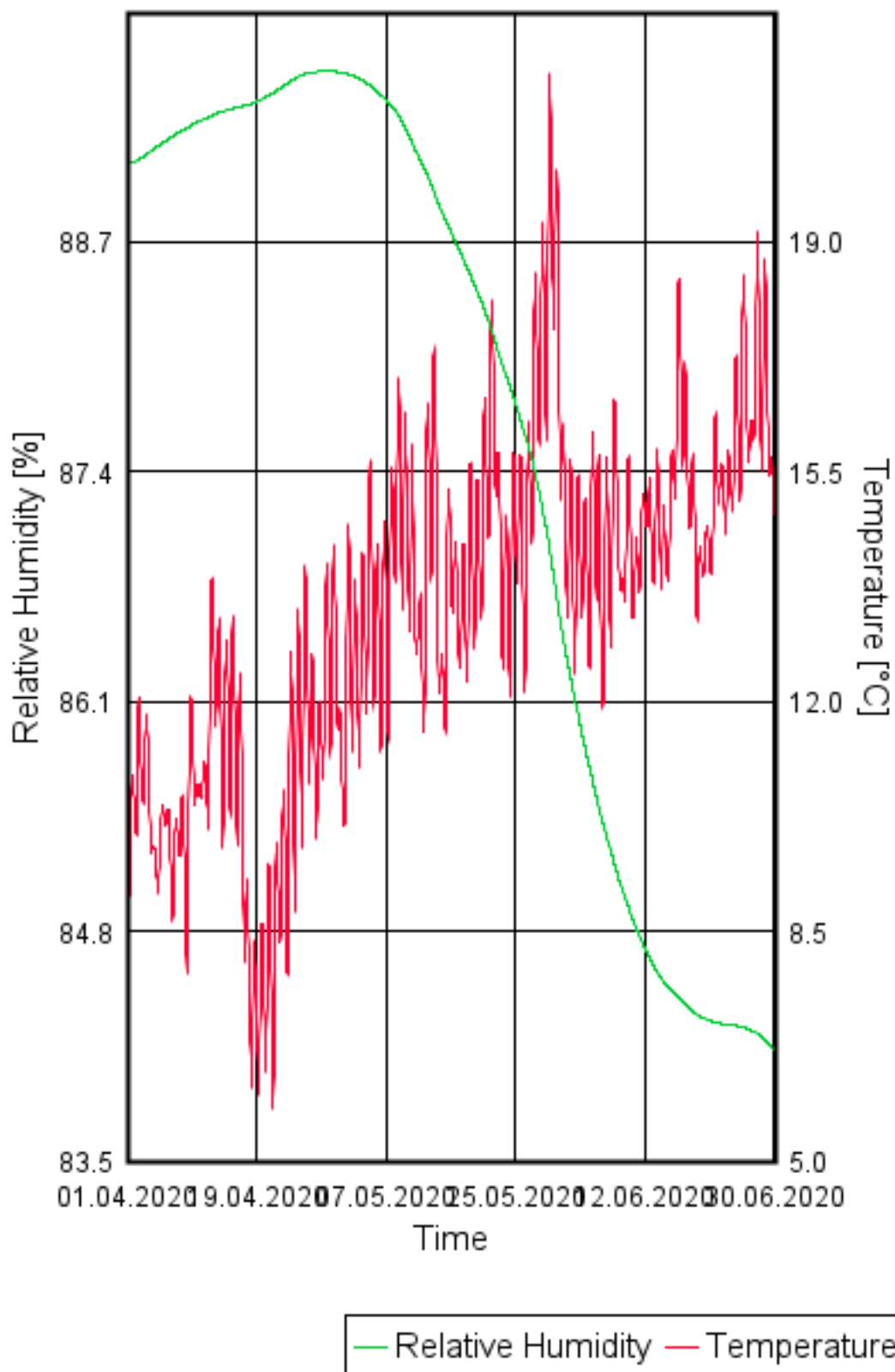
Figur V – C.3: Relativ fuktighet og temperatur for beregningsperioden 1. april til 30. juni for beregningspunkt nr.1 av vinduskarmen.

Relative Humidity



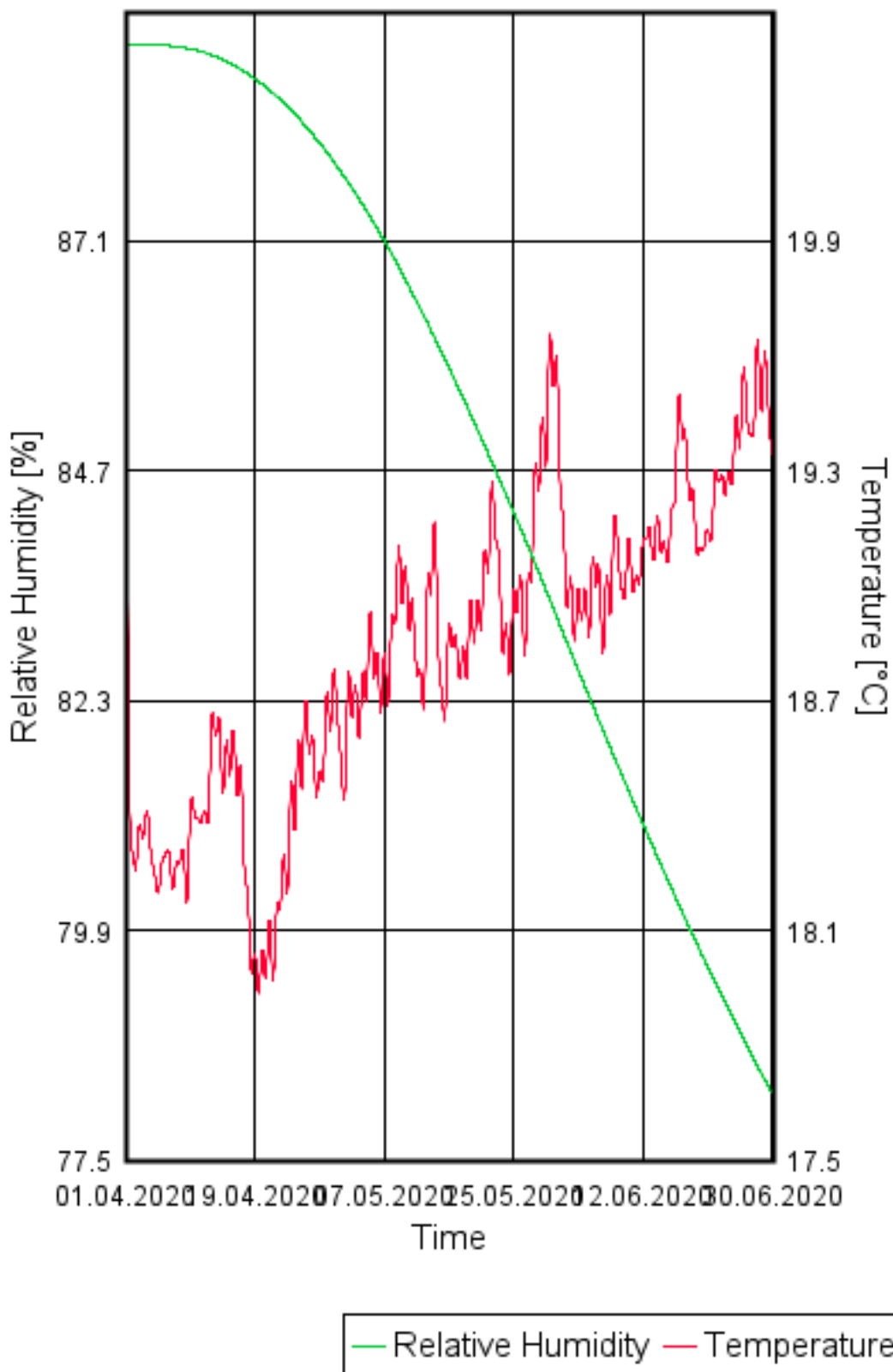
Figur V – C.4: Relativ fuktighet og temperatur for beregningsperioden 1. april til 30. juni for beregningspunkt nr.2 av vinduskarmen.

Relative Humidity



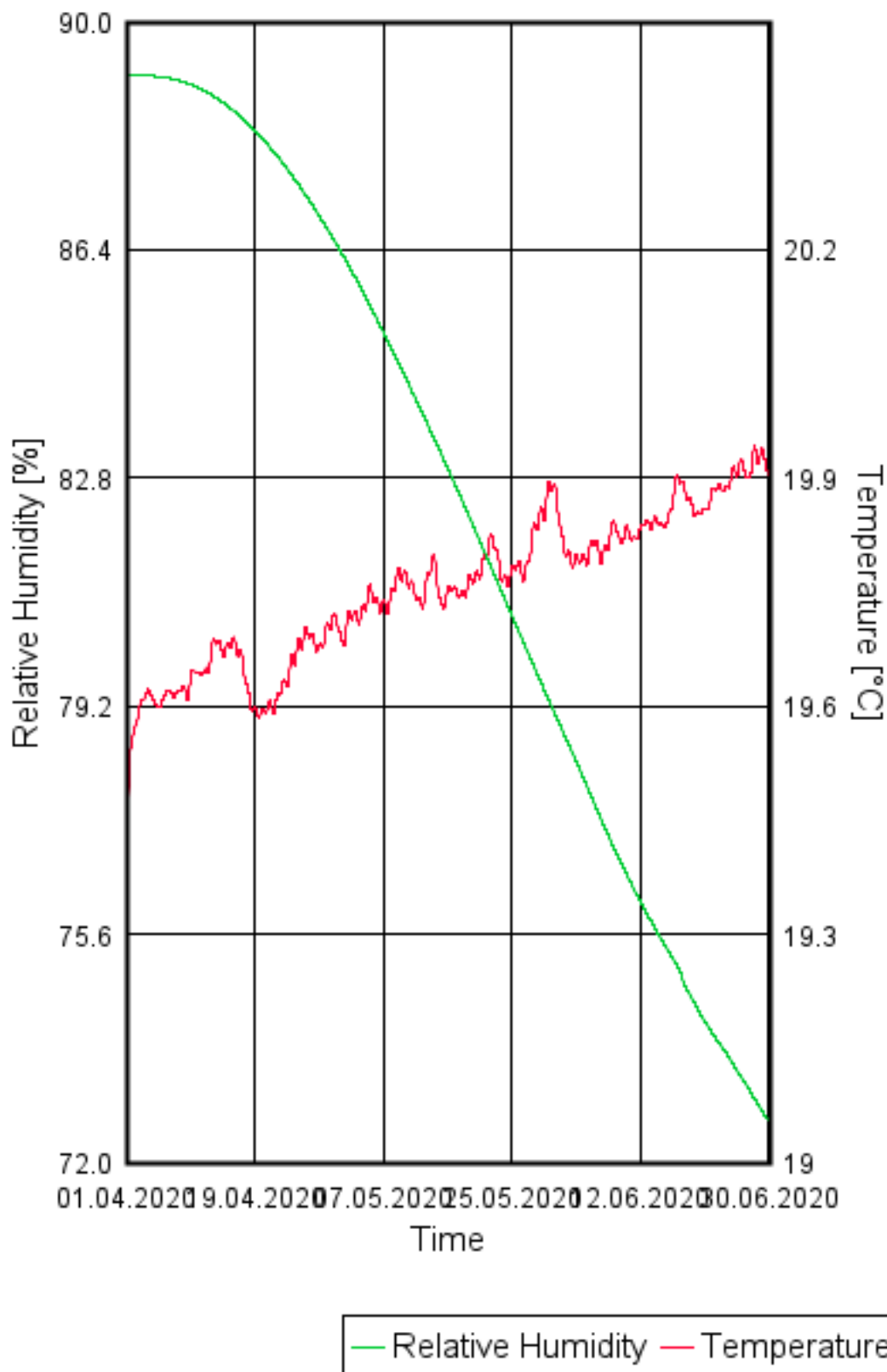
Figur V – C.5: Relativ fuktighet og temperatur for beregningsperioden 1. april til 30. juni for beregningspunkt nr.3 av vinduskarmen.

Relative Humidity



Figur V – C.6: Relativ fuktighet og temperatur for beregningsperioden 1. april til 30. juni for beregningspunkt nr.4 av vinduskarmen.

Relative Humidity



Figur V - C.7: Relativ fuktighet og temperatur for beregningsperioden 1. april til 30. juni for beregningspunkt nr. 5 av vinduskarmen.

D Muggvekstanalyse

I dette vedlegget presenteres resultattabell fra muggvekstanalysen fra WUFI Mould Index VTT for den en-dimensjonale bindingsverkeveggen.

Nr.	Kommentar	Risiko for muggvekst:	Årlig muggvekstindeks:
1	25%, 400 mm iso, med tape sd =8,9m	Ja	4.43
2	25%, 400 mm iso, med tape sd=1,5 m	Ja	3.37
3	25%, 400 mm iso, med tape sd= 1,2	Ja	2.77
4	25%, 400 mm iso, uten tape	Nei	0.238
5	20%, 400 mm iso, med tape sd= 8,9m	Ja	4.14
6	20%, 400 mm iso, uten tape	Nei	0.222
7	15%, 400 mm iso, med tape sd= 8,9 m	Ja	2.18
8	15%, 400 mm iso, uten tape	Nei	0.129
9	25%, 250 mm iso, med tape sd= 8,9 m	Ja	4.81
10	25%, 250 mm iso, uten tape	Nei	0.576
11	25%, 150 mm iso, med tape sd= 8,9 m	Ja	4.53
12	25%, 150 mm iso, uten tape	Nei	0.658
13	Trondheim	Ja	5.03
14	Bergen	Ja	5.07
15	Karasjok	Ja	4.89
16	1. juli	Ja	5.05
17	1. oktober	Ja	4.94
18	1. januar	Ja	4.87
19	Vindsperre sd=0,5m	Ja	4.72
20	Dampspærre sd=2m	Ja	4.31
21	Vindsperre sd=0,5 m og dampspærre sd=2 m	Ja	4.32

