



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2017 30 stp
Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT)

Soppskader i etterisolerte småhus av tre: et parameterstudie av risikofaktorer.

Damage in wooden houses caused by additional
insulation: a parametric study of risk factors.

Ekaterina Bobrineva
Byggeteknikk og arkitektur

I. Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen av mastergraden innen byggeteknikk og arkitektur ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet. Denne oppgaven på 30 studiepoeng ble utarbeidet i perioden høsten 2016-våren 2017.

Jeg fikk stor interesse for bærekraft og trekonstruksjoner etter å ha studert ved NMBU i 5 år. Rehabilitering av eldre trehus er et gunstig miljøtiltak, derfor hadde jeg lyst til å bidra til kompetanseutvikling i dette fagfeltet. Dette resulterte i et samarbeidsprosjekt med Mycoteam som var interessert i å benytte informasjon fra databasen sin til forskningsformål.

Jeg vil gjerne rette ekstra stor takk til veilederne mine Mari Sand Austigard ved Mycoteam AS og Thomas Kringelbotn Thiis ved NMBU for oppfølging, støtte og faglig hjelp. Sist men ikke minst ønsker jeg også å takke familie, venner, og spesielt Martine Mulstad for gjennomlesing av oppgaven og min kjære samboer Asia Chernova for all støtte og motivasjon under skriveprosessen.

II. Sammendrag

Denne masteroppgaven er skrevet i samarbeid med rådgivningsfirmaet Mycoteam som er spesialisert innen fagfelt biologiske skadegjørere.

Etterisolering av småhus av tre er et utbredt energieffektiviseringstiltak i Norge som også bidrar til økt brukerkomfort. Imidlertid kan tiltaket endre bygningsfysiske forhold i konstruksjonen til det verre og det kan dannes gunstige forhold for utvikling av fukt-, råte- og sopp-skader. Dette kan ha negative konsekvenser både for inneklima og konstruksjonsbestandighet, og føre til behov for ytterligere rehabilitering.

Dette studiet tar utgangspunkt i skadesaker som Mycoteam har behandlet og undersøker hvordan etterisolering kan forårsake sopp-skadedannelse i småhus av tre. Det betraktes følgende faktorer som påvirker mikroklima i etterisolerte konstruksjoner: isolasjonstykkelse, konstruksjonens diffusjonstetthet, ventilasjonsintensitet, makroklima og fuktproduksjon i oppvarmede deler av bolig.

Det ble benyttet både kvantitative og kvalitative forskningsmetoder. Først ble det utført en analyse av 44 skadesaker fra database til Mycoteam. Det ble funnet to bygningskomponenter som er utsatt for soppangrep i småhus av tre: kaldt luftet loft (22 skadesaker) og bindingsverk av tre (6 skadesaker). I begge gruppene ble det i hovedsak oppdaget muggsopp som har oppstått på grunn av dårlig lufting eller lav dampdiffusjonsmotstand til konstruksjonen.

Deretter ble det utført et parameterstudie i det hydrotermiske bygningssimuleringsprogrammet WUFI 2D for å undersøke hvor høy skaderisiko ovenfor nevnte faktorer kan forårsake. Simuleringsmodeller tar utgangspunkt i skadesaker og representerer konstruksjonsoppbygging som er karakteristisk for hver gruppe.

Ut ifra resultatene fremkommer det, at selv om etterisolering i seg selv fører til noe kaldere overflater på undertak og på varm side av vindsperre, er disse endringene ubetydelige for skadedannelse ved bruk av et isolasjonslag som er opptil 300 mm tykt. Tilstrekkelig lufting er avgjørende for å unngå skadedannelse på loft i småhus av tre. Selv om makroklima har påvirket skadedannelse i begge tilfeller, er det først og fremst en gunstig sammensetning av temperatur og RF i den aktuelle konstruksjonen som er viktig.

III. Abstract

This Master thesis is written in collaboration with Mycoteam, a consulting company, which specializes in investigation of construction damages.

Adding insulation to wooden houses is a widespread energy efficiency measure, which also increases indoor air quality. However, incorrect implementation of this measure can result in favorable conditions for moisture development, as well as rot fungi and mold damage. This can have unfortunate consequences both for comfort of residents and durability of construction, which in turn create a need for further restoration. Thus, damages are caused mainly by the unfavorable combination of relative humidity (RH) and temperature in construction.

This study is based on the reports of damage cases, which were investigated by Mycoteam. The study explores factors, which are crucial for moisture and mold damages in wooden houses. The following factors are crucial for moisture damage formation: insulation thickness, vapor resistance of construction, aeration intensity, macroclimate, and moisture production in heated parts of residence. A mixed research methodology is applied, which includes both quantitative and qualitative research techniques.

Firstly, 44 cases, taken from Mycoteam's database, were analyzed in order to find building components, which are exposed to mold and moisture damage in wooden houses, and analyze damage causes. Two groups of building components were established: cold aerated attic (22 cases) and timber wall (6 cases).

Next, hydrothermal simulations in WUFI 2D were performed. Simulation models were based on the damage cases and illustrated constructions, which are typical for both groups. Hydrothermal transport in the cold aerated attic and timber wall are simulated both before and after additional insulation. In order to study the damage risk caused by abovementioned factors there were simulated different ways of adding insulation.

The results showed, that adding insulation, which is maximum 300 mm thick, will not cause any damage, if executed properly. Next, intensity of attic aeration was factor with the strongest influence on the first group. Macroclimate influenced mold growth in both groups, but this influence varied for different groups.

IV. Figurer

Figur 1 Molliers diagram viser sammenheng mellom RF, temperatur, vanndampinnhold og damptrykk. Illustrasjon: (Geving, 1995).	20
Figur 2 Oppbygging av trevirke. Illustrasjon: (Ramstad, 2015).	22
Figur 3 a-b. Uttørking av vann i celleveggene. Fibermetningspunkt (a) ytterligere uttørking av treceller (b) Illustrasjon: (Skaug, 2007).....	22
Figur 4 Fuktinnhold i trevirke. Illustrasjon: (Ramstad, 2015).	23
Figur 5 Fire viktige faktorer som påvirker soppskadedannelse. Illustrasjon: (Mattsson, 2010).	24
Figur 6 Vekst av muggsopp på gipsplate. Bilde: Mycoteam.	24
Figur 7 Råtesoppskade i gulvbjelke forårsaket av ekte hussopp. Bilde: Mycoteam.....	26
Figur 8 Aktivitet til råtesopp er temperaturavhengig. Illustrasjon: (Mattsson, 2010).....	27
Figur 9 a-b. Germinering til <i>Aspergillus restrictus</i> (a), som benyttes til utvikling av LIM (b). Illustrasjon: (Sedlbauer, Krus, & Breuer, 2003).	28
Figur 10 LIM-diagrammer for tre substrattyper som viser hvordan substrat påvirker soppens aktivitet. Illustrasjon: (Sedlbauer, 2001).	29
Figur 11 En prinsippskisse av et skråtak med kaldt luftet loft og bindingsverk av tre.	33
Figur 12 Etterisolering av skråtak med kaldt loftet loft. Illustrasjon: (Uvsløkk, 2005).....	34
Figur 13 Komponenter i bindingsverksveggen. Illustrasjon: (Ramstad, 2014).	35
Figur 14 Utvendig etterisolering av bindingsverk av tre. Illustrasjon: (Edwardsen, 2004).	36
Figur 15 a-b. a: Fuktopptak i luft uten ekstra fuktkapasitet; b: fuktopptak i luft med ekstra fuktkapasitet. Illustrasjon: WUFI.	39
Figur 16 LIM I (rød linje) som Folosdiagram benyttes til vurdering av soppskaderisiko. Illustrasjon: (Sedlbauer, 2001).	40
Figur 17 Eksempel på Folosdiagram.....	41
Figur 18 Modelloppbygging for gruppe 1 loft.	50
Figur 19 Modelloppbygging for Gruppe 2 vegg.	51
Figur 20 Figuren viser hvordan den forenklete modellen (a) tilnærmes til skråtak (b) ved valg av klima.	52

Figur 21 a-b. Oversikt over klima for grupper 1(a) og 2 (b): uteklima (blå), adiabatisk (grønn) og inneklime (rød).....	53
Figur 22 a-b. Utforming av luftkilder på loft før etterisolering for grupper 1(a) og 2(b).	53
Figur 23 Beregnet luftomsetning ved lekkasjetall 10 1/h ved 50 Pa. Illustrasjon: (Edvardsen, Haug, & Ramstad, 2010).....	54
Figur 24 Oversikt over konstruksjoner og bygningskomponenter som ble hentet fra skadearkivet til Mycoteam.	57
Figur 25 Sammenheng mellom skader og skadeårsaker for gruppe 1, loft.....	59
Figur 26 a-b. Skadesak 6. Lufting er tettet med isolasjon. a: hvitjuke og b:råtesoppkade. Bilder: Mycoteam AS.....	59
Figur 27 Sammenheng mellom skader og skadeårsaker for gruppe 2, bindingsverk av tre. ...	61
Figur 28 Skaderisiko [%] ved uttørking av byggfukt på loft i Oslo (1.0.(O)), Bergen (1.0.(B)) og Karasjok (1.0.(K)).	62
Figur 29 a-h. Oversikt over isopleths for simuleringer for etterisolerte tilfeller.....	63
Figur 30 Skaderisiko [%] måned for måned ved variasjon av lufting på loft.	64
Figur 31 Gjennomsnittlig skaderisiko per måned og dens sammenheng med luftskifter på loft.	65
Figur 32 Skaderisiko [%] i Oslo (2.0.(O)), Bergen (2.0.(B)) og Karasjok (2.0.(K)) for 1950-53	65
Figur 33 a-e. Isopleths for simuleringer fra Tabell 5.	66
Figur 34 Skaderisiko [%] for simuleringer av et etterisolert bindingsverk av tre i Oslo med luftet panel (2.1.a.(O)) og i Karasjok (2.3.b.(K))......	67
Figur 35 Modell for gruppe 1: loft. Alle mål i mm.	78
Figur 36 a-b. a: Modell for bindingsverk av tre før etterisolering. b: Bindingsverk av tre med 150 mm ekstra isolasjon.	79
Figur 37 Bindingsverk av tre med 150 mm ekstra isolasjon og luftet kledning.	79
Figur 38 Relativ fuktighet i Karasjok. Illustrasjon: WUFI 2D.	81
Figur 39 Klima i Oslo. Illustrasjon: WUFI.	82
Figur 40 klima i Bergen. Illustrasjon: WUFI.	82

Figur 41 Nedbørnormaler i Oslo, Bergen, Karasjok. Kilde: (Meteorologisk institutt, u.d.) ...	83
Figur 42 a-b. a: Skadesak 1.1. Misfarging ut mot raft på grunn av soppvekst. b: Skadesak 1.3. Muggsoppvekst på undertak mot raft og 1 meter opp over gulv. Bilder: Mycoteam.	84
Figur 43 a-b. a: Skadesak 1.7. Muggsoppvekst og tett lufting. b: Skadesak 1.8. Muggsoppvekst på takflate mot nord. Bilder: Mycoteam.....	84
Figur 44 a-b. Skadesak 1.9. a: riming på taktroa den 12.12. b: termografering av samme området viser luftlekkasjer. Bilder: Mycoteam.....	85
Figur 45 a-b. Skadesak 1.10 Muggsoppvekst på undertak og tetting av lufting pga. etterisolering. Bilder: Mycoteam.....	85
Figur 46 a-b: Skadesak 1.14. Muggsoppvekst på undertak og tetting av lufting med isolasjonsmatt. Bilder: Mycoteam.....	85
Figur 47 a-b. Skadesak 3.7. Muggsoppvekst på yttervegg. Bilde: Mycoteam.....	87
Figur 48 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.0.(O).....	89
Figur 49 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.0.(B)	89
Figur 50 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.0.(K).....	90
Figur 51 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.1.a.(O).....	90
Figur 52 oversikt over RF og temperatur for simulering 1.1.b.(O).....	91
Figur 53 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.2.a.(O)	91
Figur 54 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.2.b.(O).....	92
Figur 55 Vanninnhold i undertaket når simulering 1.3.b.(B) krasjet.	92
Figur 56 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.4.a.(O).....	93
Figur 57 oversikt over RF og temperatur for simulering 1.5.a.(O).....	93
Figur 58 oversikt over RF og temperatur for simulering 1.5.b.(O).....	94
Figur 59 oversikt over RF og temperatur for simulering 1.5.c.(O).....	94
Figur 60 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.0.(O).....	95
Figur 61 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.0.(B)	95
Figur 62 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.0.(K).....	96
Figur 63 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.1.a.(O).....	96

Figur 64 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.1.b.(O).....	97
Figur 65 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.2.a.(O).	97
Figur 66 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.3.b.(K).....	98
Figur 67 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.4.a.(O)r.....	98

V. Tabeller

Tabell 1 Oversikt over endringer i minste krav til noen bygningsdeler over tid.....	30
Tabell 2 Simuleringer av et kaldt luftet loft for periode 1950-2000.....	45
Tabell 3 Simuleringer av en vegg av bindingsverk for periode 1950-2000.....	45
Tabell 4 Simuleringer av et etterisolert kaldt luftet loft for periode 2000-2003.....	47
Tabell 5 Simuleringer av en etterisolert vegg for periode 2000-2003.....	48
Tabell 6 Elementinndeling for loft og vegg i ulike retninger.....	51
Tabell 7. Gruppe 1: oversikt over caser.....	57
Tabell 8. Gruppe 2: oversikt over skadesaker.....	60
Tabell 9 Materialer til WUFI-simuleringer.....	80
Tabell 10 Noen luftsjikt som ble benyttet til simuleringer.....	81
Tabell 11 Klimadata for Oslo, Bergen og Karasjok.....	83
Tabell 12 Inneklimadata. Kilde: WUFI 2D.....	84
Tabell 13 Resultater for Gruppe 3.....	86
Tabell 14 Uttørking av undertak på kaldt luftet loft før etterisolering.....	88
Tabell 15 Uttørking av bindingsverk av tre i Oslo og Bergen før etterisolering.....	88

VI. Formler

Formel 2-1.....	16
Formel 2-2.....	17
Formel 2-3.....	17
Formel 2-4.....	18
Formel 2-5.....	19
Formel 2-6.....	19
Formel 2-7.....	37
Formel 2-8.....	37
Formel 2-9.....	38
Formel 2-10.....	40
Formel 3-1.....	55
Formel 3-2.....	56
Formel 8-1.....	81

Innholdsfortegnelse

I. Forord	2
II. Sammendrag	3
III. Abstract	4
IV. Figurer	5
V. Tabeller	9
VI. Formler	10
1. Innledning	13
1.1. Bakgrunn	13
1.2. Problemstilling	14
1.3. Omfang og begrensninger	14
2. Teori	15
2.1. Varme	15
2.2. Bygningsfysiske begrep	16
2.3. Fukt	18
2.4. Tre som materiale	21
2.5. Sopp	23
2.6. Rehabilitering	30
2.7. Kaldt loft og bindingsverk av tre fra 1940-1955: oppbygging og etterisolering	32
2.8. WUFI 2D	36
3. Metode	42
3.1. Datainnsamling	42
3.2. Case-studier	43
3.3. Varme- og fuktsimuleringer	44
3.4. Simuleringsoppsett	49

3.5. Metode for databehandling	55
4. Resultater	57
4.1. Datainnsamling.....	57
4.2. Simuleringer i WUFI 2D.....	62
5. Diskusjon.....	68
5.1. Gruppe 1: loft	68
5.2. Gruppe 2: vegg	70
6. Konklusjon.....	72
7. Kilder.....	74
8. Vedlegg	78
8.A. Målsatte modeller	78
8.B. Materialer	80
8.C. Klima	81
8.D. Bilder fra skadearkiv for Gruppe 1, loft	84
8.E. Resultater fra datainnsamling for Gruppe 3: andre konstruksjoner og bygningsdeler.....	86
8.F. RF i konstruksjoner før etterisolering i ulike klima.....	88
8.G. RF og temperaturer for WUFI-simuleringer.	89

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Eksisterende bygningsmasse utgjør 3,8 millioner bygninger i Norge og er en svært viktig ressurs. Dagens miljøambisjoner stiller strenge krav til byggebransjen med tanke på reduksjon av avfallsmengder og energiforbruk. Rehabilitering av eldre bygg fremfor rive og bygge nytt er et gunstig miljøtiltak.

Etterisolering er et av de mest utbredte tiltakene på eksisterende eneboliger som pleier å gi gode resultater. Imidlertid kan etterisolering også endre bygningsfysiske forhold i konstruksjonen til det verre. Mange gamle småhus av tre har opplevd ulike fukt- og sopprelaterte problemer i senere tid nettopp på grunn av etterisolering. Dette skjer fordi ethvert inngrep har innvirkning på fukt- og temperaturforhold i konstruksjonen.

Det er heller ikke uvanlig at tiltaket utføres feil på grunn av manglende kunnskap eller mistolking av faglige anvisninger i forhold til den aktuelle konstruksjonen. Dette kan resultere i gunstige forhold for biologiske skadegjørere, som kan være skadelig for konstruksjonen eller føre til dårlig inneklime.

Som regel skal etterisolering være unntatt fra krav i byggeteknisk forskrift (TEK), og dette gir en viss frihet for hvordan tiltaket skal utføres. For eksempel er det ofte hensyn til beboernes komfort og ønske om å spare energi som er den viktigste driveren for valg av isolasjonstykkel. Dette kombinert med manglende kunnskap om fagfeltet gjør at det er aktuelt å studere skadedannelse i småhus av tre.

1.2. Problemstilling

Formålet med dette prosjektet er å undersøke hvilke faktorer som forårsaker fukt- og sopp-skader i etterisolerte småhus av tre.

Delmålene i studiet:

1. Finne ut hvilke konstruksjoner som er utsatt for skader på grunn av etterisolering.
2. Samle informasjon om skadeårsaker ut fra skadearkiv til Mycoteam..
3. Studere påvirkningen av ulike faktorer på etterisolerte konstruksjoner ved hjelp av simuleringer av fukt- og varmetransport.

1.3. Omfang og begrensninger

Denne oppgaven omfatter 30 studiepoeng og er begrenset både i tid og omfang. Det er kun sett på skadesaker som har blitt rapportert til Mycoteam, og de fleste skadesakene befinner seg i Oslo-området. Selv om skadesaker om etterisolering omfatter mange ulike konstruksjoner, ble det valgt å betrakte kun bygningsdeler i småhus av tre på grunn av begrenset tid og kapasitet. Ut ifra skadesaker ble det definert 2 grupper: kaldt luftet loft og bindingsverk av tre.

Modellen som benyttes til hydrotermiske simuleringer tar utgangspunkt i skadesaker og representerer en karakteristisk konstruksjon for aktuelle bygningskomponenter. Det er kun denne konstruksjonsombyggingen som ble betraktet her, og en annen konstruksjonsombygging kunne ha gitt andre resultater.

Det er kun noen variasjoner av studieparameterne som har blitt studert.

2. Teori

2.1. Varme

Ved faseoverganger til vann skjer det en endring i varmeinnholdet uten at temperatur endres. Varmen tilsettes ved smelting og fordampning, mens den frigis ved kondensasjon og størkning (Geving & Thue, Fukt i bygninger, 2002). En prosess som foregår uten varmeutveksling med omgivelser kalles adiabatisk prosess. Varme transporteres ved ledning, stråling og konveksjon.

Økt temperatur fører til at atomer vibrerer i faste stoffer eller kolliderer med hverandre i væsker og gasser, og dette overfører varmeenergi til områder med lav temperatur (Thue, 2000). Denne mekanismen for varmetransport kalles varmeledning, og den påvirkes av materialets varmeledningsevne og temperaturforandring per materialtykkelse ved stasjonære forhold.

Varmestråling er en form for elektromagnetisk stråling som kan forplante seg gjennom gasser, væsker og noen faste stoffer, for eksempel glass. Varme bygningsmaterialer har evne til å emittere termisk stråling, mens stråling fra omkringliggende flater kan bli absorbert, transmittert og reflektert. Selv om sammensetning av disse prosessene varierer for ulike materialer, må de alltid utgjøre 100% til sammen (Edvardsen, Haug, & Ramstad, 2010). Materialets farge eller transparens er eksempler på egenskaper som påvirker denne sammensetningen.

Luft- eller væskestrømmer er drivkrefter bak konveksjon. Man skiller mellom naturlig og tvungen konveksjon. Ved naturlig konveksjon får et oppvarmet medium en lavere tetthet og dermed stiger, mens kaldere medium synker nedover (Thue, 2000). I bygninger kan det dannes en naturlig konveksjon mellom to flater med ulik temperatur. Tvungen konveksjon skyldes densitetsforskjeller forårsaket av ytre krefter, for eksempel vind. Formlene som er nevnt i forbindelse med fukt- og varmetransport er hentet fra bok *Trehus* (Edvardsen, Haug, & Ramstad, 2010).

2.2. Bygningsfysiske begrep

I denne delen blir det presentert følgende begrep som er knyttet til fukt- og varmetransport i bygninger: varmeledningsevne, varmemotstand, U-verdi.

2.2.1. Varmeledningsevne

Varmeledningsevnen eller varmekonduktivitet (λ -verdi [W/mK]) er en materialkonstant som angir stoffets evne til å lede varme ved temperaturendringer. Materialer med høy molekyltetthet har høyere λ -verdi, mens materialer med lavere molekyltetthet har dårligere varmeledningsevne (Thue, 2000). For eksempel har mineralull mange gassfylte porer som reduserer materialets tetthet og bidrar til en lavere varmeledningsevne.

Materialets varmeledningsevne øker ved økende fuktinnhold, fordi vannet som er tatt opp gjør materialet mer ledende.

2.2.2. Varmemotstand

Varmemotstand R er definert som et forhold mellom materialsjiktets tykkelse og materialets varmeledningsevne:

$$R = \frac{d}{\lambda} (2 - 1)$$

hvor

R = varmemotstand [m²K/W]

d = sjiktets tykkelse [m²]

λ = varmekonduktivitet [W/K]

Den totale R-verdien til alle sjikt i konstruksjonen finnes ved å summere R-verdiene til alle sjikt:

$$R_{tot} = R_{si} + R_{sjikt\ 1} + R_{sjikt\ 2} + \dots + R_{sjikt\ n} + R_{se} \quad (2 - 2)$$

hvor

R_{si} = innvendig varmeovergangsmotstand [m^2K/W]

$R_{sjikt\ n}$ = varmemotstand til sjikt n [m^2K/W]

R_{se} = utvendig varmeovergangsmotstand [m^2K/W]

Motstanden som varmeoverføringen møter ved en innvendig eller utvendig sjikt kalles varmeovergangsmotstand.

2.2.3. U-verdi

U-verdi [W/m^2K] beskriver bygningsmaterialets varmeisolasjonsevner. U-verdien er den varmen som strømmer gjennom en kvadratmeter av et materiale når temperaturforskjellen over en bygningsdel er lik 1 K.

U-verdien er gitt av følgende formel:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} + \Delta U \quad (2 - 3)$$

hvor

R_{tot} = varmemotstand [m^2K/W]

ΔU = et eventuelt tillegg, tar hensyn til blant annet utettheter i isolasjon og festeanordninger som går gjennom isolasjon.

Materialer med lavere λ -verdi som for eksempel isolasjon bidrar til at konstruksjonen får lavere U-verdi.

2.3. Fukt

2.3.1. Damptransport

Varme og fukt er to prosesser som påvirker hverandre og bør betraktes i sammenheng. Fukt transporteres både i dampform ved RF under 98% og som fritt vann ved RF over 98%.

Diffusjon og konveksjon er de mest aktuelle mekanismene for damptransport i tilknytning til fuktskadedannelse (Thue, 2000).

Diffusjon foregår når vannmolekyler flytter seg til områder med lavere damptrykk, inntil fuktinnholdet i materialet oppnår en likevekt med omgivelsene (Thue, 2000). Materialets motstandsfaktor μ påvirker vanndampdiffusjon gjennom materiale. Motstandsfaktor er definert ved hjelp av følgende uttrykk:

$$\mu = \frac{D_p}{\delta_p} (2 - 4)$$

hvor

D_p = vanndampens diffusjonstall i luft, basert på damptrykk [$\text{kg}/(\text{m}^*\text{s}*\text{Pa})$]

δ_p = materialets vanndamppermeabilitet [$\text{kg}/(\text{m}*\text{Pa}*s)$]

Materialets vanndamppermeabilitet reduseres med økende fuktinnhold (Geving & Thue, Fukt i bygninger, 2002).

Naturlig konveksjon som er beskrevet i avsnitt 2.1 *Varme* medfører også en omfordeling av fukt i konstruksjonen. Fuktkonveksjon kan foregå gjennom utettheter i konstruksjoner. Da kan vanndamp bli transportert i relativt store mengder gjennom konstruksjoner (Thue, 2000).

2.3.2. Relativ fuktighet

Absolutt fuktighet v [g/m^3] angir hvor mye vanndamp et gitt luftvolum inneholder. Imidlertid kan relativ fuktighet (RF, [%]) brukes til å beskrive hvor mye fuktighet luften inneholder i forhold til den maksimale fuktmengden som luften kan inneholde ved en gitt temperatur.

$$\square F = \frac{v}{v_{sat}} * 100\% \quad (2 - 5)$$

hvor

v = vanddampkonsentrasjon [g/m^3]

v_{sat} = metningsinnhold i luft [g/m^3]

RF 100% oppnås når luft er mettet, og dette krever at luft må avkjøles til duggpunktet ved konstante damp- og trykkforhold. Ved videre avkjøling vil vann felles ut som kondens.

2.3.3. Porøsitet

Det finnes ulike typer poresystemer, hvor pores fordeling, størrelse og form er avgjørende for materialets evne til fuktopptak og fuktransport. Materialets porøsitet er definert som

$$n = 1 - \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (2 - 6)$$

hvor

ρ = materialets romdensitet

ρ_s = densiten av materialets faststoff

Det er kun porøse materialer som kan binde fukt i poresystemet og regnes som hygroskopiske materialer. Hygroskopiske materialer kan både absorbere og felle ut fuktighet for å oppnå likevekt med RF i omkringliggende luft (Geving & Thue, Fukt i bygninger, 2002).

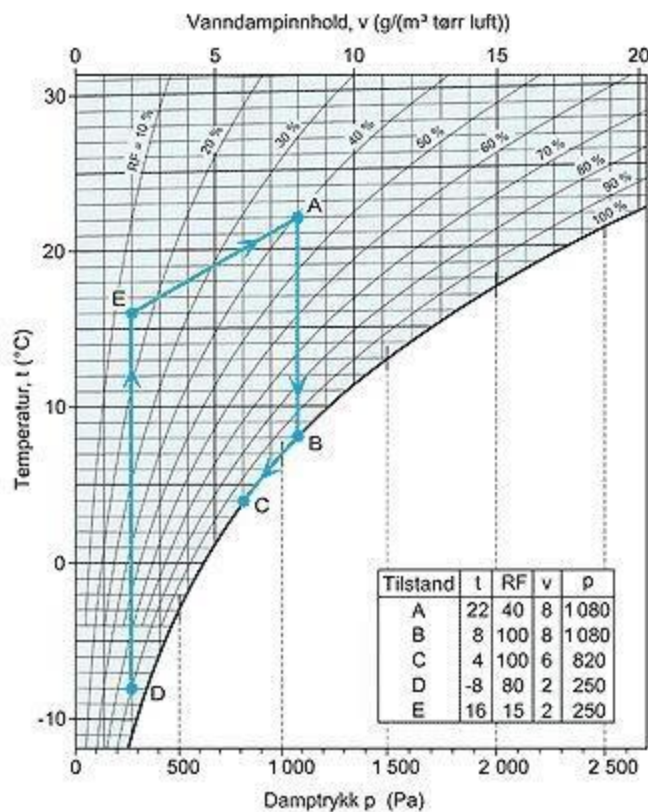
Tre og de fleste bygningsmaterialene tilhører denne gruppen, derfor bør de beskyttes mot uønsket fuktopptak. For eksempel kan bunnsvill beskyttes med grunnmurspapp.

2.3.4. Molliers diagram

Sammenhengen mellom vanndampinnhold, damptrykk, lufttemperatur og den relative fuktigheten kan illustreres ved hjelp av Molliers diagram, som er vist på Figur 1.

Metningsinnholdet er temperaturavhengig og øker med økende temperatur.

Figur 1 viser også et eksempel på hvordan ukjente parametere kan avleses ved hjelp av Molliers diagram. Ved tilstand A har inneluften temperatur på 22°C ved 40 % RF. Dette betyr at den inneholder 8,0 g damp per m³ tørr luft og damptrykket er 1100 Pa. Luften blir mettet hvis temperaturen synker til tilstand B. Da stiger RF, og det vil dannes 2 g/m³ kondens hvis luften avkjøles til 4°C ved tilstand C (Geving, 1995).



Figur 1 Molliers diagram viser sammenheng mellom RF, temperatur, vanndampinnhold og damptrykk. Illustrasjon: (Geving, 1995).

Variasjon i RF i uteluft kan også forklares ved hjelp av Molliers diagram. Fuktinnholdet er væravhengig og varierer både gjennom døgnet og året. Vanndampkonsentrasjon ved metningspunktet synker med synkende temperatur på luften. Derfor er RF høyere når luften er

kald, dvs. om vinteren og på natta, enn når luften er varmere (Geving & Thue, Fukt i bygninger, 2002).

2.4. Tre som materiale

Skog er en viktig råvareressurs i Norge, og tre er et materiale som har tradisjonelt vært mye brukt på grunn av sin tilgjengelighet og anvendelighet. Trevirke har gode konstruksjonsmessige og varmeisolerende egenskaper, men samtidig er det et materiale som er mye utsatt for skader på grunn av dens biologiske opprinnelsen (Norsk Treteknisk Institutt, 1999). Treets struktur påvirker materialeegenskaper og evnen til fuktopptak.

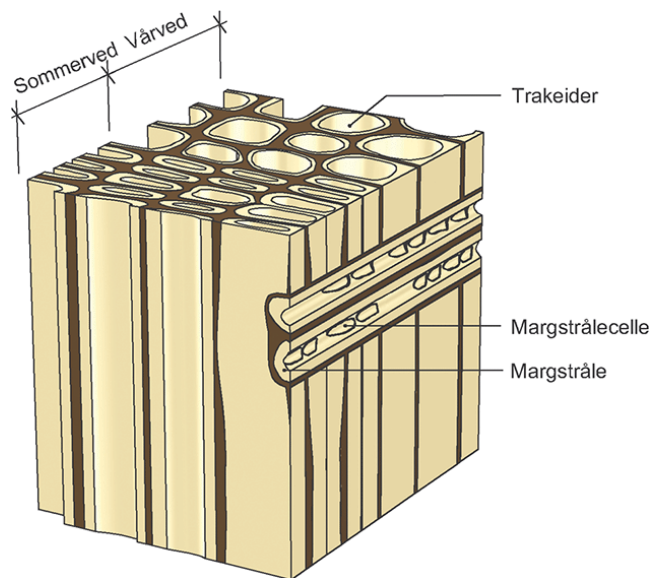
2.4.1. Struktur

Tre er et unikt materiale som har en meget komplisert oppbygging. Trevirke består av mange tynne langsgående celler, eller trakeider, som ligner på sugerør og bidrar til vanntransport i levende tre, se Figur 2. Selv om de fleste cellene er langstrakte, finnes det også margstråler som går på tvers av trestammen og bidrar til tverrtransport av næringsstoffer (Edvardsen, Haug, & Ramstad, 2010).

Celleveggene består av flere sjikt, som er dannet i hovedsak av cellulose, hemicellulose og lignin. Sistnevnte bidrar til treets mekaniske styrke og holder cellene sammen. Kambiet er en del av veden, som deler seg, og det bidrar til at tre vokser radielt (Ramstad, 2015). Det dannes synlige årringer, hvor den lyse delen dannes om våren, og den mørke dannes om sommeren.

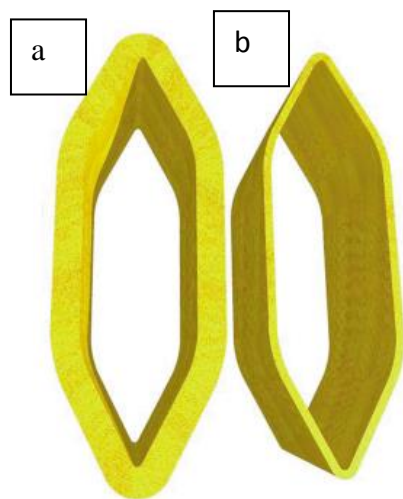
2.4.2. Egenskaper

En varierende struktur gjør tre til et anisotrop materiale, dette betyr at det har ulike egenskaper i forskjellige retninger. Tre er også et heterogent materiale, fordi densitet til ulike deler av trevirke varierer. Derfor har trevirke forskjellige evner til væsketransport i ulike retninger (Skaug, 2007).



Figur 2 Oppbygging av trevirke. Illustrasjon: (Ramstad, 2015).

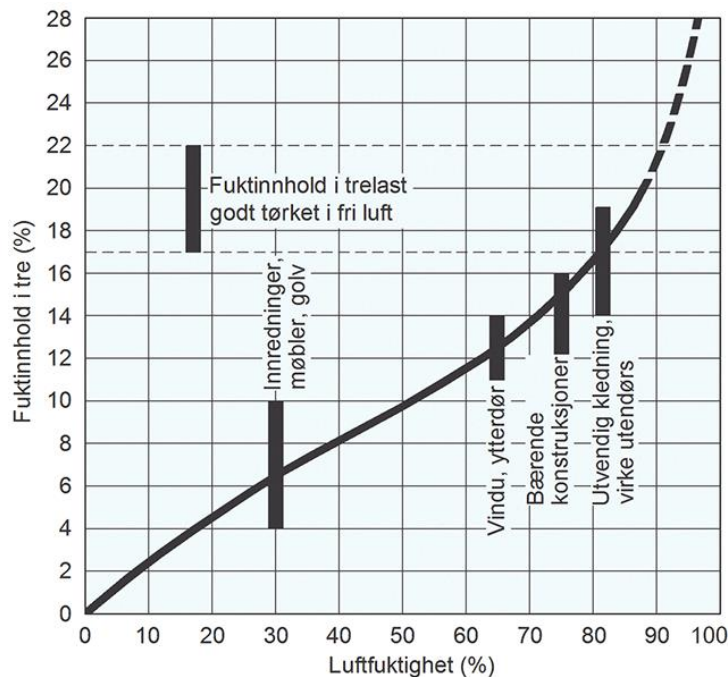
Trevirke kan inneholde både fritt vann i hulrommene i cellene, og bundet vann i celleveggene. Det frie vannet fordampes først ved uttørking, mens celleveggene begynner å tørke etter at det frie vannet er fordampet, som er illustrert på Figur 3. Dette tilsvarer fibermetningspunktet, som er ca. 30% fuktinnhold for gran og furu.



Figur 3 a-b. Uttørking av vann i celleveggene. Fibermetningspunkt (a) ytterligere uttørking av treceller (b) Illustrasjon: (Skaug, 2007)

Som diskutert i avsnitt 2.3.3. *Porøsitet* er tre et hygroskopisk materiale. Trevirkets fuktinnhold som er i balanse med luftens fuktighet er likevektsfuktighet. Den er temperaturavhengig og minsker med økende temperatur. Trelast får vanligvis et fuktinnhold på 18-20% ved uttørking utendørs (Ramstad, 2015), se Figur 4.

Ved oppfuktning blir treets fuktinnhold lavere enn ved uttørking ved samme likevektsfuktighet.



Figur 4 Fuktinnhold i trevirke. Illustrasjon: (Ramstad, 2015).

2.5. Sopp

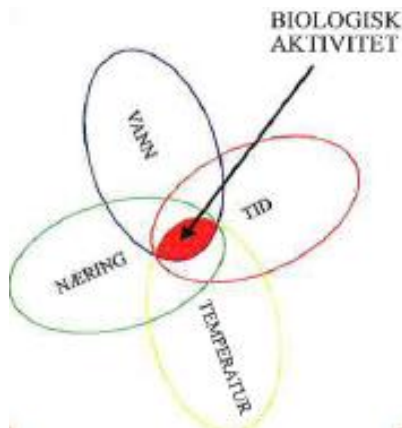
TEK (§ 13-14 Fukt, 1997) stiller følgende krav til beskyttelse mot vekst av sopp:

“ *Grunnvann, overflatevann, nedbør, bruksvann og luftfuktighet skal ikke trenge inn og gi fuktskader, mugg- og soppdannelse eller andre hygieniske problemer*” (Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 2010).

Grunnen til det er at mugg- og råtesopp er biologiske skadegjørere, som kan forårsake dårlig inneklimate eller nedbrytning av bygningsmaterialer.

Det finnes en rekke fysiske faktorer som må være til stede for at sopp skal kunne utvikle seg. Figur 5 illustrerer at gunstig fuktighet og temperatur, samt næring skal være tilgjengelige for

en tilstrekkelig lang tid for at sopp skal kunne utvikle seg. Sammensetning av disse faktorer avgjør hvilke sopparter som etableres i konstruksjonen, fordi ulike sopparter behøver ulike forhold for optimal trivsel.



Figur 5 Fire viktige faktorer som påvirker soppskadedannelse. Illustrasjon: (Mattsson, 2010).

2.5.1. Muggsopp

Det finnes alltid noen muggsoppssporene til stede innendørs, og de kan utvikle seg i gunstig miljø, for eksempel i fuktige omgivelser eller bygningsmaterialer (Nunez, 2014).

Muggsopp kan føre til kosmetiske skader, for eksempel misfarging av materialoverflater, se Figur 6. Disse skadegjørerne kan også forårsake allergiske reaksjoner og lungesykdommer hos personer som oppholder seg i muggsoppinfisert bygning.



Figur 6 Vekst av muggsopp på gipsplate. Bilde: Mycoteam.

Muggsopp forårsaker ikke styrketap, fordi de bruker kun fritt sukker som næring og ikke bryter ned celleveggen i treverket.

Muggsopp behøver organisk næringsmedium som kalles substrat på organisk substrat, og treverk og tapet er spesielt attraktive for mugg (Nunez, Sivertsen, & Mattsson, 2012). Andre produkter, som ikke inneholder organiske materialer, for eksempel mineralull, lim, er dårlig egnet til muggsoppvekst (Hyvärinen, Meklin, Vepsäläinen, & Nevalainen, 2002). Skaderisiko øker hvis overflate er skitten eller støvete, fordi forurensninger er en næringskilde.

Kritisk RF-grense for muggsoppvekst er temperaturavhengig. Relativ fuktighet 75% kan likevel benyttes som nedre grense for en rask estimering av muggsoppforekomst (Pasanen, Juutinen, Jantunen, & Kalliokoski, 1992). Nedre grense for kritisk RF varierer også for ulike bygningsmaterialer, hvor organiske materialer krever lavere fuktighet enn ikke-organiske materialer.

De fleste muggsopparter trives ved temperatur fra -2 til + 30 ° C. Dette er ganske bredt temperaturområdet som dekker både vanlige innetemperaturer i bygninger og lavere temperaturer i kalde konstruksjonssjikt.

Muggsopp er primære skadegjørere, fordi de forekommer relativt fort etter oppfukning. Utviklingen av mugg foregår saktere ved varierende fuktighet og temperatur. Viitanen (Viitanen, 1997) skriver, at skadedannelse kan ta fra noen uker opptil noen måneder ved RF over 80% og temperaturer mellom 5 og 50 ° C. Ved 0-5 ° C skal utviklingen foregå saktere og kun ved RF over 90%. Ved RF over 95% og temperatur 25-40 ° C tar det kun noen dager, mens ved temperatur 10-20 ° C tar det 4-8 uker.

2.5.2. Råtesopp

Råtesopp er vednedbrytende sopper som er spesielt farlige, fordi de kan forårsake konstruksjonssvekkelser. Råtesoppeskader er en hovedårsak til nedbrytning av trematerialer i Norge (Mattsson, 2010), og de kan være meget omfattende og krevende å utbedre, se Figur 7.



Figur 7 Råtesoppskade i gulvbjelke forårsaket av ekte hussopp. Bilde: Mycoteam.

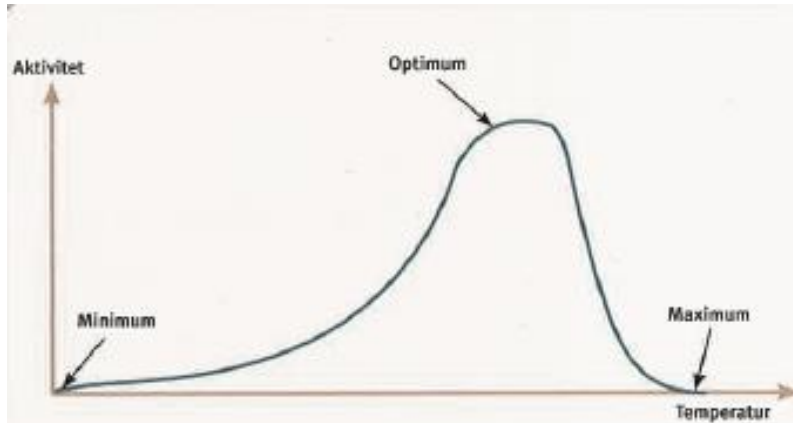
Råtesopp behøver organisk næring, og cellulose og lignin er viktige næringsstoffer. Hyfene vokser inne i vedcellene og skiller ut enzymer, og dette bryter ned cellulose og celleveggene. Som resultat får soppene energi, samt CO₂ og vann frigjøres. Vannet bidrar til akselerering og videreutvikling av skader hvis det ikke fordamper, derfor kan videreutvikling av råtesoppskader skje ved lavere fuktighet (Mattsson, 2010).

Ekte hussopp har evne til å spre seg ved hjelp av strenger, som kan bli noen meter lange og kan frakte vann og næring til næringsfattige områder. Derfor kan ekte hussopp vokse over uorganiske materialer.

Ekte hussopp kan overleve uttørkingsperioder opp til noen år og fortsette veksten ved fukttilførsel. For mye vann kan også stanse veksten, fordi høyere fuktinnhold fører til lavere oksygeninnhold. Den generelle grensen for mest gunstige forhold er mellom 40 og 70% RF. Den øvre grensen for de fleste arter er 90% RF (Alfredsen, Gobakken, Flæte, & Brischke, 2014).

Et vanlig temperaturområde for optimalt trivsel er ved 20-25°C, hvor 0-5 °C er nedre grense, og 35-40°C er en øvre grense, og overskridelse er dødelig for sopp. Selv om råtesopp ikke dør ved nedfrysning, blir aktiviteten redusert.

Vekstkurven på Figur 8 viser sammenheng mellom temperatur og vekst.



Figur 8 Aktivitet til råtesopp er temperaturavhengig. Illustrasjon: (Mattsson, 2010).

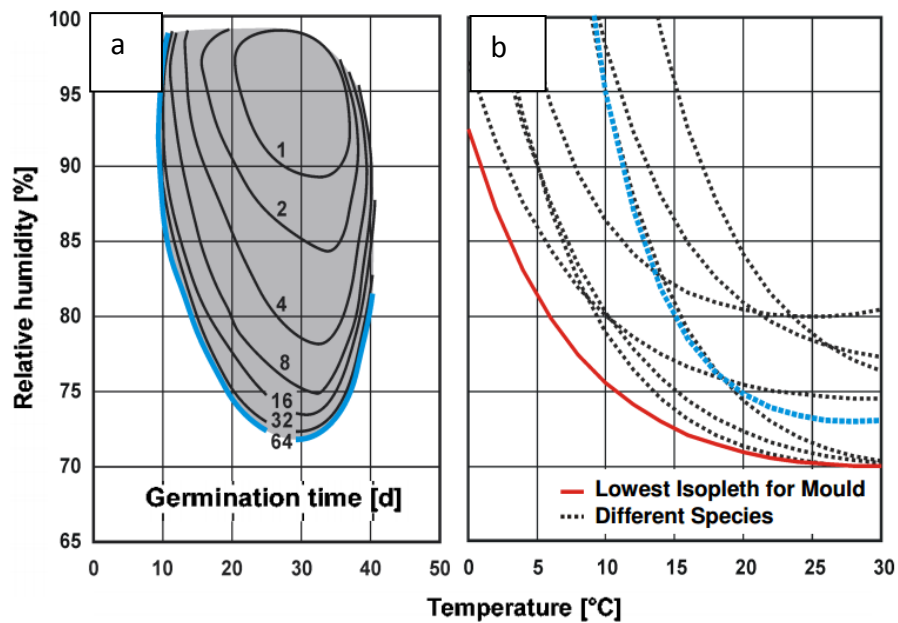
Utviklingstiden til sopp avhenger av vekstmiljø og kan variere fra 2 til 200 år, hvor ugunstige forhold forårsaker saktere utvikling, og gunstige forhold akselererer utviklingen (Mattsson, 2010). Ekte hussopp kan også leve i dvaletilstand i flere år, derfor er det ofte risiko for oppblomstring av råtesoppkader i gamle bygninger.

2.5.3. Lowest Isopleth for Mould (LIM)

Isolinje er en linje som er trukket gjennom punkter med samme verdi. LIM står for «Lowest Isopleth for Mould» og markerer nedre grense for muggsoppforekomst.

Utvikling av LIM er basert på dyrking av sopp under laboratorieforhold og analyse av soppens germinering. Den resulterende isolinjen er den aller laveste grensen for soppaktivitet

med hensyn på alle sopparter, som finnes innendørs, se Figur 9.



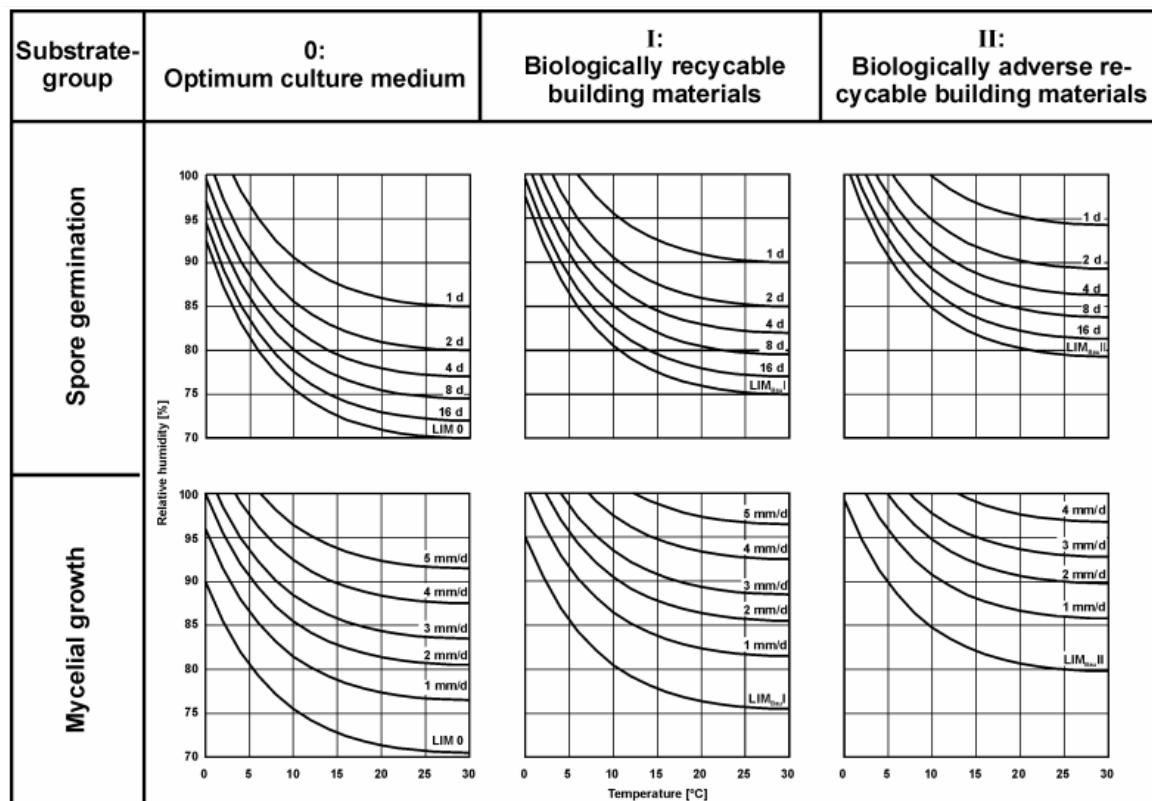
Figur 9 a-b. Germinering til *Aspergillus restrictus* (a), som benyttes til utvikling av LIM (b).

Illustrasjon: (Sedlbauer, Krus, & Breuer, 2003).

Substrat har påvirkning på soppenes aktivitet, derfor utarbeides det følgende LIM for substrattyper som egner seg til soppvekst (Sedlbauer, Krus, & Breuer, 2003) :

1. LIM 0: optimalt substrat
2. LIM I: bionedbrytbare materialer, for eksempel tapet, papp, noen isolasjonsmaterialer.
3. LIM II: ikke-bionedbrytbare materialer, for eksempel mineralull.

Figur 10 gir en oversikt over noen LIM for ulike substrattyper.



Figur 10 LIM-diagrammer for tre substrattyper som viser hvordan substrat påvirker soppens aktivitet. Illustrasjon: (Sedlbauer, 2001).

2.5.4. Sammenheng mellom klima og soppforekomst

Det finnes en sammenheng mellom soppskaderisiko og makroklima, hvor varmt og fuktig klima bidrar til en økt skaderisiko, mens kjølig og tørt klima skaper ugunstige forhold for biologiske skadegjørere (Mattsson, 2010).

Imidlertid kan mikroklima i konstruksjonen også påvirke soppforekomst for inhomogene materialer, og dette skyldes enkelte områder med gunstige forhold lokalt i konstruksjoner (Mattsson, Flyen, Grønli, & Whist, 2014). Konstruksjonens oppbygging, materialets dampdiffusjonsmotstand og inneklimate er noen faktorer som har innvirkning på konstruksjonens mikroklima. For eksempel har feltundersøkelser fra fuktbelastede bygninger på Svalbard vist at det forekommer muggsopp til tross for kjølig og tørt makroklima.

2.6. Rehabilitering

Rehabilitering av eldre bygg er en forsvarlig måte å utnytte eksisterende bygningsmasse på. Den bidrar til økt brukerkomfort og energieffektivisering.

2.6.1 Byggteknisk forskrift (TEK)

TEK er en forskrift om tekniske krav. Den setter minstekrav til egenskaper som en bygning må ha for å oppføres i Norge.

TEK §14-5 (Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 2010) stiller blant annet krav til det maksimale varmetapet til bygningsdeler. Dette gjelder tak, gulv, vinduer og yttervegger.

Økende miljøambisjoner og tilgjengelighet av nyere isolasjonsmaterialer har ført til at kravene ble strengere hver gang TEK ble revidert. I Tabell 1 som tar utgangspunkt i Byggetekniske forskrifter 1949-2010 finner man oversikt over minste gjennomsnittlige krav til U-verdi til noen bygningsdeler. Variasjon i noen krav tar utgangspunkt i forskjellig innetemperatur eller makroklima.

Tabell 1 Oversikt over endringer i minste krav til noen bygningsdeler over tid.

Bygningsdel	Byggeforskrift 1949	Byggeforskrift 1997-2003	TEK 2007- 2010
Yttervegg	0,6 - 1,1	0,22 – 0,6	0,22
Tak	0,6-1,0	0,15 - 0,6	0,18

2.6.2. TEK og rehabilitering

Plan- og bygningsloven (Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 2009) § 31-2 tilsier følgende:

«Tiltak på eksisterende byggverk skal prosjekteres og utføres i samsvar med bestemmelser gitt i eller i medhold av loven.»

Inngrep må dermed tilfredsstillende nye krav, som er fastsatt av gjeldende TEK. Til tross for dette kan man søke om å få dispensasjon i enkelte tilfeller. Dette er aktuelt når

«... det ikke er mulig å tilpasse byggverket til tekniske krav uten uforholdsmessige kostnader, dersom bruksendringen eller ombyggingen er forsvarlig og nødvendig for å sikre hensiktsmessig bruk». (Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 2009).

Dette gjelder for eksempel rehabilitering av vernet bygg. Mindre tiltak som utskifting av gulv eller vinduer vil normalt også være unntatt. Dette fører til at det ofte er hensyn til beboernes komfort og ønske om å spare energi som er de viktigste drivere for hvordan tiltak utføres.

Mattsson skriver (Mattsson, 2010), at rehabiliteringstiltak kan forårsake endringer i konstruksjonens bygningsfysikk og fører til at temperatur og fuktinnhold i konstruksjonen vil forandre seg.

I gamle bygninger finnes det ofte skader som har oppstått på grunn av en langvarig fuktpåvirkning. Disse skadene kan være vanskelige å oppdage, for eksempel soppskader som er skjult i konstruksjonen eller sopp i dvaletilstand. Inngrep kan danne optimale forhold for skadeutvikling og føre til videreutvikling eller dannelse av nye skader.

Det er ikke bare omfattende tiltak som har noe effekt på bygningsfysikk. Bruk av nye materialer, etterisolering og bruksendring av et bygg eller rom er eksempler på tiltak som kan danne grunnlag for fukt- og soppskadeforekomst.

En feil utførelse av rehabilitering kan også føre til skader. I blad 725.403 *Etterisolering av treetak* (Uvsløkk, 2005) finner vi for eksempel at

«Der det er praktisk mulig og fuktteknisk forsvarlig, bør man montere så mye isolasjon at forskriftskravet til U-verdi for tak blir tilfredsstillt».

Dette gjør at man må vurdere på egen hånd om utførelse av tiltaket blir byggeteknisk forsvarlig for den aktuelle konstruksjonen, og dette kan være utfordrende.

2.7. Kaldt loft og bindingsverk av tre fra 1940-1955: oppbygging og etterisolering.

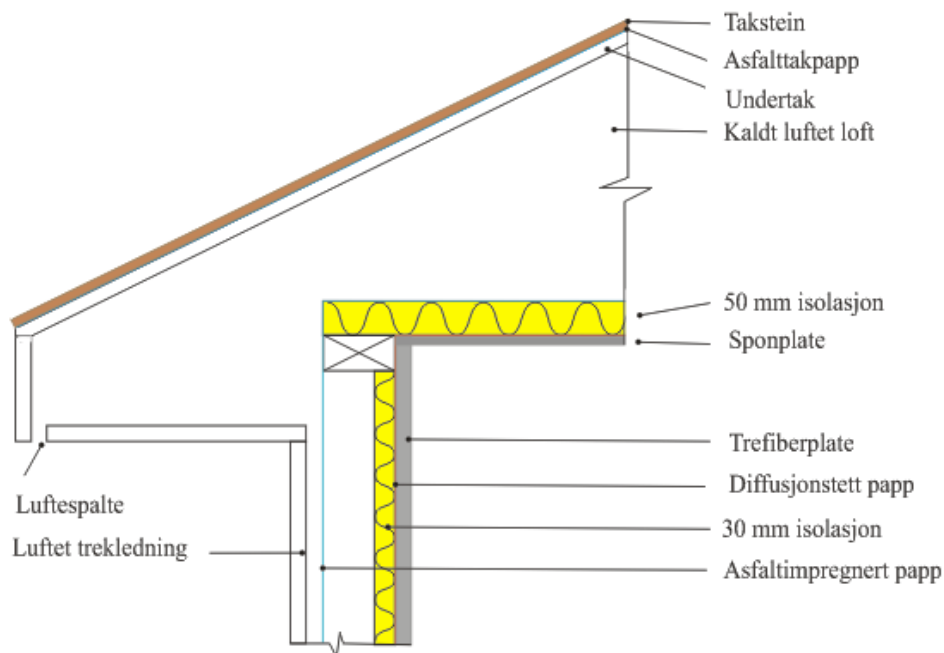
Dette avsnittet gir en oversikt over kjennetegn til to bygningskomponenter som skal betraktes videre: et kaldt luftet loft og et bindingsverk av tre fra perioden 1940-1950.

På 1950-tallet kom det en rekke nye bygningsmaterialer, som ble tatt i bruk ved utbygging. Impregnert papp ble brukt både til takteking og til å øke konstruksjonens dampetthet. Man pleide å benytte uimpregnert papp bak inn- og utvendig panel til vindbeskyttelse av konstruksjonen. Norsk produksjon av glassvatt startet i 1935, og den ble tatt i bruk i form av sydde mineralullmatter (Drange, Aanensen, & Brønne, 2000).

2.7.1. Kaldt luftet loft og bindingsverk av tre

Kaldt luftet loft har tradisjonelt vært mye i bruk i Norge. Eneboliger i 1940-1955 pleide å ha et skråtak med helning 25-45° (Drange, Aanensen, & Brønne, 2000). Et eksempel på en karakteristisk oppbygging av et skråtak med kaldt luftet loft kan man se på Figur 11. Prinsippskissen tar utgangspunkt i følgende litteraturkilder: (Drange, Aanensen, & Brønne, 2000), (Edwardsen, 2017), (Hveem, 2017), (Uvsløkk, 2005).

Lufting foregår via åpninger ved raft og muligens åpninger i møne. Lufting på loft er nødvendig for å transportere bort fukt og varme. Dette hindrer fuktskader og reduserer faren for snøsmelting ved takfoten og i takrenner. En god luftgjennomstrømning er spesielt viktig når undertaket er damp tett, fordi den øker konstruksjonens uttørkingsevne.



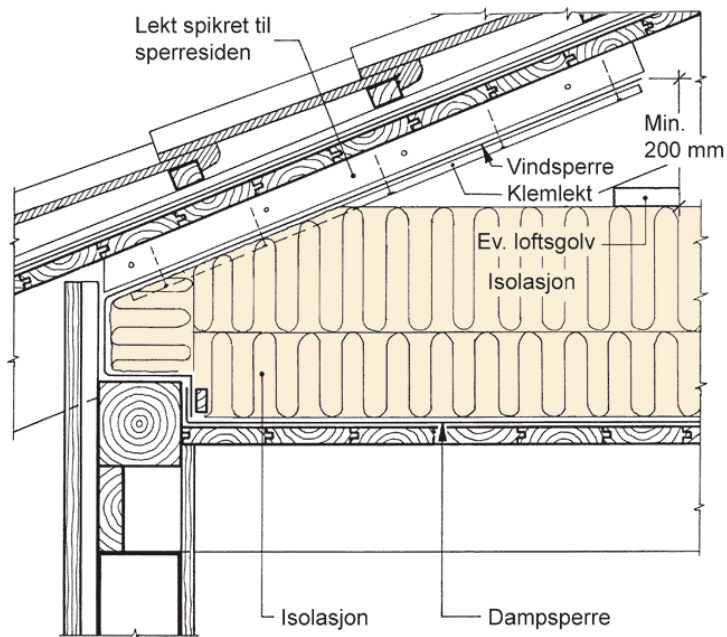
Figur 11 En prinsippskisse av et skråtak med kaldt luftet loft og bindingsverk av tre.

Ved etterisolering pleier man å legge isolasjon oppå eksisterende isolasjonssikt. Det anbefales å legge en ny og tett dampsperre under isolasjonen.

SINTEF Byggforsk (Uvsløkk, 2005) anbefaler også å beholde lufting ved etterisolering og sikre en godt dampdiffusjonsmotstand til undertaket. Det er typisk å etterisolere på utsiden av bærekonstruksjonen, fordi dette hjelper å unngå fuktskader og kuldebroer. Det er vanligvis behov for 200-300 mm isolasjon totalt for å tilfredsstille dagens krav til bygningskomponenter (Uvsløkk, 2005), se Tabell 1.

Ved etterisolering endres det temperaturforhold på loft. Alle sjikt som befinner seg på kald side av isolasjonen blir kaldere etter tiltaket, og dette fører til fare for kondens på undertaket. Tidligere forskning (Geving & Holme, 2010) har vist, at RF på loft er høyest når man bruker mye isolasjon. Intensiv lufting kan også redusere fare for kondens, selv om det ble observert en økning i RF i luftspalten ved økning av luftomsetninger (Hansen, 2016). God ventilasjon, lav relativ fuktighet i oppvarmede deler av bolig, samt himlingens lufttetthet og lufting på loft

er avgjørende for en god og skadefri konstruksjon. Ved manglende lufting er det avgjørende at undertaket er dampåpent, mens bjelkelaget er lekkasjetett (Uvsløkk, 2005).

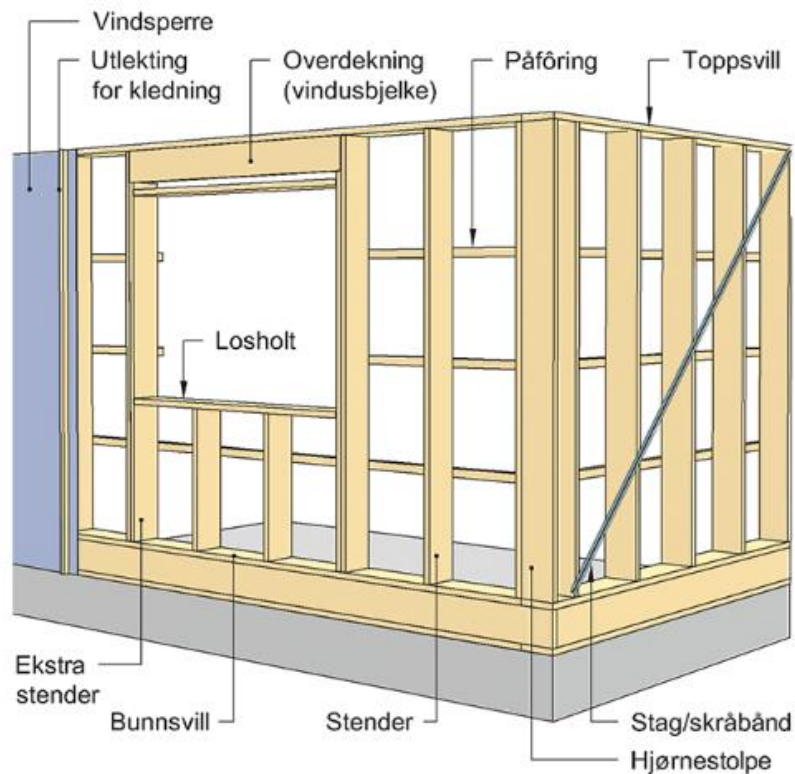


Figur 12 Etterisolering av skråtak med kaldt loftet loft. Illustrasjon: (Uvsløkk, 2005).

2.7.2. Bindingsverk av tre

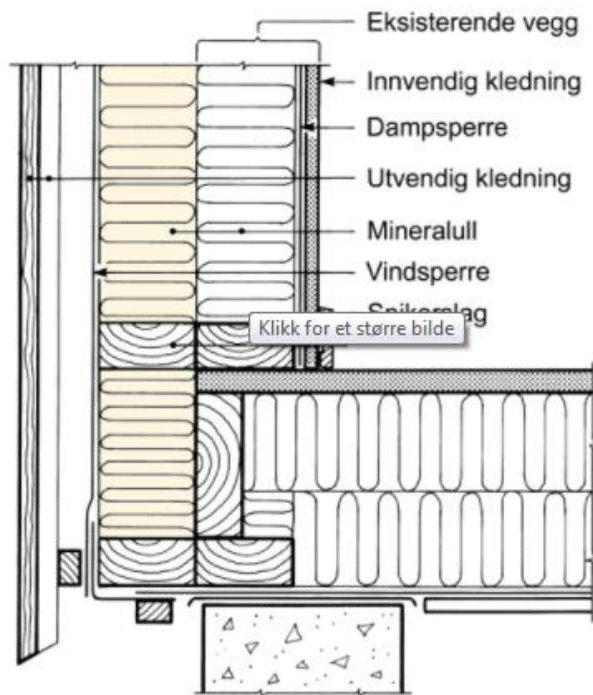
Bindingsverk av tre er en konstruksjon som består av bærende stolper og sviller. Den ble dominerende etter at moderne isolasjonsmaterialer ble tatt i bruk. Konstruksjonens oppbygging er illustrert på Figur 13.

Man pleide å benytte en luftet kledning med en drenert åpning. Den fungerer som en «buffer» for variasjon i fuktforhold (Drange, Aanensen, & Brønne, 2000). Oppbygging som var karakteristisk for 1940-1950 er illustrert på Figur 11. Her er det benyttet 3 cm mineralull som er plassert i hulrom. Ved utvendig etterisolering bør man fjerne gammel kledning og vindsperre før man legger inn isolasjon. Etterpå skal vindsperre og en ny luftet utvendig kledning monteres. Prinsippet er illustrert på Figur 14. Det trengs ca. 150 mm ekstra isolasjon for å tilfredsstillte TEK-10 kravet for konstruksjonen på Figur 11 (Edvardsen, 2004).



Figur 13 Komponenter i bindingsverksvegg. Illustrasjon: (Ramstad, 2014).

Ved etterisolering kan det dannes kondens på varm side av vindsperre på grunn av en økt isolasjonstykkelse. Dette skjer fordi byggfukt tørker saktere ut og ytre deler av konstruksjonen blir kaldere. Dette fører til at risiko for fukt- og soppskader kan øke. Likevel har forskning vist at skaderisiko er meget lav hvis konstruksjonen har en god uttørkingsevne (Geving & Holme, 2010). For eksempel bør man unngå en damptett vindsperre.



Figur 14 Utvendig etterisolering av bindingsverk av tre. Illustrasjon: (Edwardsen, 2004).

2.8. WUFI 2D

Simuleringer er utført i WUFI 2D. WUFI 2D er et state of the art dataverktøy som utfører todimensjonale beregninger over tid for kombinert varme- og fukttransport gjennom ulike konstruksjonssjikt. 2D analyser tillater simulering av konstruksjoner med komplisert geometri, for eksempel hjørner. Programvare er utviklet av Fraunhofer Institutt for Bygningsfysikk i Tyskland.

Simuleringer tar hensyn til hydrotermiske forhold i bygningskomponenter under reelle klimapåkjenninger. Programvare tillater å kombinere valgfrie materialer, overganger og geometri for å kunne tilpasse modellen til virkelighet så nøyaktig som mulig (Fraunhofer IBP, oppdatert 12.04.2017).

WUFI er basert på differensialligninger som viser sammenheng mellom lagringskapasitet og transportkomponenter for varme- og fukttransport (Künzel, 1995).

Varmetransport:

$$\frac{dH}{d\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla \vartheta) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi p_{\text{sat}})) \quad (2-7)$$

Fukttransport:

$$\frac{dW}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{\text{sat}})) \quad (2-8)$$

hvor

d = operator for total differensial

∂ = operator for partiell differensial

∇ = nabla-operator

$\frac{dH}{d\vartheta}$ = varmelagringskapasitet av et fuktig materiale [$J/m^3 K$]

$\frac{dW}{d\varphi}$ = fuktlagringskapasitet av et materiale [$J/m^3 K$]

λ = termisk konduktivitet av et fuktig materiale [W/mK]

D_φ = vanntilstandskoeffisient til et materiale [kg/ms]

Δ_p = vanddamppermeabilitet av et materiale [$kg/msPa$]

h_v = fordampningsvarme til vann [J/kg]

p_{sat} = metningstrykk til vanndamp [Pa]

ϑ = temperatur [$^{\circ}C$]

φ = relativ fuktighet [%]

Venstre ledd av begge ligningene består av henholdsvis varmelagringskapasitet og fuktlagringskapasitet til et materiale.

Høyre ledd består av varme- og fukttransportkomponenter. Varmetransportkomponenter tar hensyn til varmeledning og latent varme. Fukttransport dannes av vanntransport og dampdiffusjon.

2.8.1. Luft

Luft er betraktet som et porøst materiale i WUFI 2D, derfor har den samme egenskaper som andre materialer. WUFI simulerer ikke konveksjon, men den tar hensyn til varmekonduktivitet og vandampdiffusjon, samt væsketransport. Dette gjør at varme- og fukttransport gjennom luft avhenger av dimensjoner til luftsjikt i WUFI. Derfor er det spesielt viktig å ikke kombinere flere smalere luftsjikt til et luftsikt (Fraunhofer IBP, 2013).

WUFI tar hensyn til materialets emissivitet og skiller mellom metall og ikke-metall, derfor finner man materialdata både for R_{met} og $R_{non-met}$. Det brukes en følgende formel til å regne $R_{non-met}$:

$$R_{non-met} = \frac{\Delta x^*}{\lambda^*} \quad (2-9)$$

hvor

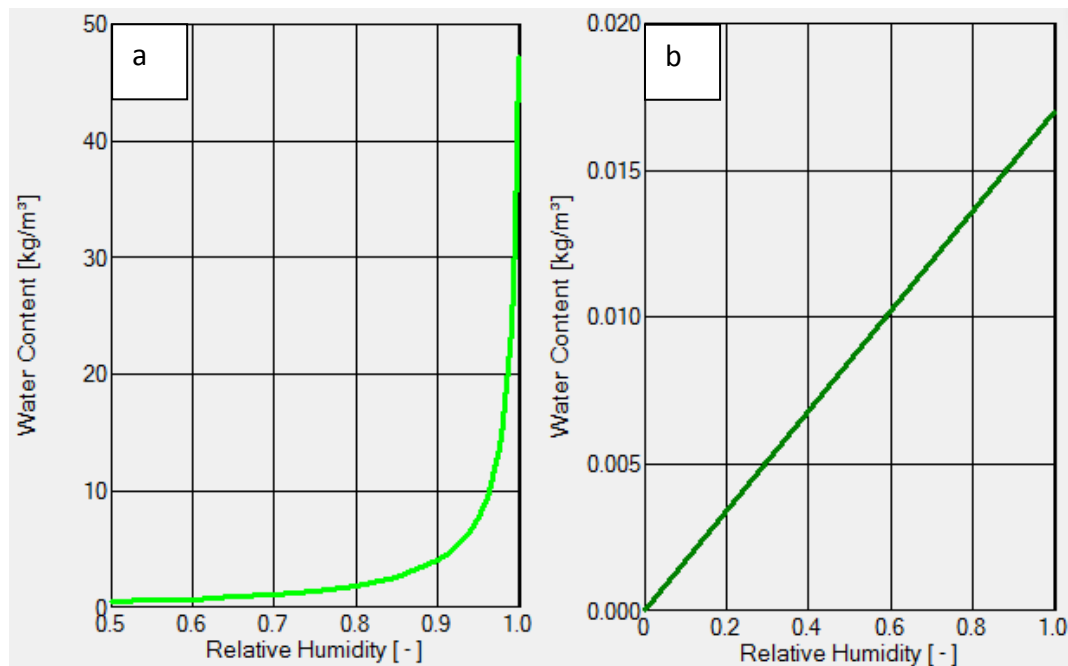
$R_{non-met}$ – varmemotstand [m^2K/W]

Δx^* – effektiv materialtykkelse [m]

λ^* - effektiv varmekonduktivitet [$W/(mK)$]

Luftsjikt bør ikke overskride 300 mm (Fraunhofer IBP, 2013), og WUFI inneholder luftmaterialer opp til 150 mm. Oversikt over noen av dem kan man se i Vedlegg.

WUFI skiller mellom luft med og uten fuktighetskapasitet. (Fraunhofer IBP, 2013) anbefaler å bruke førstnevnte for å få realistiske mengder fukt, som kan brukes til evaluering av konstruksjon. Sistnevnte luftsjikt gir urealistiske høye verdier for fuktopptak. Simulering stopper hvis RF i luft når RF 98%.



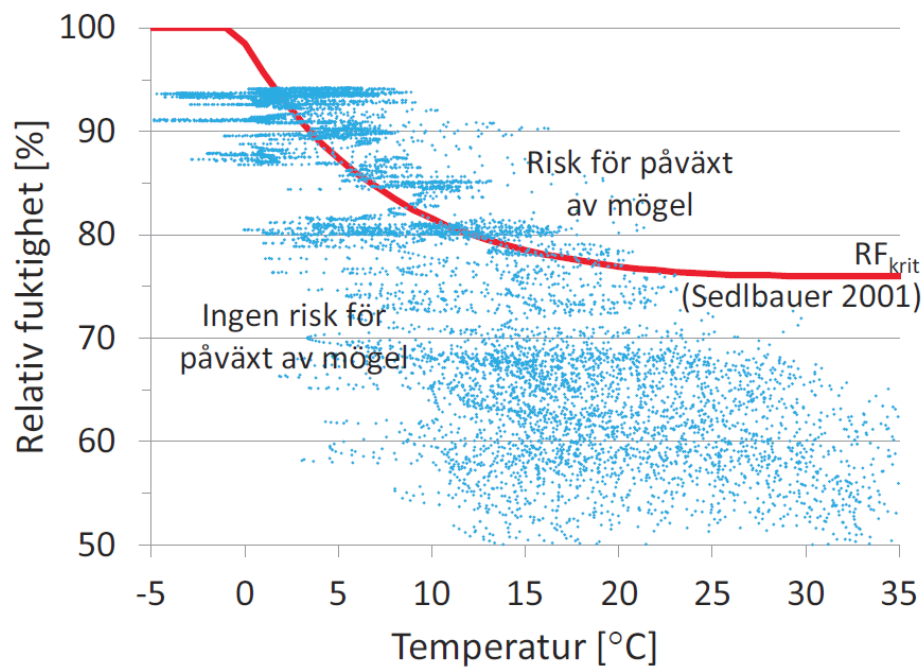
Figur 15 a-b. a: Fuktopptak i luft uten ekstra fuktkapasitet; b: fuktopptak i luft med ekstra fuktkapasitet. Illustrasjon: WUFI.

Det finnes ikke noe forskriftsmessig måte å simulere lufting i en konstruksjon på (Fraunhofer IBP, 2013). En mulig løsning er å velge lufting i form av luftkilder, og oppgi antall luftskifter per time.

2.8.2. Fremstilling av resultater

Vekstforhold for mugg kan bli presentert i form av isolinjer i WUFI-2D, som ble presentert i avsnitt 2.5. *Sopp*. Programvaren benytter resultater for temperatur og RF til å plote soppens vekstrate time for time i form av fargede punkter. Fargene illustrerer tidspunkt til hver enkelt time, hvor starttidspunktet kjennetegnes av en gul farge, som kjennetegner simuleringens start, og blir mørkere mot sluttet av simulering. WUFI benytter LIM, som er betraktet i avsnitt 2.5.

Folosdiagram er en annen måte å visualisere skaderisiko på. Diagrammet er utarbeidet av S.Olaf Mundt-Petersen (Mundt-Petersen, Wallentén, Toratti, & Heikkinen, 2012). Bruker kan benytte RF og temperatur fra WUFI til å illustrere disse parametere. Diagrammet tar utgangspunkt i nedre grense for soppskaderisiko, som tilsvarer LIM I for biologisk nedbrytbare materialer, se Figur 16.



Figur 16 LIM I (rød linje) som Folosdiagram benytter til vurdering av soppkaderisiko. Illustrasjon: (Sedlbauer, 2001).

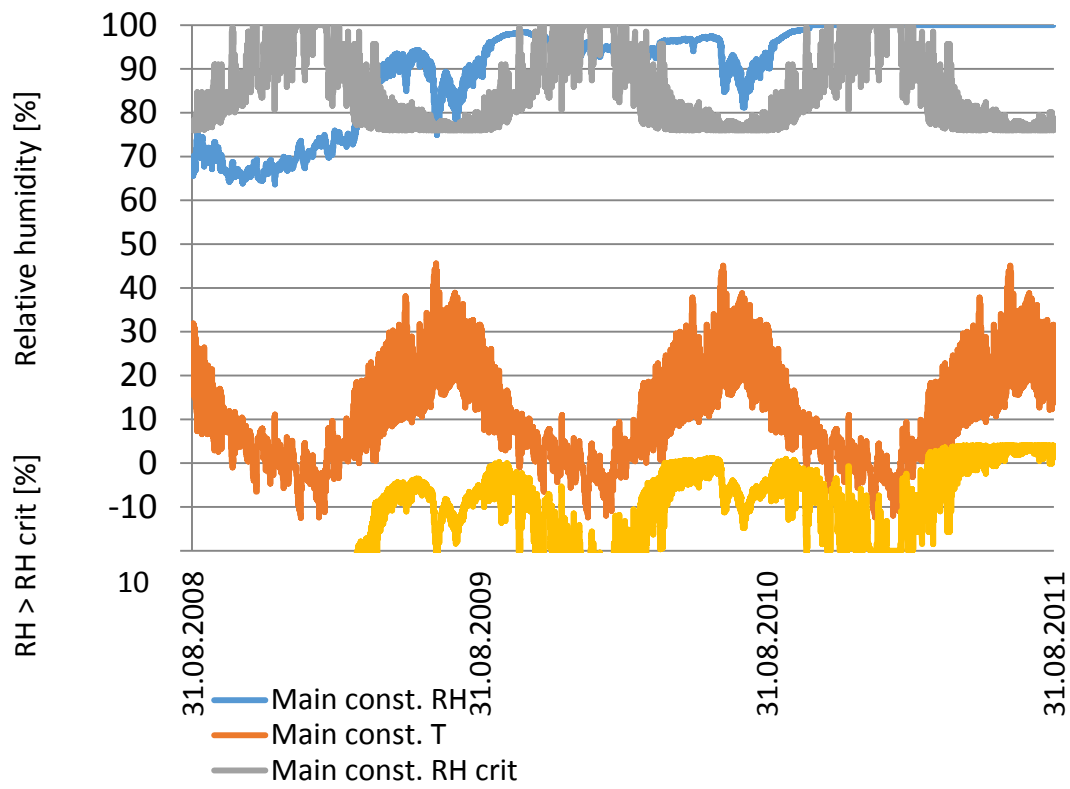
Eksempel på et Folosdiagram er illustrert på Figur 17. Det er tegnet opp RF (blå linje) og temperatur (oransje linje) time for time. Diagrammet tar utgangspunkt i temperaturer og plotter verdier for kritisk RF, som er temperaturavhengig (grå linje). En gul linje illustrerer hvor mange prosent målt eller simulert RF ligger over kritisk RF, dvs. $RF > RF_{krit}$ [%]:

$$RF > RF_{krit} = (100 - RF_{krit}) (2-10)$$

hvor

RF_{krit} – relativ fuktighet ved en gitt temperatur

RF – relativ fuktighet ved et gitt tidspunkt



Figur 17 Eksempel på Folosdiagram.

3. Metode

I denne oppgaven ble det benyttet en blandet metode som omfatter både kvantitative og kvalitative forskningsmetoder (Thiel, 2014).

3.1. Datainnsamling

Datainnsamling foregikk i samarbeid med et rådgivningsfirma Mycoteam AS høsten 2016. Hensikten med den var å finne ut skadesaker, hvor skadene har oppstått på grunn av etterisolering.

Det ble benyttet en kvalitativ forskningsmetode som omfatter datainnsamling og analyse av materiale fra rapporter.

En elektronisk fulltekstdatabase til Mycoteam er hoveddatakilde. Dette er en SuperOffice database som består i hovedsak av inspeksjons- og analyserapporter.

Mycoteam er spesialisert innen fagfelt bygningsskader som er forårsaket av fukt, skadedyr, mugg- og råtesopp. Bedriften undersøker 1500-2000 bygningsskader årlig. Typiske oppdrag er knyttet til inneklimate relaterede problemstillinger og byggskader.

Inspeksjonsrapporter utarbeides i etterkant av oppdrag, og inneholder all informasjon som kan være relevant til saken. Dette omfatter problemstilling, objekt beskrivelse, skadeomfang, prøveresultater fra analyserapporter og anbefalte tiltak. Inspeksjonsrapporter inneholder resultater fra analyserapporter, derfor ble de brukt til datainnsamling.

I SuperOffice er hele teksten i dokumenter søkbar. Det ble benyttet fritekstsøking som er en praktisk måte å søke på. For å få med så mange relevante treff som mulig ble søket trunkert. Dette gir mulighet til å få med flere bøyningsformer av søkeordet.

Proessen ble delt inn i følgende trinn:

1. Det ble utført et søk på ordet *etterisolering*, som ble til *etteriso** med trunkering. Søket var utført for siste 10 år, det vil si fra 10.01.2007 til 10.01.2017, dette ga 3025 resultater.
2. Rapportfragmenter som inneholder søkeordet ble benyttet til å vurdere om rapportene var relevante for studiet. Dette resulterte i 385 inspeksjonsrapporter som ble lastet ned.
3. Rapporter fra trinn 2 ble lest, og skadeårsakene ble analysert. De fleste rapportene handlet om etterisolerte konstruksjoner, men i noen tilfeller var etterisolering nevnt i andre sammenhenger, for eksempel som et anbefalt tiltak. Det var også viktig å velge saker, hvor etterisolering resulterte i skader, og dette ga 44 rapporter. Disse skadesakene har dannet grunnlag for case-studier.

3.2. Case-studier

Et case-studie er et eksempelstudie, som betrakter et enkelt tilfelle og bruker dette til å belyse en hel klasse av lignende fenomener. Case-studiet kan brukes til å trekke analytiske konklusjoner som avdekker kausale forhold (Thiel, 2014).

Til case-studiet ble det benyttet 44 rapporter fra forrige trinn. Det var aktuelt å finne informasjon om følgende: type konstruksjon, byggeår, tidspunkt til etterisolering, type skader og skadeårsak.

Skadesakene ble gruppert etter type bygningskomponent og konstruksjon, dette ga tre grupper:

1. kaldt luftet loft i eneboliger
2. bindingsverk av tre i eneboliger
3. andre konstruksjoner

Det var valgt å ikke betrakte gruppe 3 til videre analyse, men heller ha fokus på trekonstruksjoner i eneboliger. Derfor har de to første gruppene dannet grunnlaget for varme- og fuktsimuleringer.

3.3. Varme- og fuktsimuleringer

Simuleringer benyttes til å studere, predikere og belyse ulike fenomener (Thiel, 2014). I denne oppgaven ble simuleringene utført til å studere prosesser og mekanismer som ligger bak skadedannelse i aktuelle konstruksjoner.

Varme- og fukttransport foregår i to dimensjoner på loft, det vil si både oppover fra oppvarmede deler av bolig og horisontalt på grunn av uteklimapåkjønning. Skadene i veggkonstruksjoner har oppstått kun på grunn av horisontal fukt- og varmetransport, det vil si i en dimensjon.

Det ble likevel benyttet WUFI 2D til begge grupper. Årsaken til dette er at gruppe 1 og 2 ikke kan sammenlignes dersom forenklingene knyttet til modellen er ulike; da det reelle sammenligningsgrunnlaget vil være ulikt. Dette og behovet for å fremstille resultater på samme måte og benytte samme forenklinger knyttet til modellen for begge konstruksjoner var grunnen til dette valget.

3.3.1. Simulering av konstruksjonen før etterisolering for 1950-2000.

Simuleringsoppsett ble utarbeidet med utgangspunkt i studiecaser, og teori som er omtalt i avsnitt 2.7. *Småhus av tre*. Det ble simulert en konstruksjonsoppbygging som er representativ for alle caser fra 1950-tallet for henholdsvis loft (Gruppe1) og vegg (Gruppe 2).

Først ble det simulert levetid til begge konstruksjoner før etterisolering i ulike klima. Det ble valgt både Oslo-klima som dannet grunnlag for base-case videre, og mer ekstreme klima.

Følgende makroklima ble betraktet:

1. Oslo: et temperert klima med årsmiddeltemperatur 5,69 og moderat nedbør og vindstyrke.
2. Bergen: et kystklima som er karakterisert av mye nedbør og slagregn.
3. Karasjok: kaldt klima med høy RF.

Oversikt over simuleringer for Gruppe 1 og Gruppe 2 finner man i henholdsvis Tabell 2 og Tabell 3. Formålet med dette er å studere konstruksjonens uttørking i ulike klima.

Tabell 2 Simuleringer av et kaldt luftet loft for periode 1950-2000.

Simuleringsnr.	Total isolasjonstykkelse, loft, mm	Dampsperre	Luftskifte, [1/h]	Klima	Fuktproduksjon
1.0.(O)	50	papp	0,9	Oslo	medium
1.0.(B)	50	papp	0,9	Bergen	medium
1.0.(K)	50	papp	0,9	Karasjok	medium

Tabell 3 Simuleringer av en vegg av bindingsverk for periode 1950-2000.

Simuleringsnr.	Total isolasjonstykkelse, vegg, mm	Dampsperre	Luftskifte [1/h]	Klima	Fuktproduksjon
2.0.(O)	30	papp	0,9	Oslo	medium
2.0.(B)	30	papp	0,9	Bergen	medium
2.0.(K)	30	papp	0,9	Karasjok	medium

3.3.2. Parameterstudie: simulering av de etterisolerte konstruksjonene for 2000-2003.

Parameterstudie tok utgangspunkt i hydrotermiske forhold som var tilstede i aktuelle bygningskomponenter (loft og vegg) etter uttørking av byggfukt. Formålet med parameterstudie var å vurdere alvorlighetsgraden til variasjon av ulike parametere som kunne påvirke skadedannelse i de etterisolerte bygningsdelene.

Det ble betraktet følgende parametere for begge grupper:

1. isolasjonstykkelse
2. luftskifte
3. uteklima
4. fuktproduksjon i oppvarmede deler av boliger

Valg av parametere tar utgangspunkt i skadeårsaker som er beskrevet i skadesaker. På loft ble også effekten av følgende studert:

5. diffusjonstetthet til undertak

Tidligere forskning som er omtalt i avsnitt 2.7 *Småhus av tre* har også vist at disse parametere påvirker soppskadedannelse for begge grupper.

Forsøk ble delt inn i ulike undergrupper ut ifra studieparametrene, se Tabell 4 og Tabell 5. I hver undergruppe ble det variert en parameter om gangen, mens de fem andre parametere holdes fast. Bokstav viser hva slags uteklima man benytter, hvor O betyr Oslo, B er Bergen og K er Karasjok.

Parameterne som holdes fast representerer en «best-case scenario» ifølge teori fra avsnitt 2.7 *Småhus av tre*. Formålet med det var å unngå en uheldig konstruksjon som er utsatt for skader uavhengig av en studieparameter. Simuleringer 1.1.a(O) og 2.1.a(O) følger alle faglige anvisninger og er «base-cases» for hver gruppe som ikke bør forårsake skader.

Tabell 4 Simuleringer av et etterisolert kaldt luftet loft for periode 2000-2003.

Studieparameter	Nr.	Den totale isolasjonstykkelsen på loft, mm	Dampsperre	Luftskifte [1/h]	Klima	Fuktproduksjon
1.Isolasjonstykkelse	1.1.a.(O)	200	papp	0,9	Oslo	medium
	1.1.b.(O)	300	papp	0,9	Oslo	medium
2.Luftskifte	1.2.a.(O)	200	papp	0,45	Oslo	medium
	1.2.b.(O)	200	papp	0,1	Oslo	medium
3.Klima	1.3.a.(B)	200	papp	0,9	Bergen	medium
	1.3.b.(K)	200	papp	0,9	Karasjok	medium
4.Fuktproduksjon	1.4.a.(O)	200	papp	0,9	Oslo	høy
5.Dampsperre	1.5.a.(O)	200	Utett PE-folie	0,9	Oslo	medium
	1.5.b.(O)	200	PE-folie mellom isolasjons-	0,9	Oslo	medium

			lag			
	1.5.c(O)	200	PE-folie	0,9	Oslo	medium

Tabell 5 Simuleringer av en etterisolert vegg for periode 2000-2003.

Studieparameter	Nr.	Den totale isolasjonstykkelser, vegg, mm	Dampsperrer	Luftshiftere [1/h]	Klima	Fuktproduksjon
1.Isolasjonstykkelser	2.1.a.(O)	180	papp	-	Oslo	medium
	2.1.b.(O)	300	papp	-	Oslo	medium
2.Luftskifte	2.2.a.(O)	180	papp	0,9	Oslo	medium
3.Klima	2.3.a.(B)	180	papp	0,9	Bergen	medium
	2.3.b.(K)	180	papp	0,9	Karasjok	medium
4.Fuktproduksjon	2.4.a.(O)	180	papp	0,9	Oslo	høy

3.4. Simuleringsoppsett

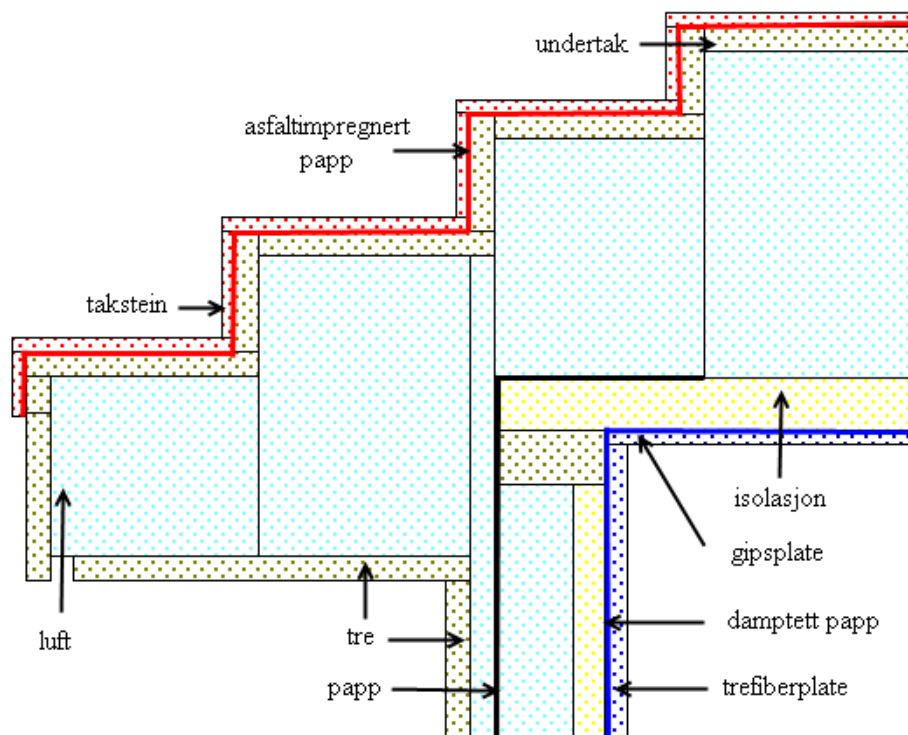
Selv om inspeksjonsrapporter inneholder konstruksjonsbeskrivelse og bilder, mangler de detaljtegninger. Derfor ble det benyttet de karakteristiske bygningskomponentene, som er omtalt i avsnitt 2.7.

3.4.1. Geometri

For Gruppe 1 loft ble det modellert et hjørne på et kaldt luftet loft. Modellen består av skråtak, luftet loftsrom, yttervegg og himling i henhold til *Figur 11* En prinsippskisse av et skråtak med kaldt luftet loft og bindingsverk av tre.

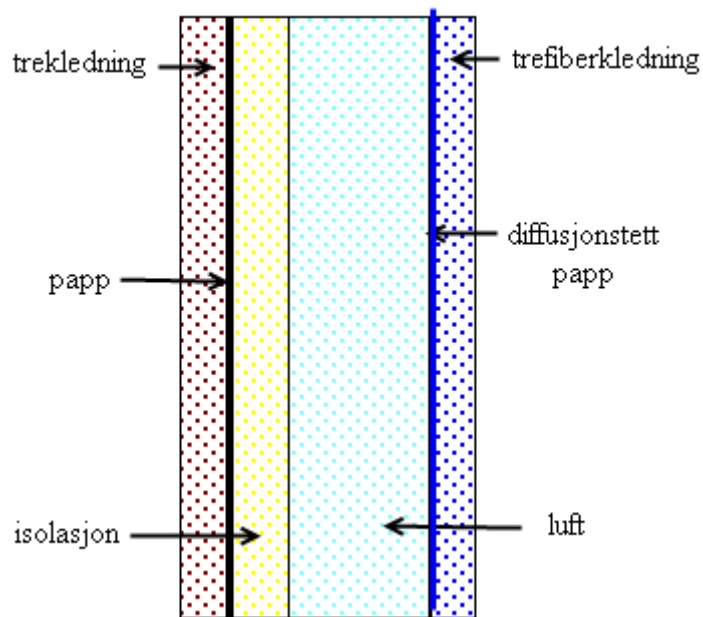
Man kan tegne kun rektangulære sjikt i WUFI 2D, derfor ble et skråtak forenklet ved hjelp av rektangler. Dette gir en mulighet til å simulere luftrom så realistisk som mulig med tanke på hydrotermisk transport som diskutert i 2.8. *WUFI 2D*, se *Figur 18*. Denne modellen er tilpasset til takvinkel 25° . Den er effektiv både med tanke på bearbeidingstid og tilnærming til virkelighet, fordi WUFI 2D ikke tar hensyn til konveksjon (Fraunhofer IBP, 2013).

Oversikt over mål og noen etterisolerte konstruksjoner finner man i *Vedlegg 8.A: Målsatte modeller*.



Figur 18 Modelloppbygging for gruppe 1 loft.

Til gruppe 2 ble det først benyttet samme veggkonstruksjon som inngår i modell til loft, se Figur 19. Under simuleringprosessen ble det oppdaget at plassering av isolasjon på varm side av hulrommet, som vist på Figur 18, var ugunstig. Dette har forårsaket noen feil i simuleringer, derfor ble det vurdert å flytte isolasjonen til kald side av hulrommet. Disse endringene ble ikke gjort i forhold til loft, fordi de har lite påvirkning på varmetransport på loft for disse simuleringene.



Figur 19 Modeloppbygging for Gruppe 2 vegg.

3.4.2. Rutenett

Man kan justere antall celler både i x- og y-retninger. Utfordringen er å lage et rutenett som er fint nok til å få med alle overganger mellom sjikt, men som ikke har for mange elementer, fordi dette øker beregningstiden. Det ble valgt antall elementer med utgangspunkt i anbefalinger fra (Fraunhofer IBP), og det ble kontrollert at elementinndeling i alle sjikt har skjedd jevnt, spesielt i overganger mellom sjikt. Oversikt over dette kan man finne i Tabell 6.

Ved simuleringer av veggkonstruksjonen ble det valgt så få elementer i y-retning som mulig, fordi de ikke påvirker fukt- og varmetransport i konstruksjonen i dette tilfellet.

Tabell 6 Elementinndeling for loft og vegg i ulike retninger.

Simuleringsgruppe	<i>Elementer i x- retning</i>	<i>Elementer i y-retning</i>
Gruppe 1 loft	208	210
Gruppe 2 vegg	150	18

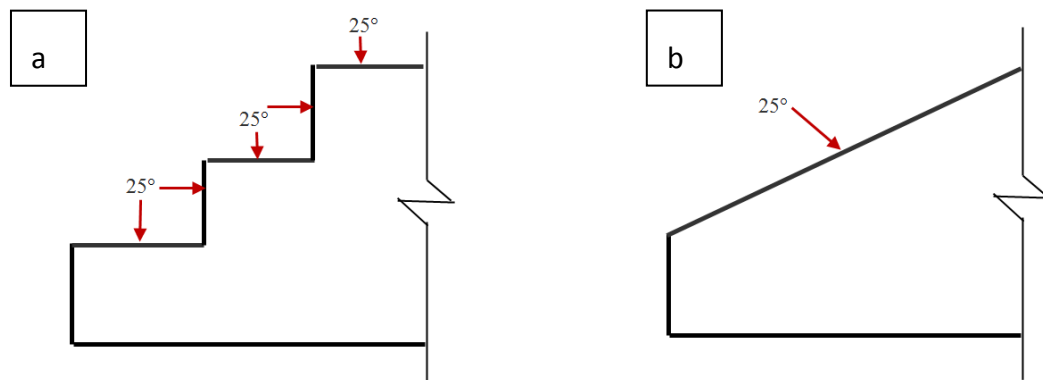
3.4.3. Materialer.

Valg av riktige materialegenskaper er avgjørende for et realistisk resultat.

Følgende materialegenskaper betraktes i WUFI: densitet, porøsitet, varmekapasitet, termisk konduktivitet og vandampdiffusjonsmotstandsfaktor. Ved materialvalg er det tatt utgangspunkt i avsnitt 2.7. Alle materialene er hentet fra materialdatabase til WUFI, og noen av dem ble tilpasset til tidsperioden. For sistnevnte ble det benyttet de eldste av utgatte og tilgjengelige anvisninger, som er notert i tabellen. Oversikt over materialer finner man i *Vedlegg 8.B. Materialer*.

3.4.4. Klima og overflater

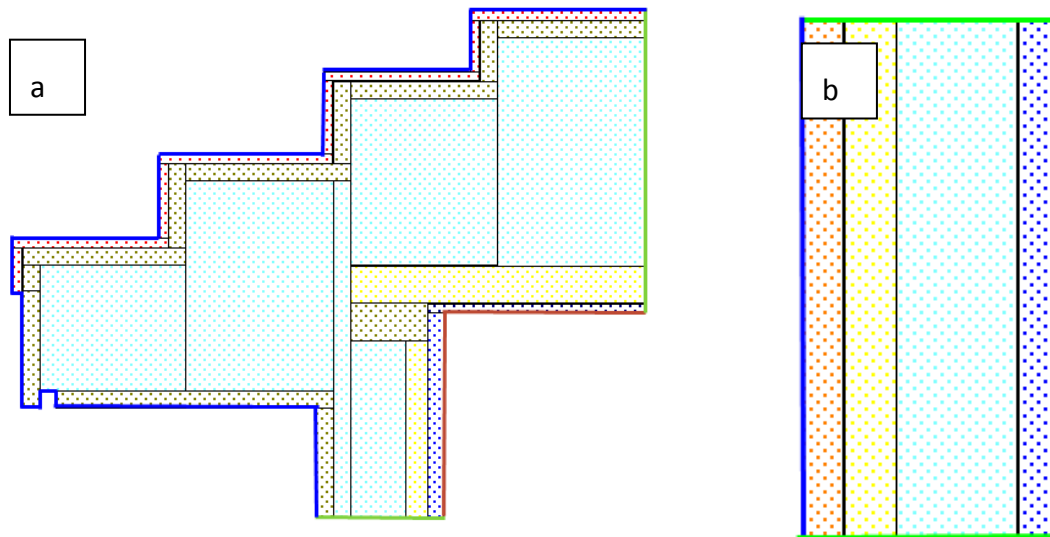
Det ble valgt følgende grenser: makroklima, inneklima og adiabatisk grense, se Figur 21. Det er valgt innebygde værdata for det aktuelle makroklimaet. Det ble også tatt hensyn til sjiktets helning. For eksempel ble det benyttet en vinkel 25° på alle takflater ved valg av makroklima for å simulere skråtak, se Figur 20. Oversikt over klimadata finnes i *Vedlegg 8.C.Klima*.



Figur 20 Figuren viser hvordan den forenklede modellen (a) tilnærmes til skråtak (b) ved valg av klima.

Det ble betraktet nordvendte konstruksjoner. Dette gir lavere temperaturer i konstruksjoner og reduserer konstruksjonens uttørkingsevne ifølge Uvsløkk (Uvsløkk, 2005).

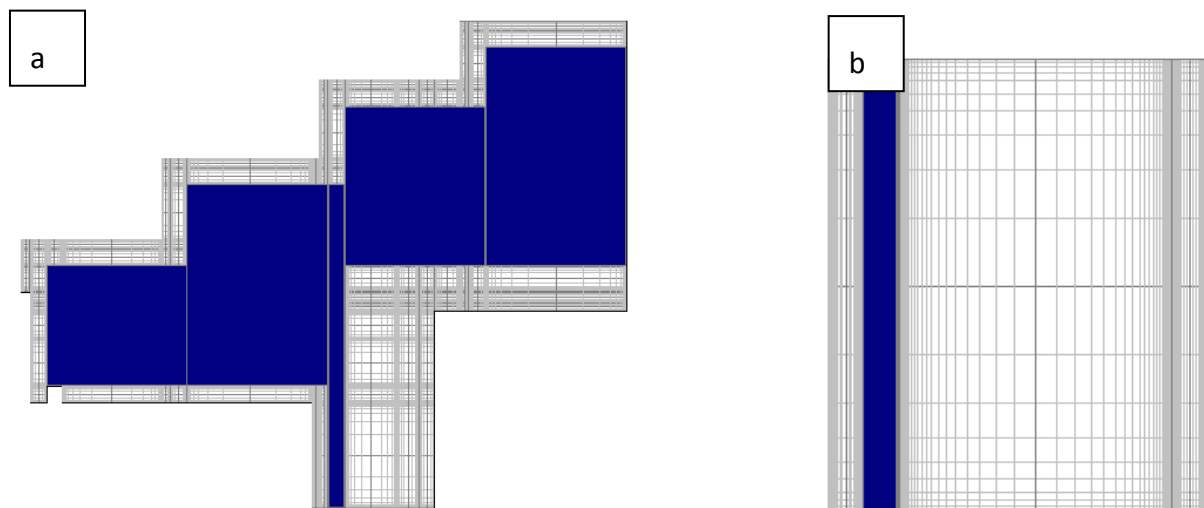
I oppvarmet del av bolig er det valgt inneklima med temperatur 20°C og amplitude på 2°C og enten medium eller høy fuktproduksjon, som tilsvarer simuleringsbetingelser.



Figur 21 a-b. Oversikt over klima for grupper 1(a) og 2 (b): uteklima (blå), adiabatisk (grønn) og inneklima (rød).

3.4.5 Lufting

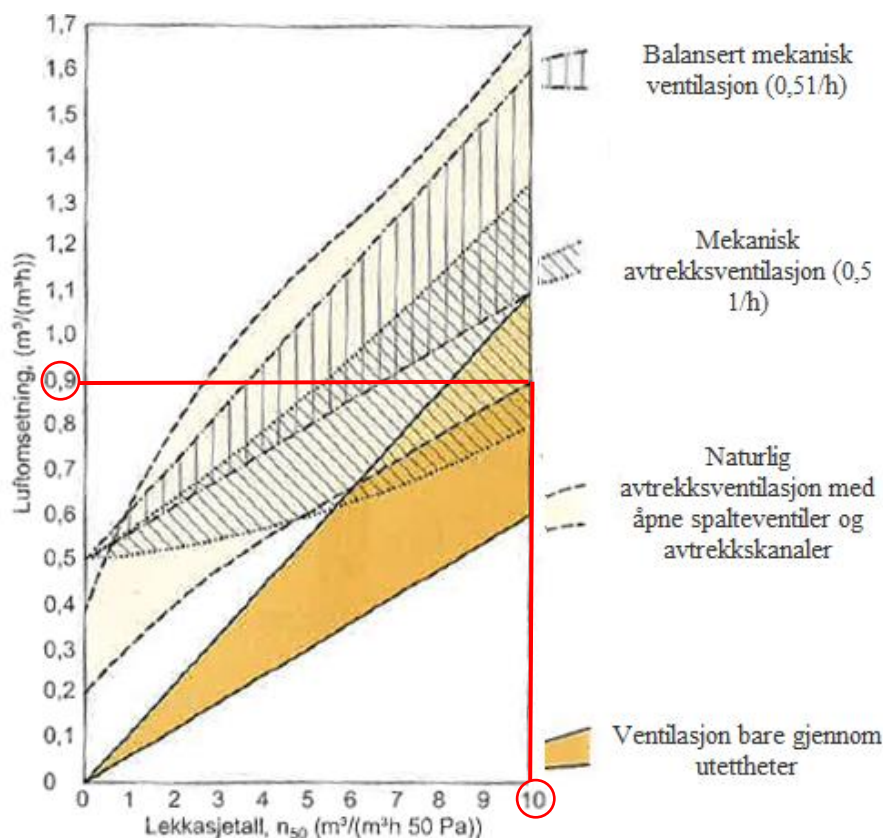
Lufting er lagt inn som luftkilder i alle aktuelle sjikt, se Figur 22. Alle luftkilder er koblet til makroklima. Figur 22 viser plassering av lufting på loft (a) og i den etterisolerte veggen med luftet panel (b).



Figur 22 a-b. Utforming av luftkilder på loft før etterisolering for grupper 1(a) og 2(b).

Skadesaker mangler informasjon om luftskifte på loft og bak trekledning, fordi det ikke ble foretatt noen tetthetsmålinger. Lufting på loft er også sterkt væravhengig og kan variere

betydelig med lokale vindhastigheter og -retninger i forhold til konstruksjonen. Til tross for det må det velges antall luftvekslinger som kan være representativ for alle skadesaker. Derfor ble det vurdert å ta utgangspunkt i gjennomsnittlig lekkasjetallet n_{50} lik 10 for småhus fra 1950 (Norconsult, 2013) ved naturlig ventilasjon. Selv om måling av lekkasjetallet ikke omfatter målinger på loft, tar det likevel hensyn til utettheter og ventilasjon gjennom åpne spalter. Dette gir også en mulighet til å betrakte en «worst-case scenario» eller en nedre grense for veiledende luftomsetning. Ved hjelp av Figur 23 finner man luftomsetning 0,9 1/h. I første omgang skal denne verdien betraktes som en anslagsverdi for å kontrollere modelloppbygging i forhold til studiecaser. Hvis simuleringresultatene kommer til å avvike fra rapportresultater, skal modellen justeres.



Figur 23 Beregnet luftomsetning ved lekkasjetall 10 1/h ved 50 Pa. Illustrasjon: (Edvardsen, Haug, & Ramstad, 2010).

Det ble benyttet samme luftomsetning bak utvendig kledning på grunn av begrensninger knyttet til loftkonstruksjon. Dette innebærer at det samme luftsjiktet befinner seg både på loft og bak utvendig panel, se Figur 22a.

Ved variasjon av luftomsetning skal den først reduseres med 50% (0,45 1/h), og deretter tettes med isolasjon. Sistnevnte tilsvarer 0,1 1/h for å ta hensyn til luftinfiltrasjon gjennom isolasjon.

3.4.6. Tidsforløp

Alle simuleringene startet den 01.09 for at bygningen skulle utsettes for fuktig høstvær.

Som nevnt tidligere, ble det simulert følgende:

1. konstruksjonenes levetid for 1950-2000
2. de etterisolerte konstruksjonene for 2000-2003

Derimot var det avgjørende å studere uttørking i konstruksjoner, derfor ble de simuleringene utført for 3 år. Det var som regel nok til at trevirke skulle oppnå likevektsfukt, ellers ble simuleringsperioden ytterligere utvidet til 4-5 år. WUFI 2D benyttet omtrent 2 døgn for simuleringer av Gruppe 1 og 20-60 minutter for simuleringer av Gruppe 2.

3.5. Metode for databehandling

Resultater av simuleringer ble benyttet til å finne hvilke parameterne som påvirker utvikling av biologiske skadegjørerne og hvor høy skaderisiko de forårsaker. Isopleths ble brukt til en kvalitativ analyse av soppforekomst og dannet grunnlag for en kvantitativ analyse. Kvantitativ skaderisiko beskriver sannsynlighet for at skadene skal oppstå ved en gitt temperatur og fuktighet.

Skaderisiko [%] for time i skal finnes ved hjelp av følgende formel:

$$Skaderisiko_i = \frac{RF_{over\ kritisk}}{100 - RF_{krit}} * 100\% (3 - 1)$$

hvor

$RF_{over\ kritisk}$ = antall % over kritisk RF [%]

RF_{krit} = nedre grense for kritisk RF for en gitt temperatur [%]

Folosdiagram ble brukt til å finne kritisk RF ved en gitt temperatur for time i . Når RF_{krit} er 100% kan skaderisiko vurderes visuelt ved hjelp av isopleths for relevante timer.

Videre finner man gjennomsnittlig faktor $Skaderisiko_{snitt}$ for hver måned ved hjelp av følgende ligning:

$$Skaderisiko_{snitt} = \frac{\sum_1^n Skaderisiko_i}{n} \quad (3 - 2)$$

hvor

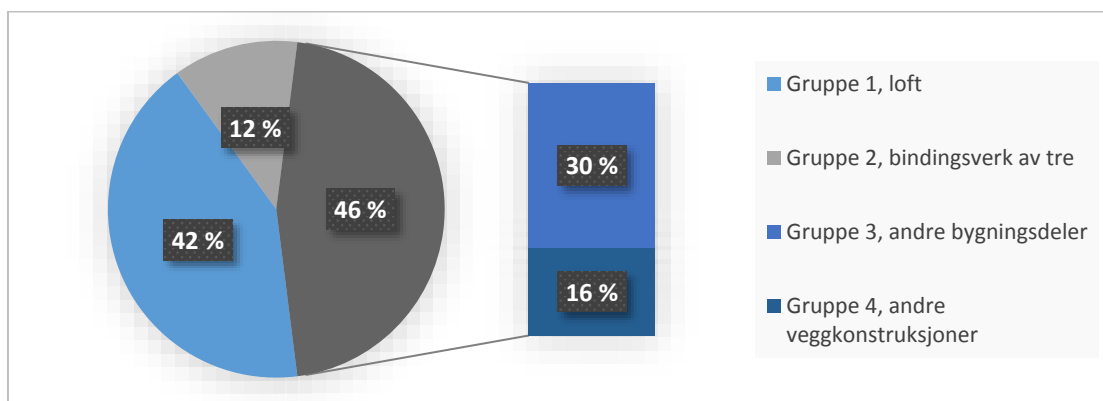
$Skaderisiko_i$ = risiko for soppforekomst time for time for alle $Skaderisiko_i > 0$ [%]

n = antall dager i måned [-]

4. Resultater

4.1. Datainnsamling

Videre kan man se oversikt over caser som ble funnet i databasen, se Figur 24. I alle tilfeller er skader knyttet til etterisolering.



Figur 24 Oversikt over konstruksjoner og bygningskomponenter som ble hentet fra skadearkivet til Mycoteam.

4.1.1. Gruppe 1: loft

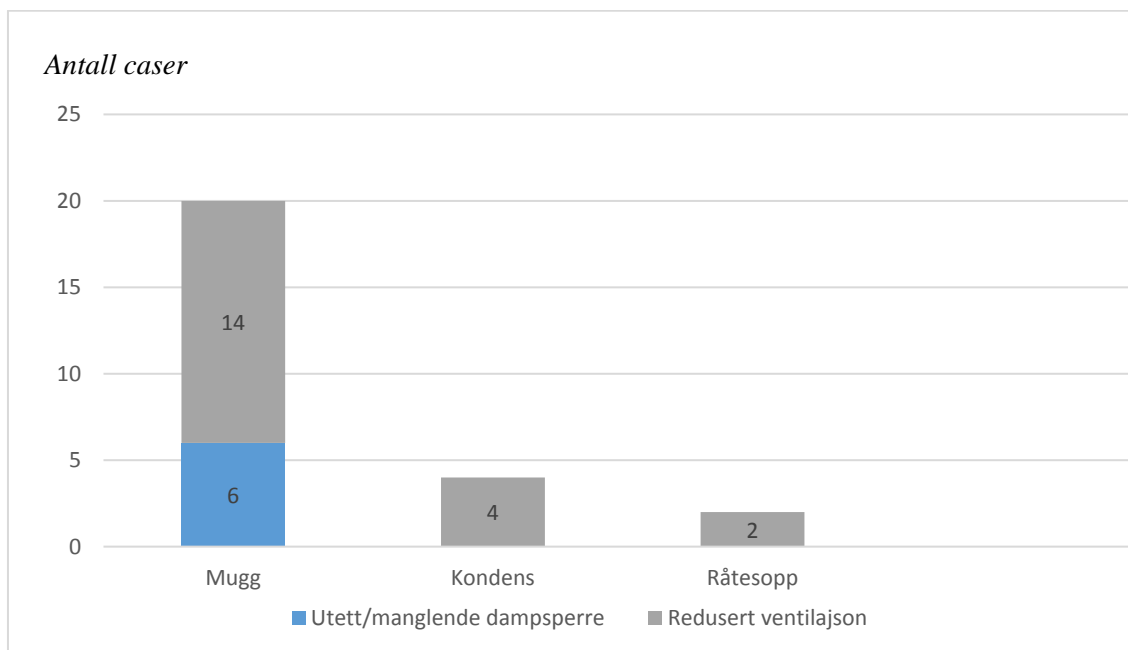
Skader på kaldt luftet loft ble funnet i 21 rapporter, og oversikt over alle caser finner man i Tabell 7.

Tabell 7. Gruppe 1: oversikt over caser.

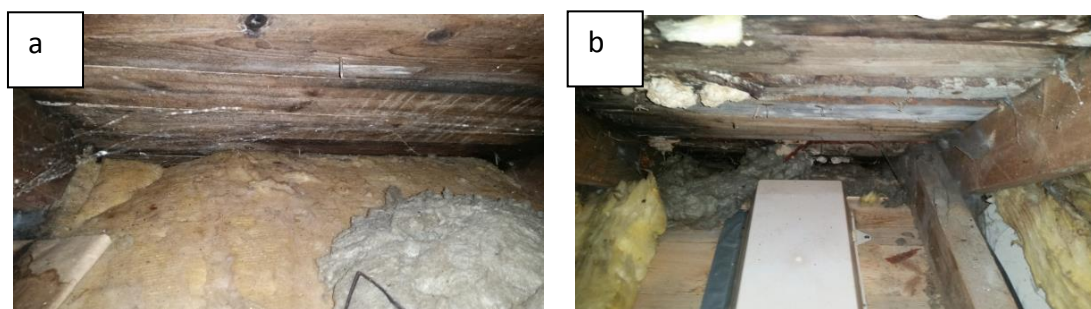
Skadesak	År, bygging	År, etterisolering	Type skade	Skadeårsak
1.1	1937	1996	Muggsopp	Utett/manglende dampsperre, redusert ventilasjon
1.2	1914	ukjent	Kondens	Lufting er tett
1.3	1952	1987	Muggsopp	Lufting er redusert
1.4	1951	2005	Muggsopp	Lufting er tett

1.5	1928	ukjent	Muggsopp	Lufting er tett
1.6	1950	ukjent	Muggsopp, råtesopp	Lufting er tett
1.7	1943	ukjent	Muggsopp	Lufting er tett, utett dampsperre
1.8	1960	ukjent	Muggsopp	Utett/manglende dampsperre
1.9	1950	ukjent	Muggsopp	Utett/manglende dampsperre
1.10	1952	2001	Muggsopp	Lufting er tett
1.11	1950	ukjent	Muggsopp	Lufting er tett
1.12	1950	ukjent	Kondens	Lufting er tett
1.13	1933	1990	Kondens	Tetting av lufting
1.14	1950	2011	Muggsopp	Lufting er redusert, manglende dampsperre
1.15	1951	ukjent	Muggsopp	Lufting er redusert
1.16	1894	ukjent	Kondens	Lufting er tett
1.17	1930- 1940	2015	Muggsopp	Lufting er tett
1.18	1950	ukjent	Råtesopp	Lufting er redusert
1.19	1952	1988	Muggsopp	Lufting er redusert, manglende dampsperre
1.20	1978	ukjent	Muggsopp	Lufting er redusert
1.21	1916	nylig	Muggsopp	Lufting er redusert

Skader befinner seg i eneboliger fra periode 1894 – 1952, hvor de fleste ble bygget på 1950-tallet. Det ble etterisolert mot loftsrom i periode 1987-2011, og tidspunktet for etterisolering er ukjent for de fleste caser. Skadeårsaker er i hovedsak knyttet til redusert lufting og varmluftlekkasjer fra underliggende boligrom, som skyldes enten skadet eller utett dampsperre. Det fremkommer at muggsopp på undertak er den typiske skaden som har oppstått på grunn av etterisolering, se Figur 25. Noen skadesaker er illustrert på Figur 26, og man finner flere i *Vedlegg 8.D*.



Figur 25 Sammenheng mellom skader og skadeårsaker for gruppe 1, loft.



Figur 26 a-b. Skadesak 6. Lufting er tett med isolasjon. a: hvitkjuke og b: råtesopp. Bilder: Mycoteam AS.

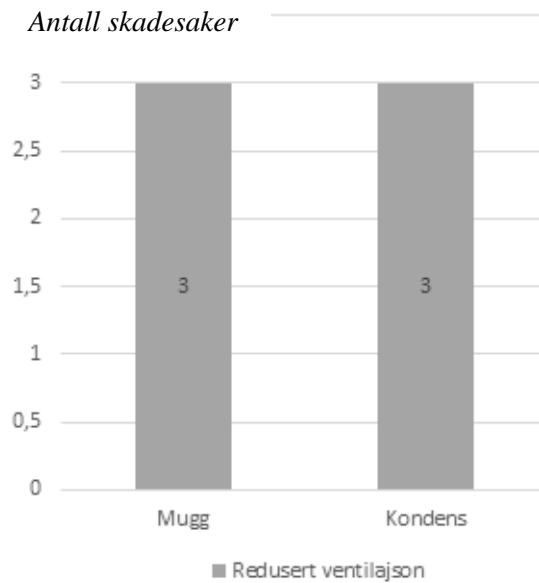
4.1.2. Gruppe 2: bindingsverk av tre

Oppsummering av skadesaker for Gruppe 2 finner man i Tabell 8.

Tabell 8. Gruppe 2: oversikt over skadesaker.

Skadesak	År, bygging	År, etterisolering	Type skade	Skadeårsak
2.1	1952	ukjent	Kondens	Luftet panel mangler
2.2	1935	ukjent	Muggsopp	Dårlig lufting
2.3	1910	ukjent	Kondens	Kledning er ikke luftet
2.4	1950	ukjent	Muggsoppskader	Kledning er ikke luftet, fuktig luft fra baderom.
2.5	1937	2000-2005	Muggsopp	Dårlig lufting
2.6	1950	2009	Kondens	Lufting er tettet

Konstruksjonen befinner seg i småhus av tre som er bygget i periode 1910-1950, hvor de fleste er bygget i 1950. Det ble etterisolert med innblåst isolasjon i periode 2000-2009, hvor tidspunkt for etterisolering er ukjent for de fleste skadesakene. Kondens og mugg bak innvendig kledning er problemer som har oppstått etter tiltaket. Manglende lufting bak utvendig panel er grunnen til skader i de fleste tilfeller. Derfor ble det simulert en opprinnelig konstruksjon uten luftet kledning som «base-case», og effekt av luftet panel ble undersøkt under parameterstudiet.



Figur 27 Sammenheng mellom skader og skadeårsaker for gruppe 2, bindingsverk av tre.

4.1.3. Gruppe 3: andre konstruksjoner

Oversikt over andre konstruksjoner finner man i *Vedlegg 8.E*.

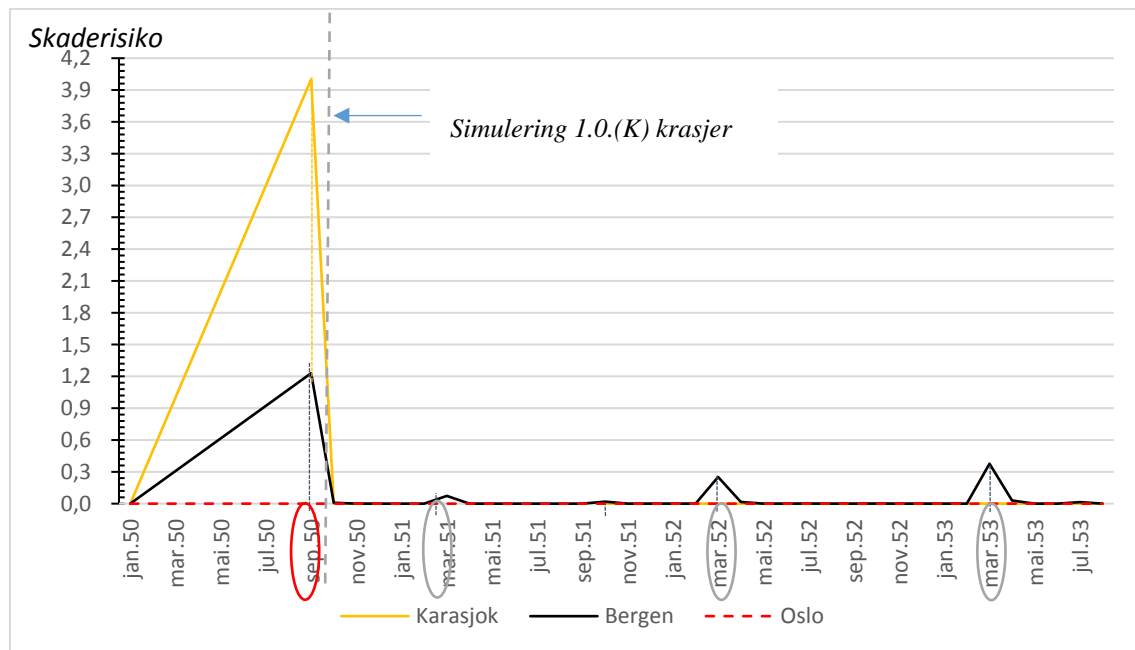
Gruppe 3 består av betongvegger (7), teglsteinvegger (1), og etasjeskillet (7).

I første gruppe ble det utført enten utvendig eller innvendig etterisolering. Vannlekkasjer og uheldig innvendig etterisolering er skadeårsaker i de fleste tilfeller. I andre tilfeller har skader oppstått i teglsteinsvegger og etasjeskillere. Årsaker er endrede bygningsfysiske forhold i konstruksjonen, dårlig lufting og uheldig plassering mot kryperom.

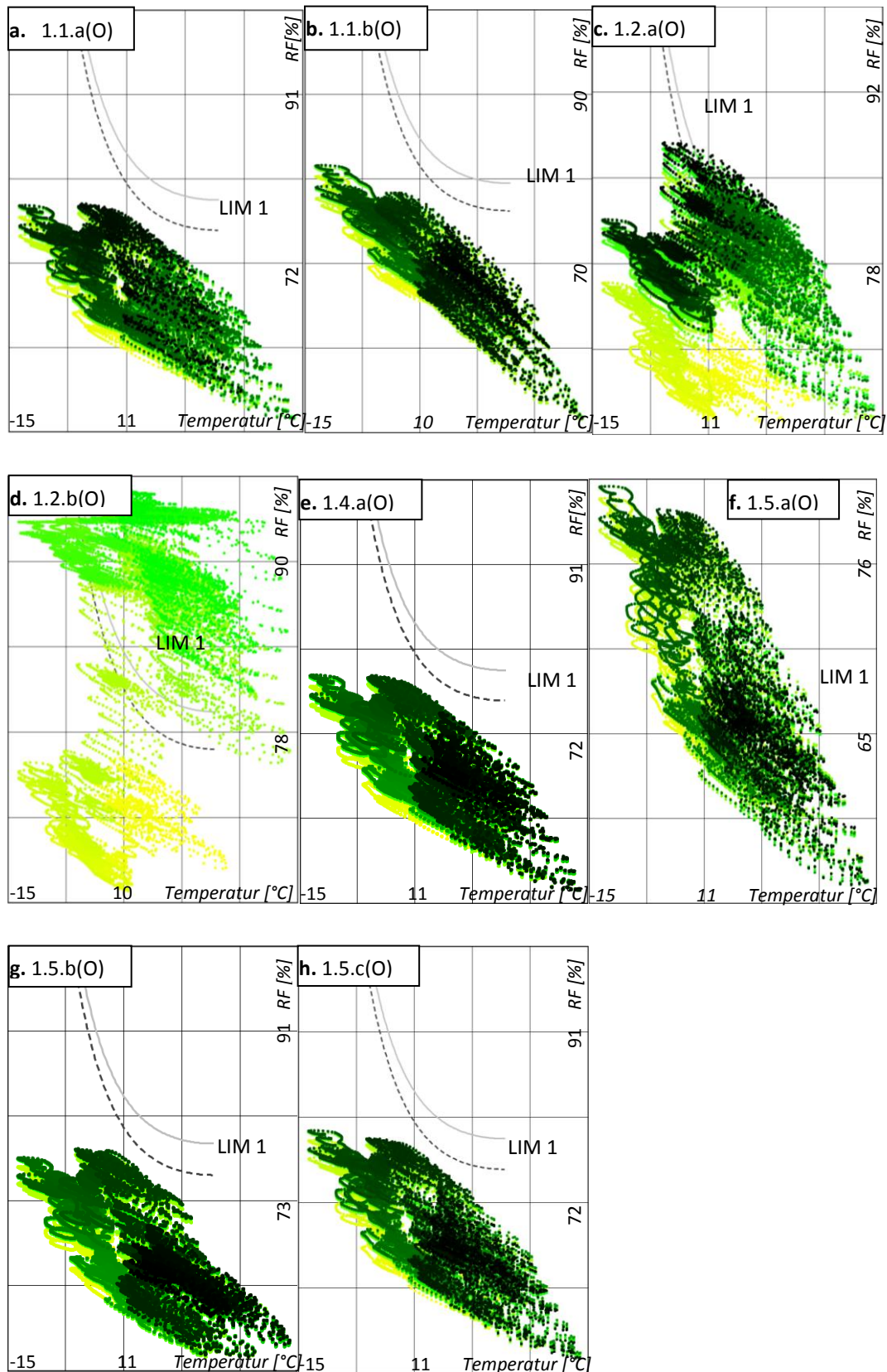
4.2. Simuleringer i WUFI 2D

4.2.1. Gruppe 1: loft

Oversikt over RF og temperatur i undertak ved uttørking av byggfukt i ulike klima samt RF i undertak før etterisolering finner man i *Vedlegg 8.F*. Figur 28 gir oversikt over skaderisiko før etterisolering i ulike klima.



Figur 28 Skaderisiko [%] ved uttørking av byggfukt på loft i Oslo (1.0.(O)), Bergen (1.0.(B)) og Karasjok (1.0.(K)).

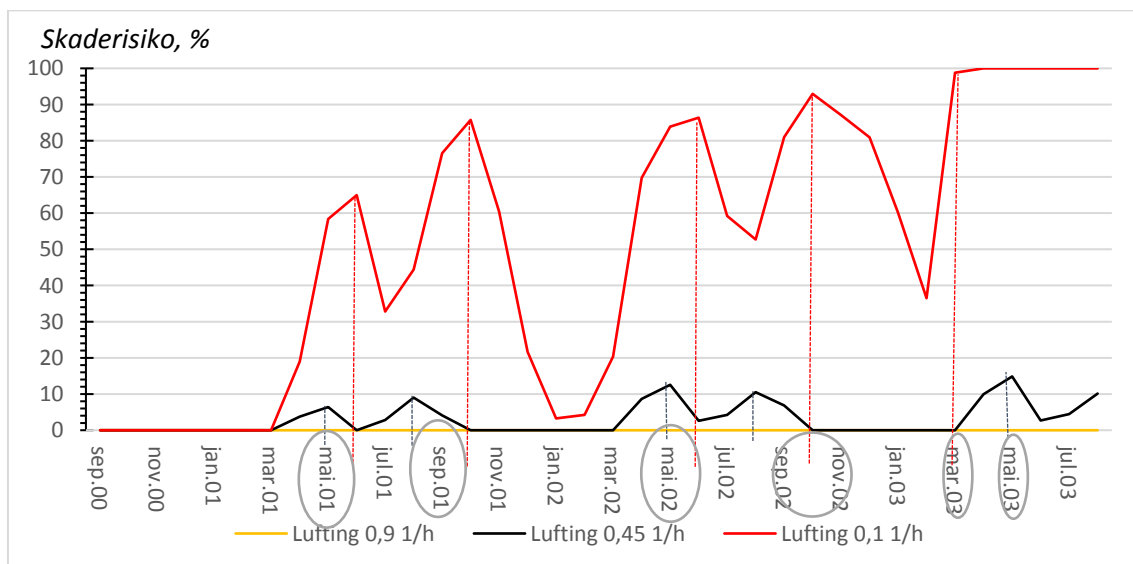


Figur 29 a-h. Oversikt over isopleths for simuleringer for etterisolerte tilfeller.

Videre ble det utført etterisolering ifølge Tabell 4. Det ble benyttet RF og temperatur til undertaket som var tilstede etter uttørking av byggfukt, se *Vedlegg 8.F*. Resultater er fremstilt i form av isopleths for en visuell vurdering av soppforekomst. Simulering 1.4.b(K) ble ikke utført, fordi det har oppstått fritt vann i luft i september 1950 ved uttørking av byggfukt i Karasjok (1.0.(K)). Derfor har simulering krasjet og data for RF og temperatur ikke var tilgjengelig etter 08.1950.

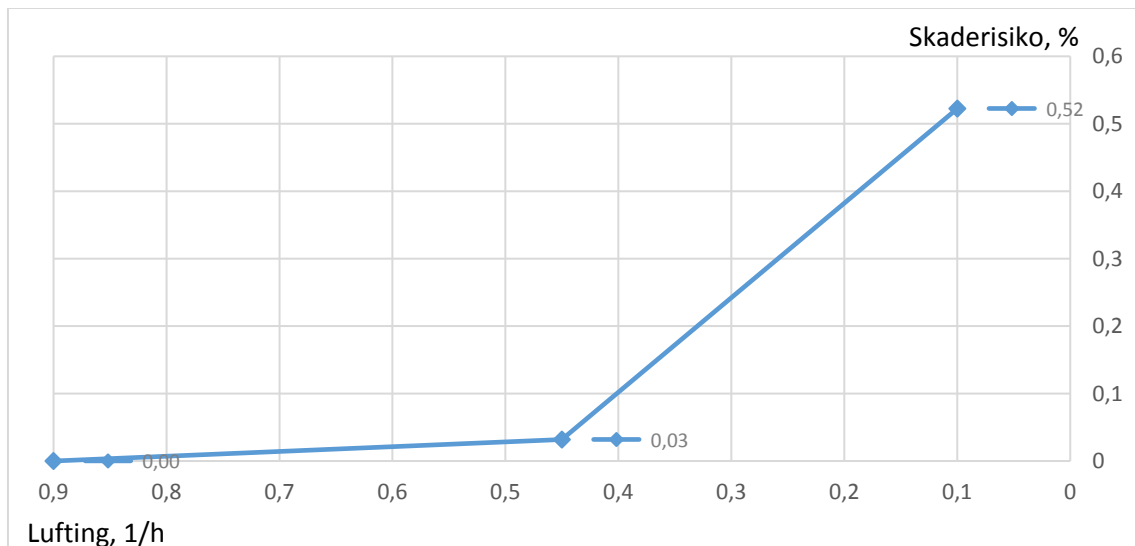
Ved etterisolering i Bergen (simulering 1.4.c(B)) har simuleringen også krasjet den 02.09.2000, dvs. kun etter et døgn. Vanninnhold i konstruksjonen kan man se i *Vedlegg*.

En visuell analyse av isopleths fra Figur 29 viser, at det er tilfeller 1.2.b(O), 1.3.a(O) og 1.3.b(O) som er utsatt for skader. Beregning av skaderisiko har likevel vist at det er kun lufting som har påvirkning på skadedannelse i utførte simuleringer, se Figur 30.



Figur 30 Skaderisiko [%] måned for måned ved variasjon av lufting på loft.

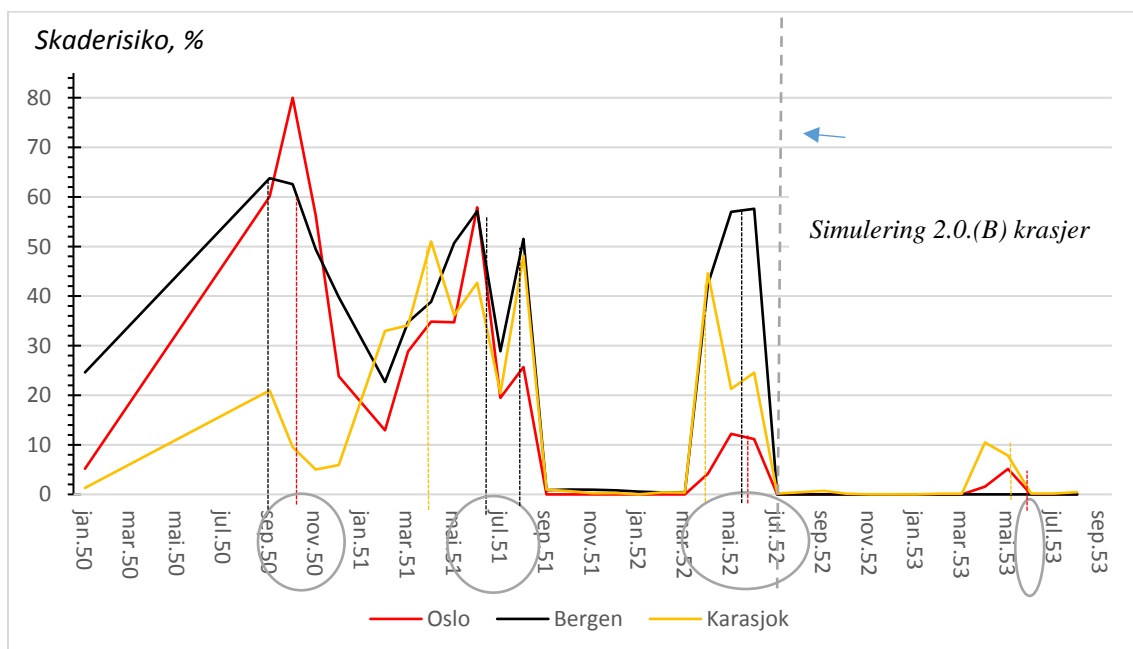
Man kan også finne en gjennomsnittlig skaderisiko per måned for periode 01.09.00-01.09.03 for hver simulering fra Figur 30. Ved å plote dette kan man se tendenser til økning av skaderisiko ved tetting av lufting, se Figur 31.



Figur 31 Gjennomsnittlig skaderisiko per måned og dens sammenheng med luftskifter på loft.

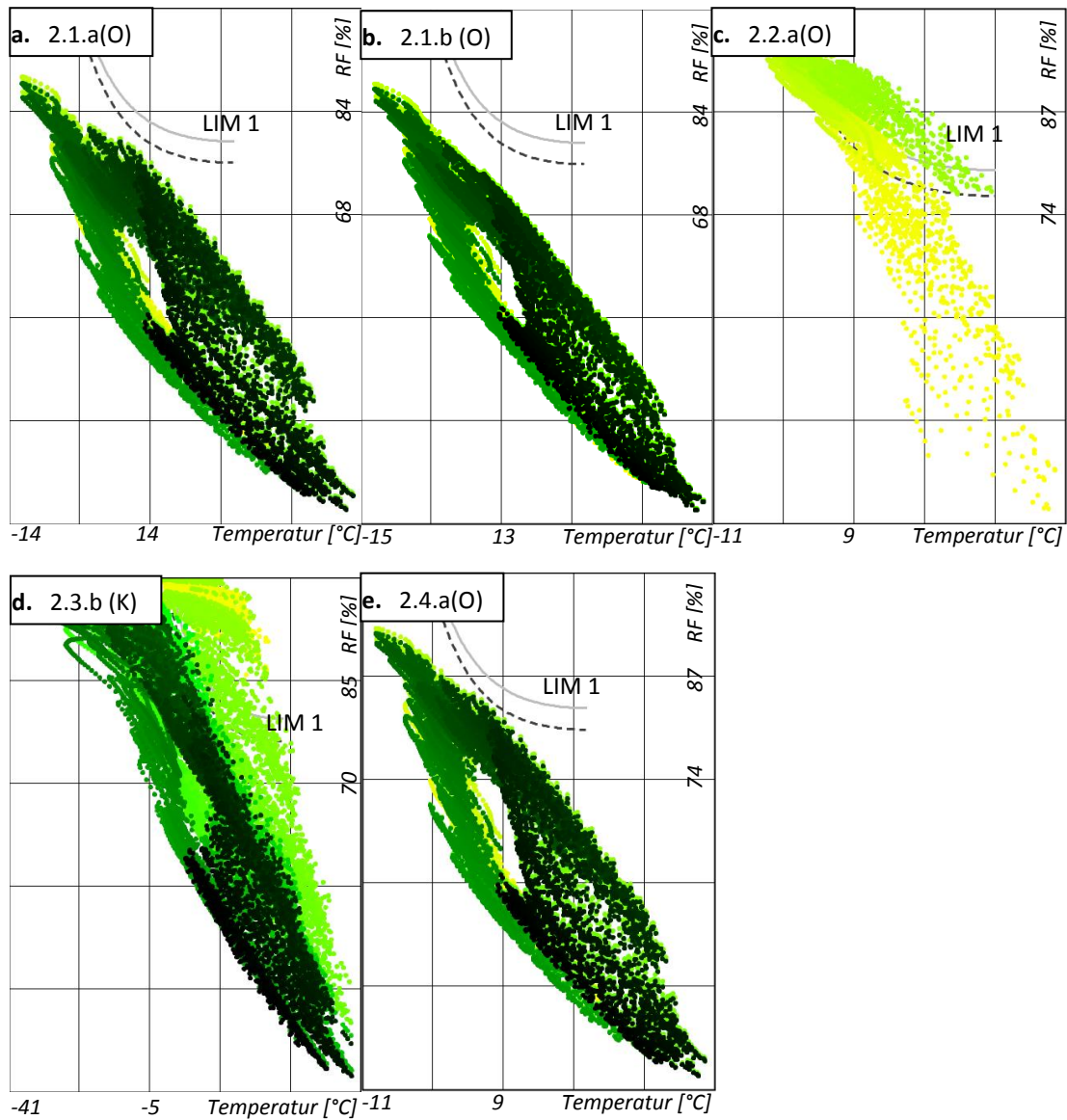
4.2.2. Gruppe 2: bindingsverk av tre

Analyse av isopleths gjennom konstruksjonen viser, at det er noe skaderisiko på kald side av dampsperre. Relativ fuktighet og temperatur for uttørkingsperioder for ulike klima, samt RF bak innvendig kledning ved etterisoleringtidspunkt finner man i vedlegg.



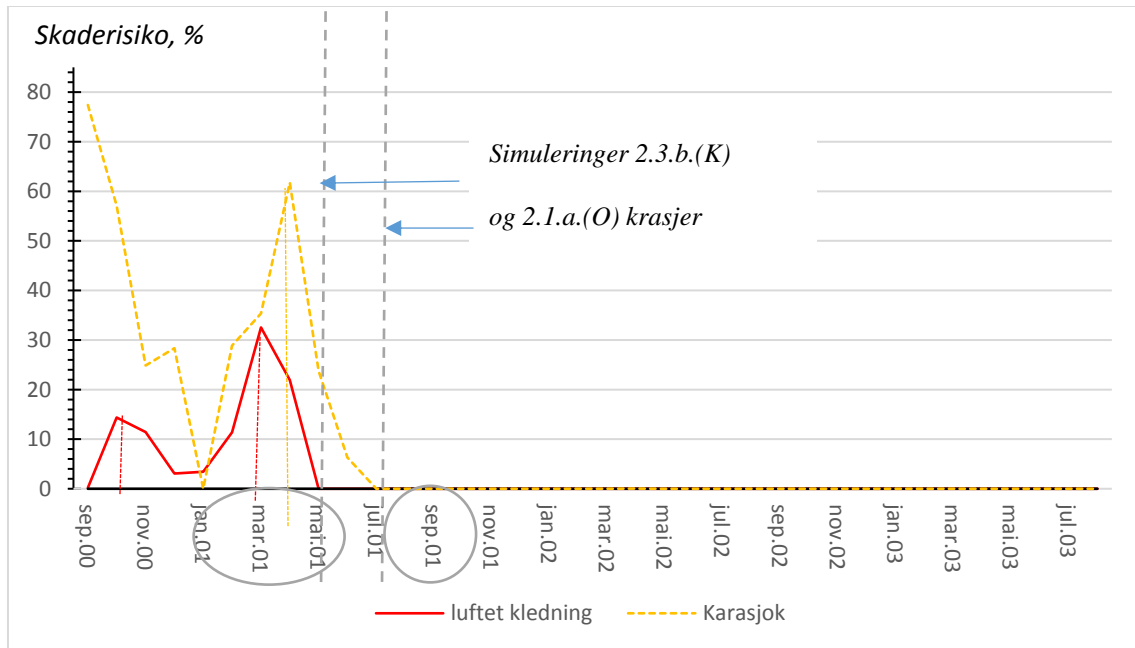
Figur 32 Skaderisiko [%] i Oslo (2.0.(O)), Bergen (2.0.(B)) og Karasjok (2.0.(K)) for 1950-53 .

Man fikk følgende resultater etter at veggen ble etterisolert, se Figur 33.



Figur 33 a-e. Isopleths for simuleringer fra Tabell 5.

En visuell analyse viser at det er noe skaderisiko i simuleringer c og d fra Figur 33. Beregning av skaderisiko (%) for disse simuleringene har gitt følgende resultater:



Figur 34 Skaderisiko [%] for simuleringer av et etterisolert bindingsverk av tre i Oslo med luftet panel (2.1.a.(O)) og i Karasjok (2.3.b.(K)).

5. Diskusjon

5.1. Gruppe 1: loft

Fra inspeksjonsrapporter fremkommer det at skader ble dannet på undertak. Skadeplassering er først og fremst knyttet til en oppoverrettet transport av fuktig luft fra oppvarmede deler av bolig på grunn av utettheter i papp. Dette gjør at varm og fuktig inneluft stiger opp og kondenserer på et kaldt undertak ifølge prinsipper som er beskrevet ved hjelp av Molliers diagram, se Figur 1.

Råtesoppkader som er forårsaket av etterisolering ble funnet kun i 8% av de undersøkte skadesakene. Dette stemmer godt overens med tidligere forskning, hvor kun 10% av råtesoppkader ble funnet på loft (Sand Austigard, Mattsson, Bjorvand Engh, & Bull Jensen, 2014). Grunnen til det er at råtesopp ikke trives ved temperaturer over 40°C (Mattsson, 2010), og temperatur på loft kan overstige 50°C om sommer ifølge simuleringsresultater, se Vedlegg. Råtesopp behøver også en jevn tilførsel av fritt vann, og en periodisk kondensering på loft er ikke tilstrekkelig. I noen simuleringer ble det likevel observert fritt vann på undertak over lang tid ved temperatur under 40°C, for eksempel når lufting er tettet, se Figur 29. Dette illustrerer tilfeller når råtesoppkader kan oppstå.

Simuleringsmodellen har gitt resultater som stemmer godt overens med resultater fra datainnsamling. Derfor anses valg av modellparametere, som for eksempel antall luftvekslinger på loft, som tilfredsstillende.

Resultatene viser, at loft er noe utsatt for skadedannelse før etterisolering i Bergen og Karasjok, mens i Oslo er konstruksjonen risikofri. I Bergen er skaderisiko høyest de første månedene etter bygging, dvs. fra september til januar, hvor maksimal skaderisiko er 1,2 %. Dette forklares av uttørking av byggfukt og mye nedbør i løpet av vinter og høst i Bergen, se Figur 40. Deretter er det noe skaderisiko kun på våren på grunn av nedbør. I Karasjok ble det observert 4% skaderisiko i mai på grunn RF over 90% og temperaturer over 0-5°C. Etterpå har RF overskredet 98% og simuleringen krasjet på grunn av fritt vann i konstruksjon. På Figur 40 kan man se at RF har steget veldig bratt på en kort tid, og dette kan forklares av meget lave temperaturer i den aktuelle perioden.

Studiet av isopleths til de etterisolerte konstruksjonen viser, at det er kun 3 tilfeller som er utsatt for skader: reduksjon og tetting av lufting og bruk av en utett dampsperre. Jo større reduksjon av lufting, desto høyere skaderisiko. Ved tetting eller reduksjon av lufting er konstruksjonen likevel skadefri de første 7 månedene etter tiltaket på grunn av lav RF. Deretter blir fukten akkumulert i konstruksjonen. Dette gir fritt vann og skaderisiko opptil 100% ved tetting av lufting på våren, se Figur 30. Den gjennomsnittlige skaderisiko per måned øker relativt sakte når lufting først reduseres ned mot 0,45 l/h, se Figur 31. Ved ytterligere tetting øker skadefaktor raskere og når 100% etter 1 år. Utifra disse resultatene fremkommer det at tilstrekkelig ventilasjon på loft er avgjørende for å unngå skadedannelse på undertaket.

Økt fare for soppforekomst ved bruk av en utett dampsperre skyldes høyere RF på grunn av utettheter i dampsperre sammenlignet med bruk av en tett dampsperre. Skaderisiko ble likevel eliminert ved bruk av Folosdiagrammet, selv om isopleths har indikert noe fare for soppforekomst. Dette har skjedd fordi skaderisiko var meget lav og ble eliminert ved utregning av gjennomsnittlig skaderisiko. Legging av en ny dampsperre mellom to isolasjonssjikt har ikke resultert i økning av skaderisiko heller ifølge simuleringer. I virkelighet blir det likevel noe trevirke mellom disse to diffusjonstette sjikt, og dette bør danne fare for soppskade.

Simuleringsresultatene viser også at legging av en ny dampsperre kan være unødvendig, forutsatt at papp er like tett som ved byggetidspunkt og det er en god lufting på loft. Man må likevel huske at en asfaltimpregnert papp har levetid på 20-25 år (Drange, Aanensen, & Brønne, 2000) og behøver utskifting når levetiden er overskredet. Derfor blir papp mest sannsynligvis utett.

Ved bruk av en 300 mm isolasjon blir temperaturen på undertaket som regel 1-3°C lavere og RF er 1-2% høyere sammenlignet med bruk av 200 mm isolasjon. Når utetemperatur er høy, for eksempel på dagtid om sommer, blir temperaturen noe høyere ved lavere RF i første tilfellet. Dette viser at en økt isolasjonstykkelse gjør at loftsrommet blir mer utsatt for temperatursvingene. Disse endringene er likevel ubetydelige for skadedannelse i dette tilfellet ifølge simuleringer, mens ytterligere økning av isolasjonstykkelse skal mest sannsynligvis føre til soppskader. Dette viser at man gjerne kan bruke noe tykkere isolasjonssjikt hvis man ønsker økt komfort og økte energibesparelser. Disse simuleringene har også vist at

etterisolering som tilfredsstillende TEK10 ikke kan forårsake skader, så lenge tiltaket er utført forsvarlig.

Det er imidlertid vanskelig å påstå at makroklima har også påvirket bygningsfysiske forhold i konstruksjonen etter tiltaket. Etterisolering i Karasjok ble ikke studert, fordi simulering av konstruksjonen før etterisolering krasjet. I Oslo var konstruksjonen risikofri, mens i Bergen har simuleringer krasjet kun noen dager etter tiltaket. Dette skyldes fritt vann i konstruksjonen i Bergen, som kunne oppstå på grunn av lavere temperatur til undertak som følge av etterisolering. Manglende oversikt over bygningsfysiske forhold i konstruksjonen over lengre tid på grunn av en krasjet simulering gjør det vanskelig å trekke konklusjoner om negativ effekt av etterisolering i Bergen.

5.2. Gruppe 2: vegg

Fra skadesaker fremkommer det at skadene har oppstått inne i konstruksjonen, mens en nøyaktig skadeplassering er ukjent. En analyse av hydrotermiske forhold i konstruksjonen viser, at skadene har oppstått på en varm side av vindsperre, og dette stemmer godt overens med tidligere forskning (Geving & Holme, 2010). Det ble oppdaget mugg i 50% av tilfeller og kondens i 50% av tilfeller, se Figur 27. Råtesopp trives ikke på grunn av temperatursvingene i konstruksjonen, mens muggsopp både tåler temperatursvingene og får nok fuktighet. Kondens oppstår fordi en varm og fuktig inneluft fra oppvarmede deler av bolig drives mot områder med lavere damptrykk, dvs. inne i konstruksjon. Dette forårsaker kondens når luft kommer i kontakt med en kaldere overflate til vindsperre. Ved etterisolering blir vindsperreoverflate enda kaldere, og dette fører til økt skaderisiko. Ifølge rapporter har skadene i hovedsak oppstått, fordi et luftet panel ikke var etablert etter tiltaket. Dette kunne føre til kapillær oppsuging av slagregn og til at fuktighet fra indre deler av veggen ikke kunne slippes ut.

Resultater av simuleringer viser (Figur 32), at den opprinnelige konstruksjonen er utsatt for skader i alle klima. Skaderisiko er spesielt høy det første året etter bygging, og dette skyldes uttørking av byggfukt. Konstruksjonen i Karasjok er minst utsatt for skader på grunn av lave temperaturer og relativt lite nedbør. Aller høyest skaderisiko ble oppdaget i Oslo første året etter bygging. Dette skjedde fordi temperatur i Oslo var ca. 5°C lavere enn i Bergen den aktuelle perioden, noe som resulterte i høyere RF ved gunstige temperaturer. Det årlige

toppunktet av skaderisikokurven befinner seg i september og mai-juli på grunn av mye nedbør. I Bergen krasjet simuleringen etter 2 år på grunn av fritt vann i konstruksjonen.

I etterisolerte konstruksjoner ble skaderisiko større enn null i 2 tilfeller: ved bruk av luftet kledning og i Karasjok, se Figur 34.

I Karasjok var fuktinnholdet i sjiktet høyt førte året etter tiltaket, deretter har det stabilisert seg etter 3 år. Dette og temperaturer mellom -4 til +20 °C resulterte i skaderisiko, noe som stemmer godt overens med preferanser til muggsopp. Ut ifra tilgjengelige resultater kan man også påstå at det er høyere skaderisiko i Karasjok i forhold til Oslo, og dette kan vise at klima har påvirkning på skadedannelse i denne konstruksjonen.

I virkeligheten vil bruk av et luftet panel med drenering bidra til konstruksjonens uttørking. Til tross for det, fører dette til en økt skaderisiko ifølge simuleringer, som krasjer noen måneder etter tiltaket. Dette skyldes fritt vann i konstruksjonen på grunn av nedbørintrenging fra lufting, som i virkelighet skulle dreneres. Det at luft betraktes som et porøst materiale i WUFI 2D eliminerer mulighet for å drenere ut vann som kommer bak kledning før det når vindsperre. Istedenfor suges det inn i konstruksjonen. Vindsperre er ikke diffusjonstett, og dette forårsaker fuktinntrenging i konstruksjonen. I tillegg har temperaturen i sjiktet blitt lavere på grunn av uteluft, og dette resulterte i enda høyere RF. Det er likevel tvilsomt at dette resultatet er representativt og gjenspeiler virkeligheten. Skaderisiko skyldes mest sannsynligvis luftegenskaper i WUFI.

6. Konklusjon

I arbeidet med denne oppgaven hadde forsker tre delmål:

1. Finne ut hvilke konstruksjoner som er utsatt for skader på grunn av etterisolering.
2. Samle informasjon om skadeårsaker ut fra skadearkiv til Mycoteam.
3. Studere påvirkningen av ulike faktorer på etterisolerte konstruksjoner ved hjelp av simuleringer av fukt- og varmetransport.

Disse ble undersøkt grundig og diskutert gjennom denne oppgaven. Først og fremst har studiet av skadearkivet til Mycoteam vist at et kaldt luftet loft og bindingsverksvegg er bygningsdeler i småhus av tre som er mest utsatt for skader på grunn av etterisolering. For det andre, er manglende lufting og utettheter i konstruksjonen definert som hovedårsaker til disse skadene, og muggsopp er den mest populære biologiske skadegjøreren for begge bygningsdeler. Dette ble belyst ved hjelp av simuleringer.

Påvirkning av følgende faktorer på skadedannelse har blitt studert: isolasjonstykkelse, lufting, fuktproduksjon, diffusjonstetthet til konstruksjonen og makroklima.

Ut ifra studien fremkommer det, at selv om etterisolering i seg selv fører til noe kaldere overflater på undertak og bak vindsperre, er disse endringene ubetydelige for skadedannelse. Det ble undersøkt både isolasjonstykkelser som trengs for å tilfredsstille minstekrav til TEK og noen tykkere sjikt i begge tilfeller. Det kan likevel oppstå fare for soppdannelse ved ytterligere økning av isolasjonslag, og dette ble ikke undersøkt her.

Resultatene har vist, at lufting var avgjørende for skadedannelse på loft i småhus av tre, og dette stemmer godt overens med skadesakene.

I veggkonstruksjonen bør ikke etterisolering føre til noen skader i virkeligheten, selv om bruk av en luftet kledning har gitt noe skaderisiko ved simuleringene. Dette forklares av begrensningene til WUFI 2D. Selv om makroklima har påvirket skadedannelse i begge tilfeller, er det først og fremst en sammensetning av temperatur og RF i den aktuelle konstruksjonen som er avgjørende for skadedannelse.

6.1. Videre arbeid

Videre kan man fortsette å undersøke påvirkning av skadefaktorer på soppforekomst. Flere simuleringer med ulik luftomsetning før og e kan gjøres for å undersøke hvordan konstruksjoner med bedre eller dårligere ventilasjon skal oppføre seg ved etterisolering. Man kan også måle lekkasjetallet på noen typiske loft og bruke dette til simuleringer.

Det er også aktuelt å studere skadedannelse ved ytterligere økning av isolasjonssjiktet. Man kan også undersøke hvordan etterisolering påvirker skadedannelse i andre bygningsdeler, for eksempel kjeller.

7. Kilder

- Meteorologisk institutt. (u.d.). *Nedbør*. Hentet April 20, 2017 fra <http://www.met.no/>
- Alfredsen, G., Gobakken, L. R., Flæte, P. O., & Brischke, C. (2014, vol.34). Faktorer som påvirker levetiden til tre utendørs. *AGARICA*, ss. 11-19.
- Alfredsen, G., Solheim, H., & Jenssen, K. M. (2006, vol. 26). Råtesopp i norske bygninger. *AGARICA*, ss. 78-86.
- Bech-Andersen, J. (1996). *Ægte hussvamp og svamp i huse* (7.. utg.). Holte: Hussvamp Laboratoriets Forlag.
- Drange, T., Aanensen, H. O., & Brønne, J. (2000). *Gamle trehus. Historikk, reparasjon og vedlikehold*. (5. opplag. utg.). Ås: Universitetsforlaget.
- Edvardsen, K. (2004, Februar). 723.511 - Etterisolering av yttervegger av tre. *Byggforskserien*.
- Edvardsen, K. I. (1983). Varmegjennomgang. k-verdier for bygningskonstruksjoner. *Byggforskserien*.
- Edvardsen, K. I. (2017, 2). 723.306 - Eldre vegger av bindingsverk. Metoder og materialer. *Byggforskserien* . Hentet Mars 2017 fra <https://www.byggforsk.no/>
- Edvardsen, K. I. (2017, 2). 744.103. Takteking av tegl- og betongtakstein, skifer, bordtak, kavletak og takspån på eldre bygninger. *Byggforskserien*. Hentet 3 2017 fra <https://www.byggforsk.no>
- Edvardsen, K. I., Haug, T., & Ramstad, T. Ø. (2010). *Trehus. Håndbok 53*. (9.. utg.). Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Fraunhofer IBP. (2013). *WUFI Wiki*. Hentet April 1, 2017 fra <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:AirLayers>
- Fraunhofer IBP. (oppdatert 12.04.2017). *wufi.de*. Hentet april 2017 fra <https://wufi.de/en/software/wufi-2d/>
- Fraunhofer IBP. (u.d.). *WUFI 2D. Calculation example step by step*. Hentet Desember 16, 2016 fra <https://wufi.de/en/service/downloads/>
- Geving, S. (1995). *421.132 Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*. Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Geving, S., & Holme, J. (2010). *Høyisolerte konstruksjoner og fukt*. Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Geving, S., & Thue, J. V. (2002). *Fukt i bygninger*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Hansen, E. (2016). *Luftstrømning i skrå tretak*. Trondheim.

- Hveem, S. (2017, Januar). 525.422 - Lydisolasjonsegenskaper for tak. *Byggforskserien*.
- Hyvärinen, A., Meklin, T., Vepsäläinen, A., & Nevalainen, A. (2002, vol. 49). Fungi and actinobacteria in moisture-damaged building materials: concentrations and diversity. *International Biodeterioration and Biodegradation*, ss. 27-37.
- IBP. (2013). *WUFI Pro, 2D, Plus*. Hentet 3 2017 fra www.wufi-wiki.com
- Kommunal- og arbeidsdepartementet. (1949, Desember 15). *Byggeforskrift av 15. desember 1949, bind I*. Hentet fra https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk
- Kommunal- og moderniseringsdepartementet. (2009, mai 8). *Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven)*. Hentet april 2017 fra lovdata.no
- Kommunal- og moderniseringsdepartementet. (2010, Juli 1). *Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift)*. Hentet fra <http://www.lovdata.no>
- Kommunal- og regional departementet. (2007, Januar 26). *Tekniske forskrifter til plan- og bygningsloven 1997*. Hentet fra https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk/
- Kommunal- og regionaldepartementet. (1997, Januar 22). *Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk*. Hentet fra https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk
- Kommunal- og regionaldepartementet. (2003, Juni 24). *Tekniske forskrifter til plan- og bygningsloven*. Hentet fra https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk
- Künzel, H. M. (1995). I *Simultaneous heat and moisture transport in building components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. (s. s. 39). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Mangor-Jensen, O. (1987). 471.010 Varmegjennomgang. U-verdier for bygningskonstruksjoner. Del I og II. *Byggforskserien*.
- Mattsson, J. (2004). *Muggsopp i bygninger*. Oslo: Mycoteam AS.
- Mattsson, J. (2010). *Råtesopp i bygninger*. Oslo: Mycoteam AS.
- Mattsson, J., & Sand Austigard, M. (2014, vol. 34). Introduksjon til bygningsmykologi. *AGARICA*, ss. 3-9.
- Mattsson, J., & Stensrød, O. (2009). *Håndbok om vannskader. Årsak, undersøkelser, tiltak og gjenoppbygging*. Oslo: Mycoteam AS.
- Mattsson, J., Flyen, A. C., Grønli, I., & Whist, C. M. (2014, vol.34). Muggsoppskader i bygninger på Svalbard. *AGARICA*, ss. 101-109.

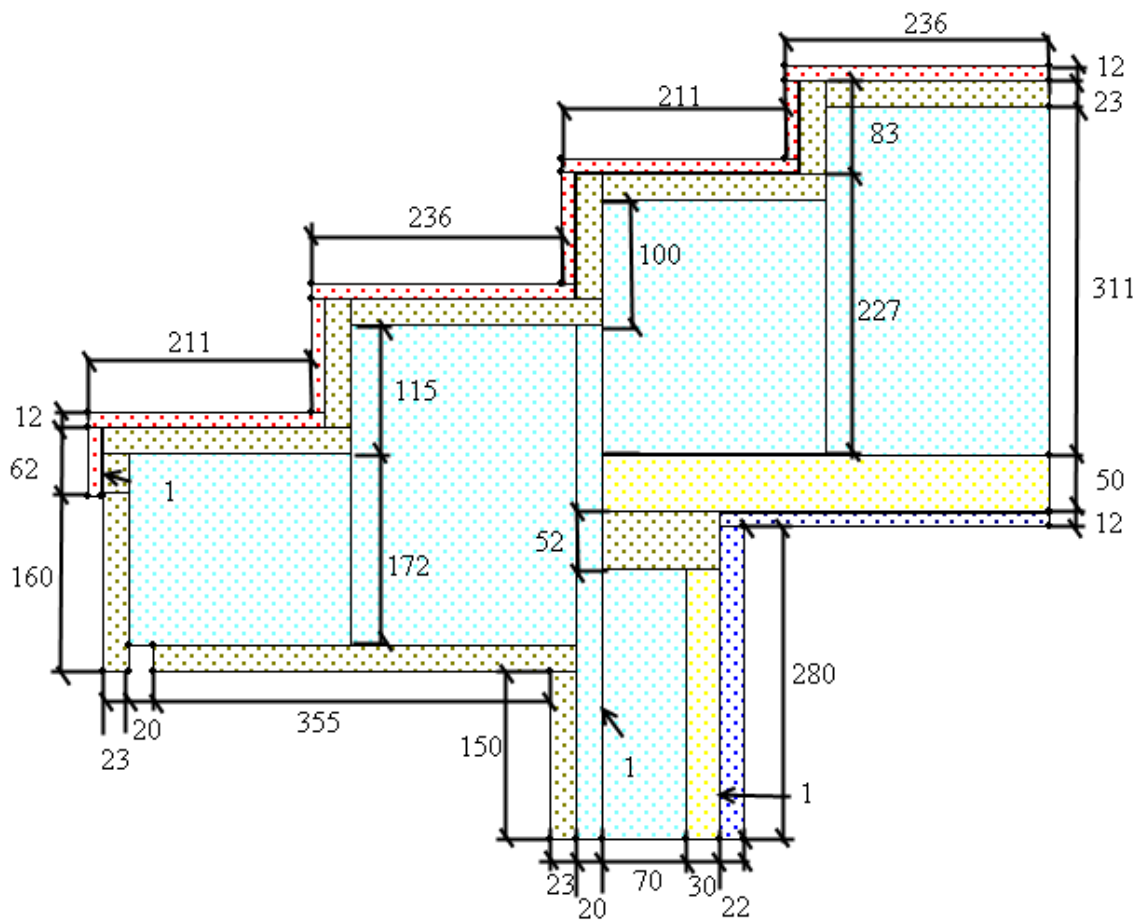
- Mundt-Petersen, S. O., Wallentén, P., Toratti, T., & Heikkinen, J. (2012). *Moisture risk evaluation and determination of required measures to avoid mould damage using the Folos 2D visual mould chart*. Lund: Division of Building Physics.
- Norconsult. (2013). *Praktisk veileder for energimerking*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat .
- Norsk Treteknisk Institutt. (1999). *Treteknisk Håndbok* (2.. utg.). Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Nunez, M. (2014, vol. 34). Critical factors for mould growth in Scandinavian buildings. *AGARICA*, ss. 63-69.
- Nunez, M., Sivertsen, M. S., & Mattsson, J. (2012). Substrate and construction preferences for Actinomycetes and 20 mould genera. Brisbane: Healthy Buildings.
- Pasanen, A. L., Juutinen, T., Jantunen, M. J., & Kalliokoski, P. (1992, vol. 30). Occurrence and moisture requirements of microbial growth in building materials. *International Biodeterioration and Biodegradation* , ss. 273-283.
- Ramstad, T. (2015, August). 571.523 - Trevirke. Treslag og materialegenskaper. *Byggforskserien*.
- Ramstad, T. Ø. (2014, April). 523.251 - Bindingsverk av tre i småhus. Dimensjonering og utførelse. *Byggforskserien*.
- Sand Austigard, M., Mattsson, J., Bjorvand Engh, I., & Bull Jenssen, H. (2014, vol.34). Dry rot fungus (*Serpula lacrymans*) in Norwegian buildings. *AGARICA*, ss. 19-29.
- Sedlbauer, K. (2001). *Predictuion of mould manifestation on and in building parts*. University of Stuttgart.
- Sedlbauer, K., Krus, M., & Breuer, K. (2003). Mould growth prediction with a new biohygrothermal method and its application in practice. Lodz: Fraunhofer IBP.
- Skaug, E. (2007, 04). Fokus 40 - Trevirkets oppbygging og egenskaper. *Fokus på tre*.
- Thiel, D. V. (2014). *Research methods for engineers*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Thue, J. V. (2000). *Husbyggingsteknikk. Bygningsfysisk grunnlag*. Trondheim: NTNU, Institutt for bygg- og anleggsteknikk.
- Torgersen, S.-E. (1994). Uttørking og kontrollmåling av byggfukt. *Byggforskserien (Byggdetaljer 474.533)*.
- Uvsløkk, S. (2005, April). 725.403 - Etterisolering av tretak. *Byggforskserien*.
- Uvsløkk, S. (2005, November). Skrå tretak med kaldt loft. *Byggforskserien*.

Uvsløkk, S. (2005). *Tak med kaldt loft. Delrapport fra prosjekt 4 i FoU-programmet "Klima 2000"*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.

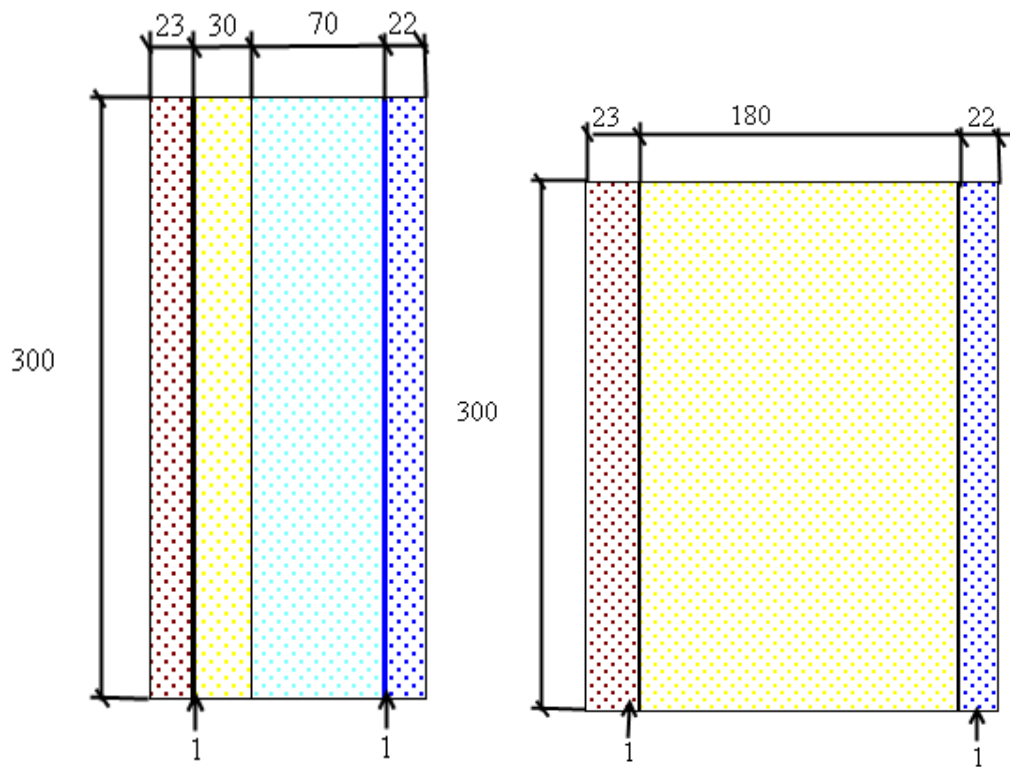
Viitanen, H. A. (1997, vol. 51). Modelling the time factor in the development of mould fungi - the effect of critical humidity and temperature conditions on pine and spruce sapwood. *Hozforschung*, ss. 6-14.

8. Vedlegg

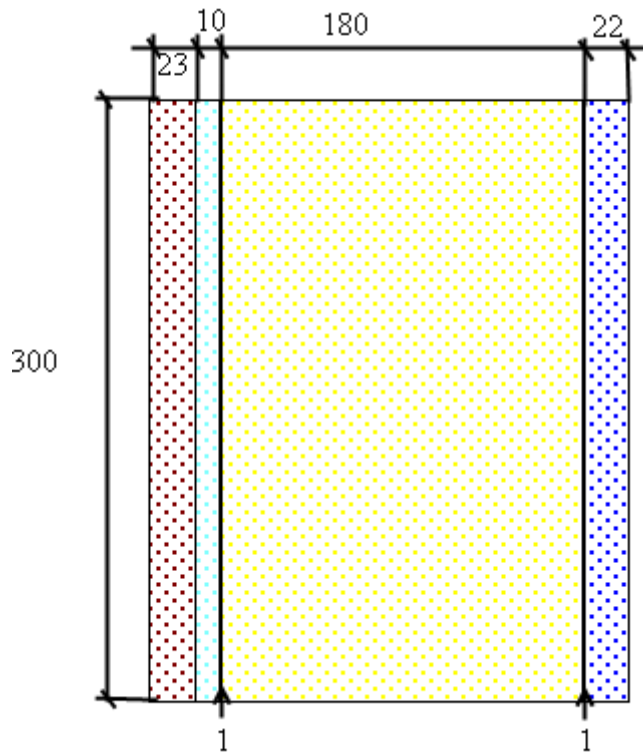
8.A. Målsatte modeller



Figur 35 Modell for gruppe 1: loft. Alle mål i mm.



Figur 36 a-b. a: Modell for bindingsverk av tre før etterisolering. b: Bindingsverk av tre med 150 mm ekstra isolasjon.



Figur 37 Bindingsverk av tre med 150 mm ekstra isolasjon og luftet kledning.

8.B. Materialer

Tabell 9 Materialer til WUFI-simuleringer.

Materiale	Vanndampdif- fusjonsmotstand s-faktor	Tetthet kg/m ³	Porøsitet m ² /m ³	Varmeka- pasitet J/kg*K	Termisk konduktivitet W/mK
Tre, langsgående	4,3	455	0,73	1500	0,23
Tre, radielt	130	455	0,73	1500	0,12 (Mangor- Jensen, 1987)
Asfaltimpregnert papp, 1mm	1000	130	0,001	2300	0,033
Isolasjon	1,3	60	0,95	850	0,035 (Edvardsen, 2017)
Diffusjonstett papp, 1mm	10000	130	0,001	2200	0,002 (Mangor- Jensen, 1987)
Trefiberplate, 22mm	12,5	400	0,8	1500	0,1 (Evardsen, 1983)
Sponplate, 12 mm	70	600	0,5	1500	0,15
Asfalttakpapp, 1mm	100	130	0,001	2200	0,033 (Mangor- Jensen, 1987)
Betongtakstein	16	600	0,77	850	0,12

PE-folie	87000	130	0,001	2200	1,65
----------	-------	-----	-------	------	------

Det ble også regnet ut termisk konduktivitet til aktuelle luftsjikt. Det ble benyttet følgende formel (Fraunhofer IBP, 2013):

$$\lambda^* = \Delta x / R_{non-met.} (8 - 1)$$

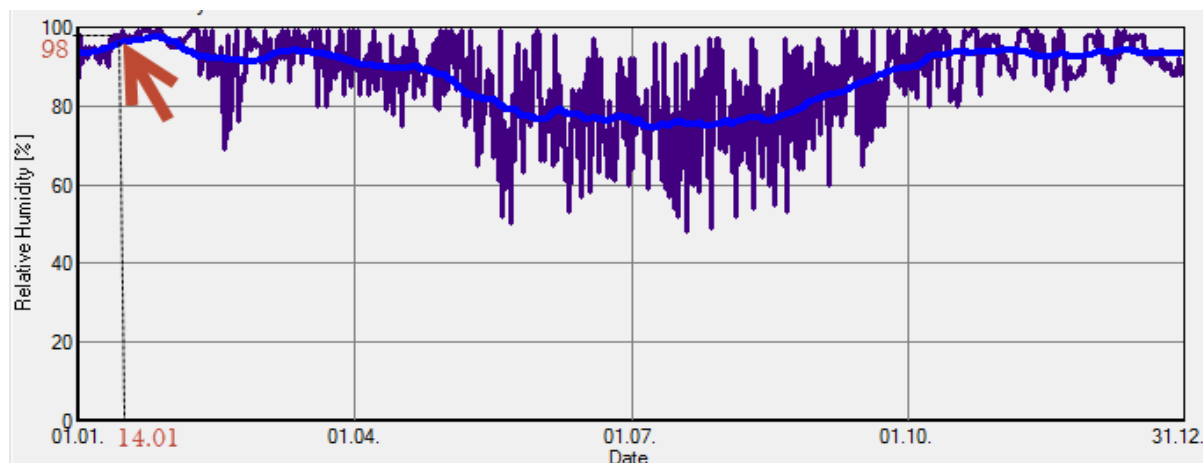
Det ble benyttet $R_{non-met}$ lik 0,08 mK/W for alle sjikt (Fraunhofer IBP, 2013). Eksempler på luftsjikt kan man se i Tabell 10.

Tabell 10 Noen luftsjikt som ble benyttet til simuleringer.

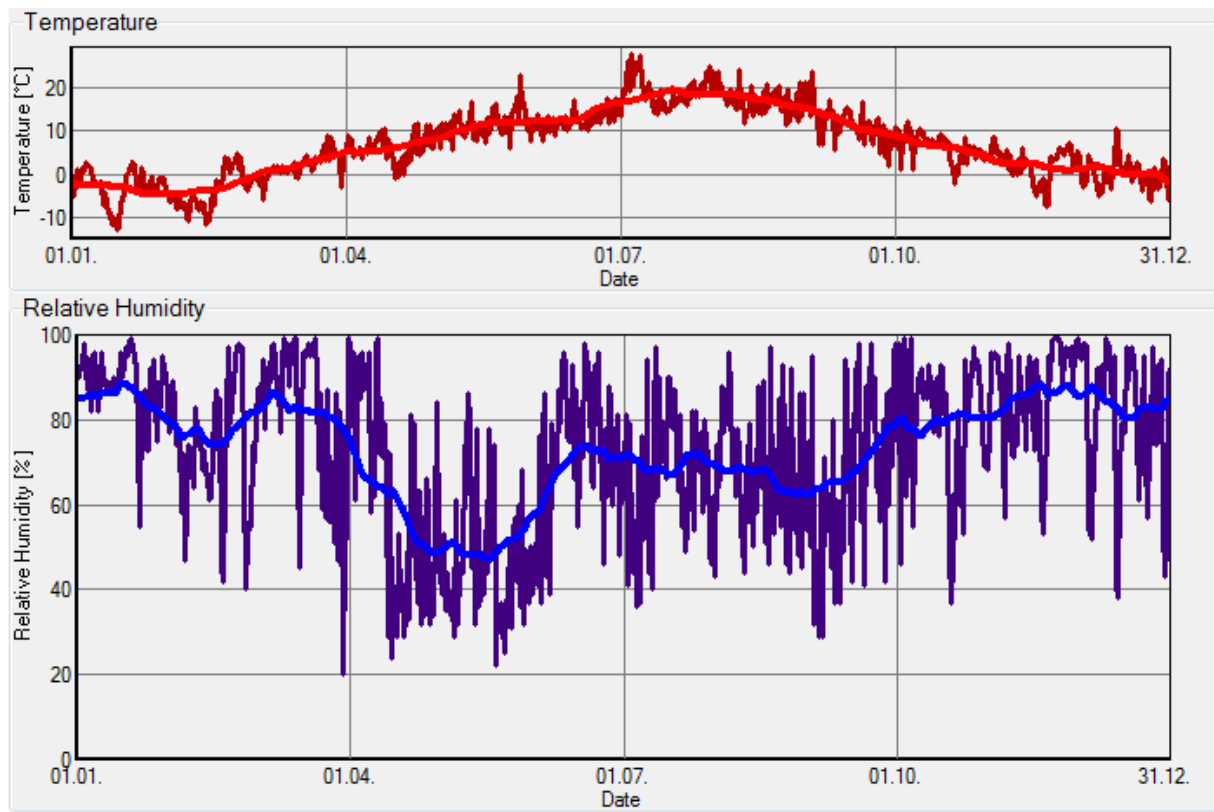
Luft, tykkelse	Termisk konduktivitet, W/mK
170 mm	2,125
250 mm	3,125
300 mm	3,75

8.C. Klima

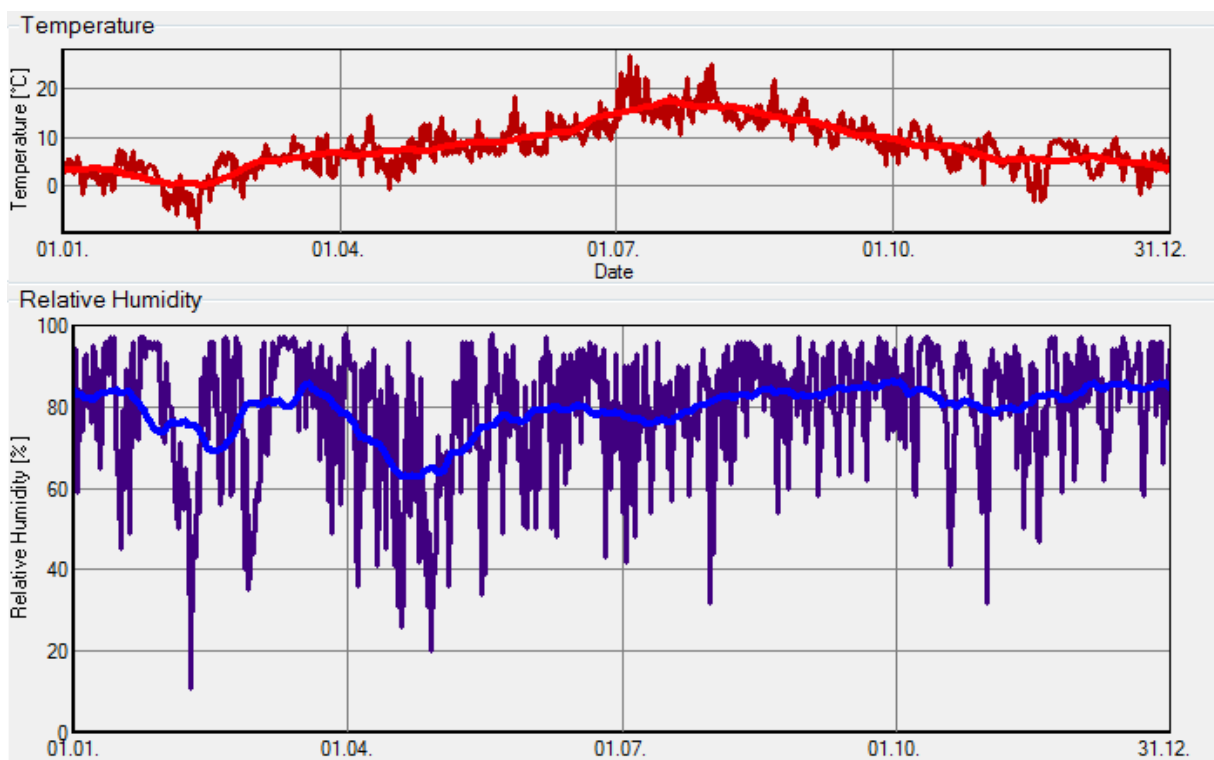
Klimafiler er hentet fra WUFI 2D. Rødt punkt markerer aller høyeste vanninnhold i undertaket i Karasjok siden 01.09 da simuleringen krasjet, se Figur 38.



Figur 38 Relativ fuktighet i Karasjok. Illustrasjon: WUFI 2D.



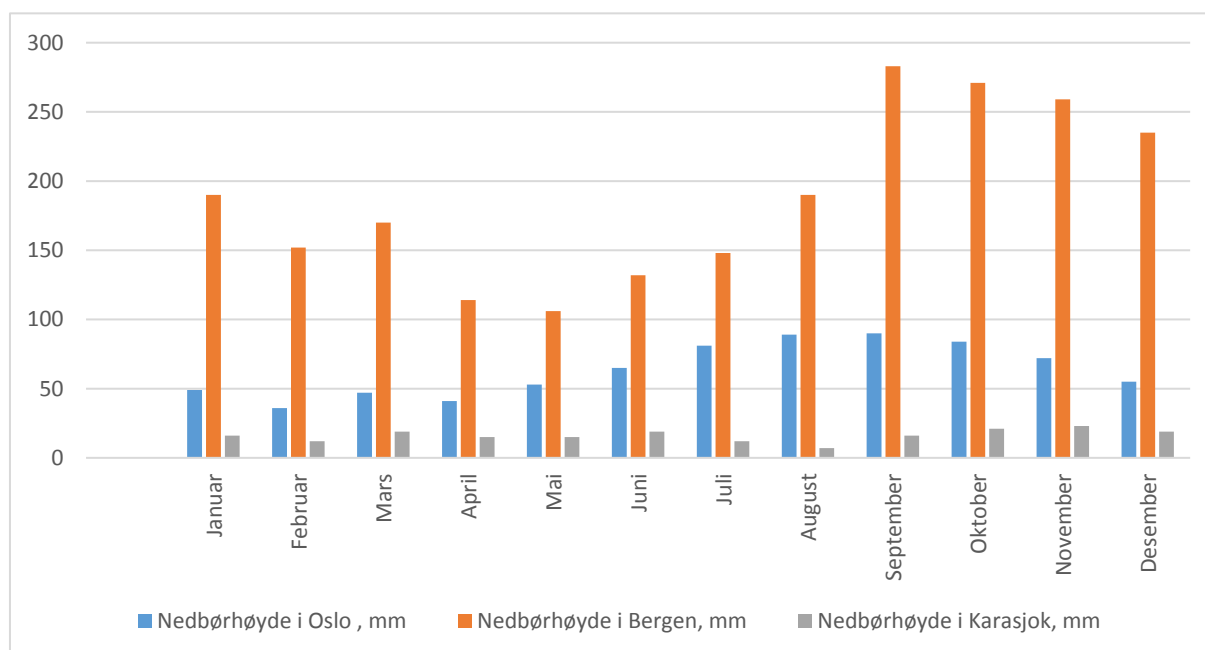
Figur 39 Klima i Oslo. Illustrasjon: WUFI.



Figur 40 klima i Bergen. Illustrasjon: WUFI.

Tabell 11 Klimadata for Oslo, Bergen og Karasjok.

	Oslo	Bergen	Karasjok
Temperatur, årsmiddels.	6,8	8,1	-3,1
Temperatur, max.	29,3	28	24
Temperatur, min.	-14,8	-9,7	-44,2
RF, årsmiddels.	73	79	87
RF, maks.	100	99	99
RF, min.	15	9	43



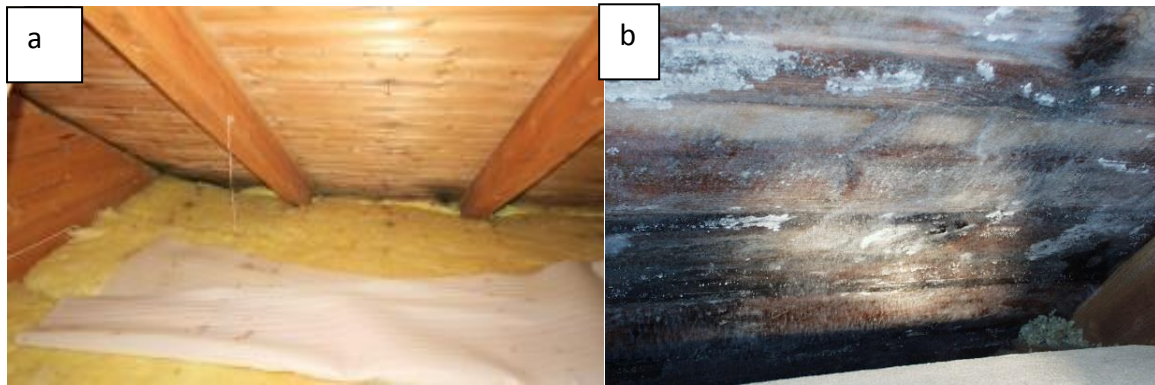
Figur 41 Nedbørnormaler i Oslo, Bergen, Karasjok. Kilde: (Meteorologisk institutt, u.d.)

Tabell 12 Inneklimadata. Kilde: WUFI 2D.

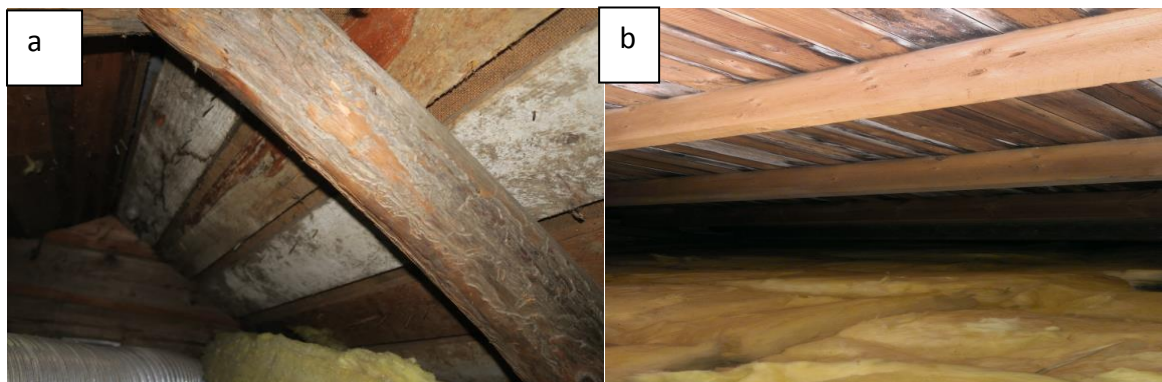
	Temperatur, °C	RF, %	
		Medium fuktighetsproduksjon	Høy fuktighetsproduksjon
Gjennomsnittlig verdi	21	50	55
Amplitude	1	10	5

8.D. Bilder fra skadearkiv for Gruppe 1, loft

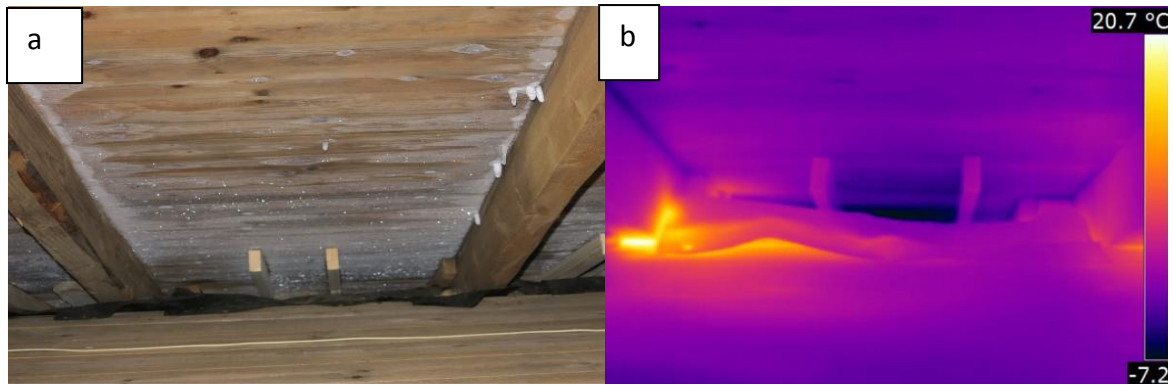
Videre finner man oversikt over de utvalgte bildene for Gruppe 1 loft fra skadearkivet.



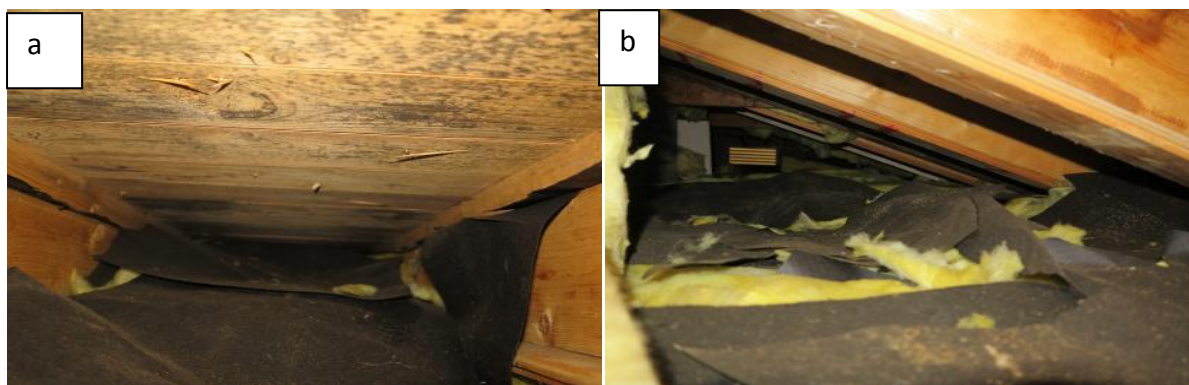
Figur 42 a-b. a: Skadesak 1.1. Misfarging ut mot raft på grunn av soppvekst. b: Skadesak 1.3. Muggsoppvekst på undertak mot raft og 1 meter opp over gulv. Bilder: Mycoteam.



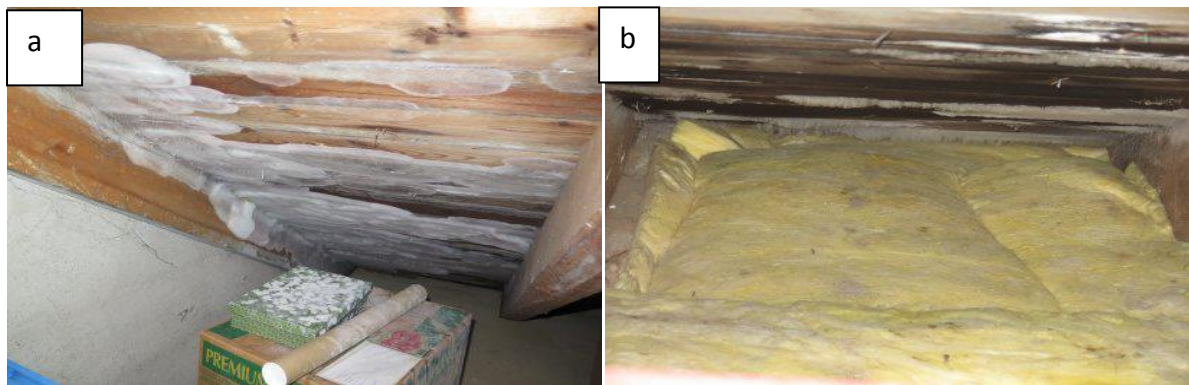
Figur 43 a-b. a: Skadesak 1.7. Muggsoppvekst og tett lufting. b: Skadesak 1.8. Muggsoppvekst på takflate mot nord. Bilder: Mycoteam.



Figur 44 a-b. Skadesak 1.9. a: riming på taktrao den 12.12. b: termografering av samme området viser luftlekkasjer. Bilder: Mycoteam



Figur 45 a-b. Skadesak 1.10 Muggsoppvekst på undertak og tetting av lufting pga. etterisolering. Bilder: Mycoteam.



Figur 46 a-b: Skadesak 1.14. Muggsoppvekst på undertak og tetting av lufting med isolasjonsmattar. Bilder: Mycoteam.

8.E. Resultater fra datainnsamling for Gruppe 3: andre konstruksjoner og bygningsdeler.

Tabell 13 Resultater for Gruppe 3.

Nr.	År, bygging	År, etterisolering	Type skade	Skadeårsak
Betongvegger				
3.1	1920	ukjent	Muggsopp	Uheldig innvendig etterisolering
3.2	ukjent	2015	Muggsopp	Fasade ble vannutsatt ved etterisolering.
3.3	ukjent	2015	Dårlig inneklime	Uheldig innvendig etterisolering.
3.4	1950	ukjent	Muggsopp	Endrede bygningsfysiske forhold til veggen delvis under terrengnivå.
3.5	1950	2015	Muggsopp	Lekkasjer.
3.6	1950	nylig	Muggsopp	Ventiler er tettet pga. etterisolering
3.7	1967	ukjent	Muggsopp	Konstruksjonen ble oppfuktet ved etterisolering, utett dampsperre rundt ventilåpningene.
Teglsteinsvegger				
3.8	1920	ukjent	Muggsopp	Oppblomstring
Etasjeskillet				
3.9	1733	1998	Soppkader	Akkumulering av fuktighet i etasjeskillet
3.10	1927	ukjent	Råtesopp	Endrede bygningsfysiske forhold.

3.11	1994	ukjent	Ekte hussopp	Endrede bygningsfysiske forhold.
3.12	1862	ukjent	Ekte hussopp	Uheldig etterisolering mot kryperom.
3.13	1860-tallet	ukjent	Råtesopp	Uheldig etterisolering mot kryperom.
3.14	1920	nylig	Mugg på vegg	Oppblomstring av gamle skader.
3.15	1950	ukjent	Kondens på vegg	Kuldebro og vannlekkasje.

Videre finner man oversikt over noen bilder fra denne gruppe.



Figur 47 a-b. Skadesak 3.7. Muggsoppvekst på yttervegg. Bilde: Mycoteam

8.F. RF i konstruksjoner før etterisolering i ulike klima.

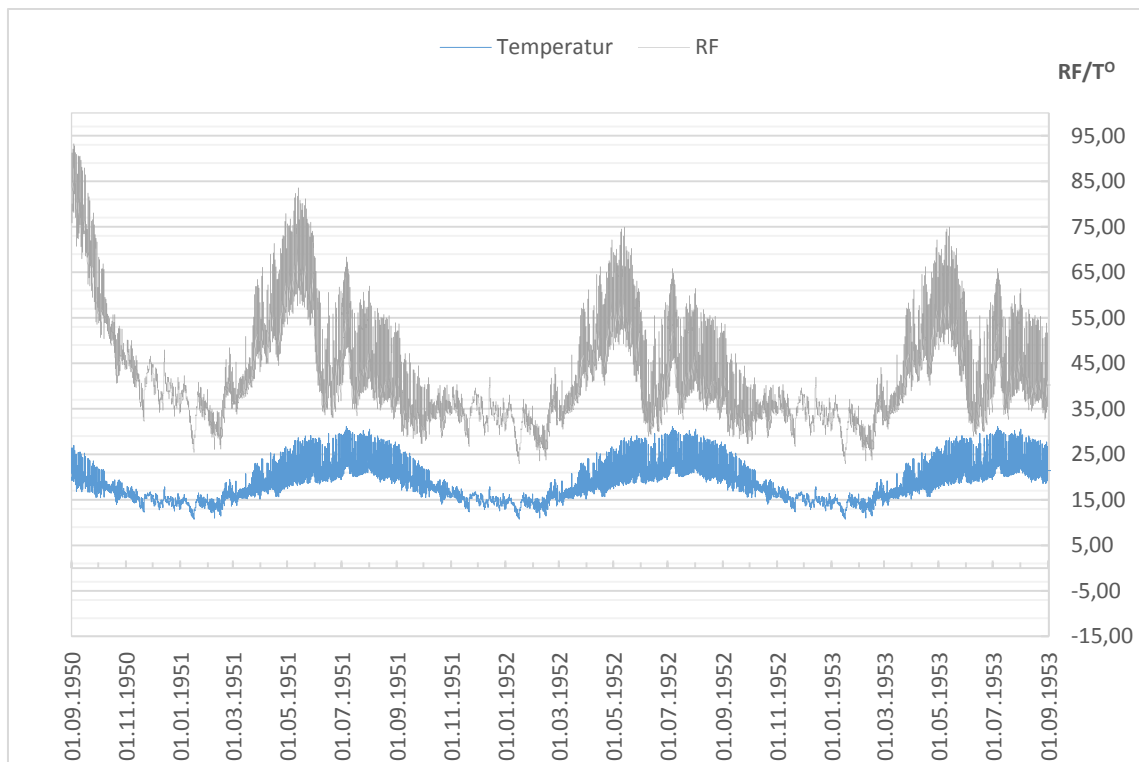
Tabell 14 Uttørking av undertak på kaldt luftet loft før etterisolering.

Materiale	RF, Bergen, [%]	RF, Oslo, [%]
Tre, undertak	86	65
Luft	85	56
Takstein	97	66
Tre, raftekasse	80	30
Tre, toppsvill	90	61
Tre, kledning	85	43
Mineralull, vegg	93	62
Mineralull, loft	95	73
Trefiberplate	91	56
Sponplate	94	60

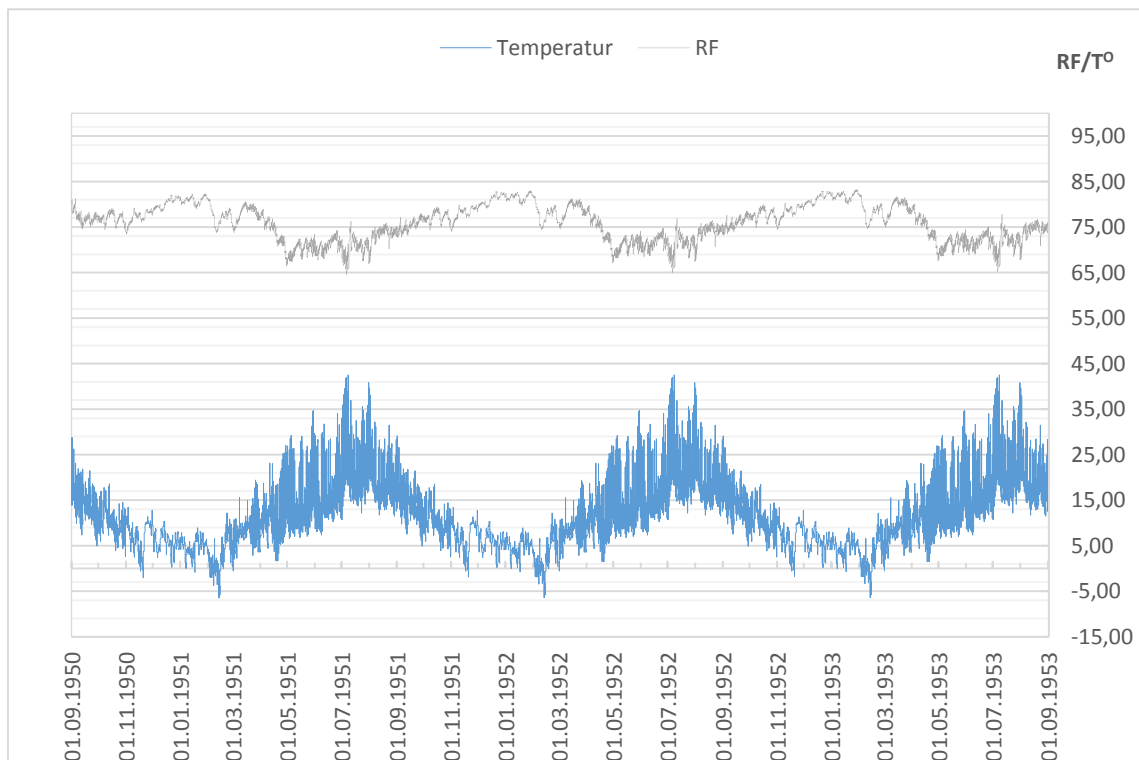
Tabell 15 Uttørking av bindingsverk av tre i Oslo og Bergen før etterisolering.

Bygningsmateriale	RF, Oslo [%]	RF, Karasjok, [%]
Trefiberplate	55	61
Isolasjon	38	83
Tre	33	56

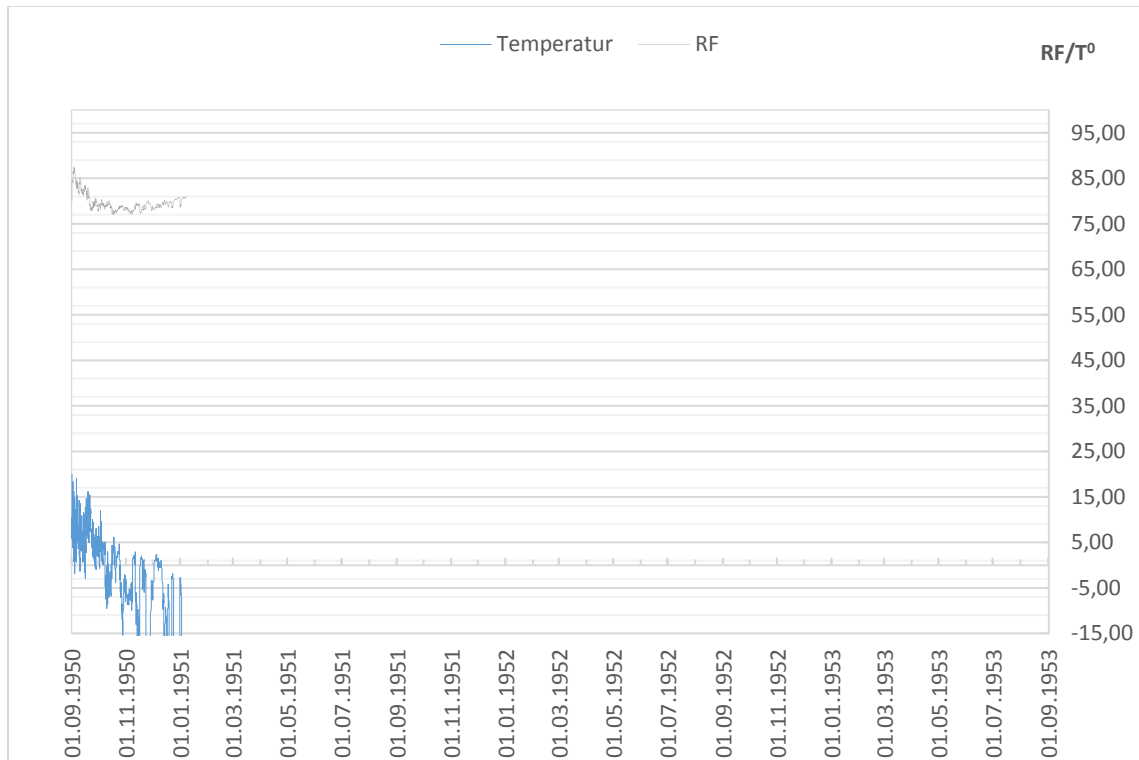
8.G. RF og temperaturer for WUFI-simuleringer.



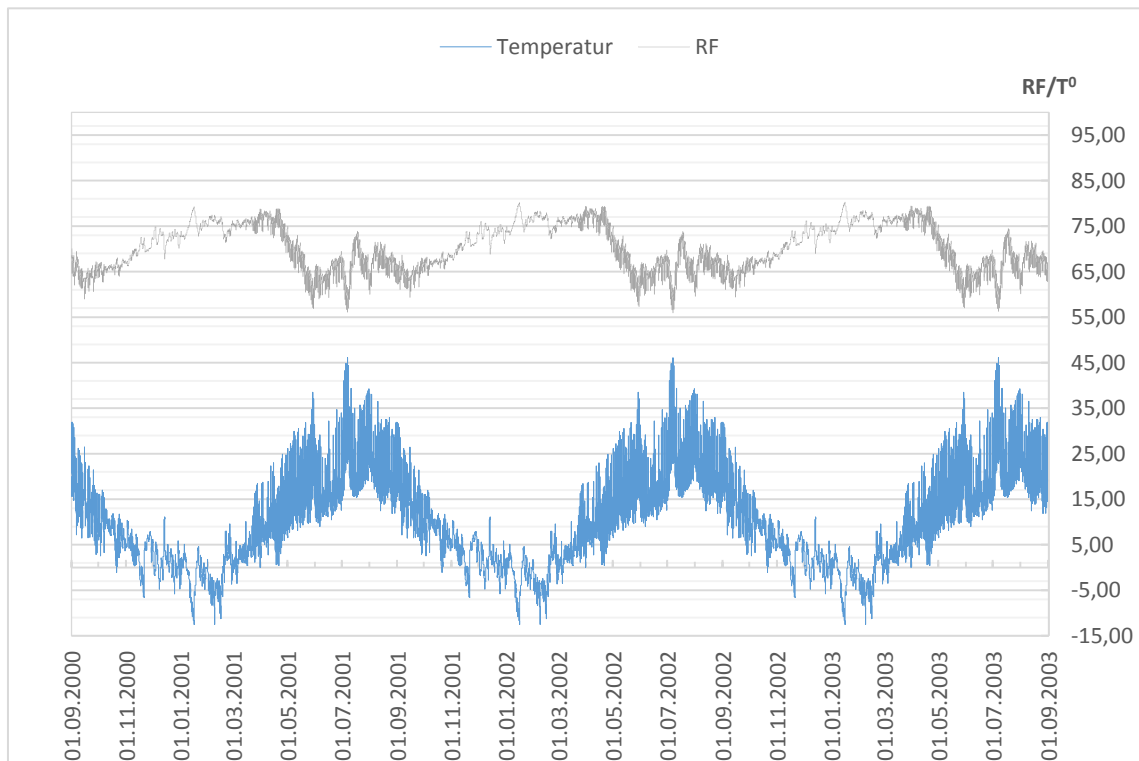
Figur 48 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.0.(O).



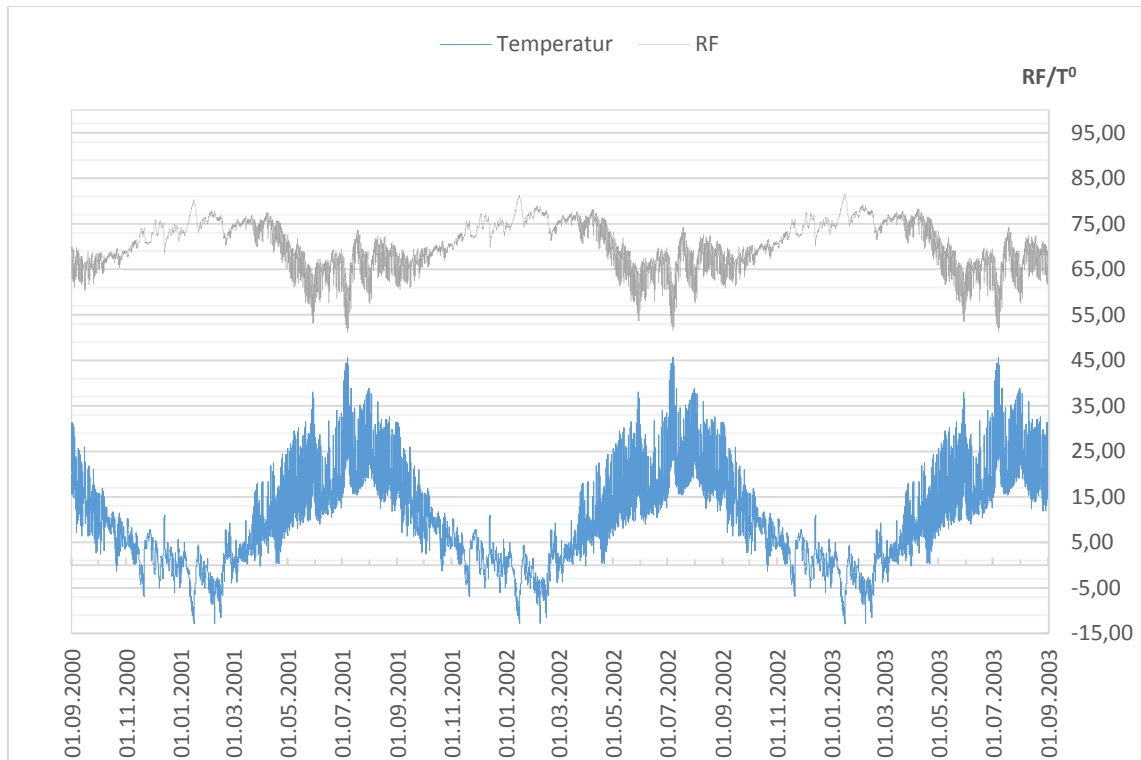
Figur 49 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.0.(B)



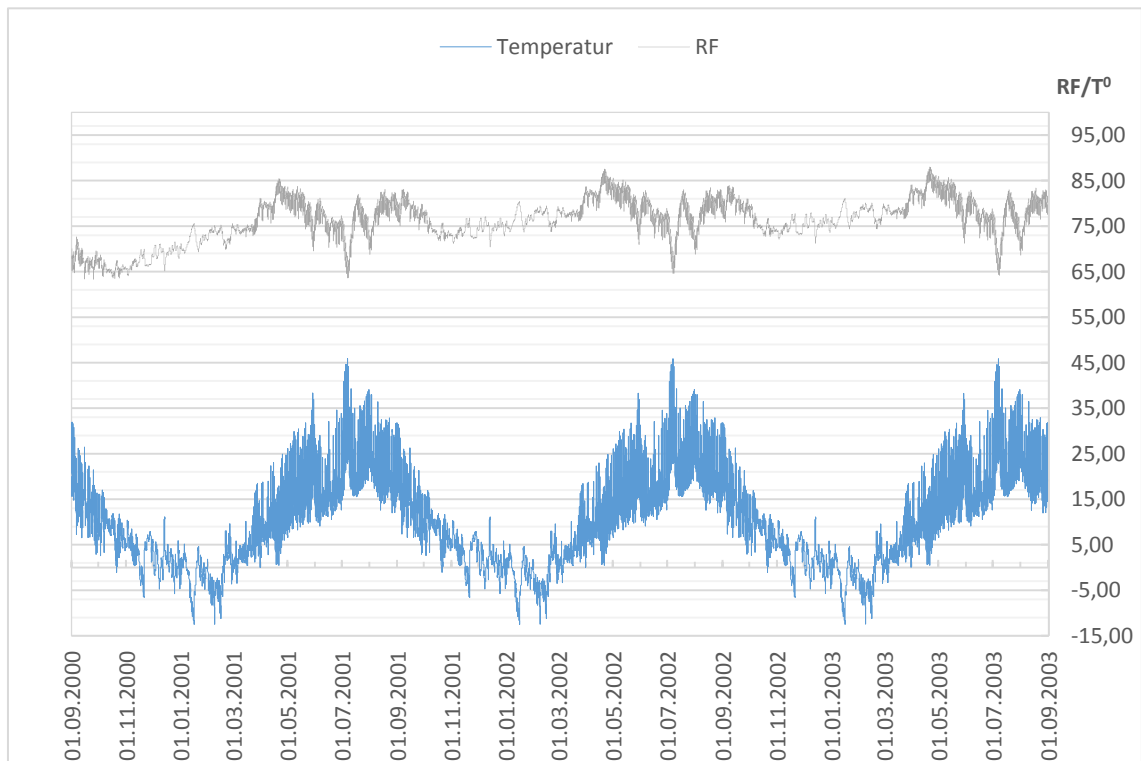
Figur 50 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.0.(K).



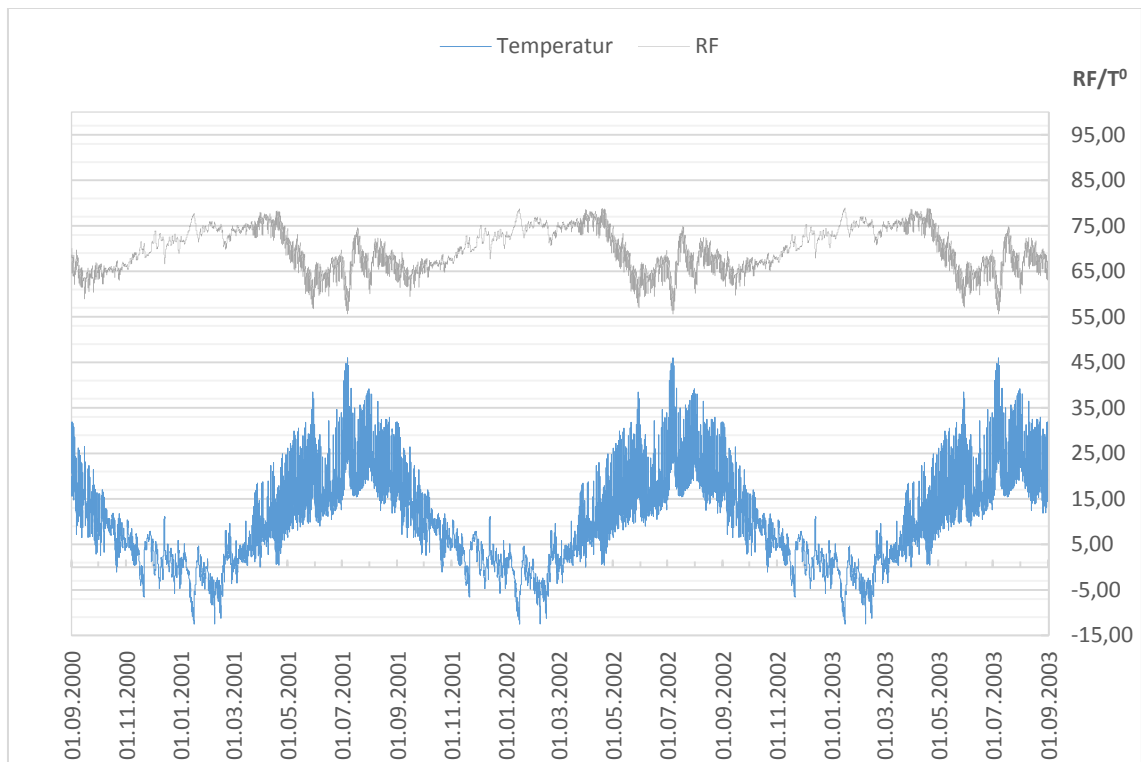
Figur 51 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.1.a.(O).



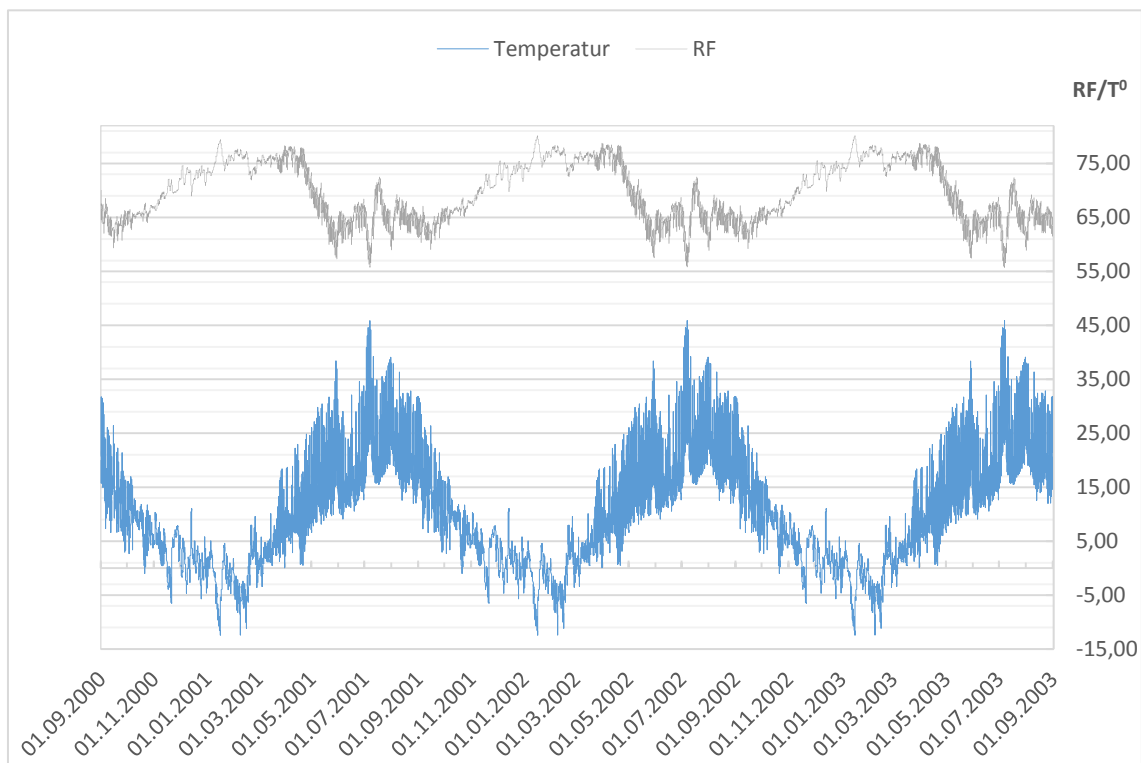
Figur 52 oversikt over RF og temperatur for simulering 1.1.b.(O).



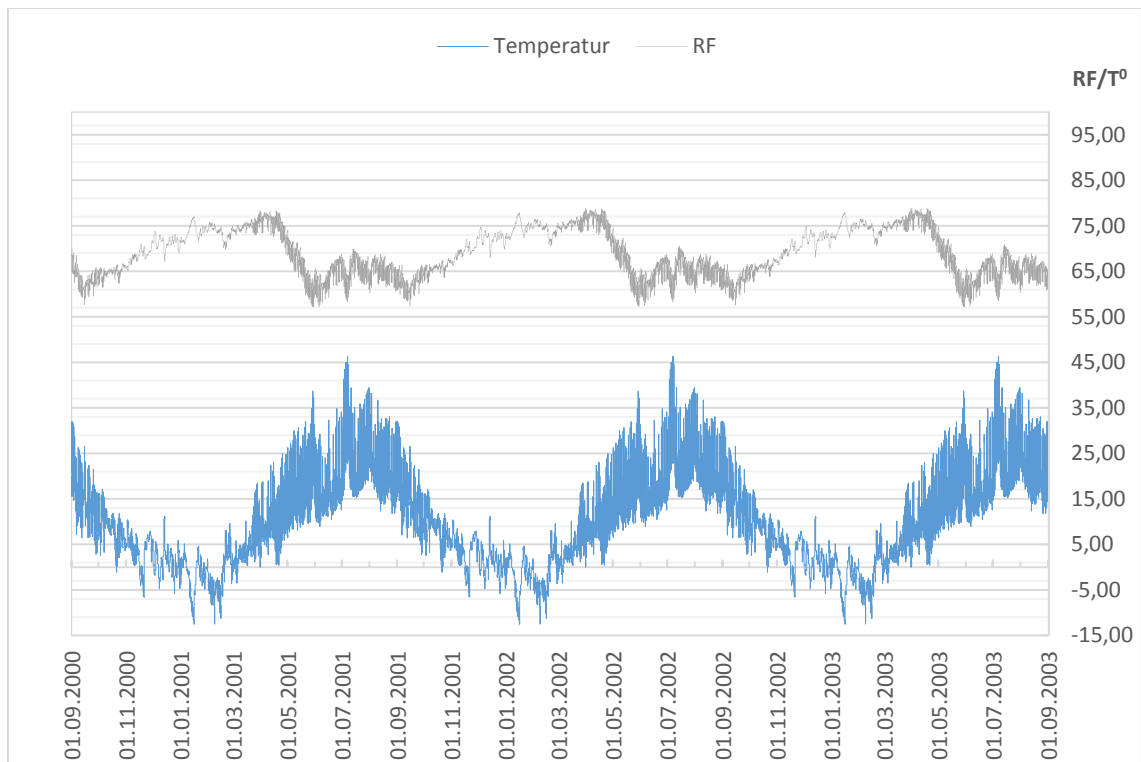
Figur 53 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.2.a.(O)



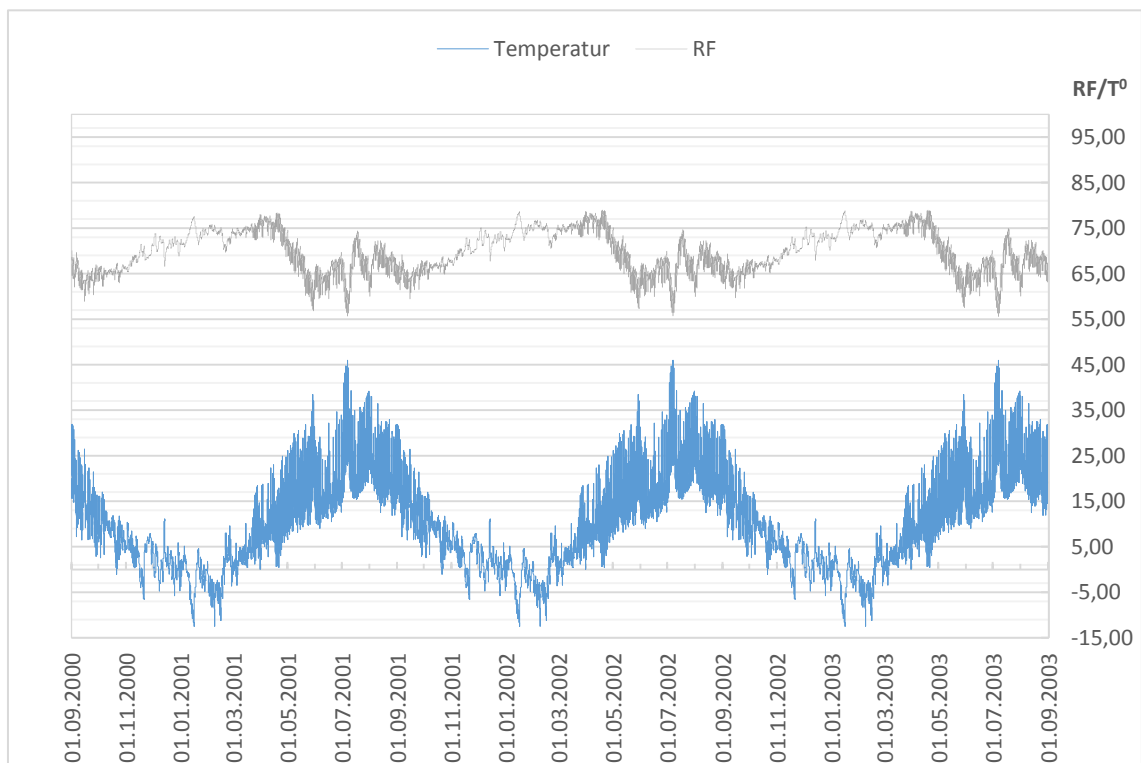
Figur 56 Oversikt over RF og temperatur for simulering 1.4.a.(O).



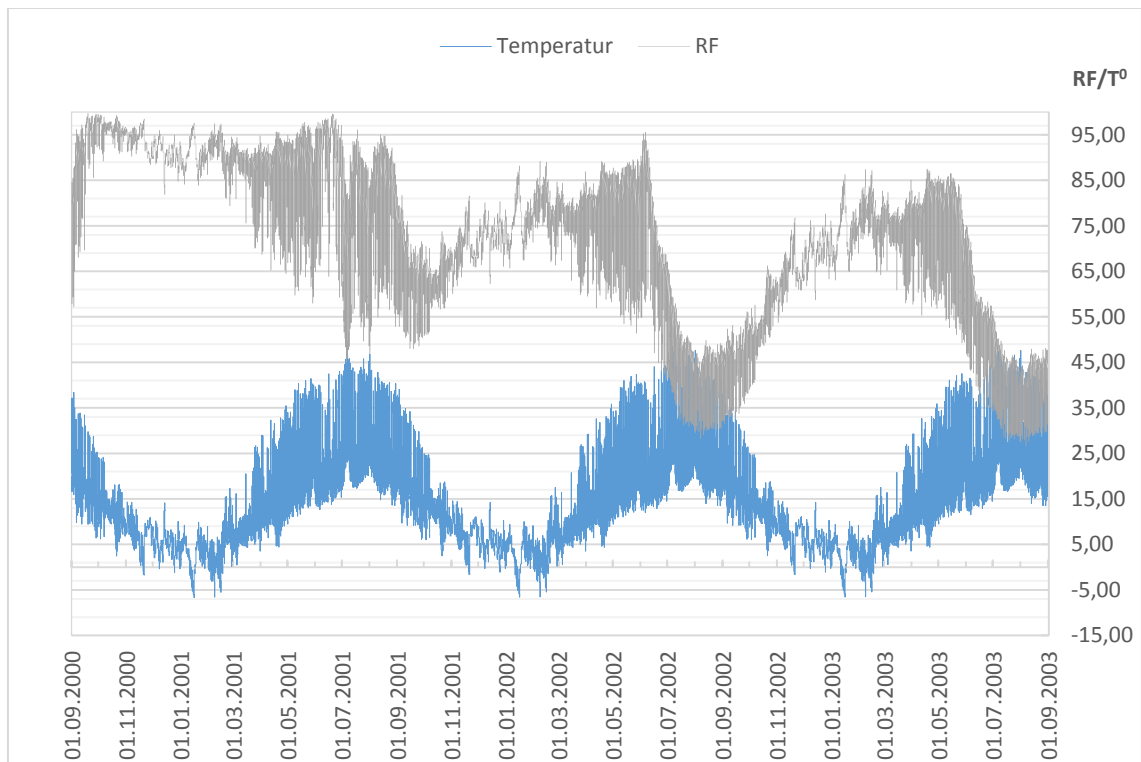
Figur 57 oversikt over RF og temperatur for simulering 1.5.a.(O).



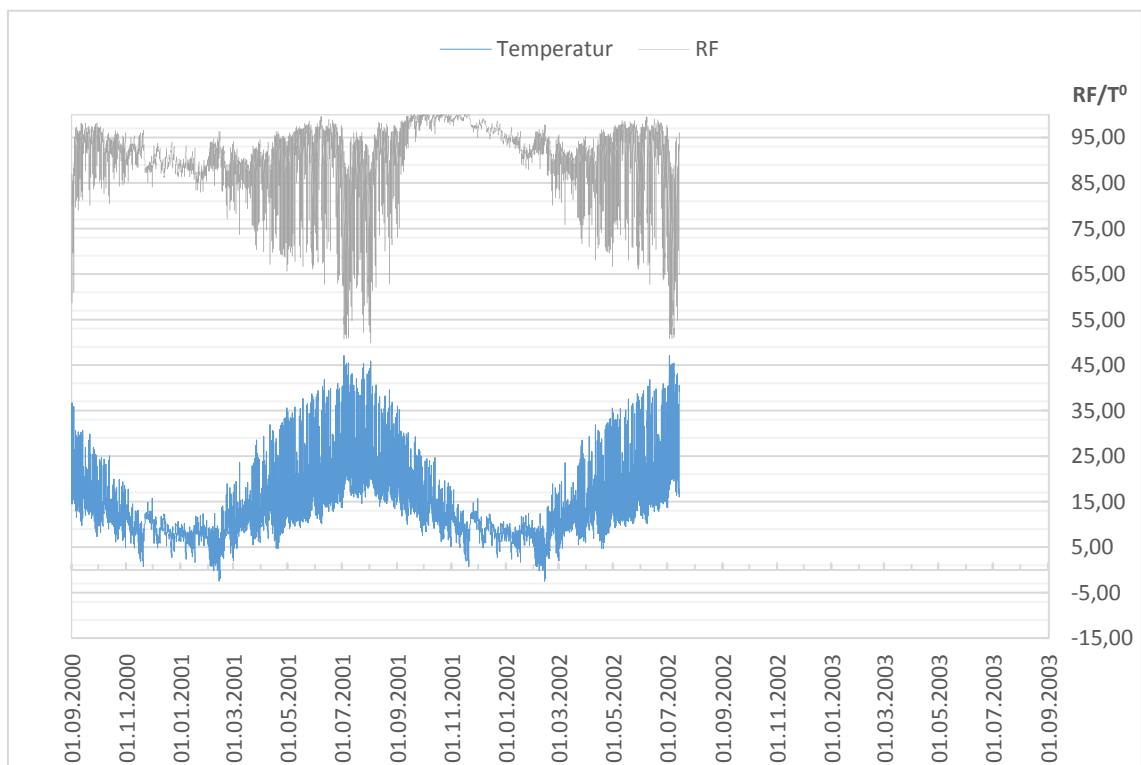
Figur 58 oversikt over RF og temperatur for simulering 1.5.b.(O)



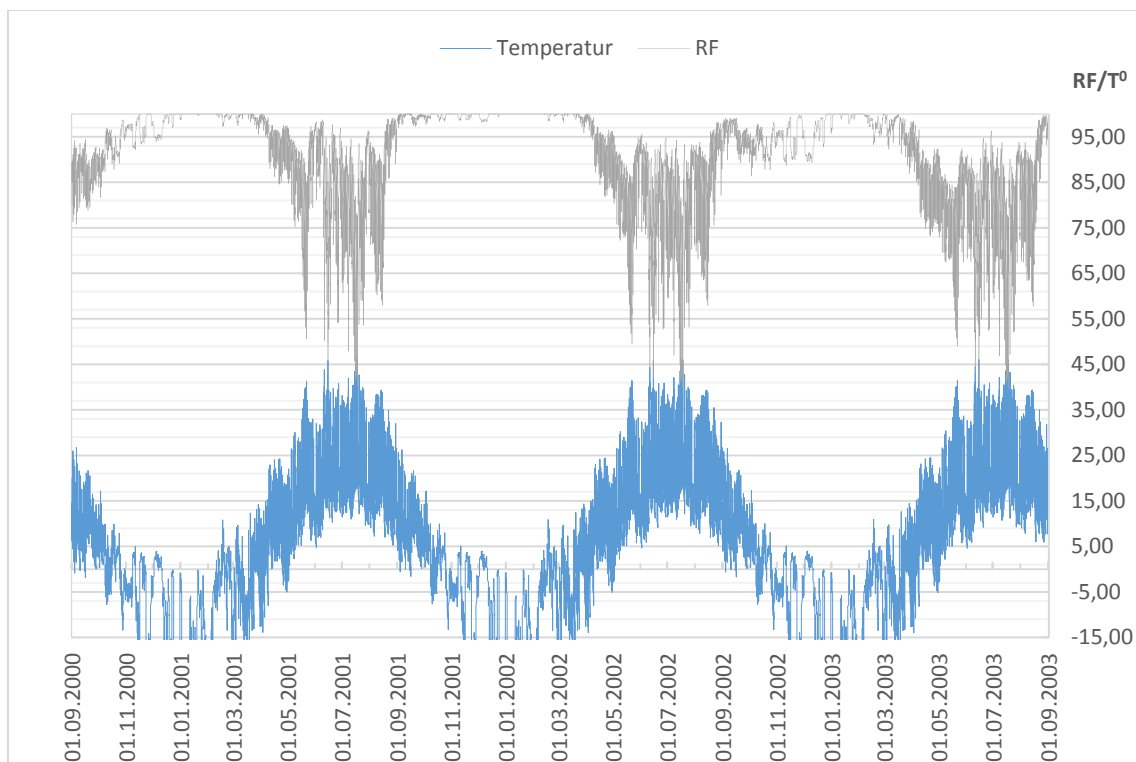
Figur 59 oversikt over RF og temperatur for simulering 1.5.c.(O).



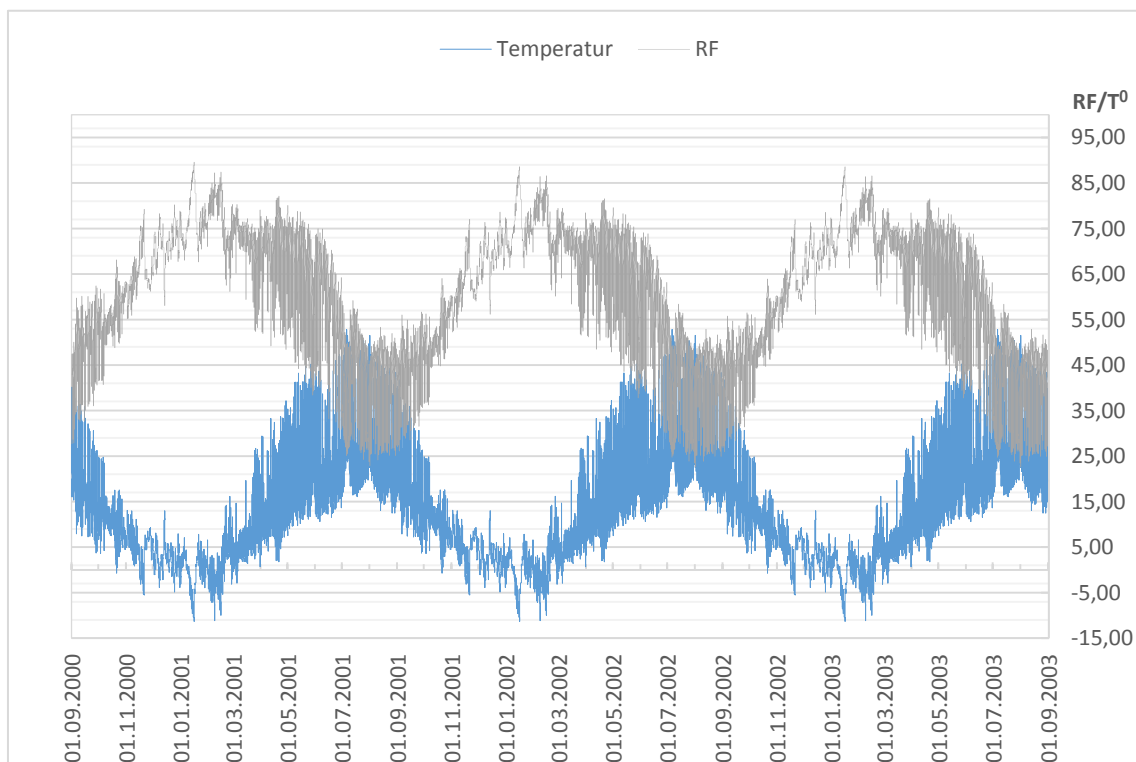
Figur 60 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.0.(O).



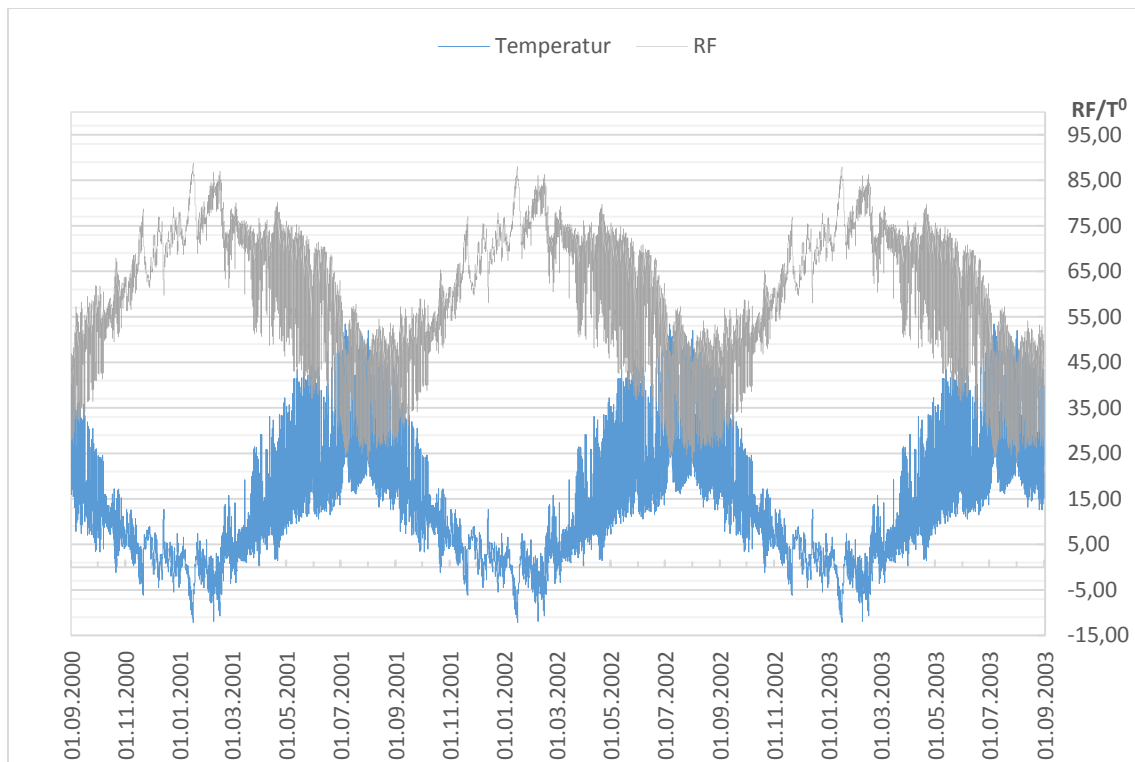
Figur 61 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.0.(B)



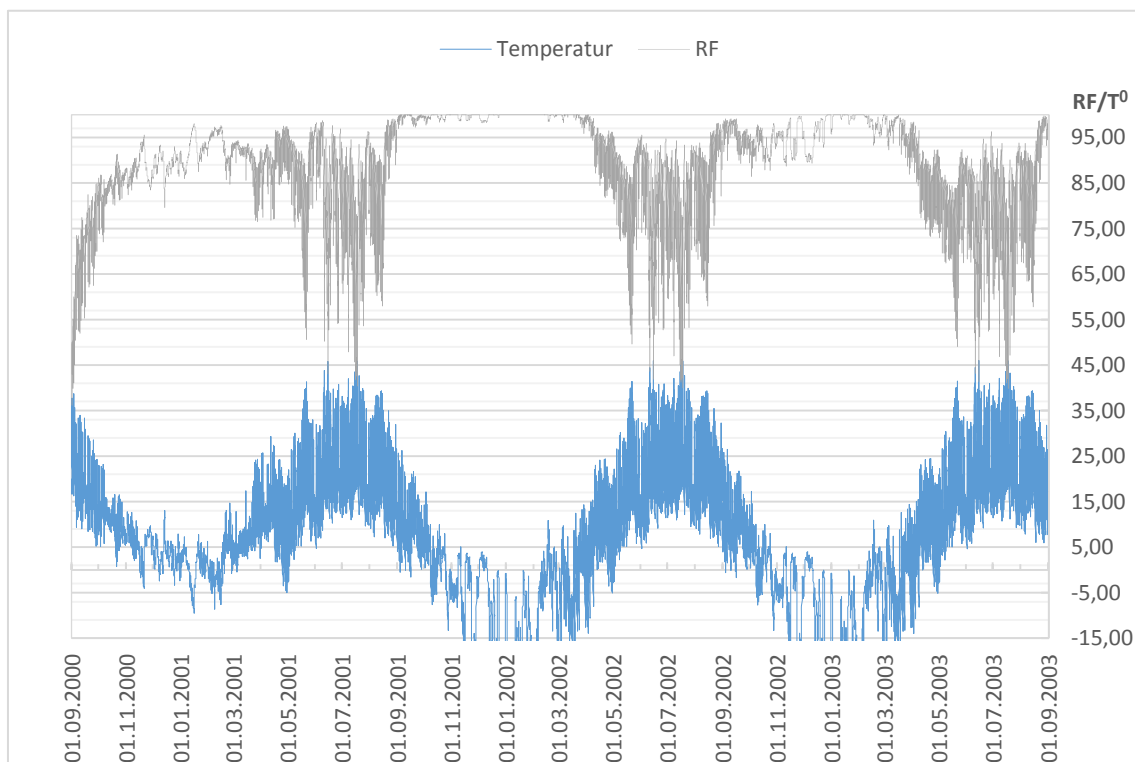
Figur 62 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.0.(K)



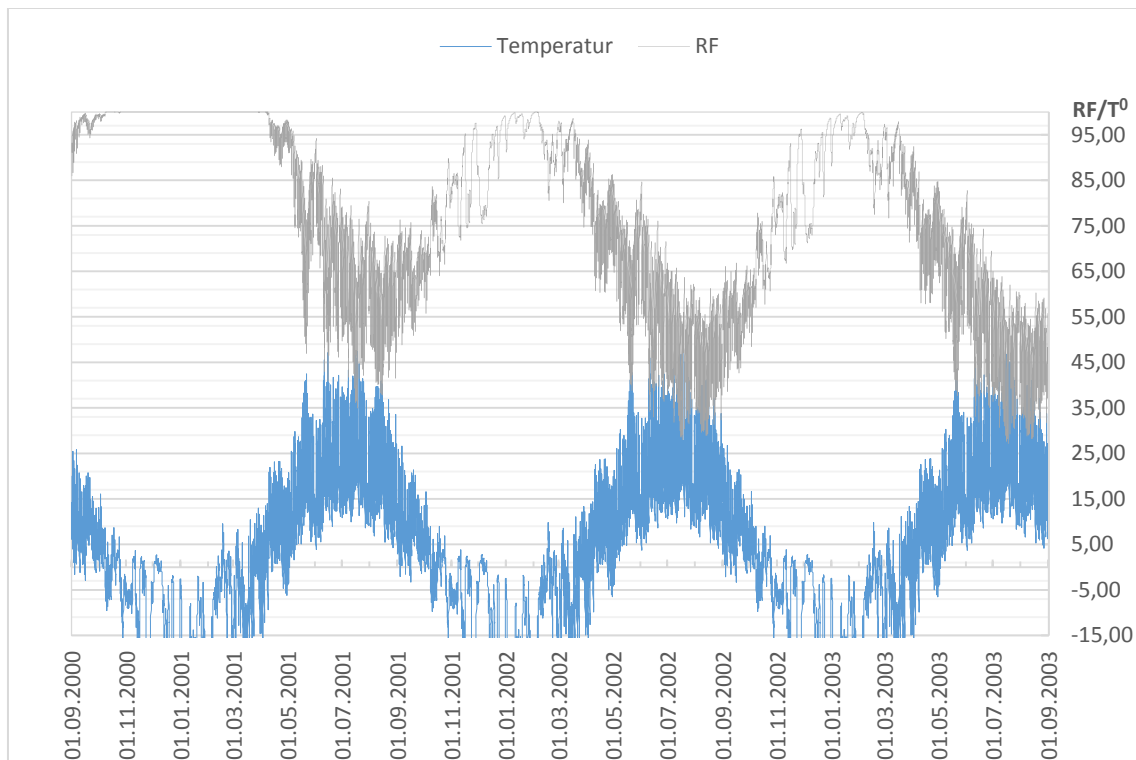
Figur 63 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.1.a.(O).



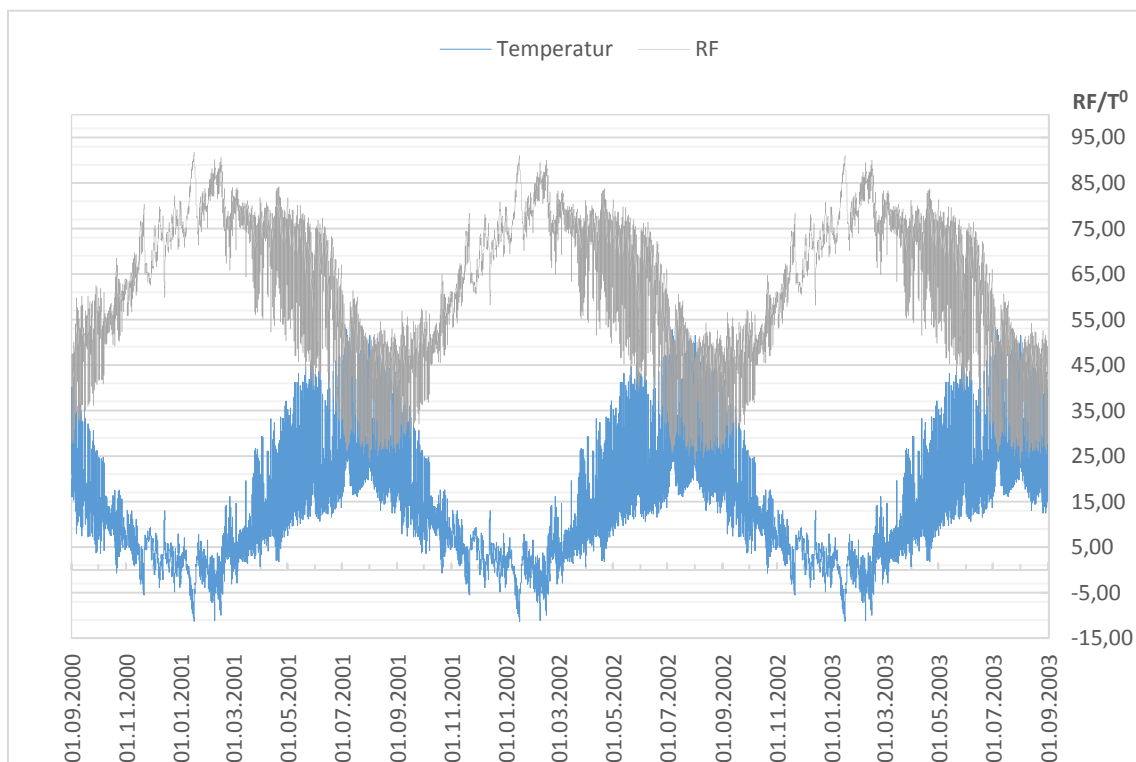
Figur 64 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.1.b.(O)



Figur 65 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.2.a.(O).



Figur 66 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.3.b.(K).



Figur 67 Oversikt over RF og temperatur for simulering 2.4.a.(O)



Norges miljø- og biovitenskapelig universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway