

Aleksander Bredeesen

# Fuktberegninger av kompakte tak med massivtreelementer

*En parameterstudie i WUFI Pro*

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Stig Geving

Juni 2020



Aleksander Bredesen

# **Fuktberegninger av kompakte tak med massivtreelementer**

*En parameterstudie i WUFI Pro*

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk  
Veileder: Stig Geving  
Juni 2020

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



Kunnskap for en bedre verden



# Forord

Denne masteroppgaven er skrevet våsemesteret 2020 ved Institutt for bygg- og miljøteknikk innenfor hovedprofilen Bygnings- og materialteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU. Oppgaven er en videreføring av arbeidet som er utført i prosjektoppgaven og skal utgjøre totalt 30 studiepoeng.

Veileder gjennom arbeidet i masteroppgaven har vært Stig Geving.

Arbeidet i masteroppgaven har vært både en utfordrende og lærerik prosess. Det har gitt meg innblikk i hvordan massivtreelementer vil oppføre seg i bygningskonstruksjoner, samt hvilke spesielle hensyn som bør tas dersom slike elementer skal benyttes i kompakte tak. Kunnskapen og erfaringene jeg har tilegnet meg gjennom arbeidet i oppgaven kommer jeg til å ta med meg videre inn i arbeidslivet.

Jeg ønsker å rette en stor takk til veileder Stig Geving for god hjelp og veiledning gjennom både prosjekt- og masteroppgavearbeidet.

Trondheim, 17. juni 2020

Aleksander Bredesen

Aleksander Bredesen



# Sammendrag

## Hensikt

Hensikten med oppgaven er å studere fuktforholdene og muggvekstrisikoen til et flatt kompakt tak med massivtreelementer med ulike konstruksjonsoppbygginger, byggfuktnivå og uteklima. Det undersøkes hvilke parametere som vil ha stor betydning for fukt- og muggvekstforholdene, og om det bør tas spesielle hensyn dersom massivtreelementer benyttes i slike konstruksjoner. Det undersøkes også om det bør brukes dampsperre eller ikke på oversiden av elementene.

## Litteraturstudie

Det gjennomføres en litteraturstudie der laboratoriemålte verdier for materialparametere til massivtre (KLT) kartlegges slik at dette kan modelleres og beregnes i dataprogrammet WUFI Pro.

## Parameterstudie

Parameterstudie går inn for å undersøke effekter av ulike parametervariasjoner på takkonstruksjonen. Det utføres fuktregninger i det endimensjonale simuleringsverktøyet WUFI Pro 6.3 og muggvekstrisikovurderinger i tilleggsprogrammet WUFI Mould Index VTT. Parameterstudie består av en hovedstudie og en tilleggsstudie med totalt 59 beregningsvarianter. Effekter av følgende parametere undersøkes: startfuktnivå (byggfuktnivå), dampsperrsjikt, uteklima, innvendig fukttilskudd, isolasjonstype og -tykkelse, taktekningstype, massivtretykkelse, skygge og strålingsabsorpsjonstall til taktekning. Det tas kontroller av RF og temperatur i ytterste mm av massivtreelementet og mineralullen for å kunne vurdere fuktforholdene og muggvekstrisikoen til beregningsvariantene.

## Resultater

Resultatene fra kontrollene i ytterste mm av mineralullen gir urealistiske verdier for fukt- og muggvekstforholdene på denne overflaten. I vurderingene i oppgaven tas det derfor hovedsakelig utgangspunkt i verdier fra kontrollene i ytterste mm av massivtreelementet. Usikkerheter og begrensninger som kan være årsaker til at resultatene for kontroll av mineralullen viser det de viser er: strålingsabsorpsjonstall til taktekning, temperaturnivå

i mineralullsjiktet, benyttede klimadata, muggvekstmodell i WUFI Mould Index VTT, begrensninger med WUFI Pro og materialparametere og -egenskaper til mineralull.

De undersøkte parameterne rangeres nedenfor ut i fra hvor stor effekt disse har på fukt- og muggvekstforholdene i takkonstruksjonen:

Stor effekt → Byggfuktnivå, dampsperrsjikt, isolasjonstype, isolasjonstykkelse

Middels effekt → Uteklima

Liten effekt → Strålingsabsorpsjonstall til taktekning, skygge, taktekningstype, massivtretykkelse

Neglisjerbar effekt → Innvendig fukttilskudd

### **Konklusjon og anbefalinger**

Byggfuktnivået og dampsperrsjikt viser seg å være de parameterne som har størst effekt på fuktforholdene, mens byggfuktnivået vil være mest kritisk for muggvekstrisikoen til konstruksjonen. Bruk av isolasjon av EPS og redusert isolasjonstykkelse viser seg å være risikabelt ved høye byggfuktnivå i massivtreelementene og bør unngås for slike tilfeller.

Om det bør brukes dampsperre eller ikke viser seg å være svært avhengig av byggfuktnivået i massivtreelementene. For lave byggfuktnivå har dette mindre betydning. Her blir bruk av dampbrems mest gunstig. For høye byggfuktnivå har dette stor betydning. Her blir sløyfing av dampsperran mest gunstig, mens bruk av dampbrems og PE-folie bør unngås.

Ved bruk av massivtreelementer i kompakte tak bør det tas spesielt hensyn til fuktsikring av elementene under byggefasen for å unngå at disse oppfuktes av nedbør.



# Summary

## **Purpose**

The purpose of this thesis is to study the moisture conditions and mold growth risks in a flat compact roof with solid wood elements with different structural structures, building moisture levels and outdoor climates. It examines which parameters that will be of great importance for the moisture and mold growth conditions, and whether special consideration needs to be taken into account when solid wood elements is used in such constructions. It also examines whether or not a vapour barrier should be used on top of the elements.

## **Literature study**

A literature study is carried out to map laboratory measured values of material parameters for solid wood elements (CLT) so that it can be modeled and calculated in the computer program WUFI Pro.

## **Parameter study**

The parameter study investigates the effects of various parameter variations on the roof structure. It is performed moisture calculations in the one-dimensional simulation tool WUFI Pro 6.3 and mold growth risk assessments in the add-on program WUFI Mould Index VTT. The parameter study consists of a main study and a supplementary study with a total of 59 calculation variants. It investigates the effects of the following parameters: initial moisture level (building moisture level), vapour barrier, outdoor climate, internal moisture grants, insulation type, insulation thickness, roofing type, solid wood thickness, shading and radiation absorption number for the roofing. Controls of RH and temperature in the outermost mm of the solid wood element and mineral wool is taken to be able to assess the moisture conditions and mold growth risk of the calculation variants.

## **Results**

The results from the controls in the outermost mm of the mineral wool gives unrealistic values for the moisture and mold growth conditions on this surface. Therefore the assessments in the thesis mainly use values from the controls in the outermost mm of the solid

wood element. Uncertainties and constraints that may cause the results from the control of the mineral wool to show the values it shows are: radiation absorption number for roofing, temperature levels in the mineral wool surface, climate data used, mold growth model in WUFI Mould Index VTT, limitations with WUFI Pro and material parameters and properties for mineral wool.

The examined parameters are ranked below based on their effect on the moisture and mold growth conditions in the roof structure:

Great effect → Building moisture level, vapour barrier, insulation type, insulation thickness

Medium effect → Outdoor climate

Small effect → Radiation absorption number for roofing, shading, roofing type, solid wood thickness

Negligible effect → Internal moisture grants

### **Conclusion and recommendations**

The building moisture level and vapour barrier are found to be the parameters that have the greatest effect on the moisture conditions, while the building moisture level will be most critical for the mold growth risk of the construction. The use of EPS insulation and reduced insulation thickness are found to be risky at high building moisture levels and should be avoided for such cases.

Whether or not a vapour barrier should be used is highly dependant on the building moisture levels in the solid wood elements. For low building moisture levels this has less significance. Here the use of a vapour retarder is most favorable. For high building moisture levels this has greater significance. Here looping the vapour barrier is most favorable, while the use of a vapour retarder or PE-foil should be avoided.

When using solid wood elements in compact roofs, special consideration should be given to moisture protection of the elements during the construction phase to prevent them from being wetted by rain.

---

# Innhold

<b>Forord</b>	<b>I</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>III</b>
<b>Summary</b>	<b>V</b>
<b>Innhold</b>	<b>VII</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>XII</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Forarbeid . . . . .	2
1.3 Formål . . . . .	3
1.4 Avgrensninger . . . . .	4
1.5 Oppbygging . . . . .	4
<b>2 Kompakte tak</b>	<b>6</b>
2.1 Oppbygging med massivtreelementer som bærekonstruksjon . . . . .	6
2.2 Fukttransport og fuktvandring . . . . .	8
2.3 Fuktproblematikk . . . . .	9
2.4 Dampsperrer . . . . .	10
2.5 Muggsopp . . . . .	11
<b>3 Hygrotermiske egenskaper massivtre (KLT)</b>	<b>14</b>
3.1 Bakgrunn og hensikt . . . . .	14
3.2 Modellering av KLT i WUFI Pro . . . . .	14
3.3 Utgangspunkt . . . . .	15
3.4 Materialparametere . . . . .	17
3.4.1 Romdensitet . . . . .	17
3.4.2 Porøsitet . . . . .	17
3.4.3 Fuktlagringsfunksjon . . . . .	18

---

3.4.4	Termisk konduktivitet . . . . .	20
3.4.5	Vanndampdiffusjonsmotstand . . . . .	21
3.4.6	Væsketransport . . . . .	22
3.4.7	Varmekapasitet . . . . .	23
3.5	Oppsummering og vurdering . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Parameterstudie WUFI Pro</b>	<b>26</b>
4.1	Bakgrunn og motivasjon . . . . .	26
4.2	Problemdefinisjon . . . . .	27
4.2.1	Målsetning . . . . .	27
4.2.2	Konstruksjon . . . . .	27
4.2.3	Fuktkilder . . . . .	28
4.2.4	Mulige fuktproblemer . . . . .	28
4.3	Beregningsoppsett og inngangsverdier . . . . .	28
4.3.1	Beregningsverktøy . . . . .	28
4.3.2	Ytelseskontroller . . . . .	32
4.3.3	Uteklima . . . . .	33
4.3.4	Inneklima . . . . .	33
4.3.5	Materialparametere . . . . .	34
4.3.6	Beregningsperiode . . . . .	39
4.3.7	Startbetingelser . . . . .	39
4.3.8	Øvrige parametere . . . . .	41
4.4	Parametervariasjoner og beregningstilfeller . . . . .	43
4.4.1	Parametervariasjoner . . . . .	43
4.4.2	Beregningstilfeller hovedstudie . . . . .	45
4.4.3	Beregningstilfeller tilleggsstudie . . . . .	46
4.5	Begrensninger og usikkerheter . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Resultater og vurderinger hovedstudie</b>	<b>49</b>
5.1	Effekt av dampspersesjikt med ulike startfuktnivå . . . . .	50
5.1.1	Resultater - Variasjon i RF og muggindeks . . . . .	51
5.1.2	Maksimal muggindeks og trafikklysfarge . . . . .	55
5.1.3	Vurderinger - Kontroll ytterste mm av massivtreelement . . . . .	56
5.1.4	Vurderinger - Kontroll ytterste mm av mineralull . . . . .	59
5.2	Effekt av uteklima med ulike dampspersesjikt . . . . .	61
5.2.1	Resultater - Variasjon i RF og muggindeks . . . . .	62
5.2.2	Maksimal muggindeks og trafikklysfarge . . . . .	66
5.2.3	Vurderinger - Kontroll ytterste mm av massivtreelement . . . . .	67

5.2.4	Vurderinger - Kontroll ytterste mm av mineralull . . . . .	69
5.3	Oppsummering og evaluering . . . . .	71
5.3.1	Beregningstilfelle 1 - 10 . . . . .	71
5.3.2	Usikkerheter og begrensninger ved kontroll ytterste mm av mineralullen . . . . .	74
5.3.3	Valg til tilleggsstudie . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Resultater og vurderinger tilleggsstudie</b>	<b>81</b>
6.1	Videreføringstilfelle fra hovedstudie . . . . .	83
6.2	Effekt av strålingsabsorpsjonstall . . . . .	84
6.3	Effekt av innvendig fukttilskudd . . . . .	87
6.4	Effekt av isolasjonstype . . . . .	88
6.5	Effekt av taktekning . . . . .	90
6.6	Effekt av massivtretykkelse . . . . .	91
6.7	Effekt av isolasjonstykkelse . . . . .	94
6.8	Effekt av skygge . . . . .	97
6.9	Oppsummering og evaluering . . . . .	100
<b>7</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>104</b>
<b>8</b>	<b>Videre Arbeid</b>	<b>106</b>
	<b>Referanser</b>	<b>108</b>
<b>A</b>	<b>Beskrivelse av muggvekstmodell WUFI Mould Index VTT</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>U-verdi beregninger</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Fuktmålingsoversikt massivtredekker ZEB-laboratoriet</b>	<b>C-1</b>
<b>D</b>	<b>Grafer for kontroll av massivtreelement</b>	<b>D-1</b>
D.1	Beregningstilfeller tilleggsstudie . . . . .	D-1
D.1.1	Variasjon i RF for ytterste mm av massivtreelement . . . . .	D-2
D.1.2	Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement . . . . .	D-4
<b>E</b>	<b>Grafer for kontroll av mineralull</b>	<b>E-1</b>
E.1	Beregningstilfeller hovedstudie . . . . .	E-1
E.1.1	Variasjon i RF for ytterste mm av mineralull . . . . .	E-2
E.1.2	Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull . . . . .	E-6
E.2	Beregningstilfeller tilleggsstudie . . . . .	E-10
E.2.1	Variasjon i RF for ytterste mm av mineralull . . . . .	E-10

E.2.2 Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull . . . . .E-18

# Nomenklatur

Symbol	Beskrivelse	Enhet
$(\frac{dMI}{dt})_0$	Reduksjon muggveksthastighet trematerialer	—
$(\frac{dMI}{dt})_{mat}$	Reduksjon muggveksthastighet andre materialer	—
$A_w$	Vannabsorpsjonskoeffisient	$\frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}$
$C$	Spesifikk varmekapasitet	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$C_{mat}$	Reduksjonsfaktor	—
$D_{ws}$	Fuktdiffusivitetskoeffisient oppsuging	$\frac{m^2}{s}$
$D_{ww}$	Fuktdiffusivitetskoeffisient omfordeling	$\frac{m^2}{s}$
$H$	Entalpi	$\frac{J}{kg}$
$MI$	Muggindeks	—
$MI_{max}$	Maksimal muggindeks	—
$R$	Varmemotstand	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
$RF_i$	Varmemotstand til sjikt	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
$RF_{crit}$	Kritisk relativ fuktighet	%
$RF_{min}$	Minste relativ fuktighet	%
$R_{se}$	Utvendig overgangsmotstand	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
$R_{si}$	Innvendig overgangsmotstand	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
$R_{tot}$	Total varmemotstand	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
$SQ$	Overflatekvalitet	—
$S_d$	Ekvivalent luftlagstykkelse	$m$
$T$	Temperatur	$K/^\circ C$
$U$	Varmegjennomgangskoeffisient	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$W$	Treslag	—
$^\circ C$	Grader Celsius	$^\circ C$
$\delta_a$	Vanndamppermeabilitet luft	$\frac{kg}{m \cdot s \cdot Pa}$
$\delta_s$	Materialets vanndamppermeabilitet	$\frac{kg}{m \cdot s \cdot Pa}$
$\epsilon$	Porøsitet	$\frac{m^3}{m^3}$
$\frac{dMI}{dt}$	Muggveksthastighet	—
$\lambda$	Termisk konduktivitet	$\frac{W}{m \cdot K}$

Symbol	Beskrivelse	Enhet
$\mu$	Vanndampmotstandsfaktor	—
$\rho$	Densitet	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_w$	Densitet vann	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_{cv}$	Celleveggens densitet	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_{s.tørr}$	Materialets tørrdensitet	$\frac{kg}{m^3}$
$k_1$	Muggvekst koeffisient	—
$k_2$	Muggvekst koeffisient	—
$u$	Fuktinnhold per mengde tørrstoff	vekt-%
$w$	Fuktinnhold per volumenhet tørrstoff	$\frac{kg}{m^3}$
$w_{80}$	Fuktinnhold ved 80% RF	$\frac{kg}{m^3}$
$w_{cap}$	Fuktinnhold ved fri vannmetning	$\frac{kg}{m^3}$
$w_{cr}$	Kritisk fuktinnhold	$\frac{kg}{m^3}$
$w_{hygr}$	Fuktinnhold ved hygroskopisk grense	$\frac{kg}{m^3}$



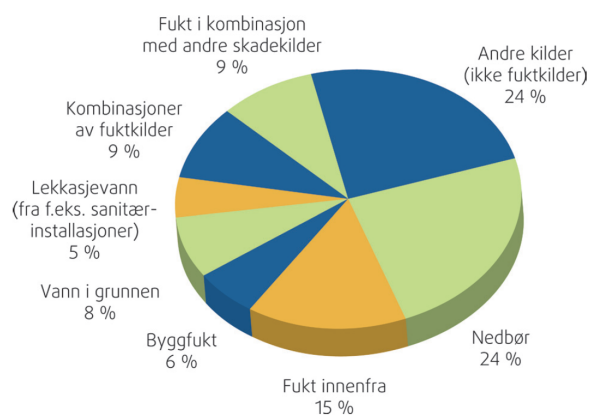
---

# Kapittel 1

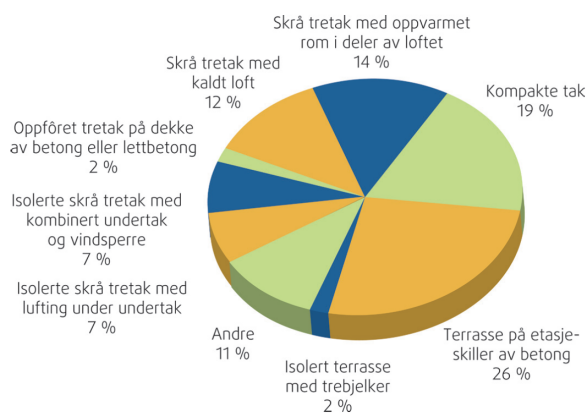
## Introduksjon

### 1.1 Bakgrunn

I mer enn 50 år har SINTEF Byggforsk kartlagt byggskader og årsakskilden til disse i norske bygninger. Denne kartleggingen er viktig for å kunne minske byggskader som utgjør et stort problem i byggebransjen. Resultatene fra kartleggingen viser at over 75 % av alle prosessforårsakede byggskader skyldes fukt i en eller annen form (Byggforskserien 2010). Se figur 1.1.1 nedenfor til venstre.



**Figur 1.1.1:** Fordeling av prosessforårsakede byggskader i forhold til skadekilde (Byggforskserien 2010). Gjelder tidsperioden 1993 - 2002.



**Figur 1.1.2:** Fordeling av prosessforårsakede byggskader på tak i forhold til type tak (Byggforskserien 2010). Gjelder tidsperioden 1993 - 2002.

En av de mest skadeutsatte konstruksjonstypene er tak, og disse står for nesten  $\frac{1}{4}$  av alle byggskader (Byggforskserien 2010). Figur 1.1.2 ovenfor til høyre illustrer fordelingen av byggskader i tilknytning til tak i forhold til type tak. Figuren viser at kompakte tak og terrasse på etasjeskiller av betong er de mest skadeutsatte taktypene.

Bruk av massivtreelementer i bygningskonstruksjoner har blitt en stadig mer populær byggemetodikk de siste 20 årene, helt siden disse først ble anvendt i Norge i en etasjeskiller i Asker i 1998 (Byggforskserien 2001). Massivtreelementer består av lameller (bord eller plank) av trevirke som er satt sammen til elementer ved bruk av ulike festemetoder. I dag er bruksområdet en del større og slike elementer brukes i alt fra etasjeskillere, inner- og yttervegger, skrå og flate tak til svalganger og balkonger (Aasheim et al. 2006, Aarstad et al. 2008).

Selv om bruk av massivtreelementer har blitt en populær byggemetodikk, eksisterer det fortsatt en del utfordringer i bransjen som det er mye usikkerhet rundt. Utfordringene er som regel tilknyttet bruk av massivtreelementer i konstruksjoner som utsettes for fukt, eksempelvis tak. Årsaken til dette er at fukt og massivtre utgjør et stort problem som kan føre til negative konsekvenser for både konstruksjonen og innemiljøet i bygningen. For å bedre kunne legge til rette for bruk av massivtreelementer i slike konstruksjoner, samt redusere antall byggskader i norske bygningskonstruksjoner, vil det være et behov for mer forskning og undersøkelser rundt dette temaområdet.

## 1.2 Forarbeid

Høsten 2019 skrev undertegnede en prosjektoppgave rundt temaområdet fukt- og lufttett-hetsproblematikk med bruk av massivtreelementer. Arbeidet er dokumentert i Bredesen (2019) og omtales videre som prosjektoppgaven. Her ble det gjennomført et omfattende litteratursøk rundt de mest fremtredende fukt- og lufttekniske problemstillingene ved bruk av massivtreelementer i ytterveggs- og takkonstruksjoner, med formål å undersøke hvordan disse kan håndteres best mulig. Det ble også utført fuktmålinger i vegger, dekker og søyler i massivtre på et reellt byggeprosjekt på Gløshaugen i Trondheim. Hensikten med disse målingene var å skaffe rede for typiske fuktinnholds nivåer for massivtre som er utsatt for nedbør under montasje. Siden masteroppgaven omhandler fukt i relasjon med massivtreelementer, er det fokusert på disse resultatene nedenfor. Deler av arbeidet i masteroppgaven vil ta utgangspunkt i resultater fra litteratursøket og fuktmålingene i prosjektoppgaven.

Litteratursøket i prosjektoppgaven belyste at to av de mest omstridte problemstillingene i bransjen med hensyn på fukt er hvordan håndtere fuktpåvirkning av massivtreelementer under byggefasen og om det skal brukes dampsperre eller ikke i ytterveggs- og takkonstruksjoner med massivtreelementer.

Fuktpåvirkning under byggefasen ble trukket frem som en stor utfordring siden massivtreelementer kan oppta store mengder vann ved fuktpåkjennning. Elementene er såpass

massive at byggfukt vil bruke lang tid på å tørke ut. Dersom konstruksjonene lukkes før fuktigheten har fått mulighet til å tørke ut, kan dette gi store fuktskader på massivtreelementene og konstruksjonen generelt. Dette kan derimot håndteres ved bruk av ulike fuktsikringstiltak under byggefasen. To av tiltakene som ble trukket fram er bruk av byggeteltsystemer over konstruksjonen eller byggetidstekning på oversiden av massivtreelementene. Av disse ble byggeteltsystemer belyst til å være mest effektivt.

Om det skal brukes dampsperre eller ikke på oversiden av massivtreelementene viste seg å være et omdiskutert tema i byggebransjen. Her mente noen at en ordinær dampsperre fortsatt var den sikreste løsningen, mens andre mente bruk av dampbrems eller ingen dampsperre var en bedre tilnærming på grunn av massivtrees egenskaper. Det ble ikke gitt noen klare anbefalinger eller veiledninger rundt dette, og det kan videre antas at ulike tilnærminger til bruk av dampsperre kan benyttes. Den røde tråden som derimot knyttet de fleste synspunktene sammen var at innvendig lufttetthet var kritisk og måtte ivaretas på en eller annen måte.

Fuktmålingene ble utført over en periode hvor bygningen gradvis ble lukket. Dette gjorde det mulig å studere uttørkingsprosessen til massivtre som har vært påkjent av nedbør. Resultatene viste at massivtre kan oppnå svært høye fuktnivåer og at disse bruker lang tid til å tørke ut til akseptable fuktnivåer. Av de ulike bygningsdelene det ble målt i ble dekkekonstruksjonene mest fuktig. Under byggefasen ble det ikke utført noen spesielle fuktsikringstiltak, og viktigheten av dette vises derfor til å være av stor betydning.

## **1.3 Formål**

I denne oppgaven studeres fuktforholdene og muggvekstrisikoen til et flatt kompakt tak med massivtreelementer med ulike konstruksjonsoppbygginger, byggfuktnivå og uteklimate. Det undersøkes hvilke parametere som vil ha stor betydning for fukt- og muggvekstforholdene, og om det bør tas spesielle hensyn dersom massivtreelementer benyttes i slike konstruksjoner. Det undersøkes også om det bør brukes dampsperre eller ikke på oversiden av elementene.

For å undersøke de ulike parameterne utføres det fuktberegninger i det endimensjonale simuleringsverktøyet WUFI Pro og muggvekstrisikovurderinger i tilleggsprogrammet WUFI Mould Index VTT. Det gjennomføres også en litteraturstudie der det kartlegges laboratoriemålte verdier for materialparametere til massivtre (KLT) slik at dette kan modelleres i WUFI Pro.

## 1.4 Avgrensninger

Denne masteroppgaven er skrevet i løpet av vårsemesteret 2020 og skal representere totalt 30 studiepoeng. I oppgaven er det derfor blitt gjort en del avgrensninger med hensyn til tidsperspektivet og arbeidsmengde.

Opgaven vil kun se på fukt- og varmetekniske forhold i massivtrekonstruksjonen. Andre problemstillinger, eksempelvis tilknyttet lyd og brann, er ikke blitt undersøkt.

Opgaven baserer seg hovedsakelig på arbeidet som utføres i beregningsprogrammet WUFI Pro. For å kunne modellere massivtre (KLT) i programmet måtte flere materialparametere være tilstede. Disse ble i oppgaven ikke målt ved laboratorieundersøkelser av massivtre, men ble i stedet kartlagt gjennom en litteraturstudie der det ble undersøkt hva andre troverdige kilder hadde målt disse til å være.

I parameterstudie i oppgaven ble det undersøkt totalt 59 beregningsvarianter. Det ville også vært interessant å undersøke flere varianter og kombinasjoner av disse, derimot måtte arbeidet begrenses med hensyn på tidssomfanget og arbeidskapasitet. Kapittel 8 gir en beskrivelse av andre parametere og konstruksjonsvarianter som det hadde vært interessant å undersøke i relasjon med hva som er undersøkt i oppgaven.

## 1.5 Oppbygging

Opgaven er inndelt i 8 hovedkapitler etterfulgt av 5 vedlegg. Nedenfor vil det gis en kort beskrivelse av hver av disse.

Innledningsvis i kapittel 1 vil bakgrunnen og formålet i oppgaven presenteres. Her vil det også inkluderes en kort beskrivelse av forarbeidet i prosjektoppgaven, samt hvilke avgrensninger som er utført i oppgaven.

Siden oppgaven hovedsakelig omhandler fukt i kompakte tak med massivtreelementer vil det i kapittel 2 beskrives relevant bakgrunnsinformasjon tilknyttet kompakte tak. Momenter som blir belyst her er: oppbyggingen av slike tak dersom massivtreelementer benyttes som bærekonstruksjon, hvordan vil fukt transporteres i slike tak, hvilke fuktproblemer som ofte kan oppstå, ulike typer dampsperrer som er mulig å bruke og til slutt hvilke forutsetninger som må være tilstede for at muggvekst kan forekomme.

I oppgaven blir det utført en stort parameterstudie av et kompakt tak med massivtreelementer i det endimensjonale beregningsverktøyet WUFI Pro. For å kunne modellere massivtre (KLT) i programmet ble det i kapittel 3 utført en litteraturstudie med formål å

kartlegge laboratoriemålte verdier for materialparametere til massivtre. Videre i kapittel 4 vil det gis en nøye beskrivelse av parameterstudie i oppgaven. Her vil problemdefinisjonen først bli beskrevet, deretter blir beregningsoppsettet og inngangsverdiene nøye gjennomgått og til slutt blir parametervariasjonene og beregningstilfellene i studie presentert. Beregningstilfellene i parameterstudie ble det opp i to deler: en hovedstudie og en tilleggsstudie. Parametervariasjonene som utføres i hver av disse er oppsummert og presentert i tabeller på slutten av kapittel 4.

Kapittel 5 og 6 presenterer resultatene og vurderingene for hoved- og tilleggsstudie. Her blir resultatene til hvert beregningstilfelle først presentert og deretter vurdert. Til slutt i hvert av kapitlene vil det gis en oppsummering og evaluering av konstruksjonsvariantene som er undersøkt.

Avslutningsvis i kapittel 7 og 8 blir det gitt en konklusjon på arbeidet i studie og presentert forslag til videre arbeid rundt forskningstemaområdet.

Data som ikke ble ansett som hensiktsmessig å presentere sammen med teksten er plassert i vedlegg. Dette er ment for å øke lesbarheten til oppgaven. Det vil her totalt være 5 vedlegg (Vedlegg A - Vedlegg E).

---

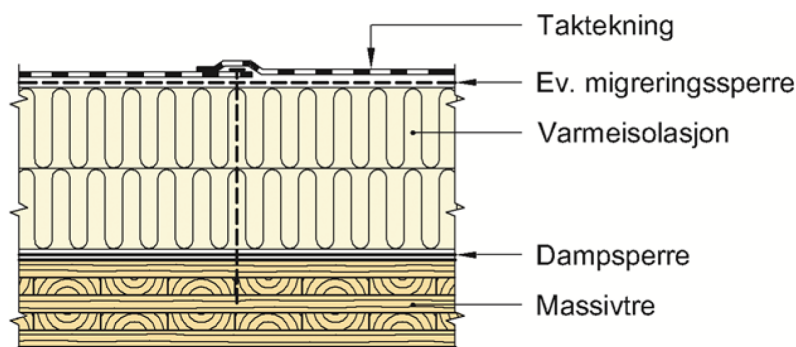
# Kapittel 2

## Kompakte tak

I dette kapitlet vil det gis en beskrivelse av relevant informasjon tilknyttet kompakte tak i lys av arbeidet og fokusområdene i oppgaven. Siden fukt i kompakte tak er den sentrale problemstillingen vil innholdet i dette kapitlet hovedsakelig omhandle dette.

### 2.1 Oppbygging med massivtreelementer som bærekonstruksjon

Kompakte tak med massivtreelementer som bærekonstruksjon kan bygges som både flate og skrå tak (Byggforskserien 2001). Oppbyggingen av disse følger prinsippene til rettvendte tak hvor all varmeisolasjon er plassert over bærekonstruksjonen. Figur 2.1.1 nedenfor viser en prinsipiell oppbygging av et kompakt tak med massivtreelementer som bærekonstruksjon.



Figur 2.1.1: Prinsipiell oppbygging av et kompakt tak med massivtreelementer

### Taktekning

I kompakte tak vil materialsjiktene ligge så tett som overhode mulig uten luftespalte mellom taktekningen og isolasjonen. Disse må derfor tekkes med en robust taktekning som tåler stående vann. Her er det mest vanlig å benytte takbelegg av asfalt, plast eller gummi med sveiste skjøter (Byggforskserien 2018c).

### Isolasjon

Massivtre har gode varmeisolerende egenskaper, men vil i de fleste tilfeller ha behov for tilleggisolasjon for å oppfylle krav til U-verdi i henhold til Byggteknisk Forskrift (TEK17). Direktoratet for byggkvalitet (2020a) § 11-9 pkt. 2-D gir at det som hovedregel bør benyttes ubrennbar isolasjon i takkonstruksjoner, eksempelvis mineralull. Derimot er det også mulig å benytte brennbar isolasjon, eksempelvis EPS, gitt at branntekniske tiltak er tatt hensyn til. Da må brennbar isolasjon enten tildekkes med ubrennbare materialer, eksempelvis sjikt med 30 mm tykk ubrennbar isolasjon, eller deles opp i arealer på maksimalt 400 m<sup>2</sup> (Byggforskserien 2018b). Her vil tildekking av brennbar isolasjon være mest hensiktsmessig. Time et al. (2008) viser til at massivtreelementer med tette gjennomføringer og elementskjøter, samt tykkelse på minimum 100 mm, vil ha tilfredsstillende tetthet i brannklasse 1 og 2 til at disse kan tildekkes kun på oversiden med ubrennbar isolasjon.

### Dampsperre

I tradisjonelle kompakte tak er det vanlig å benytte et dampsperrsjikt på innvendig (varm) side av isolasjonen (Byggforskserien 2018c). Kapittel 2.4 gir en liten innføring i ulike dampsperrsjikt som er mulig å bruke i kompakte tak. Derimot er det et veldig omdiskutert tema i byggebransjen om det skal brukes dampsperrsjikt i ytterkonstruksjoner hvor det benyttes massivtreelementer. Denne problemstillingen ble det rettet søkelys mot i prosjektoppgaven, og her belyste litteratursøket at det ble gitt ulike anbefalinger og veiledninger på tvers av bransjen om dette skulle brukes eller ikke. Noen mente en tradisjonell dampsperre fortsatt ville være den sikreste løsningen, mens andre mente bruk av dampbrems eller ingen dampsperre var en bedre tilnærming på grunn av massivtreets egenskaper. Med hensyn til de ulike retningslinjene som ble belyst kan det videre antas at ulike tilnærminger til bruk av dampsperre i ytterkonstruksjoner med massivtreelementer kan benyttes.

### Massivtreelementer

En skiller normalt mellom tre typer massivtreelement: kantstilte-, krysslagte og hulromselementer. Til bygningsformål er krysslagte elementer med limte lameller mest utbredt (Edwardsen & Ramstad 2014). Disse omtales i bransjen som KLT. Her vil lamellene som regel ligge 90 grader i forhold til hverandre og limes med lamellenes brede side (flasken) mot hverandre. Noen produsenter velger også å lime lamellenes korte side (kantene) mot hverandre, men dette gjøres ikke uniformt i bransjen. Elementene består som regel av mellom 3 til 9 lag lameller av gran (Aasheim et al. 2006).

## 2.2 Fukttransport og fuktvandring

### Fukttransport

Fukt kan transporteres både i damp- og væskeform. Disse kan i bygningskonstruksjoner også opptre samtidig. Det fins en rekke ulike fukttransportmekanismer. For kompakte tak vil fukttransport via diffusjon, fuktkonveksjon og kapillærledning som regel være av størst betydning. Tabellen nedenfor viser transportformen og drivkraften til disse tre transportmekanismene.

Transportmekanisme	Transportform	Drivkraft
Diffusjon	Dampform	Damptrykkforskjeller
Fuktkonveksjon	Dampform	Lufttrykkforskjeller
Kapillærledning	Væskeform	Porevannsundertrykkforskjeller

**Tabell 2.2.1:** Transportform og drivkraft for fukttransportmekanismene: diffusjon, fuktkonveksjon og kapillærledning (Geving & Thue 2002)

Diffusjon kan i kompakte tak foregå både vertikalt oppover, vertikalt nedover og sideveis mot kantene (Uvsløkk 2008). Her vil vanndamp transporteres fra områder med høyt damptrykk til områder med lavere damptrykk (Geving & Thue 2002). Damptrykkforskjeller i bygningskonstruksjoner skyldes som regel temperaturforskjeller. Her vil høyere temperaturer gir høyere damptrykk, mens lavere temperaturer gir lavere damptrykk.

Fuktkonveksjon innebærer transport av vanndamp via luftstrømmer. Her vil vanndamp transporteres fra områder med høyt lufttrykk til områder med lavt lufttrykk. Fuktkonveksjon kan i mange tilfeller være mer kritisk enn diffusjon da det kan føre til transport av store luftmengder som inneholder mye vanndamp (Geving & Thue 2002). Lufttrykkforskjeller over bygningsdeler kan oppstå på grunn av: overtrykksventilasjon, skorsteins-effekten eller vind (Thue 2016).



Diffusjon og fuktkonveksjon vil være de dominerende fukttransportmekanismene når fuktforholdene i konstruksjonen holder seg under det hygroskopiske området (RF ca. 95 - 98 %). Derimot når fuktforholdene overstiger det hygroskopiske området vil fukttransport i væskeform og derav kapillærledning bli dominerende. Når et porøst materiale kommer i kontakt med fritt vann vil vann suges inn i porene i materialet på grunn av kapillære krefter (Geving & Thue 2002). Kapillærledning vil være en fukttransportmekanisme som foregår inne i porene i materialet. Forskjeller i porevannsundertrykk gjør her at små porer vil suge vann fra større porer (Thue 2016).

### Fuktvandring

I kompakte tak vil fuktfordelingen forandre seg i løpet av året i forhold til temperaturgradienten i taket. Effekten av fuktfordelingen blir større ved høyere byggfuktnivå i konstruksjonen, og fukten vil alltid gå mot den kalde siden (Thue 2016). På senhøst og tidlig vinter når temperaturen synker, vil fukt vandre utover og samle seg i de ytre sjiktene av konstruksjonen. Dette vil foregå så lenge damptrykket er ulik i taket. Etter en periode vil forholdene stabilisere seg og fuktvandringen stopper. På våren og tidlig sommer når temperaturen igjen øker, vil fukt vandre innover og samle seg i de indre sjiktene av konstruksjonen. Dette vil også foregå så lenge damptrykket er ulik i taket, og det vil stabilisere seg etter enn viss periode. En slik fuktvandring vil også skje sideveis i konstruksjonen. Dette kan skje hvis deler av taket har lavere temperaturer enn andre deler, eksempelvis fra solcellepanel eller snø. (Uvsløkk 2008)

## 2.3 Fuktproblematikk

Kompakte tak kan ved feil oppbygging og utførelse være en fuktskadeutsatt konstruksjon. Nedenfor er det listet opp ulike årsaker som kan gi fuktrelaterte skader i kompakte tak. Disse er hentet fra (Geving & Thue 2002, Byggforskserien 2012, Noreng et al. 2012).

- Innebygd fukt i materialer. Materialer gis ikke tilstrekkelig uttørkingstid før innbygging. Dårlig tildekking av konstruksjonen mot nedbør i byggefasen.
- Utett eller manglende dampsperre. Fuktig inneluft får mulighet til å strømme ut i kaldere deler av konstruksjonen å kondensere.
- Dårlige fallforhold. Medfører at vann kan bli stående. Gir stor påkjenning på takteking og økt risiko for vannlekkasjer.
- Feil med sluk. Tette sluk kan gi oppdemming av vann. Dårlige slukplasseringer. Vannlekkasjer i overgang sluk/membran.

- Vannlekkasjer som følge av ufullstendige tekkearbeider, beslags- og overgangsløsninger.
- Utette gjennomføringer og overganger.
- Fuktig inn klima og utilstrekkelig ventilasjon.
- Perforering av taktekning som følge av mekaniske påkjenninger eller tekniske installasjoner montert på tak.

## 2.4 Dampsperrer

I kompakte tak er det vanlig å benytte en dampsperre på innvendig side av varmeisolasjonen. Hovedfunksjonen til dampperren er å beskytte mot fukttransport fra innelufta ut i ytterkonstruksjonene gjennom luftlekkasjer (fuktkonveksjon) og vanndampdiffusjon (Byggforskserien 2003b). I tillegg skal den sammen med varmeisolasjonen redusere trekk og varmetap på grunn av luftlekkasjer (Geving et al. 2010).

$S_d$ -verdi, også kalt ekvivalent luftlagstykkelse, bestemmer vanndampmotstanden (diffusjonsmotstanden) til dampperresjiktet. Produkter med høy  $S_d$ -verdi er mer damptett, mens produkter med lav  $S_d$ -verdi er mer dampåpen. SINTEF Byggforsk anbefaler at dampsperrer som skal benyttes for generell bruk i bygningskonstruksjoner bør ha en  $S_d$ -verdi på minst 10 m (Byggforskserien 2003b).

Ute på markedet i dag finnes det mange forskjellige typer dampsperrer. Nedenfor vil tre av disse beskrives mer i detalj.

### Tradisjonell dampsperre

Den tradisjonelle dampperren som anvendes i kompakte tak er polyetylenfolie, også kalt PE-folie. Folien fås i flere ulike tykkelser og har en  $S_d$ -verdi på mellom 24 - 90 m (avhengig av tykkelsen), som er godt over anbefalt minsteverdi (Byggforskserien 2003b). PE-folien vil være passende i de fleste tradisjonelle kompakte takkonstruksjoner. Den har derimot sine begrensninger da folien har en fast vanndampmotstand ( $S_d$ -verdi) og muliggjør kun uttørking utover i konstruksjonen. Geving et al. (2010) viser i sin SINTEF rapport til flere tilfeller hvor uttørking innover i konstruksjonen vil være gunstig. Dette eksempelvis for: konstruksjoner som har redusert eller ingen uttørkingsmulighet utover, konstruksjoner som utsettes for store mengder fukt utenfra og konstruksjoner som inneholder mye byggfukt og har en økt risiko for lekkasjer innad i konstruksjonen. I slike tilfeller kan det være nyttig å vurdere andre dampperretyper.

## Dampbrems

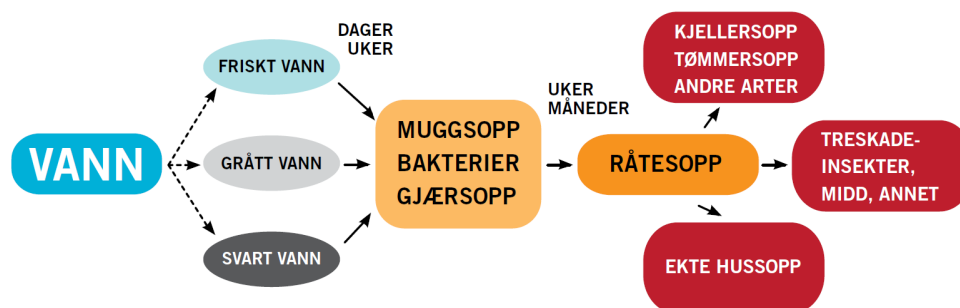
Dampbrems er dampsperreprodukter som har en  $S_d$ -verdi lavere enn minstekravet til dampsperrer, men høyere enn maksimumskravet til vindsperrer ( $S_{d,vindsperre} \leq 0,5 \text{ m}$ ) (Geving et al. 2010). Dette innebærer en  $S_d$ -verdi på mellom 0,5 m - 10 m.  $S_d$ -verdien til produktet er som regel konstant, men det kan også variere. Tanken bak produktet er at det skal være damp tett nok til å hindre kondens om vinteren og samtidig dampåpent nok til at konstruksjonen får en viss uttørkingsmulighet innover om sommeren.

## Smart dampsperre

Smarte dampsperrer, også kalt SDS, er dampsperreprodukter som har en  $S_d$ -verdi som varierer med den relative fuktigheten (RF) omkring (Noreng & Hisdal 2013). Disse produktene vil fungere som en ordinær damp tett dampsperre i tørr tilstand, men slippe gjennom fukt dersom konstruksjonen blir fuktig (Byggforskserien 2003b). Dette innebærer at produktene har en høy  $S_d$ -verdi ved lav RF og en lav  $S_d$ -verdi ved høy RF. Slike dampsperreprodukter har vist seg å være fordelaktig for noen konstruksjonstyper, eksempelvis kompakte tretak, da disse gir konstruksjonen en økt uttørkingsmulighet innover.

## 2.5 Muggsopp

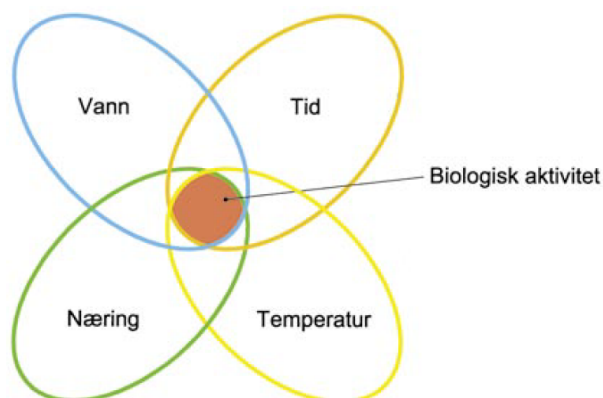
Dersom fuktbetingelser i kompakte tak og bygningskonstruksjoner generelt blir dårlige, vil dette gi et grunnlag for mikrobiologisk aktivitet. Slike aktiviteter er ikke ønskelig og kan medføre negative konsekvenser for både konstruksjonen og innemiljøet i bygningen. Figur 2.5.1 nedenfor viser eksempler på biologiske aktiviteter som kan utvikle seg dersom fuktbelastningen blir høy.



**Figur 2.5.1:** Biologisk utvikling ved høy fuktbelastning (Mattsson & Stensrød 2009)

Av disse er det som regel soppvekst som vil være av størst betydning, og her hovedsakelig muggsopp. Nedenfor vil det gis en beskrivelse av muggsopp og forutsetningene som må være tilstede i konstruksjonen for at muggvekst kan oppstå.

Muggsopp er en betegnelse på en stor gruppe hurtigvoksende sopper som hovedsakelig angriper overflater på materialer og kan medføre negative konsekvenser for inneklimate gjennom å avgi lukt og forårsake allergi hos mottakelige individer (Byggforskserien 2005). For at muggsopp skal kunne utvikle seg er det visse forutsetninger som må være tilstede. Soppen må ha tilgang på næring, vann eller fuktighet og gunstig temperatur over en viss tidsperiode. Disse forutsetningene er illustrert i figur 2.5.2 nedenfor.



**Figur 2.5.2:** Forutsetninger for vekst av muggsopp (Byggforskserien 2005).

### Næring

Næring til muggsopp finnes i organiske materialer, eksempelvis trematerialer. Byggforskserien (2005) viser derimot til at uorganiske materialer og flater også i prinsipp kan bli angrepet av muggsopp dersom vekstforholdene her er gunstige.

### Vann

Den viktigste forutsetningen for vekst av muggsopp er tilgang på vann eller fuktighet. Her har de ulike muggsopptypene forskjellige krav til fuktighet for å kunne vokse og overleve. De fleste typer krever normalt en RF på over 80 % på materialoverflaten for å kunne vokse (Geving & Thue 2002). Dette RF-nivået vil derimot være avhengig av type material det vokser på og temperaturen på materialoverflaten. Her vil uorganiske materialer og flater kreve høyere fuktnivå, mens kritisk fuktnivå vil øke når temperaturen på materialet synker (Geving & Thue 2002). Vekst kan også oppstå ved lavere RF-nivåer, derimot vil risikoen her være betydelig lavere. Det mest optimale RF-nivået med hensyn på muggvekst er når dette nærmer seg 100% og ligger mellom 95% og 98% (Geving & Thue 2002). Dersom materialoverflaten tørkes under ca. 80 % RF vil muggveksten stanse. Derimot vil sporene overleve og kan utvikle seg på nytt ved ny tilgang på fuktighet (Byggforskserien 2005).

### Temperatur

De ulike muggsopptypene har forskjellige krav til temperatur for å kunne vokse og overleve. For de fleste typer vil vekst stoppe ved lave temperaturer (ned mot  $0^{\circ}\text{C}$ ) og soppene går i dvale, mens ved høye temperaturer (opp mot  $40^{\circ}\text{C}$  -  $50^{\circ}\text{C}$ ) vil soppene normalt dø (Byggforskserien 2005). Her vil optimal veksttemperatur for de fleste typer ligge mellom  $20^{\circ}\text{C}$  og  $35^{\circ}\text{C}$  (Geving & Thue 2002).

### Tid

For at muggsopp skal kunne utvikle seg må forutsetningene beskrevet ovenfor være tilstede på materialoverflaten over en viss tidsperiode. Her vil soppen bruke lang tid på å utvikle seg dersom RF-nivåene er lave (fra noen uker til måneder), mens ved høye RF-nivåer i kombinasjon med gunstige temperaturforhold kan muggsoppen utvikle seg i løpet av kun få dager (Geving & Thue 2002).

---

## Kapittel 3

# Hygrotermiske egenskaper massivtre (KLT)

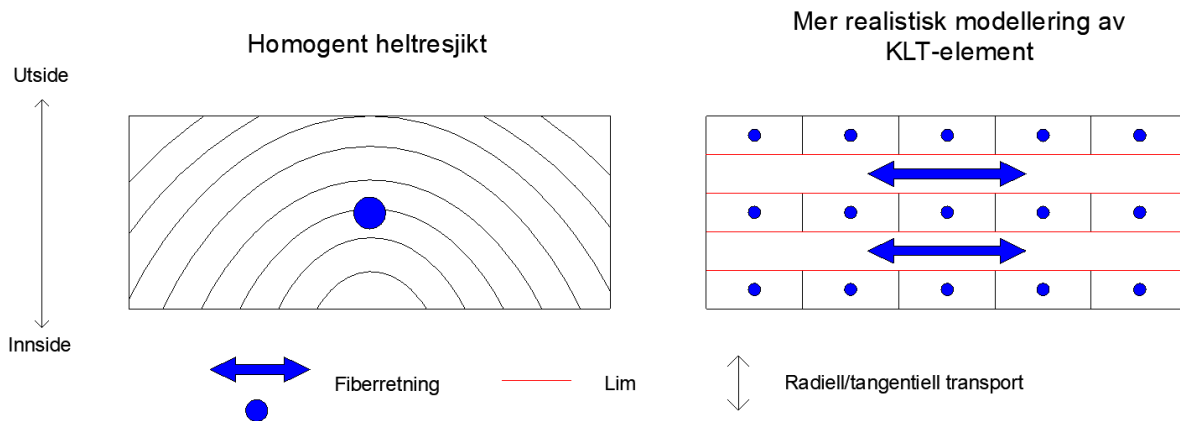
### 3.1 Bakgrunn og hensikt

For å kunne analysere massivtreets hygrotermiske ytelse i beregningsprogrammet WUFI Pro, må en rekke materialparametere defineres. Tabell 4.3.6 på side 35 viser hvilke materialparametere programmet må ha definert for å kunne utføre en beregning og hvilke som er valgfri å definere. For å oppnå fullstendige beregninger bør de hygrotermiske funksjonene defineres, siden disse forandrer på materialets egenskaper ved både fukt- og temperaturerndringer.

Hensikten med kapittelet er å kartlegge laboratoriemålte verdier for basisparameterne og de hygrotermiske funksjonene til massivtre gjennom en litteraturstudie. Det er valgt å ta utgangspunkt i massivtre av krysslimte lameller. Dette omtales videre som KLT. Kartlagte verdier for materialparameterne skal videre brukes til å modellere KLT i WUFI Pro.

### 3.2 Modellering av KLT i WUFI Pro

KLT kan modelleres på to ulike måter i WUFI Pro. Enten som et homogent massivt heltresjikt med modifiserte materialeegenskaper som tilsvarer reelle verdier for KLT, eller ved en modell som tar hensyn til hvert eneste lag med sine respektive tykkelser, materialeegenskaper m.m. Her vil den første tilnærmingen være en forenklet variant hvor effekter fra limsjiktene i massivtreet ikke direkte tas hensyn til, men som vil være innbakt i verdier som defineres til materialet. Figur 3.2.1 på neste side illustrerer forskjellene mellom disse.



**Figur 3.2.1:** Ulike måter å modellere KLT i WUFI Pro. Til venstre er en homogen tilnærming, mens til høyre er modellen delt opp

I oppgaven er det valgt å modellere KLT som et massivt homogent heltresjikt. Her vil limsjiktene effekt være innbakt i verdier som defineres til materialet.

### 3.3 Utgangspunkt

Det er valgt å ta utgangspunkt i trematerialet «Skandinavisk gran II vinkelrett fibre» som er definert av NTNU i WUFI Pro sin materialdatabase. Tabell 3.3.1 nedenfor presenterer verdier gitt for materialet i programmet.

Material → Materialdata ↓	Enhet	Skandinavisk gran II vinkelrett fibre
Romdensitet $\rho$ <sup>[1]</sup>	$[\frac{kg}{m^3}]$	390
Porøsitet $\epsilon$ <sup>[1]</sup>	$[\frac{m^3}{m^3}]$	0,75
Spesifikk varmekapasitet $C$ <sup>[1]</sup>	$[\frac{J}{kg \cdot K}]$	1600
Termisk konduktivitet $\lambda$ , ved 10 °C <sup>[1]</sup>	$[\frac{W}{m \cdot K}]$	0,13
Vanndampmotstandsfaktor $\mu$	[-]	108 - 27
Vannabsorpsjonskoeffisient $A_w$	$[\frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}]$	[2]
Tillegg termisk konduktivitet, fukt	$[\frac{W}{m \cdot K}]$ per $\frac{kg}{m^3}$	0,00043
Tillegg termisk konduktivitet, temp.	$[\frac{W}{m \cdot K}]$ per °C	0,0002
Entalpi, temperaturavhengig	$[\frac{kJ}{kg}]$	Ikke definert

<sup>[1]</sup> Gjeldende for materialet i tørr tilstand

<sup>[2]</sup> Materialet har fuktdiffusivitetsskurver for oppsuging og omfordeling definert i WUFI

**Tabell 3.3.1:** Materialdata for Skandinavisk gran II vinkelrett fibre i WUFI Pro

Nedenfor listes opp materialdataene som vil bli endret, etterfulgt av en forklaring:

- Romdensitet og fuktlagringsfunksjon (sorpsjonskurve)
  - Med hensyn til at de fleste materialdata som kartlegges i dette kapitlet er basert på målinger utført på KLT av SPF-trelast, er det valgt en romdensitet som vil være representativt for dette. Fuktlagringsfunksjonen vil endres i samsvar med romdensiteten og type treslag.
- Porøsitet
  - Porøsiteten vil være avhengig av romdensitetens verdi og vil derfor endres i samsvar med denne.
- Spesifikk varmekapasitet og termisk konduktivitet
  - Materialet Skandinavisk gran II vinkelrett fibre har valgt en konservativ tilnærming hvor det brukes dimensjonerende verdier spesifisert i NS-EN 12524 - «Byggematerialer og produkter. Hygrotermiske egenskaper. Tabulerte dimensjonerende verdier» for spesifikk varmekapasitet og termisk konduktivitet. I oppgaven er det valgt å undersøke reelle verdier for disse, og bruke disse videre.
- Vanndampdiffusjonsmotstand og fuktdiffusivitetskoeffisienter
  - Litteraturen viser til at limsjiktene i KLT vil påvirke vanndamp- og væske-transporten i forhold til homogene heltresjikt. Verdier for disse vil baseres på målinger på KLT av SPF-trelast.
- Termisk konduktivitet, fukt- og temperaturavhengighet
  - Skandinavisk gran II vinkelrett fibre antar en lineær økning i den termiske konduktiviteten for både økning i vanninnhold og temperatur. Samme tilnærming benyttes for KLT, derimot vil reelle verdier for den termiske konduktiviteten brukes. Det oppgis i WUFI Pro at materialet bruker en standardverdi for temperaturavhengig varmekonduktivitetstillegg. Denne verdien vil også benyttes for KLT.
- Entalpi
  - Entalpi, som beskriver temperaturens effekt på varmekapasiteten til materialet, er ikke spesifisert for Skandinavisk gran II vinkelrett fibre. Enkle beregninger i WUFI Pro viser til at en definert entalpi kan bidra til endring av temperatur og i noen grad også den relative fuktigheten i materialet. For å oppnå mer nøyaktige resultater vil entalpien til KLT derfor defineres.



## 3.4 Materialparametere

### 3.4.1 Romdensitet

En av basisparameterne som WUFI Pro er avhengig av, er densiteten til materialet i tørr tilstand  $\rho_{s.tørr}$  (romdensitet). Med hensyn til at de fleste materialdata som kartlegges i dette kapitlet er basert på målinger på KLT av SPF-trelast, er det valgt en romdensitet som vil være representativt for dette. SPF, også kalt spruce-pine-fir, er en klassifisering av trelast i Canada og deler av USA som består av ulike typer gran og furu med lignende fysiske og mekaniske egenskaper (Baylor 2020).

Mukhopadhyaya et al. (2014) kommer med en rekke anbefalinger for verdier til KLT som kan benyttes i hygrottermiske simuleringer. En av disse er romdensiteten, som de anbefaler å sette lik  $420 \frac{kg}{m^3}$ . Verdien er basert på den kanadiske standarden CSA 086-01 - «Engineering Design in Wood» og skal tilsvare romdensiteten til SPF-trelast. Denne verdien er valgt å bruke videre.

### 3.4.2 Porøsitet

Porøsiteten  $\epsilon$  bestemmer den maksimale mengden vann som kan lagres i materialets porer.  $\epsilon$  kan regnes ut ved formelen nedenfor (WUFI 2006):

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_{s.tørr}}{\rho_{cv}} \quad (3.4.1)$$

Hvor:

$\epsilon$  = porøsiteten  $[\frac{m^3}{m^3}]$ ,  $0 < \epsilon \leq 1$

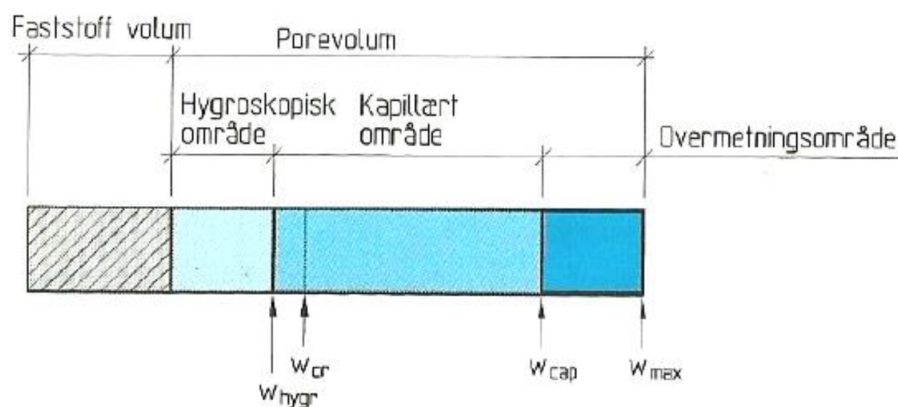
$\rho_{s.tørr}$  = materialets tørrdensitet (romdensitet)  $[\frac{kg}{m^3}]$

$\rho_{cv}$  = celleveggenes densitet  $[\frac{kg}{m^3}]$

Ifølge Byggforskserien (2015) vil celleveggenes densitet  $\rho_{cv}$  være tilnærmet lik for alle treslag og har en verdi på ca.  $1500 \frac{kg}{m^3}$ . Dette sammen med en  $\rho_{s.tørr}$  lik  $420 \frac{kg}{m^3}$  vil i følge formelen ovenfor gi en  $\epsilon$  lik 0,72.

### 3.4.3 Fuktlagringsfunksjon

Figur 3.4.1 nedenfor viser fuktopptaket i porøse materialer, eksempelvis trematerialer.

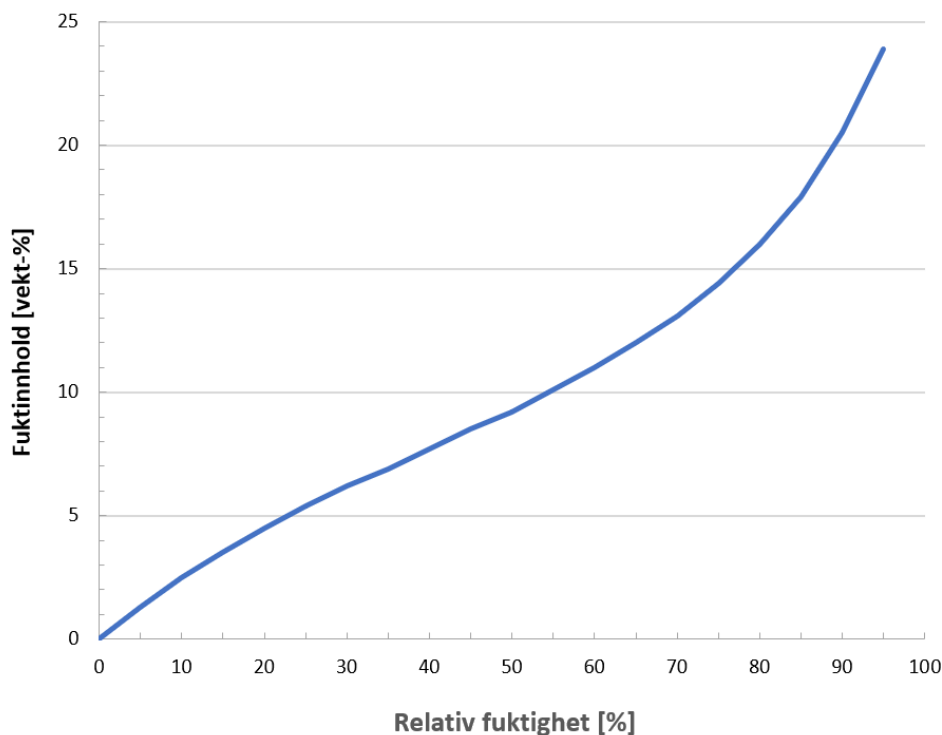


**Figur 3.4.1:** Fuktopptak i porøse materialer (Geving & Thue 2002)

Det *hygroskopiske området* ligger mellom  $0\% < RF \leq \text{ca. } 98\%$ , og her skjer fuktopptaket ved lagring av materialet over tid i fuktig luft. Økes RF ytterligere beveger man seg inn i det *kapillære området* hvor materialet tar opp fukt fra vannspeil gjennom at små og middels store porer fylles. *Overmetningsområde* er ved fullstendig vannmetning av de store porene i materialet. Dette vil ikke være mulig å oppnå i en reell bygningssituasjon, side det krever at materialet kokes eller vakumbehandles. (Geving & Thue 2002)

Fuktlagringsfunksjonen videre kalt sorpsjonskurven, er en av de hygrotermiske funksjonene som kan defineres i WUFI Pro. Sorpsjonskurven vil bestemme likevektsfuktinnholdet til materialet ved ulike RF-nivå i det hygroskopiske området. Denne kurven vil være avhengige av faktorer som type trematerial, densitet og temperatur (Geving & Thue 2002).

Det er valgt å ta utgangspunkt i en generisk sorpsjonskurve for tre, hovedsakelig avledet fra en type gran ved en temperatur på  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kurven er hentet fra Glass & Zelinka (2010) og er vist i figur 3.4.2 på neste side. Grantypen som kurven hovedsakelig er avledet for har i følge Glass & Zelinka (2010) en romdensitet lik  $420 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Verdier i kurven vil derfor samsvare bra med valgte romdensitet i oppgaven.



**Figur 3.4.2:** Sorpsjonskurve gran ved 21 °C (Glass & Zelinka 2010)

Sorpsjonskurven i figur 3.4.2 ovenfor har kun definerte fuktinnhold for RF-nivå opp til og med 95 %. Fuktinnhold for resterende RF-nivå i det hygrokroskopiske området (96 %, 97 % og 98 %) er tilnærmet ut fra presenterte verdier i Glass & Zelinka (2010). WUFI Pro er også avhengig av fuktinnholdet ved fri vannmetning  $w_{cap}$  som i programmet nås ved 100 % RF. Dersom det ikke defineres fuktinnhold for RF-nivå mellom 98 % og 100 % vil programmet automatisk anta en lineær økning i fuktinnhold mellom  $w_{hygr}$  og  $w_{cap}$ . Etersom denne tilnærmingen ikke vil være reell, er det mange av materialene i programmet som har definerte fuktinnhold for flere RF-nivå mellom 98 % og 100 %. Dette er også gjort i denne oppgaven.

Fuktinnhold ved høye RF-nivå er presentert i tabell 3.4.1 på neste side. Verdiene er basert på antagelser og tilsvarende verdier gitt for materialer i WUFI Pro.  $w_{cap}$  er hentet fra tabell B3.4 i Geving & Thue (2002) og samsvarer med verdien gitt for Skandinavisk gran II vinkelrett fibre. Det er valg å begrense kurven ved svært høye RF-nivå (nært 100 %). Bakgrunnen for dette er at det normalt ikke vil være mulig å oppnå fuktinnhold i KLT lik  $w_{cap}$  i en reell bygningsituasjon. Dette underbygges av fuktmålingene som ble utført i ulike konstruksjonsdeler med massivtre i prosjektoppgaven. Vedlegg C viser fuktmålingsoversikt for massivtredekkekonstruksjon i øverste etasje. Denne var utsatt for nedbør og utvendig klima over en lang tidsperiode. I beregninger som skal gjennomføres vil massivtreet heller aldri nå slike fuktbetingelser.

Relativ fuktighet, RF [%]	95	96	97	98	98,5	99	99,5	99,9	100
Fuktinnhold, $u$ [vekt-%]	23,9	25	27	30	35	42	51	64	143
Fuktinnhold, $w$ [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	100,4	105	113,4	126	147	176,4	214,2	268,8	600

■ Hygroskopisk område      ■ Kapillært område

**Tabell 3.4.1:** Fuktinnhold i KLT ved høye RF-nivå

### 3.4.4 Termisk konduktivitet

Den termiske konduktiviteten  $\lambda$  angir et materials evne til å lede varme. Materialer med høy termisk konduktivitet (eks: metaller) vil lede varme veldig godt, mens materialer med lav termisk konduktivitet (eks: isolasjon) vil lede varme dårlig. Den termiske konduktiviteten til trematerialer vil være avhengig av flere ulike faktorer, slik som materialets densitet, struktur (fiberretning), fuktinnhold og temperatur (Edwardsen & Ramstad 2014).

Tabell 4.3.6 viser at en av basisparameterne i WUFI Pro er den termiske konduktiviteten  $\lambda$  i tørr tilstand ved 10 °C. Derimot er det også mulig å oppgi variasjonen til  $\lambda$  i forhold til både fuktinnhold og temperatur i materialet. Dette kan legges inn manuelt eller genereres ut fra en påslagsverdi.

Glass & Zelinka (2010) gir at  $\lambda$  for ulike typer gran vil ligge mellom 0,09 - 0,10  $\frac{W}{m \cdot K}$  i tørr tilstand og 0,11 - 0,12  $\frac{W}{m \cdot K}$  ved et fuktinnhold på 12 vekt-%. De viser videre til at effekten av temperaturforandring på  $\lambda$  vil være minimal, hvor  $\lambda$  vil variere lineært med mellom 2 og 3 % per 10 °C endring i materialet.

Glass et al. (2013) gir at KLT av bartrevirke vil ha en termisk konduktivitet  $\lambda$  lik 0,111  $\frac{W}{m \cdot K}$  ved et fuktinnhold på 12 vekt-%. Dette samsvarer bra med målte verdier av  $\lambda$  for KLT, utført av Kordziel (2018). Her ble  $\lambda$  målt for flere mindre prøver kuttet fra hele KLT-elementer ved bruk av et varmestrømningsapparat og fremgangsmåten spesifisert i ASTM Standard C518-10 - «Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus». Prøvene hadde dimensjoner  $b \times l \times t \rightarrow 610 \text{ mm} \times 610 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$  og var av SPF-trelast. Effekter av limsjikt er tatt med i betraktningen og målingene ble utført vinkelrett på fibre for fuktinnhold på 10,4 og 12 vekt-%. Resultater fra målingene viste en  $\lambda$  lik 0,110  $\frac{W}{m \cdot K}$  ved et fuktinnhold på 12 vekt-%.

På bakgrunn av det som er skrevet på forrige side og i kapittel 3.3 er det valgt å bruke følgende verdier for den termiske konduktiviteten til KLT:

- $\lambda = 0,09 \frac{W}{m \cdot K}$  i tørr tilstand ved 10 °C
- $\lambda = 0,11 \frac{W}{m \cdot K}$  ved fuktinnhold på 12 vekt-%
- Lineær endring av  $\lambda$  med  $0,0002 \frac{W}{m \cdot K}$  per °C (K) endring

#### 3.4.5 Vanndampdiffusjonsmotstand

Vanndamppermeabiliteten  $\delta_s$  til et materiale angir hvor raskt vanndamp kan transporteres gjennom materialet ved diffusjon. Høyere vanndamppermeabilitet tilsvarer raskere vanndamptransport, og verdien øker med økende fuktinnhold i materialet.

I WUFI Pro blir denne faktoren tatt hensyn til gjennom en graf som viser materialsjiktets vanndampmotstandsfaktor  $\mu$  som funksjon av den relative fuktigheten RF. Her kan  $\mu$  regnes ut ved bruk av formel 3.4.2 nedenfor (Geving & Thue 2002).

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_s} \tag{3.4.2}$$

Hvor:

$\mu$  = Vanndampmotstandsfaktor [-]

$\delta_a$  = Vanndamppermeabilitet til luft [ $\frac{kg}{m \cdot s \cdot Pa}$ ]

$\delta_s$  = Vanndamppermeabilitet til materiale [ $\frac{kg}{m \cdot s \cdot Pa}$ ]

Mukhopadhyaya et al. (2014) har utført målinger av vanndamppermeabiliteten til flere mindre prøver kuttet fra KLT-elementer av SPF-trelast. Målingene er basert på både *tørr-kopp* og *våt-kopp* metoder i henhold til ASTM Standard E96/E96M - 10 - «Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials». Prøvene hadde en diameter på 150 mm og tykkelse på 18 mm. Målingene ble utført vinkelrett på fibre og effekter av et limsjikt ble tatt med i betraktning. Resultatene fra målingene ble sammensatt til en liste verdier for RF-nivå mellom 10 og 100 %. Tabell 3.4.2 nedenfor presenterer vanndamppermeabiliteten  $\delta_s$  og vanndampmotstandsfaktoren  $\mu$  for utvalgte RF-nivå. Her er  $\mu$  regnet ut ved bruk av formel 3.4.2 ovenfor, hvor  $\delta_a$  er antatt til å være lik  $2 \cdot 10^{-10} \frac{kg}{m \cdot s \cdot Pa}$  (Geving & Thue 2002).

Relativ fuktighet, RF [%]	20	40	60	80	100
Vanndamppermeabilitet, $\delta_s$ [ $10^{-12} \frac{kg}{m \cdot s \cdot Pa}$ ]	0,34	1,12	2,77	5,92	11,26
Vanndampmotstandsfaktor, $\mu$ [-]	587	179	72	34	18

**Tabell 3.4.2:** Vanndamppermeabilitet  $\delta_s$  og vanndampmotstandsfaktor  $\mu$  til KLT som funksjon av RF

### 3.4.6 Væsketransport

I WUFI Pro blir effekter av væsketransport i et material tatt hensyn til gjennom to kurver som viser materialets fuktdiffusivitetskoeffisient ved oppsuging  $D_{ws}$  og omfordeling  $D_{ww}$  i  $[\frac{m^2}{s}]$ .  $D_{ws}$  beskriver det kapillære opptaket av vann når materialoverflaten oppfuktes, mens  $D_{ww}$  beskriver omfordelingen av vannet videre i materialet etter oppfukting (WUFI 2006). Begge disse koeffisientene er vanskelig å måle og avhenger veldig av fuktinnholdet  $w$  i materialet (Geving & Thue 2002). Dersom fuktdiffusivitetskoeffisientene ikke er kjent, kan programmet estimere disse ut fra materialets sorpsjonskurve og vannabsorpsjonskoeffisient  $A_w$ .  $A_w$  kan enkelt måles for de fleste materialer ved å følge fremgangsmåten i NS-EN ISO 15148:2002 - «Byggematerialers og -produkters hygrotermiske egenskaper - Bestemmelse av vannabsorpsjonskoeffisient ved delvis nedsenking». Da vil programmet benytte seg av formel 3.4.3 nedenfor og generere følgende tabell for fuktdiffusivitetskoeffisientene:

$w [\frac{kg}{m^3}]$	$D_{ws} [\frac{m^2}{s}]$	$D_{ww} [\frac{m^2}{s}]$
0	0	0
$w_{80}$	$D_{ws}(w_{80})$	$D_{ws}(w_{80})$
$w_{cap}$	$D_{ws}(w_{cap})$	$\frac{D_{ws}(w_{cap})}{10}$

**Tabell 3.4.3:** Fuktdiffusivitetskoeffisienter for oppsuging  $D_{ws}$  og omfordeling  $D_{ww}$

$$D_{ws}(w) = 3.8 \cdot \left(\frac{A_w}{W_{cap}}\right)^2 \cdot 1000^{\left(\frac{w}{w_{cap}}\right)-1} \quad (3.4.3)$$

Her er:

$D_{ws}$  = Fuktdiffusivitetskoeffisient oppsuging  $[\frac{m^2}{s}]$

$A_w$  = Vannabsorpsjonskoeffisient  $[\frac{kg}{m^2\sqrt{s}}]$

$w$  = Fuktinnhold  $[\frac{kg}{m^3}]$

$w_{cap}$  = Fuktinnhold ved fri vannmetning  $[\frac{kg}{m^3}]$

WUFI (2006) oppgir at denne metoden for å estimere  $D_{ws}$  og  $D_{ww}$  kun vil være et grovt estimat som vil være vellykket for noen materialer, og at man ikke bør stole blindt på resultatet som fås ut. Kurvene vil ha sine usikkerheter siden de estimerer en lineær økning i  $D_{ws}$  og  $D_{ww}$  mellom fuktinnholdene  $w_{80}$  og  $w_{cap}$ . Derimot vil dette være et godt estimat dersom disse koeffisientene ikke er kjent for materialet.

Tabellen på neste side presenterer verdier for vannabsorpsjonskoeffisienten  $A_w$  som har blitt målt for KLT. Alle målinger presentert nedenfor er utført vinkelrett på fibrene.

Treslag	$A_w$ [ $10^{-3} \frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}$ ]	Kommentar/Referanse
SPF	1,95	Gjennomsnittlig verdi for målinger utført på flere mindre prøver kuttet fra KLT-element. Limte lameller. Ulike typer SPF. (Mukhopadhyaya et al. 2014)
SPF	2,32	Gjennomsnittlig verdi for målinger utført på flere mindre prøver kuttet fra KLT-element. Limte lameller. Vestlig SPF. (Kordziel 2018)
SPF	2,79	Gjennomsnittlig verdi for målinger utført på flere mindre prøver kuttet fra KLT-element. Uten limte lameller. Vestlig SPF. (Kordziel 2018)
SPF	1,93	Gjennomsnittlig verdi for målinger utført på flere mindre prøver kuttet fra KLT-element. Limte lameller. Både vestlig og østlig SPF (AlSayegh 2012)

**Tabell 3.4.4:** Vannabsorpsjonskoeffisient  $A_w$  for KLT hentet fra litteratur

Av tabellen ser man at målte verdier for  $A_w$  samsvarer bra med alle tre og er  $\approx 2 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}$ . Kordziel (2018) har også målt  $A_w$  for prøver uten limte lameller. Målingene viser her at vannabsorpsjonen blir større dersom elementet ikke har lim mellom lamellene.

I oppgaven er det valgt å bruke en  $A_w$  til KLT lik  $2 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}$ . Sorpsjonskurven i figur 3.4.2 gir en  $w_{80}$  og  $w_{cap}$  lik henholdsvis  $67,2 \frac{kg}{m^3}$  og  $600 \frac{kg}{m^3}$ . Ved bruk av formel 3.4.3 på forrige side vil følgende tabell for fuktdiffusivitetskoeffisientene genereres:

$w$ [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$D_{ws}$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]	$D_{ww}$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]
0	0	0
$w_{80}$	9,15 E-14	9,15 E-14
$w_{cap}$	4,22 E-11	4,22 E-12

**Tabell 3.4.5:** Fuktdiffusivitetskoeffisienter  $D_{ws}$  og  $D_{ww}$  for KLT

### 3.4.7 Varmekapasitet

En av basisparameterne i WUFI Pro er spesifikk varmekapasitet  $C$  til materialet i tørr tilstand. Denne parameteren beskriver materialets evne til å ta opp varme og er avhengig av både fuktinnholdet og temperaturen i materialet. I programmet vil fuktinnholdets bidrag på parameteren automatisk tas med. Derimot er det også mulig å manuelt legge inn temperaturens bidrag på faktoren gjennom å spesifisere materialets entalpi  $H$ . Da vil programmet automatisk benytte seg av tabulerte verdier i beregningene.

I oppgaven er det valgt å definere entalpien til KLT. Glass & Zelinka (2010) gir at tørt massivt trevirke vil ha følgende spesifikk varmekapasitet  $C$  og entalpi  $H$  som funksjon av temperaturen  $T$ :

Temperatur $T$ [K (°C)]	Spesifikk varmekapasitet $C$ [ $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ ]	Entalpi $H$ [ $\frac{kJ}{kg}$ ]
280 (7)	1,2	336,0
290 (17)	1,2	348,0
300 (27)	1,3	390,0
320 (47)	1,3	416,0

**Tabell 3.4.6:** Spesifikk varmekapasitet  $C$  og entalpi  $H$  som funksjon av temperatur  $T$  (Glass & Zelinka 2010)

Verdier i tabellen ovenfor blir brukt for KLT i WUFI Pro beregningene.

## 3.5 Oppsummering og vurdering

Tabellen nedenfor presenterer materialdataene til Skandinavisk gran II vinkelrett fibre og egendefinerte KLT. Verdiene for KLT er basert på det som er kartlagt i kapittel 3.4.

Material → Materialdata ↓	Enhet	Skandinavisk gran II vinkelrett fibre	Egendefinert KLT
Romdensitet $\rho$ <sup>[1]</sup>	$[\frac{kg}{m^3}]$	390	420
Porøsitet $\epsilon$ <sup>[1]</sup>	$[\frac{m^3}{m^3}]$	0,75	0,72
Spesifikk varmekapasitet $C$ <sup>[1]</sup>	$[\frac{J}{kg \cdot K}]$	1600	- <sup>[3]</sup>
Termisk konduktivitet $\lambda$ , ved 10 °C <sup>[1]</sup>	$[\frac{W}{m \cdot K}]$	0,13	0,09
Vanndampmotstandsfaktor $\mu$	$[-]$	108 - 27	1587 - 18
Vannabsorpsjonskoeffisient $A_w$	$[\frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}]$	<sup>[2]</sup>	0,002
Tillegg termisk konduktivitet, fukt	$[\frac{W}{m \cdot K}]$ per $\frac{kg}{m^3}$	0,00043	0,00040
Tillegg termisk konduktivitet, temp.	$[\frac{W}{m \cdot K}]$ per °C	0,0002	0,0002
Entalpi, temperaturavhengig	$[\frac{kJ}{kg}]$	Ikke definert	336 - 416

<sup>[1]</sup> Gjeldende for materialet i tørr tilstand

<sup>[2]</sup> Materialet har fuktdiffusivitetsskurver for oppsuging og omfordeling definert i WUFI Pro

<sup>[3]</sup> Spesifikk varmekapasitet varierer med temperaturen

**Tabell 3.5.1:** Materialdata for Skandinavisk gran II vinkelrett fibre og egendefinert KLT

Av tabellen ovenfor ser man at det vil være både likheter og forskjeller mellom materialene. Det blir spesielt stor forskjell i verdiene for vanndampmotstandsfaktoren  $\mu$ . Dette indikerer at limsjiktene i KLT vil bidra til å begrense vanndamptransporten betraktelig. Ser også at



reelle verdier for den termiske konduktiviteten vil være betydelig lavere enn hva materialet Skandinavisk gran II vinkelrett fibre har definert.

Romdensiteten er justert litt opp og porøsiteten endres i samsvar med denne. Det blir også merkbare forskjeller i fuktdiffusivitetskoeffisientene. Tilleggspåslaget til termisk konduktivitet for både fukt- og temperaturendring blir derimot svært likt.

Materialdataverdier for KLT i tabell 3.5.1 på forrige side vil videre bli brukt for å modellere og beregne KLT i WUFI Pro.

---

# Kapittel 4

## Parameterstudie WUFI Pro

I dette kapitlet beskrives parameterstudie som utføres i beregningsprogrammet WUFI Pro 6.3. Parameterstudie deles inn i to deler: en hovedstudie og en tilleggsstudie.

Nedenfor vil bakgrunnen og problemdefinisjonen først beskrives. Deretter vil det gis en nøye gjennomgang av beregningsoppsettet og inngangsverdiene. Til slutt oppsummeres parametervariasjonene etterfulgt av to tabeller som viser beregningstilfellene og -variantene for hvert studie. Det inkluderes også en del som beskriver begrensninger og usikkerheteter ved parameterstudie.

### 4.1 Bakgrunn og motivasjon

To av hovedutfordringene som ble trukket frem i prosjektoppgaven ved bruk av massivtreelementer i yttervegger og tak, er fuktpåvirkning av elementene under byggefasen og om det skal brukes dampsperre eller ikke på utvendig side. Dette er utdypet mer i detalj i kapittel 1.2.

Fuktpåvirkning av massivtreelementer under byggefasen vil være et stort problem siden elementene kan oppta store mengder vann ved fuktpåkjønning, og vil bruke lang tid på å tørke ut dersom det skjer. Dette ble også underbygget gjennom fuktmålingene som ble utført i massivtreet på byggeprosjektet på Gløshaugen. Bruk av dampsperre eller ikke viste seg å være et omdiskutert tema i bransjen. Her ble det ikke gitt noen klare anbefalinger eller veiledninger, og det kan videre antas ulike tilnærminger til bruk av dampsperre kan benyttes.

Undertegnede tenkte det hadde vært interessant å undersøke relasjonen mellom dampsperrsjikt, byggfuktnivå og massivtre mer i detalj, men også hvilke andre faktorer som vil kunne være av stor betydning dersom massivtreelementer benyttes i yttervegger eller tak. Av disse konstruksjonstypene ble tak ansett til å være mest interessant å undersøke

for. Figur 1.1.2 viste at kompakte tak vil være en av de mest fuktskadeutsatte taktypene. Kompakte tak bygges som regel uten lufting under taktekningen og vil ha svært redusert uttørkingsmulighet. Eventuell byggfukt eller annen fukt vil i slike konstruksjoner bruke lang tid på å tørke ut. Siden byggfukt og massivtre allerede er et stort problem, kan slike konstruksjonstyper by på mange utfordringer.

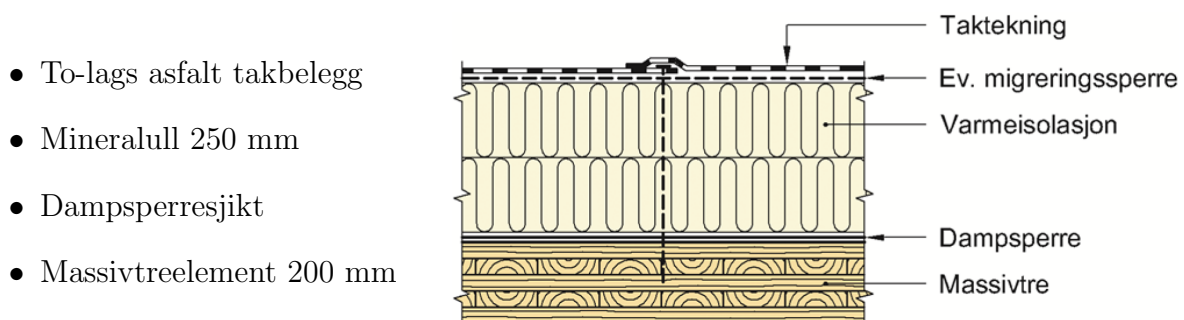
## 4.2 Problemdefinisjon

### 4.2.1 Målsetning

Parameterstudie går inn for å undersøke effekter av ulike parametervariasjoner på et kompakt tak med massivtreelementer. Det skal gi et overblikk over hvilke parametere som vil ha stor betydning for fuktforholdene og muggvekstrisikoen, samt om det bør tas spesielle hensyn dersom massivtreelementer benyttes i slike konstruksjoner. Det skal også undersøkes gunstige og ugunstige konstruksjonsoppbygginger og om dampsperre bør brukes eller ikke på oversiden av elementene.

### 4.2.2 Konstruksjon

Konstruksjonen som skal analyseres er et flatt kompakt tak med massivtreelementer som bærekonstruksjon. I oppgaven er det valgt å definere en standardkonstruksjon som referansekonstruksjon for de ulike parametervariasjonene som skal gjennomføres i studie. Oppbyggingen til standardkonstruksjonen (fra utside til innside) og en illustrasjon av hvordan denne kan se ut er vist nedenfor. Hvilke dampsperrsjikt som blir vurdert vil variere mellom hoved- og tilleggsstudiet.



**Figur 4.2.1:** Standardkonstruksjon benyttet i WUFI Pro beregningene. Illustrasjonen er hentet fra (Byggforskserien 2018c)

Massivtre vil ha god varmeisolerende evne, men vil ikke være tilstrekkelig nok for seg selv til å oppfylle minstekrav til U-verdi i henhold til byggt teknisk forskrift (TEK 17). Konstruksjonen må derfor varmeisolereres ytterligere. Se vedlegg B for U-verdi beregninger til takkonstruksjonen.

### 4.2.3 Fuktkilder

I WUFI Pro beregningene blir effekter av luftfuktighet i ute- og inneluft, samt byggfukt vurdert. Det blir sett bort i fra effekter fra vannlekkasjer gjennom taktekningen.

### 4.2.4 Mulige fuktproblemer

I kapittel 2.3 er det listet opp ulike årsaker som kan gi fuktrelaterte skader i kompakte tak. For flate kompakte tak med massivtreelementer vil følgende fuktproblemer ofte være mest kritisk (Time et al. 2008, Glass et al. 2013):

- Risiko for høy RF på ytre overflate av massivtreelement som kan føre til muggvekst dersom vekstforholdene her blir gunstige.
- Risiko for høy RF på ytre overflate av isolasjonssjikt som kan føre til muggvekst dersom vekstforholdene her blir gunstige.
- Høyt byggfuktnivå i massivtreelement etter lukking av konstruksjonen.
- Risiko for kondens og fuktakkumulering i isolasjonssjikt.

## 4.3 Beregningsoppsett og inngangsverdier

### 4.3.1 Beregningsverktøy

Beregningene i dette studie er utført med verktøyene WUFI Pro 6.3 og WUFI Mould Index VTT. Her er hoveddelen av arbeidet utført i WUFI Pro. WUFI Pro vil brukes til beregning av hygrotermiske forhold i konstruksjonene (RF og temperatur), mens WUFI Mould Index VTT vil brukes til vurdering av muggvekstrisikoene til konstruksjonene. Nedenfor vil det gis en kort beskrivelse av begge disse.

#### WUFI Pro 6.3

WUFI Pro 6.3 er et endimensjonalt simuleringsverktøy, utviklet av Fraunhofer Institut für Bauphysik i Tyskland, som beregner koblet varme- og fukttransport i endimensjonale flersjiktets bygningskomponenter over tid (WUFI 2006). Dette programmet egner seg bra til vurdering av (Thue et al. 2007):

- Uttørkingstid for byggfukt
- Kondensfare i bygningskonstruksjoner
- Hygrotermiske forhold i bestemte dybder i ytterkonstruksjoner ved klimavariasjoner eller ved ekstreme klimaforhold

I hygrotermiske konstruksjonsberegninger vil varme- og fukttransportmekanismer ha stor betydning. Tabell 4.3.1 nedenfor viser hvilke transportmekanismer WUFI Pro inkluderer og utelater i beregningene.

Transportmekanismer		
	Inkludert i WUFI	Ikke inkludert i WUFI
<b>Varmetransport</b>	Varmeledning	
	Entalpiendringer ved faseovergang i fukt	Varmetransport ved konveksjon
	Kort- og langbølget stråling	
<b>Damptransport</b>	Dampdiffusjon	
	Løsningsdiffusjon	Fukttransport ved konveksjon
<b>Væsketransport</b>	Kapillærledning	Hydraulisk strømning
	Overflatekrypning	Dreneringsstrømning
		Elektrokinetiske og osmotiske effekter

**Tabell 4.3.1:** Oversikt over hvilke transportmekanismer som er inkludert og utelatt i WUFI Pro 6.3

Ser av tabellen ovenfor at programmet ikke tar hensyn til effekter fra konveksjon (luftstrømning). Dette skyldes at disse effektene vil være for komplekse til å kvantifisere numerisk og som regel ikke opererer endimensjonalt (WUFI 2006). Av fukttransportmekanismene i tabell 4.3.1 vil dampdiffusjon bli dominerende mekanisme i dampfasen, mens kapillærledning blir dominerende mekanisme i væskefasen.

#### Mould Index VTT

WUFI Mould Index VTT er et tilleggsprogram til WUFI sin programvare, utviklet i samarbeid mellom the Finnish research institute VTT og Fraunhofer IBP, som bruker en matematisk-empirisk modell til å anslå muggvekst i bygningskonstruksjoner som funksjon av type material, temperatur, relativ fuktighet og eksponeringstid (WUFI 2017). Modellen er basert på arbeidet til Viitanen (1996), Hukka & Viitanen (1999) og Viitanen et al. (2000), og refereres normalt til som VTT-modellen. Nedenfor vil det gis en beskrivelse av de viktigste momentene og valg som er blitt tatt med hensyn på bruk av WUFI Mould Index VTT i oppgaven. En mer detaljert beskrivelse av muggvekstmodellen og formlene denne baseres på er gitt i vedlegg A.

Modellen bruker Muggindeks  $MI$  til å beskrive omfanget av muggveksten på materialoverflater. En beskrivelse av de ulike muggindeksverdiene er spesifisert i tabell 4.3.2 nedenfor. Disse verdiene blir brukt som designkriterier i vurdering av muggvekstrisikoene til konstruksjonsvariantene i studie.

Muggindeks $MI$	Beskrivelse
0	Ingen vekst
1	Noe vekst. Bare synlig ved mikroskop
2	Moderat vekst. Bare synlig ved mikroskop
3	Noe vekst kan sees visuelt på overflate
4	Visuell vekst på overflate som dekker over 10 %
5	Visuell vekst på overflate som dekker over 50 %
6	Visuell vekst på overflate som dekker rundt 100 %

**Tabell 4.3.2:** Muggindekser i WUFI Mould Index VTT

Modellen opererer med faktoren  $RF_{crit}$  som beskriver det laveste RF-nivået som muliggjør muggvekst når materialoverflaten er eksponert for forholdene over en lang tidsperiode. Det antas at muggvekst ikke skjer ved temperaturer under 0 °C og over 50 °C, mens eventuell tilstedeværende muggsopp går i dvale ved temperaturer under - 5 °C. Her vil lavere temperaturer gi høyere  $RF_{crit}$ , mens høyere temperaturer gir lavere  $RF_{crit}$  opp til et visst nivå. Se tabell 4.3.3 nedenfor.

Temperatur [°C]	Kritisk relativ fuktighet $RF_{crit}$ [%]
$T < 0$	Antas ingen vekst
$0 \leq T \leq 20$	$-0,00267 \cdot T^3 + 0,160 \cdot T^2 - 3,13 \cdot T + 100,0$
$20 < T \leq 50$	$RF_{min}$
$50 < T$	Antas ingen vekst

**Tabell 4.3.3:** Beskrivelse av kritisk RF-nivå for muggvekst  $RF_{crit}$  i forhold til temperaturnivå

For tre og trebaserte materialer vil  $RF_{min}$  være 80 %, mens for mer resistente materialer, eksempelvis mineralull, opererer programmet med en  $RF_{min}$  lik 85 %.

Programmet krever at følgende spesifiseres før en beregning kan utføres:

#### 1. Beboereksponeeringsklasse:

Her kan man velge mellom fire nivå:

- Ingen innvirkning på beboere forventet
- Innvendig overflate eller overflate i kontakt med inneluft
- Overflater inne i konstruksjonen uten direkte kontakt med inneluft
- ASHRAE 160 krav

For begge ytelseskontrollene i studie ble det valgt *Overflater inne i konstruksjonen uten direkte kontakt med inneluft.*

## 2. Materialtype og -egenskaper:

Dette blir tatt hensyn til gjennom faktorene: følsomhetsklasse, materialklasse, overflatekvalitet og treslag. Disse kan enten bestemmes manuelt eller så kan man velge et materiale i programmet med forhåndsdefinerte materialfaktorer. I studie ble disse bestemt manuelt. Figurene nedenfor viser hvilke materialfaktorer som ble valgt for kontroll på massivtre og mineralull.

Sensitivity Class	
<input type="radio"/> Very sensitive	<input checked="" type="radio"/> Sensitive
<input type="radio"/> Medium resistant	<input type="radio"/> Resistant
Material Class	
<input type="radio"/> Significant decline	<input checked="" type="radio"/> Relevant decline
<input type="radio"/> Relatively low decline	<input type="radio"/> Almost no decline
Type of surface	
<input checked="" type="radio"/> Planed	<input type="radio"/> Rough
<input type="radio"/> User defined	<input type="text" value="0"/>
Type of wood	
<input checked="" type="radio"/> Softwood	<input type="radio"/> Hardwood
<input type="radio"/> User defined	<input type="text" value="0"/>

Figur 4.3.1: Valg av materialfaktorer i WUFI Mould Index VTT for massivtre

Sensitivity Class	
<input type="radio"/> Very sensitive	<input type="radio"/> Sensitive
<input checked="" type="radio"/> Medium resistant	<input type="radio"/> Resistant
Material Class	
<input type="radio"/> Significant decline	<input type="radio"/> Relevant decline
<input checked="" type="radio"/> Relatively low decline	<input type="radio"/> Almost no decline
Type of surface	
<input checked="" type="radio"/> Cleaned	<input type="radio"/> Soiled
<input type="radio"/> User defined	<input type="text" value="0"/>

Figur 4.3.2: Valg av materialfaktorer i WUFI Mould Index VTT for mineralull

## 3. Dokument som viser variasjonen i temperatur og relativ fuktighet til analysepunktet over beregningsperioden:

Dette genereres fra beregningene i WUFI Pro for punktet i konstruksjonen som skal analyseres.

Når dette er spesifisert og en beregning er gjennomført, vil programmet presentere figurer av følgende:

- Variasjonen i temperaturen  $T$  i [ $^{\circ}C$ ], RF i [%] og  $RF_{crit}$  i [%] over beregningsperioden.
- Variasjonen i Muggindeksen  $MI$  og muggveksthastigheten over beregningsperioden.
- Trafikklys som enten viser grått, grønt, gult eller rødt.

Trafikklyset er en hjelpefunksjon i programmet som gir en generell vurdering av muggvekstrisikoen i analysepunktet og alvorligheten til et muggvekst angrep. Hvilket lys som fås ut vil avhenge av resulterende muggindeks  $MI$  på materialoverflaten i samsvar med valgte beboerekategorier. Grått lys vil representere at en vurdering ikke er mulig å gjennomføre (gjelder for beregningsperioder  $< 1$  år). Tabell 4.3.4 nedenfor beskriver forutsetningene bak rødt, gult og grønt lyst.

Trafikklysfarge	Forutsetninger	Kommentar
	Innvendig overflate: $MI > 2$ Overflate inne i konstruksjonen: $MI > 3$ ASHRAE 160: $MI > 3$	Normalt ikke akseptabelt
	Innvendig overflate: $1 \leq MI \leq 2$ Overflate inne i konstruksjonen: $2 \leq MI \leq 3$ Ingen innvirkning på beboere forventet: $MI \geq 3$ ASHRAE 160: $1 \leq MI \leq 3$	Ytterligere kriterier eller undersøkelser er nødvendig for å vurdere akseptbarhet
	Innvendig overflate: $MI < 1$ Overflate inne i konstruksjonen: $MI < 2$ Ingen innvirkning på beboere forventet: $MI < 3$ ASHRAE 160: $MI < 1$	Normalt akseptabelt

**Tabell 4.3.4:** Forutsetninger for trafikklysfarger i WUFI Mould Index VTT

#### 4.3.2 Ytelseskontroller

I parameterstudie blir følgende ytelseskontroller utført:

- RF og temperatur i ytterste mm av massivtreelement
- RF og temperatur i ytterste mm av mineralull

Med hensyn på muggvekst vil ytterste mm av massivtreelementet som regel være mest kritisk. Årsaken er at trevirke er et mye bedre vekstmedium enn mineralull og temperaturforholdene i ytterste mm av mineralullen vil som regel være ugunstig i forhold til muggvekst.



### 4.3.3 Uteklima

Uteklimaet vil ha stor betydning for fuktforholdene i takkonstruksjonen. I fuktberegninger anbefaler Geving & Thue (2002) at det blir brukt referanseår med større fuktbelastning på konstruksjonen enn et ordinært gjennomsnittså, for å oppnå økt fuktsikkerhet til konstruksjonen som vurderes. Det er derfor valgt å benytte seg av Moisture Design Reference Years (MDRY) for klimadata. Dette finnes for 12 forskjellige steder i Norge. Disse klimadataene har en returperiode på ca. 10 år og baserer seg på målinger utført 3 ganger i døgnet av Meteorologisk Institutt (MI), som er omregnet til timeverdier ved lineær interpolasjon (Thue et al. 2007).

Det er valgt å undersøke følgende uteklima: Trondheim, Oslo, Bergen, Kristiansand, Mo i Rana, Tromsø og Karasjok. Bakgrunnen for dette er å undersøke hvordan takkonstruksjonen vil yte i flere ulike norske klima. Tabell 4.3.5 nedenfor viser noen av klimaparameterne for de valgte uteklimaene. Her er Trondheim valgt som standard uteklima i fuktberegningene.

	Midlere temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Midlere skyindeks [-]	Midlere RF [%]	Årlig normalregn [mm]
Trondheim	5,4	0,74	88,1	1234
Oslo	6,8	0,67	73,1	605
Bergen	8,1	0,71	79,2	2421
Kristiansand	7,3	0,65	79,3	1645
Mo i Rana	3,3	0,71	83,9	1290
Tromsø	2,1	0,69	81,8	1276
Karasjok	-3,1	0,77	87,3	249

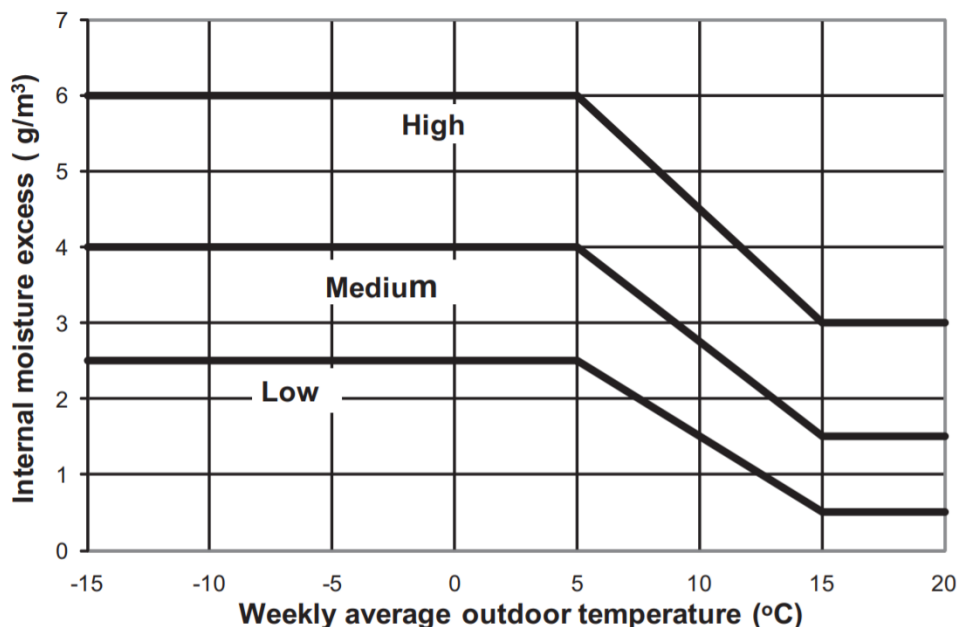
Tabell 4.3.5: Klimadata for valgte uteklima

### 4.3.4 Inneklima

Inneklimaet vil være avhengig av mange ulike parametere. Av disse vil innvendig luftfuktighet som regel være den viktigste (Geving & Thue 2002). I studie er det valgt å gjøre en forenkling hvor inneklimaet defineres gjennom en konstant innvendig lufttemperatur lik  $23^{\circ}\text{C}$  og et innvendig fukttilskudd som varierer med utelufttemperaturen.

I WUFI Pro definerer EN-ISO 13789 fem ulike fuktclasser med varierende innvendig fukttilskudd som funksjon av utelufttemperaturen. I en studie, gjennomført av Geving & Holme (2011), ble innvendig luftfuktighet (RF) og temperaturnivå målt i 117 hus i Trondheim. Studiet belyser at fuktclassene fra EN-ISO 13789 ikke samsvarer med reelle

verdier og at disse bør modifiseres før de blir brukt i hygrottermiske analyser. Til slutt i studie kommer de med et forslag til lavt, middels og høyt innvendig fukttilskudd som funksjon av utelufttemperaturen. Dette er presentert i figur 4.3.3 nedenfor.



**Figur 4.3.3:** Lavt, middels og høyt innvendig fukttilskudd i bygninger, basert på 10 % kritiske verdier (Geving & Holme 2011)

Det er valgt å bruke presenterte verdier fra Geving & Holme (2011) for innvendig fukttilskudd i beregningene. Verdiene legges inn manuelt i WUFI Pro. Nivåene i figur 4.3.3 tilsvarer følgende:

- Lavt fukttilskudd ( $0,5 - 2,5 \frac{g}{m^3}$ )
  - Stue i hus med få beboere og rom med liten fuktbelastning (eks: bod/kjeller)
- Middels fukttilskudd ( $1,5 - 4 \frac{g}{m^3}$ ) → Standard innvendig fukttilskudd
  - Stue i hus med mange beboere og soverom
- Høyt fukttilskudd ( $3,0 - 6,0 \frac{g}{m^3}$ )
  - Bad og vaskerom

#### 4.3.5 Materialparametere

I WUFI Pro er materialparameterne delt opp i basisparametere og hygrottermiske funksjoner. Basisparametere angir egenskapene til materialet i tørr tilstand og må være tilstede for at en beregning skal kunne utføres (WUFI 2006). De hygrottermiske funksjonene er valgfri å definere, men åpner for at basisparametere kan endre seg i forhold til fukt- og

temperaturforholdene i materialet under en beregning. Materialparameterne er presentert i figur 4.3.6 nedenfor. Disse blir forklart i detalj i kapittel 3.

Basisparametere	Hygrotermiske funksjoner
Romdensitet $\rho$ [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	Fuktlagringsfunksjon (sorpsjonskurve) [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
Porøsitet $\epsilon$ [ $\frac{m^3}{m^3}$ ]	Fuktdiffusivitetskoeffisient oppsuging $D_{ws}$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]
Spesifikk varmekapasitet $C$ [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]	Fuktdiffusivitetskoeffisient omfordeling $D_{ww}$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]
Termisk konduktivitet $\lambda$ (10 °C) [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]	Vanndampmotstandsfaktor $\mu$ , fuktavhengig [-]
Vanndampmotstandsfaktor $\mu$ [-]	Termisk konduktivitet $\lambda$ , fuktavhengig [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]
	Termisk konduktivitet $\lambda$ , temperaturavhengig [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]
	Entalpi $H$ , temperaturavhengig [ $\frac{J}{kg}$ ]

**Tabell 4.3.6:** Basisparametere og hygrotermiske funksjoner i WUFI Pro

#### Taktekning

Slik nevnt i kapittel 2.1 er det vanlig i kompakte tak å bruke takbelegg av asfalt, plast eller gummi. I WUFI Pro kan taktekningen defineres ved å enten legge inn et sjikt med ønsket materialdata, eller ved en forenklet variant hvor det spesifiseres en brukerdefinert  $S_d$ -verdi på utvendig overflate av takkonstruksjonen under fanen ”Overflaters overgangskoeffisient” i programmet. Da vil programmet simulere taktekningen som en overgangskoeffisient med høy vanndampmotstand uten tykkelse.

Det er valgt å undersøke bruk av både asfalt og PVC takbelegg. Bakgrunnen for dette er å undersøke hvilken effekt et mer dampåpent takbeleggsprodukt (PVC) vil ha i forhold til et svært damptett takbeleggsprodukt (asfalt). Byggforskserien (2003b) gir at et ett-lags asfalt takbelegg vil ha en  $S_d$ -verdi på 135 m, mens et PVC takbelegg vil ha en  $S_d$ -verdi mellom 12 - 24 m. Følgende takbeleggstilfeller vil undersøkes:

- PVC takbelegg ( $S_d$ -verdi = 15 m)
  - Mer dampåpen løsning. Kan gi noe økt uttørkingsevne utover i takkonstruksjonen.
- To-lags asfalt takbelegg ( $S_d$ -verdi = 270 m) → Standardkonstruksjon
  - Mer robust og damptett løsning.

Begge disse tilfellene vil defineres ved bruk av den forenklete varianten hvor det spesifiseres en brukerdefinert  $S_d$ -verdi på utvendig overflate. Materialdata for takbeleggstypene er presentert i tabell 4.3.8.

Det ble valgt å se bort i fra takbelegg med enda høyere vanndampdiffusjonsmotstand, eksempelvis takbelegg av butyl som kan ha en  $S_d$ -verdi opp mot 600 m (Noreng & Uvsløkk 2010). Årsaken er at forskjellene mellom bruk av takbelegg med  $S_d$ -verdi lik 270 m og 600 m anses til å bli relativt små.

#### Isolasjon

Slik nevnt i kapittel 2.1 kan både ubrennbar og brennbar isolasjon brukes på oversiden av massivtreelementer i flate kompakte tak, gitt at branntekniske tiltak tas hensyn til. Det er derfor valgt å undersøke bruk av både ubrennbar isolasjon (mineralull) og brennbar isolasjon (EPS). Mineralull og ekspandert polystyren (EPS) vil ha tilsvarende varmetekniske egenskaper, mens EPS vil ha betydelig større vanndampmotstand enn mineralull (Byggforskserien 2004). Følgende isolasjonstilfeller vil undersøkes:

- Mineralull 250 mm → Standardkonstruksjon
  - Homogent sjikt med kun ubrennbar isolasjon.
- EPS 220 mm + Mineralull 30 mm
  - Bruk av brennbar isolasjon som er tildekt på oversiden med ubrennbar isolasjon. Kan benyttes for bygninger i brannklasse 1 og 2.
- Mineralull 100 mm
  - Skal tilsvare tilfelle ved sluk. Byggforskserien (2018c) gir at isolasjonstykkelsen her bør være minst 100 mm.

Det er valgt å bruke mineralull og EPS med en termisk konduktivitet lik  $0,04 \frac{W}{m \cdot K}$  som er definert av Fraunhofer IBP. Materialdata for isolasjonstypene er vist i tabell 4.3.8. Tabellen viser at EPS vil ha ca. 23 ganger så høy vanndampmotstand som mineralull.

Både mineralull og EPS er ikke-hygroskopiske materialer og har ingen sorpsjonskurve definert i programmet. Siden WUFI Pro er avhengig av et materials sorpsjonskurve for å kunne utføre en beregning, blir begge disse tilegnet en standardisert sorpsjonskurve. I forhold til materialenes reelle sorpsjonskurver, som er tilnærmet lik 0 for alle RF-nivå, vil den standardiserte sorpsjonskurven gi for høye verdier. Dette er noe WUFI oppgir selv hvor de skriver at disse kurvene nødvendigvis ikke vil samsvare med virkelige verdier og at de bør brukes med varsomhet (WUFI 2006). Stellander (2012) har undersøkt bruk av mineralull sin reelle sorpsjonskurve i WUFI Pro. Her ble det kartlagt at denne sorpsjonskurven ga numeriske problemer i programmet på grunn av for lave verdier. På bakgrunn av dette ble det derfor bestemt å ikke endre på den standardiserte sorpsjonskurven til isolasjonstypene.

## Dampsperrer

På bakgrunn av det som er skrevet i kapittel 2.1 er det i oppgaven valgt å undersøke bruk av ulike typer dampsperrer på oversiden av massivtreelementet i takkonstruksjonen. Følgende dampsperretilfeller vil undersøkes:

- Ingen dampsperre → Antar massivtreelement yter funksjon som dampsperre
- Tradisjonell dampsperre → PE-folie ( $S_d = 87$  m)
- Dampbrems → Vapour retarder ( $S_d = 2$  m)
- Smart dampsperre → AirGuard Smart ( $S_d = 0,02$  m (våt) - 102,5 m (tørr))

Materialdata for dampsperrere typene er presentert i tabell 4.3.8.

I følge kapittel 2.4 vil den tradisjonelle dampsperreren som anvendes i kompakte tak være PE-folie. Det er valgt å bruke en 0,2 mm tykk PE-folie som NTNU har definert i WUFI Pro sin materialdatabase. Denne har en konstant  $S_d$ -verdi lik 87 m. For dampbremsen er det valgt å bruke et litt mer dampåpent produkt som har en konstant  $S_d$ -verdi lik 2 m definert av Fraunhofer IBP.

Flere ulike masteroppgaver har studert bruken av smarte dampsperrer (SDS) i bygningskonstruksjoner i nordiske klima (Stellander 2012, Thorsrud 2013, Agnalt 2013). Her er det tre typer SDS som går igjen: Intello, Novaflexx og AirGuard Smart. Både Intello og Novaflexx ligger inne i WUFI Pro sin materialdatabase. Resultater fra oppgavene viser at produktet AirGuard Smart vil ha gjennomsnittlig best ytelse av disse tre. Det er derfor valgt å undersøke dette produktet i parameterstudiet. I en mailutveksling mellom produsent Dupont Tyvek og Stellander (2012) ble det kartlagt at  $S_d$ -verdien til AirGuard Smart varierer mellom 102,5 meter i tørr tilstand og 0,02 meter i våt tilstand.  $S_d$ -verdier for AirGuard Smart er presentert i tabell 4.3.7 nedenfor. Disse ble lagt inn manuelt i WUFI Pro, hvor det ble tatt utgangspunkt i produktet Intello som er definert av Fraunhofer IBP. Andre materialparametere ble ikke endret siden dette ble ansett som å ha liten betydning.

<b>RF</b> [%]	0	12,5	25	37,5	41,5	62,5	75	87,5	95	97,5	100
<b><math>S_d</math>-verdi</b> [m]	102,5	102,5	34,3	18,2	3,4	1,5	0,17	0,07	0,03	0,02	0,02

**Tabell 4.3.7:**  $S_d$ -verdier for AirGuard Smart

I prosjektoppgaven ble bruk av byggetidstekning på oversiden av massivtreelementer trukket frem som et gunstig fuktsikringstiltak. Byggetidstekningen beskytter elementene mot oppfukning under byggefasen og vil fungere som dampsperre i ferdig takkonstruksjon.

Dette kan eksempelvis være et asfalt takbelegg med  $S_d$ -verdi lik 100 m. Det ble valgt å se bort i fra et slikt dampsperretilfelle på grunn av to årsaker. Det ene var at PE-folien som undersøkes har tilnærmet like høy  $S_d$ -verdi som et asfalt takbelegg, og det andre var at byggetidstekningen forutsetter som regel at massivtrelementene er helt tørre før dette legges noe som vil gi resultater som er mindre risikabelt fuktmessig.

#### Massivtre

Slik nevnt i kapittel 2.1 vil krysslimte massivtreelementer (KLT) være mest utbredt til bygningsformål. Det er derfor valgt å ta utgangspunkt i KLT i dette studiet. Kapittel 3 gir en innføring i materialparametere til KLT, samt hvordan dette skal modelleres i WUFI Pro. Materialdata for basisparameterne til KLT er presentert i tabell 4.3.8.

Kapittel 3.4 viser at KLT vil ha relativt høy vanndampmotstand. På bakgrunn av dette er det valgt å undersøke bruk av to ulike massivtretykkelser. Følgende tilfeller vil undersøkes:

- Massivtretykkelse 200 mm → Standardkonstruksjon
- Massivtretykkelse 160 mm

#### Materialdata tabell

Data for basisparameterne til de ulike materialene er presentert i tabellen nedenfor.

Basisparameter → Material ↓	Densitet $[\frac{kg}{m^3}]$	Porøsitet $[\frac{m^3}{m^3}]$	Spesifikk varmekapasitet $[\frac{J}{kg \cdot K}]$	Termisk konduktivitet $[\frac{W}{m \cdot K}]$	Vanndamp- motstandsfaktor [-]
<b>Taktekning:</b>					
PVC takbelegg	-	-	-	-	$S_d = 15 \text{ m}^{[1]}$
To-lags asfalt takbelegg	-	-	-	-	$S_d = 270 \text{ m}^{[1]}$
<b>Isolasjon:</b>					
Mineralull	60	0,95	850	0,04	1,3
EPS	15	0,95	1500	0,04	30
<b>Dampsperrer:</b>					
PE-folie	130	0,001	2200	1,65	87 000
Vapour retarder	130	0,001	2300	2,3	2 000
AirGuard Smart	85	0,086	2500	2,4	102500 - 20
<b>Massivtre:</b>					
Egendefinert KLT	420	0,72	- <sup>[2]</sup>	0,09	1587 - 18

<sup>[1]</sup> Takbeleggene blir simulert som en utvendig overgangskoeffisient med høy vanndampmotstand uten tykkelse

<sup>[2]</sup> Spesifikk varmekapasitet varierer med temperatur og fuktinnhold

**Tabell 4.3.8:** Materialdata for taktekning, isolasjon, dampsperrer og massivtre brukt i WUFI Pro beregninger

### 4.3.6 Beregningsperiode

Det er valgt en beregningsperiode på 6 år, fra 01.01 år 1 til 31.12 år 6. Dette gjør det mulig å undersøke om konstruksjonen oppnår fuktlikevekt eller om den vil fortsette å akkumulere fukt. Siden klimadataene baseres på timeobservasjoner er tidstrinn for beregningperioden satt til 1 time.

### 4.3.7 Startbetingelser

I WUFI Pro kan man bestemme temperaturen og fuktnivået i materialsjiktene før en beregning startes. Her kan temperaturen angis som middelerdi over hele konstruksjonen eller leses fra fil. Fuktnivået kan angis som typisk byggfuktnivå (gitt for hvert enkelt material i programmet), middelerdi over hele konstruksjonen (basert på uteluftens RF), leses fra fil eller manuelt legges inn som fuktmenge per volumenhet tørrstoff  $w$  i  $[\frac{kg}{m^3}]$ . Ved lesing av data fra fil kan man bestemme hvordan temperaturen og/eller fuktnivået varierer i dybdene i hvert enkelt materialsjikt.

#### Starttemperatur

Det er valgt en starttemperatur lik 5 °C over hele konstruksjonen. Denne vil være av liten betydning for beregningene da temperaturfordelingen i konstruksjonen vil jevne seg ut med utvendig og innvendig klima i løpet av få timer (Thue et al. 2007).

#### Startfuktnivå

Det er valgt å definere fire ulike startfuktnivå: lavt, middels-lavt, middels-høyt og høyt startfuktnivå. For alle tilfellene antas det at isolasjonen har blitt lagret forsvarlig slik at denne ikke har blitt påkjent av nedbør.

#### Lavt og middels-lavt startfuktnivå

I prosjektoppgaven ble det belyst flere ulike tiltak for å beskytte massivtreelementer mot fuktpåvirkning under byggefasen. To av tiltakene som ble nevnt er bruk av byggeteltsystemer og midlertidig tildekking av bygningsdeler og -arbeider. Av disse gir byggeteltsystemer best fuktbeskyttelse. Slike systemer kan beskytte helt mot at nedbør treffer bygningen og vil redusere oppfukting, samt uttørkingsbehovet til massivtreelementene betraktelig. Det vil også gi en tørrere og varmere byggeplass. Midlertidig tildekking av bygningsdeler og -arbeider er det som oftest gjennomføres på byggeplasser. Dette kan ved riktig utførelse sørge for at massivtreelementene ikke påkjennes direkte av nedbør.

Lavt startfuktnivå skal representere bygging med byggeteltsystemer. Massivtreelementene er ikke påkjent av nedbør under lagring eller montering, og har kun tatt opp noe fuktighet fra luften omkring. Disse har et gjennomgående fuktinnhold ut fra en RF lik 65 %. I følge sorpsjonskurven i figur 3.4.2 på side 19 vil dette gi et gjennomgående fuktinnhold lik 12 vekt-%.

For middels-lavt startfuktnivå er det antatt at takkonstruksjonen har blitt tildekket tilstrekkelig med presenninger e.l. slik at massivtreelementene ikke har blitt påkjent direkte av nedbør. Disse har derimot tatt opp fuktighet fra uteluften omkring, og har et gjennomgående fuktinnhold ut fra en RF lik 80 %. I følge sorpsjonskurven i figur 3.4.2 vil dette gi et gjennomgående fuktinnhold lik 16 vekt-%.

#### Middels-høyt og høyt startfuktnivå

I prosjektoppgaven ble det utført fuktmålinger i vegger, søyler og dekker av massivtre på en byggeplass i Trondheim, over en periode hvor bygningen gradvis ble lukket. Middels-høyt og høyt startfuktnivå tar utgangspunkt i fuktmålingene som er tatt i massivtredekkekonstruksjonen i 4.etg (øverste etasje) ved første måling. Taket over dekket ble her tett tre dager før måledagen. Disse fuktinnholds nivåene vil være mest representativt for fukt påkjenningen på et takelement under bygging. Det ble her utført fire individuelle målinger hvor fuktinnholdene ble målt i overflaten og 3 cm dybde. Massivtreelementene besto av krysslimte lameller av gran. Se vedlegg C for fuktmålingsoversikt.

For middels-høyt startfuktnivå er det antatt at de ytterste 2,5 cm av massivtreelementet har tatt opp vann, mens resten av elementet har et gjennomgående fuktinnhold ut fra en RF lik 80 % (16 vekt-%). Startfuktnivået er presentert i tabell 4.3.9 nedenfor.

Dybde [cm]	0 - 0,5	0,5 - 1	1 - 1,5	1,5 - 2	2 - 2,5	2,5 - 20
<b>Fuktinnhold <math>u</math> [vekt-%]</b>	35	33	28	23	19	16

**Tabell 4.3.9:** Middels-høyt startfuktnivå i massivtreelement

For høyt startfuktnivå er det antatt at de ytterste 3,5 cm av massivtreelementet har tatt opp vann, mens resten av elementet har et gjennomgående fuktinnhold ut fra en RF lik 80 % (16 vekt-%). Startfuktnivået er presentert i tabell 4.3.10 nedenfor.

Dybde [cm]	0 - 0,5	0,5 - 1	1 - 1,5	1,5 - 2	2 - 2,5	2,5 - 3	3 - 3,5	3,5 - 20
<b>Fuktinnhold <math>u</math> [vekt-%]</b>	40	36	32	29	26	23	20	16

**Tabell 4.3.10:** Høyt startfuktnivå i massivtreelement



Verdiene for middels-høyt og høyt startfuktnivå blir manuelt lagt inn i filer som leses av WUFI Pro. Da programmet ikke kan lese fuktinnhold i [vekt-%] må disse gjøres om til riktig enhet [ $\frac{kg}{m^3}$ ] ved å multiplisere med materialets densitet.

#### 4.3.8 Øvrige parametere

Innledningsvis i studie/oppgaven ble det gjennomført enkle beregninger i WUFI Pro for å undersøke hvilke parametere som vil ha betydning for de hygrotermiske forholdene i konstruksjonen. Tre av parameterne som viste seg å ha en merkbar effekt var:

- Eksplisitt strålingsbalanse
- Kortbølget strålingsabsorpsjonstall
- Skygge på taktekning

*Eksplisitt strålingsbalanse* gjør at programmet tar hensyn til avkjølingseffekten fra langbølget stråling. Dette gir gjennomsnittlig lavere temperaturer i de ytre sjiktene av konstruksjonen. Denne ble satt til å være på ( $\sqrt{\quad}$ ) for alle beregningsvarianter i hoved- og tilleggsstudiet.

*Kortbølget strålingsabsorpsjonstall* bestemmer taktekningens absorpsjon av solstråling. Her vil mørkere taktekning (større strålingsabsorpsjontall) absorbere mer solvarme enn lysere taktekning (mindre strålingsabsorpsjontall). Høyere verdi vil være mer gunstig for konstruksjoner med større muligheter for inadrettet uttørking, siden dette gir høyere temperaturer på taktekningen og de øverste delene av isolasjonssjiktet. I hovedstudie ble det valgt et standard strålingsabsorpsjonstall lik 0,7, som skulle tilsvare en grå/mørkegrå taktekning. Dette viste seg å være noe konservativt. Derfor ble det i tilleggsstudie valgt et høyere standard strålingsabsorpsjontall lik 0,85, som skulle tilsvare en enda mørkere taktekning. Effekten av økningen i strålingsabsorpsjonstallet er undersøkt og dokumentert i beregningstilfelle 12 og er beskrevet ytterligere i kapittel 5.3.2.

*Skygge* er noe som nylig har blitt lagt til som et valg i WUFI Pro. Det er mulig å velge mellom 5 ulike skygetilfeller: brukerdefinert, ingen, fra horisontal hindring, fra vertikal hindring og fra PV-moduler. Skygetilfellene vil påvirke både kortbølget strålingsabsorpsjonstall og langbølget strålingsemissivitet på ytre overflate ved å gi reduksjonsfaktorer på disse. Ingen skygge er valgt som standardparameter i både hoved- og tilleggsstudie, mens effekten av skygge fra PV-moduler er undersøkt og dokumentert i beregningstilfelle 18 i tilleggsstudie. Dette gir reduksjonsfaktorer på absorpsjonstallet lik 0,3 og emissiviteten lik 0,5.

### 4.3. Beregningsoppsett og inngangsverdier

Tabell 4.3.11 nedenfor viser en oppsummering av de øvrige parameterne som er valgt i WUFI Pro beregningene.

Parameter	Enhet	Verdi	Kommentar/Referanse
<b>Utvendig overflate:</b>			
Utvendig overgangsmotstand $R_{se}$	$[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$	0,04	(Standard Norge 2017)
$S_d$ -verdi	$[m]$	15 og 270	Varierer med takbeleggstilfelle
Eksplisitt strålingsbalanse	$[\sqrt{/\times}]$	✓	Avkjølingseffekten fra langbølget stråling blir tatt hensyn til
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall	$[-]$	0,7/0,85	Hovedstudie/Tilleggsstudie
Langbølget strålingsemissivitet	$[-]$	0,9	Standardverdi for de fleste overflater
Reduksjonsfaktor på absorpsjonstall	$[-]$	1,0/0,3	Ingen skygge/Skygge fra PV-moduler
Reduksjonsfaktor for emissivitet	$[-]$	1,0/0,5	Ingen skygge/Skygge fra PV-moduler
Terreng kortbølget refleksjonsgrad	$[-]$	0,2	Standardverdi
Regnvannsabsorpsjonstall	$[-]$	0	Ingen regnvannsabsorpsjon. Forutsetter tett taktekning
<b>Innvendig overflate:</b>			
Varmemotstand	$[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$	0,10	(Standard Norge 2017)
$S_d$ -verdi	$[m]$	0	Ingen innvendig overflatebehandling
<b>Andre parametere:</b>			
Nettoppbygging	$[-]$	100	Automatisk (II) Fint
Helning	$[^\circ]$	0	Flatt tak
Orientering	$[-]$	Sør	-
Tidstrinn	$[h]$	1	Klimadata baseres på timeverdier

**Tabell 4.3.11:** Øvrige parametere som ble brukt i WUFI Pro beregningene

## 4.4 Parametervariasjoner og beregningstilfeller

### 4.4.1 Parametervariasjoner

Tabellen nedenfor presenterer en oppsummering av alle parametervariasjonene som er gjennomført i parameterstudie:

Parameter	Varianter	Beskrivelse
Startfuktnivå	Lavt	12 vekt-% gjennomgående
	Middels-lavt	16 vekt-% gjennomgående
	Middels-høyt	Høyt fuktinnhold i ytterste 2,5 cm 16 vekt-% i resterende del
	Høyt	Høyt fuktinnhold i ytterste 3,5 cm 16 vekt-% i resterende del
Dampsperrer	Ingen dampsperre	
	PE-folie	$S_d$ -verdi = 87 m
	Vapour retarder	$S_d$ -verdi = 2 m
	AirGuard Smart	$S_d$ -verdi = 102,5 - 0,02 m
Uteklima	Trondheim	Høyest midlere RF
	Oslo	Lavest midlere RF
	Bergen	Høyest midlere temperatur
	Kristiansand	
	Mo i Rana	
	Tromsø	
	Karasjok	Lavest midlere temperatur
Innvendig fukttilskudd	Lavt	0,5 - 2,5 $\frac{g}{m^3}$
	Middels	1,5 - 4,0 $\frac{g}{m^3}$
	Høyt	3,0 - 6,0 $\frac{g}{m^3}$
Isolasjon	Mineralull 250 mm	Ubrennbar isolasjon
	EPS 220 mm + Mineralull 30 mm	Brennbar isolasjon tildekt med ubrennbar isolasjon
	Mineralull 100 mm	Representerer sluktilfelle
Taktekning	PVC takbelegg	$S_d$ -verdi = 15 m
	To-lags asfalt takbelegg	$S_d$ -verdi = 270 m
Massivtre	Tykkelse 200 mm	
	Tykkelse 160 mm	
Skygge	Ingen	
	PV-moduler	
Strålingsabsorpsjonstall	0,7	Grå/mørkegrå taktekening
	0,85	Mørkegrå/svart taktekening

Tabell 4.4.1: Oppsummering av parametervariasjoner i parameterstudie

Det er valgt å dele opp beregningstilfellene i to studier:

### Hovedstudie:

Parameterne *Startfuktnivå*, *Dampsperrer* og *Uteklima* ble vurdert til å være av størst betydning for massivtrekonstruksjonen. Variasjoner og kombinasjoner av disse vil derfor undersøkes mer i detalj i hovedstudiet. Det vil ikke gjennomføres variasjoner av andre parametere, men i stedet vil det brukes en standardparameter fra hver av disse. Hovedstudie består av 10 beregningstilfeller med totalt 40 beregningsvarianter. Se tabell 4.4.2 for beregningsmatrise.

### Tilleggsstudie:

Tilleggsstudie er en videreføring av beregningsvariantene i hovedstudiet. Det blir undersøkt et større antall parametervariasjoner, derimot ikke like mye i dybden som i hovedstudiet. Dette skal i stedet gi et overblikk over hvilke parametere som vil ha betydning for fuktforholdene og muggvekstrisikoen til massivtrekonstruksjonen. Parameterne som blir undersøkt her er: *Innvendig fukttilskudd*, *Isolasjontype og -tykkelse*, *Taktekningstype*, *Massivtretykkelse*, *Skygge* og *Strålingsabsorpsjonstall*. Tilleggsstudie består av 8 beregningstilfeller med totalt 19 beregningvarianter. Det første beregningstilfellet (nr. 11) er et videreføringstilfelle fra hovedstudiet. Bakgrunnen for dette er beskrevet i kapittel 5.3.3. Se tabell 4.4.3 for beregningsmatrise.

### Monitorposisjoner

Ytelseskontrollene som blir utført i studiet er RF og temperatur på ytre overflate av massivtreelementet og mineralullen. Dette er mulig i WUFI Pro ved bruk av monitorposisjoner. Disse gjør at man kan kontrollere de hygrotermiske forholdene i valgfri dybde i konstruksjonen. Programmet vil automatisk legge til monitorposisjon på utvendig og innvendig overflate, derimot er det valgt å legge inn en monitorposisjon i ytterste mm av massivtreelementet. Siden taktekingen simuleres som en utvendig overgangskoeffisient, blir utvendig monitorposisjon brukt for kontroll av mineralullen.

## 4.4.2 Beregningstilfeller hovedstudie

Tabell 4.4.2 nedenfor viser beregningstilfellene i hovedstudie. Her vil følgende effekter undersøkes: effekt av dampsperrsjikt med ulike startfuktnivå (1 - 4) og effekt av uteklima med ulike dampsperrsjikt (5 - 10). Tall i parentes referer til beregningstilfellet. Det brukes standardparametere for å gi et bedre sammenligningsgrunnlag for parametervariasjonene som utføres. Disse er vist i fet skrift.

Parameter	Varianter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Startfuktnivå	Lavt	X									
	Middels-lavt		X								
	<b>Middels-høyt</b>			X		X	X	X	X	X	X
	Høyt				X						
Dampsperrer	<b>Ingen</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	<b>PE-folie</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	<b>Vapour retarder</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	<b>AirGuard Smart</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Uteklima	<b>Trondheim</b>	X	X	X	X						
	Oslo					X					
	Bergen						X				
	Kristiansand							X			
	Mo i Rana								X		
	Tromsø									X	
	Karasjok										X
Innvendig fukttilskudd	Lavt										
	<b>Middels</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Høyt										
Isolasjon	<b>Mineralull 250 mm</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	EPS 220 mm + Mineralull 30 mm										
	Mineralull 100 mm (sluktilfelle)										
Taktekning	PVC takbelegg										
	<b>To-lags asfalt takbelegg</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Massivtre	<b>Tykkelse 200 mm</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Tykkelse 160 mm										
Skygge	<b>Ingen</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	PV-moduler										
Strålingsabsorpsjonstall	<b>0,7</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0,85										

Tabell 4.4.2: Beregningstilfeller og -varianter i hovedstudie

## 4.4.3 Beregningstilfeller tilleggsstudie

Tabell 4.4.3 nedenfor viser beregningstilfellene i tilleggsstudiet. Her vil følgende undersøkes: effekt av strålingsabsorpsjonstall (12), effekt av innvendig fukttilskudd (13), effekt av isolasjonstype (14), effekt av taktekning (15), effekt av massivtretykkelse (16), effekt av isolasjonstykkelse (17) og effekt av skygge (18). Tall i parentes referer til beregningstilfellet. Beregningstilfelle 11 er et videreføringstilfelle fra hovedstudie. Standardparametere er vist i fet skrift. Se kapittel 5.3.3 for begrunnelser bak valg av standardparametere.

Parameter	Varianter	11	12	13	14	15	16	17	18
Startfuktnivå	Lavt								
	Middels-lavt	X							
	<b>Middels-høyt</b>		X	X	X	X	X	X	X
	Høyt								
Dampsperrer	<b>Ingen</b>		X	X	X	X	X	X	X
	PE-folie	X							
	<b>Vapour retarder</b>		X	X	X	X	X	X	X
	AirGuard Smart								
Uteklima	<b>Trondheim</b>		X	X	X	X	X	X	X
	Oslo	X							
	Bergen	X							
	Kristiansand	X							
	Mo i Rana								
	Tromsø								
	Karasjok								
Innvendig fukttilskudd	Lavt			X					
	<b>Middels</b>	X	X		X	X	X	X	X
	Høyt			X					
Isolasjon	<b>Mineralull 250 mm</b>	X	X	X		X	X		X
	EPS 220 mm + Mineralull 30 mm				X				
	Mineralull 100 mm (sluktilfelle)							X	
Taktekning	PVC takbelegg					X			
	<b>To-lags asfalt takbelegg</b>	X	X	X	X		X	X	X
Massivtre	<b>Tykkelse 200 mm</b>	X	X	X	X	X		X	X
	Tykkelse 160 mm						X		
Skygge	<b>Ingen</b>	X	X	X	X	X	X	X	
	PV-moduler								X
Strålingsabsorpsjonstall	0,7	X							
	<b>0,85</b>		X	X	X	X	X	X	X

Tabell 4.4.3: Beregningstilfeller og -varianter i tilleggsstudie

## 4.5 Begrensninger og usikkerheter

Nedenfor vil begrensninger og usikkerheter med parameterstudie beskrives.

### Transportmekanismer i WUFI Pro:

Tabell 4.3.1 på side 29 viser hvilke transportmekanismer som er inkludert og utelatt i beregningsprogrammet WUFI Pro. Her ser man at effekter fra konveksjon (luftstrømning) ikke er inkludert. Byggforskserien (2018a) viser til at fukttransport via konveksjon ofte vil være mer kritisk enn diffusjon, siden dette kan føre til transport av store luftmengder som inneholder mye vanndamp. Effekter fra konveksjon kan også bidra positivt, siden dette kan gi takkonstruksjonen økt uttørkingsevne Uvsløkk (2008).

### Inneklimaet:

I beregningene er det valgt å definere inneklimaet i bygningen gjennom en konstant innvendig lufttemperatur i [ $^{\circ}C$ ] og et varierende innvendig fukttilskudd i [ $\frac{g}{m^3}$ ] i forhold til utelufttemperaturen. Dette vil være en stor forenkling. Det er mange andre parametere som også vil ha betydning for inneklimaet. Eksempler på dette er: strålingstemperatur, lufttrykk, ventilasjon og infiltrasjon m.m.

### Pålitelighet til resultater:

I vurdering av påliteligheten til de numeriske beregningene i WUFI Pro, ble det tatt utgangspunkt i antall konvergensfeil og verdien til massebalanse 1 og 2 for hver gjennomførte beregning. Antall konvergensfeil skulle ikke bli mer en 1 og massebalanse 1 skal ikke vike fra massebalanse 2 med mer enn 0,02. Disse ble håndtert ved å bruke en tettere nettoppbygging og adaptiv styring av tidstrinn. Dette gikk på bekostning av beregningstiden til beregningstilfellene. Dersom en beregning oppfylte disse kravene ble påliteligheten vurdert til å være tilstrekkelig.

### Begrensninger med WUFI Pro 6.3 og WUFI Mould Index VTT:

WUFI Pro 6.3 beregner koblet varme- og fukttransport i endimensjonale bygningskomponenter. Todimensjonale effekter blir derfor ikke tatt hensyn til. Modellen som defineres i programmet tar også hensyn til at materialsjiktene er 100 % homogene, noe som ikke vil samsvare helt med en reell situasjon. WUFI Pro oppgir selv at programmet benytter en rekke forenklinger i de numeriske beregningene. De legger også tydelig frem hva det blir sett bort i fra, og at noen av resultatene nødvendigvis ikke vil samsvare helt med virkeligheten. Brukeren av programmet må ta hensyn til dette ved vurdering av resultatene som fås ut. Eventuelle feil i resultatene kan skyldes mange ting, eksempler på dette er: feil i inngangsdata, numeriske problemer, programfeil m.m.

Muggvekstmodellen til WUFI Mould Index VTT baserer seg på visuell muggvekst på materialoverflater og tar ikke hensyn til at noen typer muggsopp dør ved temperaturer over 40 °C. Her er begrensningen satt ved 50 °C, som vil være noe konservativt. I programmet er største mulige kritisk RF-nivå for muggvekst satt til å være 85 %. Denne verdien er gjeldende for materialer av sement, plast, mineralull, metall og glass. Flere av disse materialene vil være svært dårlige vekstmedium for muggsopp. Det kan derfor være usikkerheter med denne verdien.

### **Menneskelige feil:**

I parameterstudie ble det gjennomført beregninger av svært mange ulike konstruksjonsvarianter i to forskjellige dataprogram: WUFI Pro 6.3 og WUFI Mould Index VTT. Det anerkjennes at menneskelige feil kan oppstå under prosessen med inn-tasting av inngangsdata, uthenting av data fra programmene, sammensetting av diagram m.m. Feil som er blitt oppdaget under analysene av resultatene har med en gang blitt utbedret.

### **Startfuktnivå:**

To av startfuktnivåene som er benyttet i studie, middels-høyt og høyt, er basert på fuktmålinger som er utført i en massivtredekkekonstruksjon i øverste etasje på en byggeplass i Trondheim våren 2019. Denne dekkekonstruksjonen har vært utsatt for utvendig klima over en lang tidsperiode, noe som ikke vil være reellt i forhold til en taksituasjon. Verdiene er justert ned i forhold til målte verdier, men disse vil nødvendigvis ikke samsvare helt med fuktnivåer som kan oppstå i massivtreelementer i takkonstruksjoner under byggefasen.

### **Materialparametere massivtre (KLT):**

For å kunne modellere massivtre (KLT) i WUFI Pro ble det utført et litteratursøk med formål å kartlegge laboratoriemålte verdier for materialparametere til KLT. Verdiene som ble hentet fra litteraturen og brukt videre i parameterstudie vil nødvendigvis ikke samsvare med verdier for massivtreelementer som blir produsert og brukt i Norge. De fleste materialparametere som ble brukt er basert på hva én kilde hadde målt disse til å være. Det vil derfor være usikkerheter tilknyttet disse verdiene.



---

# Kapittel 5

## Resultater og vurderinger hovedstudie

I dette kapitlet presenteres resultater og vurderinger for beregningstilfelle 1 - 10 i hovedstudie hvor totalt 40 beregningsvarianter ble analysert. Følgende effekter ble undersøkt:

- Effekt av dampsperrsjikt med ulike startfuktnivå (Beregningstilfelle 1 - 4)
- Effekt av uteklima med ulike dampsperrsjikt (Beregningstilfelle 5 - 10)

Det ble tatt kontroller av RF og temperatur i ytterste mm av massivtreelementet og mineralullen for å kunne vurdere fuktforholdene og muggvekstrisikoen til beregningsvariantene. I kompakte tak vil det generelt være en lav risiko for muggvekst på ytre overflate av mineralullsjiktet. Årsaken til dette er at mineralull er et dårlig vekstmedium, og vekstforholdene vil ofte være ugunstige (Time et al. 2008, Uvsløkk 2008). Kontrollene for ytterste mm av mineralullen viste derimot det motsatte for omtrent alle analyserte beregningsvarianter. Det kan være mange usikkerheter og momenter som kunne hatt påvirkning på hvorfor resultatene viser det de viser. Disse er beskrevet i slutten av kapitlet på side 74. På bakgrunn av dette er det i vurderingene hovedsakelig blitt fokusert på kontrollene for massivtreelementet. Resultater for kontrollene i mineralullen presenteres, men disse plasseres i vedlegg E kapittel E.1.

Videre i kapitlet vil resultater og vurderinger for hver undersøkte effekt presenteres suksessivt, etterfulgt av en oppsummering av resultatene og en evaluering av beregningsvariantene i hovedstudie. Det vil også belyses hvilken parameter i hovedstudie som vil være mest kritisk for muggvekstrisikoen til konstruksjonen.

## 5.1 Effekt av dampsperrsjikt med ulike startfuktnivå

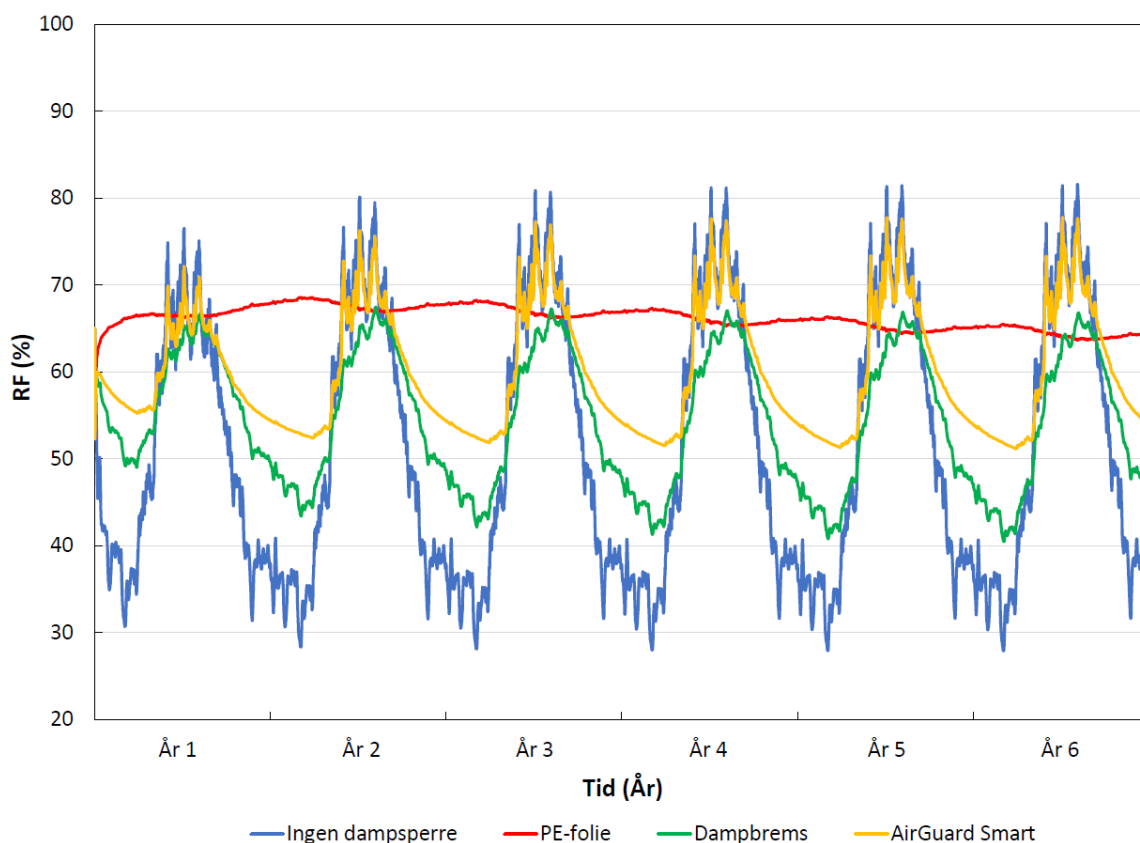
I dette kapittelet presenteres resultatene for beregningstilfelle 1 - 4 hvor effekter av dampsperretilfellene: *Ingen dampsperre*, *PE-folie*, *Dampbrems* og *AirGuard Smart* undersøkes sammen med startfuktnivåene: *Lavt*, *Middels-lavt*, *Middels-høyt* og *Høyt* for standard massivtrekonstruksjon i Trondheims klima. Se tabell 4.4.2 på side 45 for beregningsmatrise.

Videre vil det for hvert startfuktnivå (beregningstilfelle) presenteres to figurer som viser hvordan RF og muggindeksen vil variere for ytterste mm av massivtreelementet over beregningsperioden (6 år). I figurene vil de ulike beregningsvariantene ha hver sin farget graf. Fargene samsvarer mellom figurene for RF og muggindeks for hvert beregningstilfelle. Deretter presenteres to tabeller som viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge for begge kontroller, både ytterste mm av massivtreelementet og mineralullen, for alle beregningsvarianter i beregningstilfelle 1 - 4. Resultater for muggindeks og trafikklysfarge hentes fra muggvekstrisikovurderinger i WUFI Mould Index VTT. Til slutt vil det gis en vurdering av resultatene hvor viktige momenter fra hvert beregningstilfelle blir trukket fram. I vurderingene vil det hovedsakelig legges vekt på kontrollene for ytterste mm av massivtreelementet. Det vil også vurderes kort hvordan effektene som undersøkes i studie vil påvirke forholdene i ytterste mm av mineralullen.

### 5.1.1 Resultater - Variasjon i RF og muggindeks

#### Lavt startfuktnivå

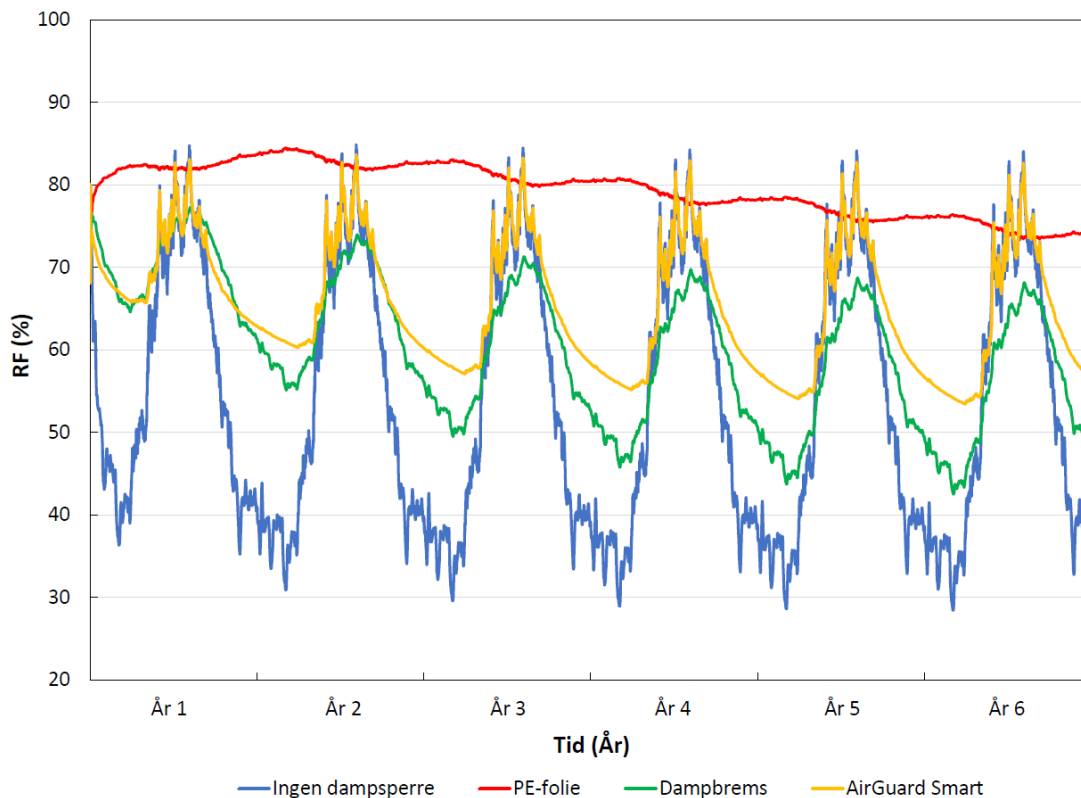
Figur 5.1.1 nedenfor viser variasjonen i RF for ytterste mm av massivtreelementet for konstruksjonsvariantene i beregningstilfelle 1 med lavt startfuktnivå. For dette startfuktnivået ble maksimal muggindeks 0 for alle dampspærretilfeller. Figur som viser variasjon i muggindeks er derfor ikke presentert. Se vedlegg E figur E.1.1 og E.1.2 for variasjonen i RF og figur E.1.9 for variasjonen i muggindeks for ytterste mm av mineralullen.



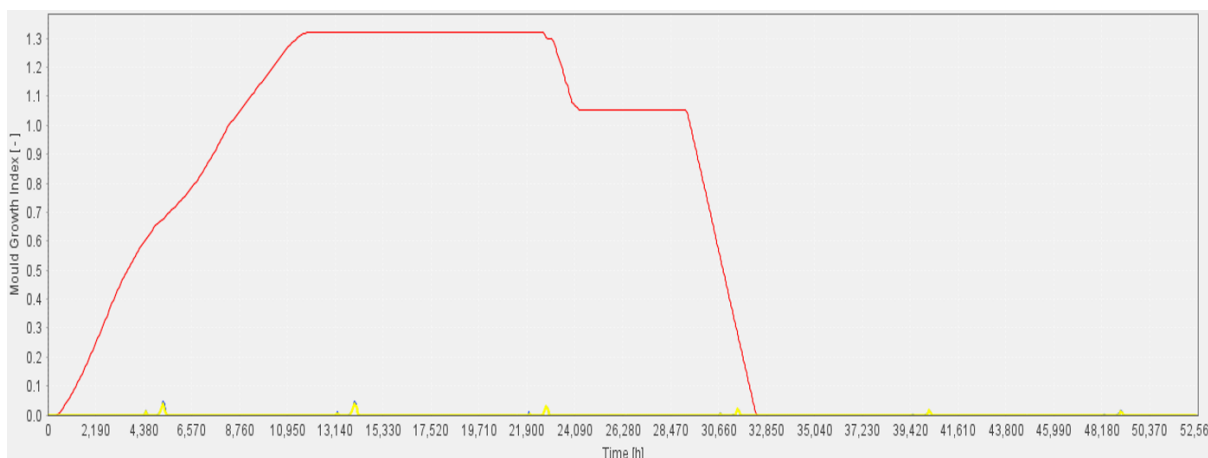
**Figur 5.1.1:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av dampspærresjikt med lavt startfuktnivå. Beregningstilfelle 1.

Middels-lavt startfuktnivå

Figur 5.1.2 og 5.1.3 nedenfor viser variasjonen i RF og muggindeks for ytterste mm av massivtreelementet for konstruksjonsvariantene i beregningstilfelle 2 med middels-lavt startfuktnivå. Se vedlegg E figur E.1.3 og E.1.4 for variasjonen i RF og figur E.1.10 for variasjonen i muggindeks for ytterste mm av mineralullen.



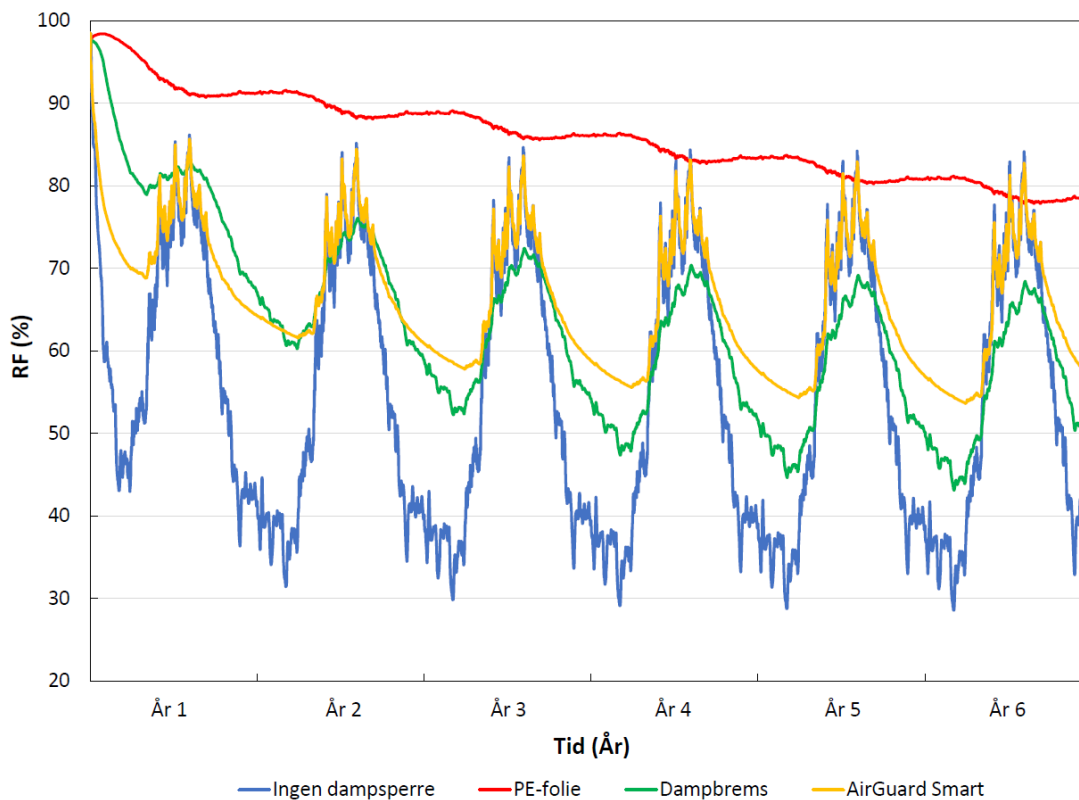
**Figur 5.1.2:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av dampspersjikt med middels-lavt startfuktnivå. Beregningstilfelle 2.



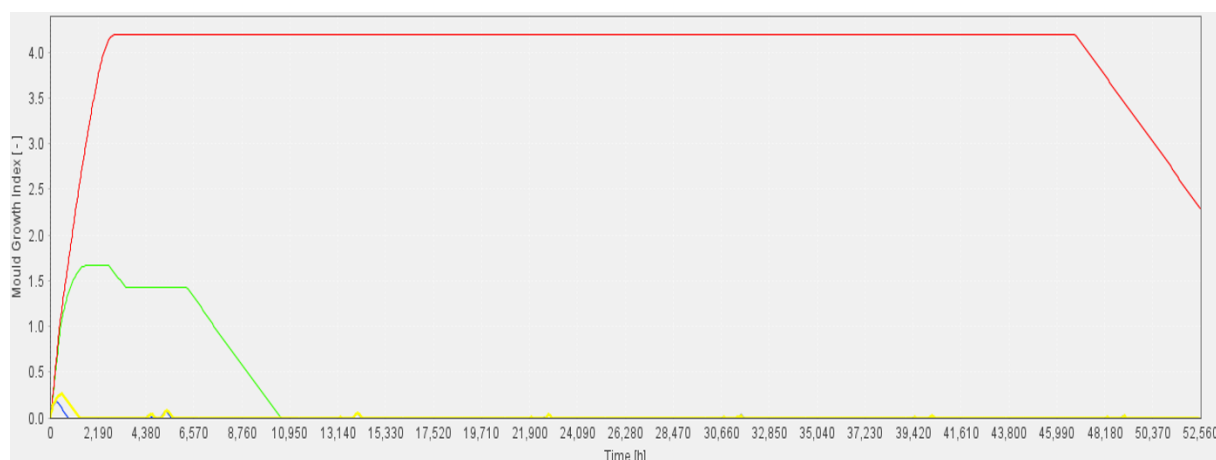
**Figur 5.1.3:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Effekt av dampspersjikt med middels-lavt startfuktnivå. Beregningstilfelle 2. Farger samsvarer med figuren ovenfor.

## Middels-høyt startfuktnivå

Figur 5.1.4 og 5.1.5 nedenfor viser variasjonen i RF og muggindeks for ytterste mm av massivtreelementet for konstruksjonsvariantene i beregningstilfelle 3 med middels-høyt startfuktnivå. Se vedlegg E figur E.1.5 for variasjonen i RF og figur E.1.11 for variasjonen i muggindeks for ytterste mm av mineralullen.



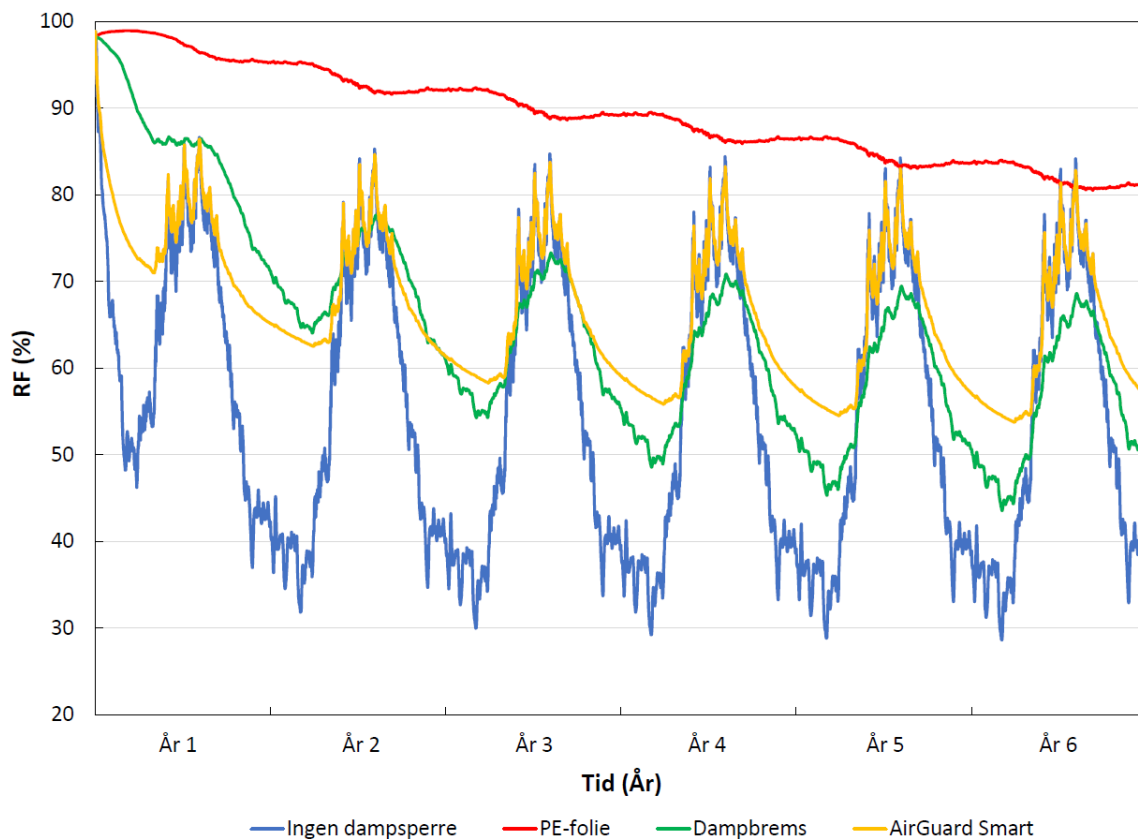
**Figur 5.1.4:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av dampspersjikt med middels-høyt startfuktnivå. Beregningstilfelle 3.



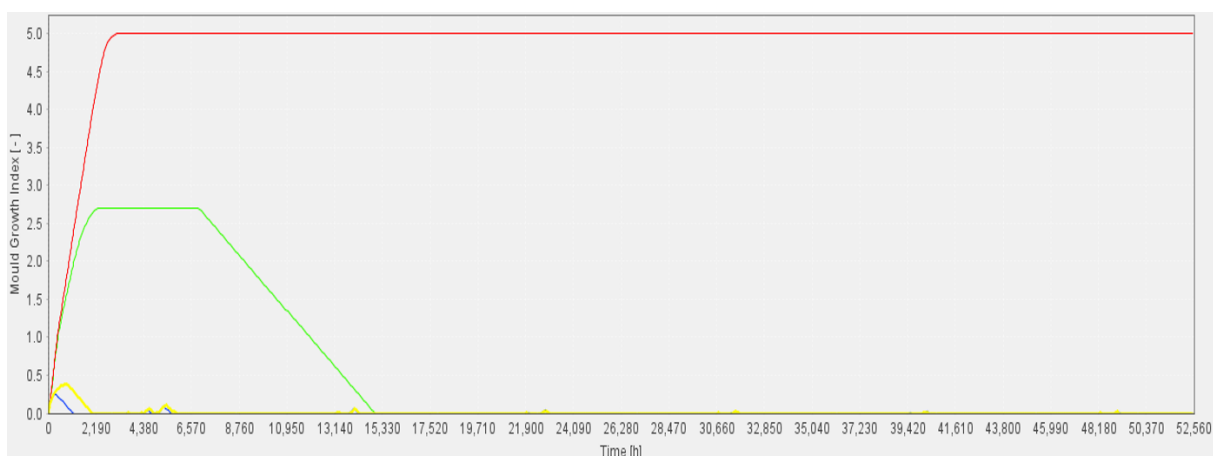
**Figur 5.1.5:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Effekt av dampspersjikt med middels-høyt startfuktnivå. Beregningstilfelle 3. Farger samsvarer med figuren ovenfor.

### Høyt startfuktnivå

Figur 5.1.6 og 5.1.7 nedenfor viser variasjonen i RF og muggindeks for ytterste mm av massivtrelementet for konstruksjonsvariantene i beregningstilfelle 4 med høyt startfuktnivå. Se vedlegg E figur E.1.6 for variasjonen i RF og figur E.1.12 for variasjonen i muggindeks for ytterste mm av mineralullen.



**Figur 5.1.6:** RF ytterste mm av massivtrelement. Effekt av dampsperrsjikt med høyt startfuktnivå. Beregningstilfelle 4.



**Figur 5.1.7:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtrelement. Effekt av dampsperrsjikt med høyt startfuktnivå. Beregningstilfelle 4. Farger samsvarer med figuren ovenfor.

### 5.1.2 Maksimal muggindeks og trafikklysfarge

Tabell 5.1.1 og 5.1.2 nedenfor viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge for kontrollene i ytterste mm av massivtreelementet og mineralullen. I tabellene er cellene enten farget grønn (akseptabelt), gul (usikkert, må vurderes ytterligere) eller rød (ikke akseptabelt). Se kapittel 4.3.1 for ytterligere beskrivelser av de ulike trafikklysfargene. Muggindeksverdiene presenteres med to desimaler for å bedre kunne illustrere forskjellene mellom de ulike konstruksjonsvariantene. I figurene står forkortelsene for følgende: SFN = Startfuktnivå, L = Lavt, M-L = Middels-lavt, M-H = Middels-høyt og H = Høyt. Figurene E.1.9 - E.1.12 i vedlegg E viser hvordan muggindeksene vil variere over beregningsperioden for ytterste mm av mineralullen.

<b>Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av massivtreelement</b>				
Konstruksjonsvariant → Beregningstilfelle (SFN) ↓	Ingen dampsperre	PE-folie	Dampbrems	AirGuard Smart
Beregningstilfelle 1 (L)	0	0	0	0
Beregningstilfelle 2 (M-L)	0,05	1,32	0	0,04
Beregningstilfelle 3 (M-H)	0,18	4,19	1,67	0,26
Beregningstilfelle 4 (H)	0,25	4,99	2,70	0,38

**Tabell 5.1.1:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelementet for konstruksjonsvarianter i beregningstilfelle 1 - 4.

<b>Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av mineralull</b>				
Konstruksjonsvariant → Beregningstilfelle (SFN) ↓	Ingen dampsperre	PE-folie	Dampbrems	AirGuard Smart
Beregningstilfelle 1 (L)	3,46	0,19	3,47	3,32
Beregningstilfelle 2 (M-L)	3,5	3,23	3,5	3,5
Beregningstilfelle 3 (M-H)	3,5	3,3	3,5	3,5
Beregningstilfelle 4 (H)	3,5	3,33	3,5	3,5

**Tabell 5.1.2:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av mineralullen for konstruksjonsvarianter i beregningstilfelle 1 - 4.

### 5.1.3 Vurderinger - Kontroll ytterste mm av massivtreelement

Ser av figurene ovenfor at ulike dampsperrsjikt i kombinasjon med startfuktnivå vil ha svært stor betydning for fuktforholdene i ytterste mm av massivtreelementet. Tabell 5.1.1 på forrige side viser at det også vil være en betydelig forskjell i muggvekstrisikoen til de ulike konstruksjonsvariantene. Av figurene ser man at for alle startfuktnivå vil det være merkbare forskjeller i RF mellom de undersøkte dampsperretilfellene. Konstruksjonsvariantene med ingen dampsperre vil ha størst variasjon i RF i løpet av hvert beregningsår, påvirkes minst av endringer i startfuktnivå og er de tilfellene hvor fuktigheten på oversiden av massivtreelementet tørker raskest ut. Konstruksjonsvariantene med PE-folie vil ha minst variasjon i RF, er mest følsom for endringer i byggfuktnivå spesielt med tanke på muggvekstrisiko og er de tilfellene hvor fuktigheten på oversiden av massivtreelementet tørker tregest ut. Konstruksjonsvariantene med dampbrems og AirGuard Smart blir en mellomting mellom ingen dampsperre og PE-folie. Her vil RF svinge mindre enn for tilfellene med ingen dampsperre, mens nivået holder seg gjennomsnittlige lavere enn for tilfellene med PE-folie. Derimot ser man at muggvekstrisikoen for tilfellene med AirGuard Smart påvirkes lite av endringer i startfuktnivå, mens muggvekstrisikoen for tilfellene med dampbrems endres betraktelig ved høye startfuktnivå.

Forskjellene i RF-nivå mellom de undersøkte dampsperretilfellene kommer trolig av vandampmotstandsforskjellene og egenskapene til disse. Slik gitt i kapittel 2.2 vil fuktighet bevege seg utover til de ytre sjiktene av konstruksjonen på vinterstid og innover til de indre sjiktene av konstruksjonen på sommerstid, siden damptrykkforskjeller gir en drivkraft for diffusjon. Dersom det ikke brukes dampsperrsjikt vil denne fukttransporten ikke begrenses og oversiden av massivtreelementet vil oppleve større endringer i RF på grunn av økt oppfukting på sommerstid og økt uttørking på vinterstid. Om det brukes en dampbrems vil denne fukttransporten begrenses. Dampbremsen, som har en  $S_d$ -verdi lik 2 m, tillater at noe fuktighet i massivtreelementet kan transportes utover på vinterstid, mens sjiktet begrenser noe av fukttransporten innover fra isolasjonen på sommerstid. Dette bidrar til en mindre variasjon i RF på oversiden av massivtreelementet. Slik gitt i kapittel 4.3.5 vil AirGuard Smart være dampåpen ved høy RF og relativt damptett ved lav RF. Ser av de gule grafene at på sommerstid når RF blir høy, reduseres vandampmotstanden til AirGuard Smart slik at fuktighet kan transporteres innover gjennom sperresjiktet. Dette medfører en oppfukting av oversiden av massivtreelementet. Oppfuktingen blir noe mindre enn ved ingen dampsperre. På vinterstid når RF blir lav, øker vandampmotstanden til AirGuard Smart og fukttransporten utover i konstruksjonen begrenses. Dette medfører at oversiden av massivtreelementet tørker ut mindre. Denne oppfuktingen og uttørkingen ved bruk av AirGuard Smart vil være svært avhengig av hvordan  $S_d$ -verdien til sperresjik-



tet varierer med RF. PE-folien, som har en  $S_d$ -verdi lik 87 m, vil være såpass damptett at omfordelingen av fukt på vinterstid og oppfukting på sommerstid nesten ikke merkes. Dette medfører at fuktigheten i massivtreelementet får svært begrenset uttørkingsmulighet utover og oversiden av elementet vil oppleve små variasjoner i RF. Uttørkingsmuligheten innover vil for alle tilfeller være redusert. Dette siden et 200 mm massivtreelementer har relativt høy vanndampmotstand.

### Lavt startfuktnivå

Ser av tabell 5.1.1 at for lavt startfuktnivå vil det ikke være noen risiko for muggvekst i ytterste mm av massivtreelementet for de undersøkte konstruksjonsvariantene. Figur 5.1.1 viser at tilfellet med ingen dampsperre er den eneste varianten som vil overstige kritisk RF-nivå (80 %) i løpet av beregningsperioden. Dette skjer på sommerstid i beregningsår 3 til 6. Årsaken til at denne konstruksjonsvarianten også får muggindeks lik 0, er at muggsopp krever ugunstige fuktforhold over en lengre tidsperiode for å kunne utvikle seg. Selv om alle konstruksjonsvarianter ikke får noen risiko for muggvekst, vil bruk av dampbrems bli mest gunstig. Her vil RF-nivået svinge lite og holde seg lavt gjennom hele beregningsperioden. Ser også av figur 5.1.1 at RF-nivået på oversiden av massivtreelementet øker fra beregningsår 1 til beregningsår 2 for alle konstruksjonsvarianter. Dette kan tyde på at byggfuktnivået var noe lavt i forhold til reell omliggende RF ved beregningsstart. Siden trevirke er hygrokopisk vil massivtreelementet derfor oppta noe fuktighet. Alle konstruksjonene oppnår derimot likevekt ved ca. år 3.

### Middels-lavt startfuktnivå

Ser av figur 5.1.2 og tabell 5.1.1 at for middels-lavt startfuktnivå vil konstruksjonsvarianten med dampbrems bli mest gunstig, både med hensyn på risiko for muggvekst, men også for å oppnå lav RF i massivtreelementet. Variantene med ingen dampsperre og Air-Guard Smart får noe høyere RF, derimot gir begge disse akseptable forhold med hensyn på muggvekst. Bruk av PE-folie vil for dette startfuktnivået bli mindre gunstig. RF vil her overstige kritisk nivå etter lukking, og det tar ca. 3 år før RF synker under dette nivået igjen. Figur 5.1.3 viser at det vil være en liten risiko for muggvekst her de første 3-4 årene. Konstruksjonsvarianten får en muggindeks over 1, som tilsier at det vil oppstå mikroskopsynlig muggvekst på overflaten i denne perioden. Likevel vurderer WUFI Mould Index VTT at konstruksjonsvarianten vil være akseptabel, siden overflaten ikke er i direkte kontakt med inneluften. (Denne varianten bedømmes derfor til å være akseptabel forutsatt at lufttettheten til massivtreelementet ivaretas).

### Middels-høyt startfuktnivå

Ser av figur 5.1.4 at for middels-høyt startfuktnivå, hvor de ytterste 2,5 cm av massivtreelementet er oppfuktet av nedbør, vil effekter av ulike dampsperrsjikt forsterkes. For både lavt og middels-lavt startfuktnivå ble bruk av dampbrems den mest gunstige varianten. For middels-høyt startfuktnivå vil denne varianten derimot bli mindre gunstig med tanke på RF og risiko for muggvekst. Slik beskrevet tidligere vil fukttransport innover gjennom massivtreelementet til inneluften være begrenset, siden elementet vil ha relativt høy vann-dampmotstand ( $S_d$ -verdi = ca. 7 m ved 80 % RF). De største uttørkingsmulighetene blir derfor utover. Når byggfuktnivået øker, vil massivtreelementet også få behov for lengre uttørkingstid før fuktnivåene når akseptable verdier. Dampbremsen er relativt dampåpen ( $S_d = 2$  m), men vil likevel begrense uttørkingen og omfordelingen av fukten utover. Derfor blir det en periode etter lukking hvor oversiden av massivtreelementet får ugunstige fuktforhold. Likevel vurderes denne varianten til å være akseptabel med hensyn på muggvekst.

Varianten med PE-folie blir for middels-høyt startfuktnivå ugunstig både med hensyn på RF-nivå og risiko for muggvekst. Her blir fuktigheten i de ytre centimeterene av massivtreelementet stengt inne mellom to relativt damptette sjikt, som gir lite til ingen uttørkingsmulighet. Varianten får en muggindeks over 4 og bør derfor unngås for slike byggfuktnivå.

Variantene med ingen dampsperre og AirGuard Smart påvirkes i mindre grad av økningen i startfuktnivået. Disse får noe høyere RF-nivå, men blir begge akseptable med hensyn på muggvekst.

### Høyt startfuktnivå

Ser av figur 5.1.6 at for høyt startfuktnivå, hvor de ytterste 3,5 cm av massivtreelementet er oppfuktet av nedbør, blir effektene man så for middels-høyt startfuktnivå forsterket ytterligere. Her blir konstruksjonsvariantene med PE-folie og dampbrems mer ugunstig med tanke på høy RF og risiko for muggvekst. Varianten med dampbrems får her såpass høy muggindeks (nesten 3) at dette bedømmes til å ikke være akseptabelt. Begge disse dampsperretilfellene bør derfor unngås for slike byggfuktnivå.

Resultatene for middels-lavt og middels-høyt startfuktnivå viste at ingen dampsperre og AirGuard Smart ble lite påvirket av en økning i startfuktnivå. Dette ser man for høyt startfuktnivå også. Begge variantene blir gunstig, men varianten med AirGuard Smart får noe høyere muggvekstrisiko. Årsaken til dette er at oversiden av massivtreelementet tørker ut raskere dersom det ikke brukes noen dampsperrsjikt.

### 5.1.4 Vurderinger - Kontroll ytterste mm av mineralull

Figur E.1.1 til E.1.6 i vedlegg E viser hvordan RF vil variere over beregningsperioden for ytterste mm av mineralullen. Figurene viser at RF på vinterstid vil ligge på 100 % med unntak av varianten med PE-folie og lavt startfuktnivå, mens det på sommerstid vil være en viss uttørking innover som gir lavere RF. Her ser man at startfuktnivået vil ha svært stor betydning for RF-nivåene for konstruksjonsvariantene med ingen dampsperre, dampbrems og AirGuard Smart. Dette skyldes trolig at disse dampsperretilfellene tillater noe fuktighet i massivtreelementet i å transporteres utover til isolasjonssjiktet. For lavt startfuktnivå, hvor konstruksjonen har et gjennomgående fuktinnhold ut fra RF lik 65 %, ser man at det tydelig vil være en uttørking på sommerstid for alle dampsperretilfeller. For middels-lavt startfuktnivå, hvor konstruksjonen har et gjennomgående fuktinnhold ut fra RF lik 80 %, ser man derimot at uttørkingen på sommerstid er redusert betraktelig. RF ligger her på 100 % omtrent hele beregningsår 4 til 6. For høyere startfuktnivå, middels-høyt og høyt, vil uttørkingen på sommerstid bli enda mindre og RF ligger her på 100 % omtrent hele beregningsperioden.

For konstruksjonsvariantene med PE-folie vil det bli en merkbar uttørking på sommerstid for alle startfuktnivå, og det vil være små forskjeller i RF mellom de ulike variantene. Dette skyldes trolig at PE-folien er svært damptett og begrenser fukttransporten utover til isolasjonen såpass mye at fuktnivået i massivtreelementet får liten betydning.

#### Lavt startfuktnivå

Ser av figur E.1.9 i vedlegg E som viser variasjonen i muggindeks at for lavt startfuktnivå vil risikoen for muggvekst i ytterste mm av mineralullen være svært avhengig av hvilket dampsperrsjikt som benyttes. Figurene E.1.1 og E.1.2 viser at det vil være en viss uttørking på sommerstid for alle dampsperretilfeller, derimot får konstruksjonsvarianten med PE-folie betydelig lavere muggindeks enn resterende varianter. Dette blir også den eneste varianten som blir akseptabel med hensyn på muggvekst. De andre variantene får gradvis høyere muggvekstrisiko i løpet av beregningsperioden og har på slutten en muggindeks over 3, som ikke vil være akseptabelt. Av disse tre vil varianten med AirGuard Smart bli mest gunstig, siden muggindeksen her vil ligge gjennomsnittlig lavere. Dette kan komme av at AirGuard Smart vil begrense mer fukt i å transportes fra massivtreelementet til isolasjonen i forhold til bruk av dampbrems, som gir mindre oppfukting av isolasjonen på vinterstid.

### Middels-lavt startfuktnivå

Figur E.1.10 viser variasjonen i muggindeks for konstruksjonsvariantene med middels-lavt startfuktnivå. Her ser man at muggindeksgrafene for variantene med ingen dampsperre, dampbrems og AirGuard Smart vil være omtrent identisk gjennom hele beregningsperioden, og alle disse får en maksimal muggindeks lik 3,5. For dette startfuktnivået vil valg mellom disse tre dampsperretilfellene derfor ha svært liten betydning for muggvekstrisikoen på oversiden av mineralullen, siden alle får like høy muggvekstrisiko.

For lavt startfuktnivå ble konstruksjonsvarianten med PE-folie gunstig med tanke på muggvekst i ytterste mm av mineralullsjiktet. Derimot viser tabell 5.1.2 at konstruksjonsvarianten med PE-folie blir ugunstig og får en svært høy maksimal muggindeks for middels-lavt startfuktnivå. Forskjellene mellom disse to startfuktnivåene var 15 % gjennomgående RF i konstruksjonen. Dette tilsier at muggvekstrisikoen på oversiden av mineralullsjiktet er svært følsom for endringer i startfuktnivå, selv ved bruk av PE-folie. Dersom man ser på figur E.1.10 som viser variasjonen i muggindeks ser man at konstruksjonsvarianten med PE-folie likevel vil få lavere muggvekstrisiko enn de andre variantene, selv om denne også blir ugunstig.

### Middels-høyt og høyt startfuktnivå

Figur E.1.11 og E.1.12 viser variasjonen i muggindeks for konstruksjonsvariantene med middels-høyt og høyt startfuktnivå. Her ser man at disse muggindeksgrafene vil ha store likheter med grafene for middels-lavt startfuktnivå i figur E.1.10. De eneste merkbare forskjellene i muggindeks ved en økning i startfuktnivået, er at grafene for ingen dampsperre, dampbrems og AirGuard Smart blir mer identisk, mens grafene for PE-folie får høyere stigning. Konstruksjonsvariantene med ingen dampsperre, dampbrems og AirGuard Smart vil her også få en maksimal muggindeks lik 3,5. Dette viser seg å være den høyeste muggindeksen som er mulig å få på overflaten av mineralullsjiktet, og vil i følge tabell 4.3.2 tilsvare at synlig muggvekst kan ses på materialoverflaten.

## 5.2 Effekt av uteklima med ulike dampsperrsjikt

I dette kapitlet presenteres resultatene for beregningstilfelle 5 - 10 hvor effekter av uteklimaene: *Oslo, Bergen, Kristiansand, Mo i Rana, Tromsø, og Karasjok* undersøkes sammen med dampsperretilfellene: *Ingen dampsperre, PE-folie, Dampbrems og AirGuard Smart* for standard massivtrekonstruksjon. Startfuktnivået *Middels-høyt* ble vurdert til å være mest interessant å undersøke disse effektene for, og er derfor benyttet som standard startfuktnivå for alle disse beregningstilfellene. Resultater fra beregningstilfelle 3 (Uteklima = Trondheim) er tatt med som sammenligningsgrunnlag for disse beregningstilfellene. Se tabell 4.4.2 for beregningsmatrise.

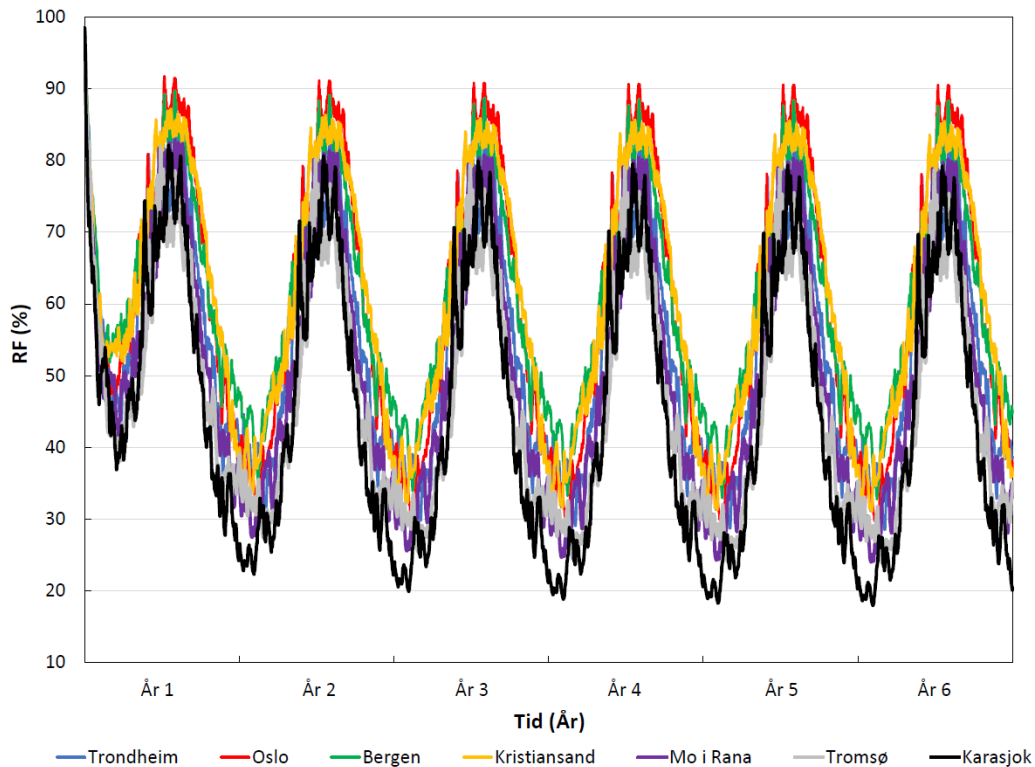
Fra beregningstilfelle 3, hvor effekter av ulike dampsperrsjikt med middels-høyt startfuktnivå ble undersøkt, ser man av figur E.1.5 i vedlegg E at RF-nivåene i ytterste mm av mineralullen ble svært høy for variantene med ingen dampsperre, dampbrems og AirGuard Smart, mens disse ble noe lavere for varianten med PE-folie. I utarbeidelsen av grafer som skulle vise variasjonen i RF i ytterste mm av mineralullen for uteklimaene i beregningstilfelle 5 - 10, viste disse svært små forskjeller for variantene med ingen dampsperre, dampbrems og AirGuard Smart. Dette kom av at RF blir veldig høy for alle varianter. Det ble prøvd å lage figurer for å illustrere forskjellene mellom disse, derimot ble figurene svært utydelig og ikke lesbar. Forskjellene i RF-nivå ble til gjengjeld mer synlig for variantene med PE-folie. På bakgrunn av dette er det valgt å ikke presentere grafer som viser variasjonen i RF i ytterste mm av mineralullen for variantene med ingen dampsperre, dampbrems og AirGuard Smart. Dette blir i stedet presentert kun for variantene med PE-folie, som er vist i figur E.1.8 i vedlegg E. Figurer som viser variasjonen i muggindeks for ytterste mm av mineralullen er presentert for alle varianter. Disse er vist i figur E.1.13 - E.1.16 i vedlegg E.

Videre vil det for hvert dampsperretilfelle presenteres to figurer som viser hvordan RF og muggindeksen vil variere for ytterste mm av massivtreelementet over beregningsperioden (6 år). I figurene vil de ulike uteklimaene ha hver sin farget graf. Fargene samsvarer mellom figurene for RF og muggindeks. Deretter presenteres to tabeller som viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge for begge kontroller, både ytterste mm av massivtreelement og mineralullen, for alle konstruksjonsvarianter i beregningstilfelle 3 og 5 - 10. Resultater for muggindeks og trafikklysfarge hentes fra muggvekstrisikovurderinger i WUFI Mould Index VTT. Til slutt vil det gis en vurdering av resultatene hvor viktige momenter for hvert dampsperretilfelle blir trukket fram. I vurderingene vil det hovedsakelig legges vekt på kontrollene for ytterste mm av massivtreelementet. Det vil også vurderes kort hvordan effektene som undersøkes i studie vil påvirke forholdene i ytterste mm av mineralullen.

### 5.2.1 Resultater - Variasjon i RF og muggindeks

#### Ingen dampsperre

Figur 5.2.1 og 5.2.2 nedenfor viser variasjonen i RF og muggindeks for ytterste mm av massivtreelementet for uteklimaene i beregningstilfelle 3 og 5 - 10 med ingen dampsperre. Se figur E.1.13 i vedlegg E for variasjonen i muggindeks for ytterste mm av mineralullen.



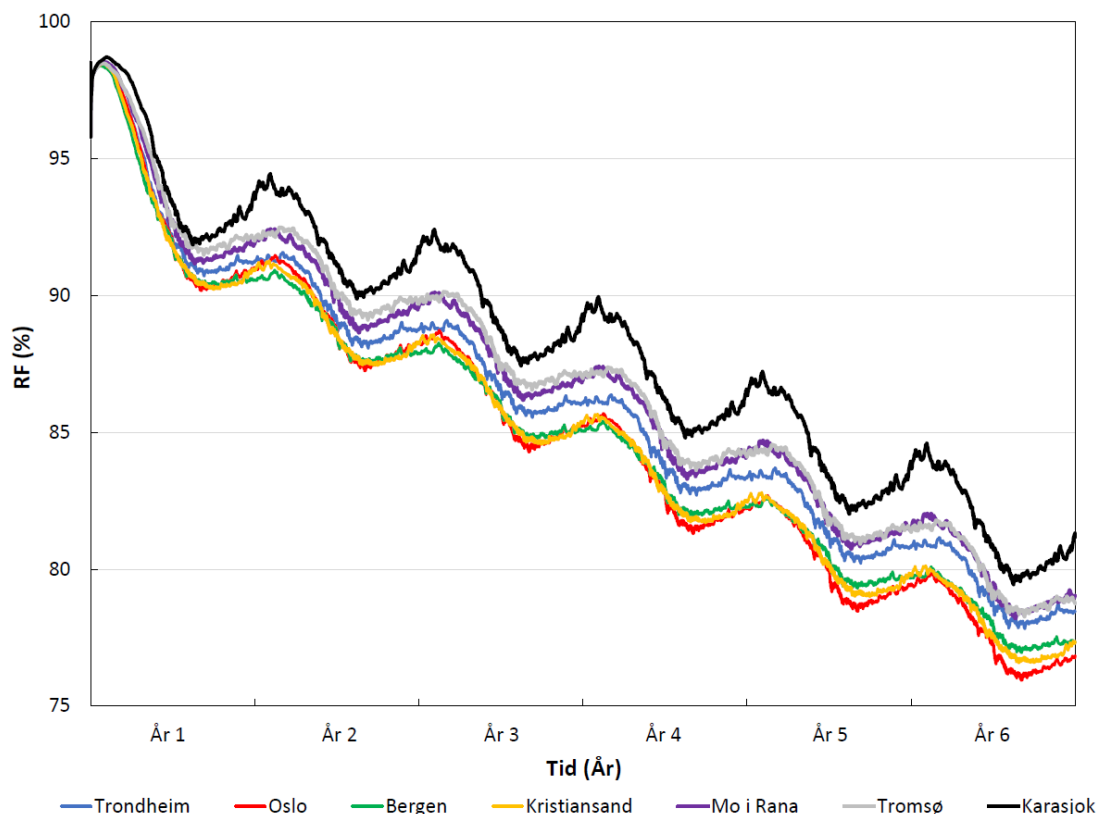
**Figur 5.2.1:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av uteklima ved bruk av ingen dampsperre. Beregningstilfelle 3 og 5 - 10.



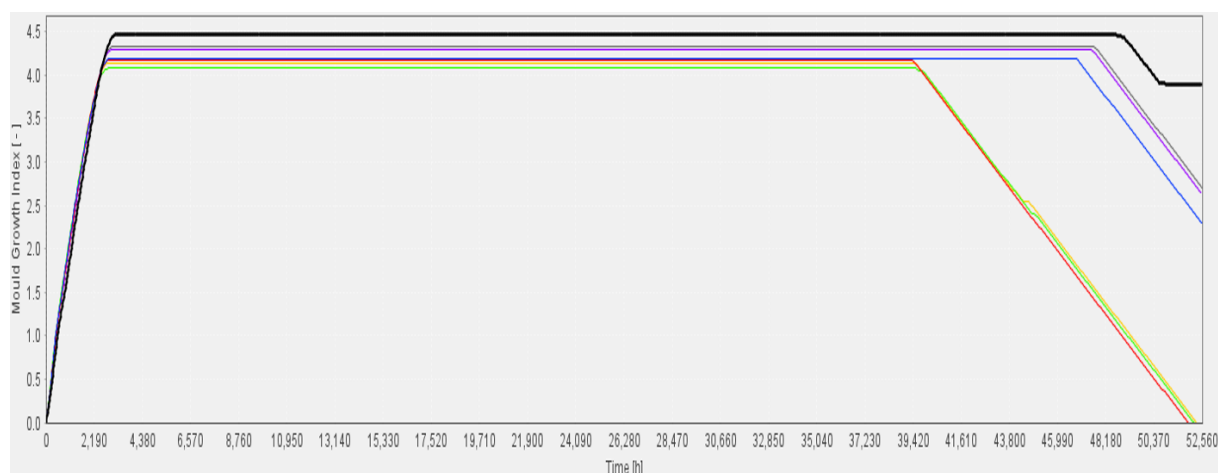
**Figur 5.2.2:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Effekt av uteklima ved bruk av ingen dampsperre. Beregningstilfelle 3 og 5 - 10. Farger samsvarer med figuren ovenfor.

## PE-folie

Figur 5.2.3 og 5.2.4 nedenfor viser variasjonen i RF og muggindeks for ytterste mm av massivtreelementet for uteklimatene i beregningstilfelle 3 og 5 - 10 med PE-folie. Se vedlegg E figur E.1.7 og E.1.8 for variasjonen i RF og figur E.1.14 for variasjonen i muggindeks for ytterste mm av mineralullen.



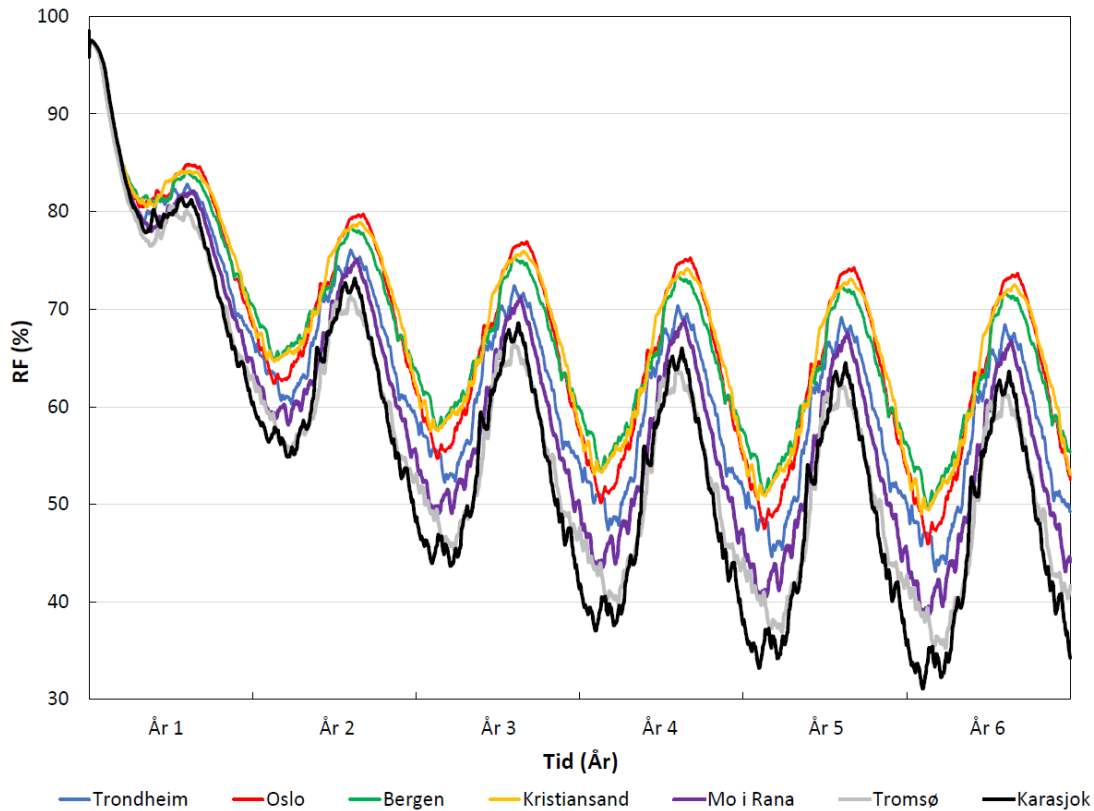
**Figur 5.2.3:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av uteklimate ved bruk av PE-folie. Beregningstilfelle 3 og 5 - 10.



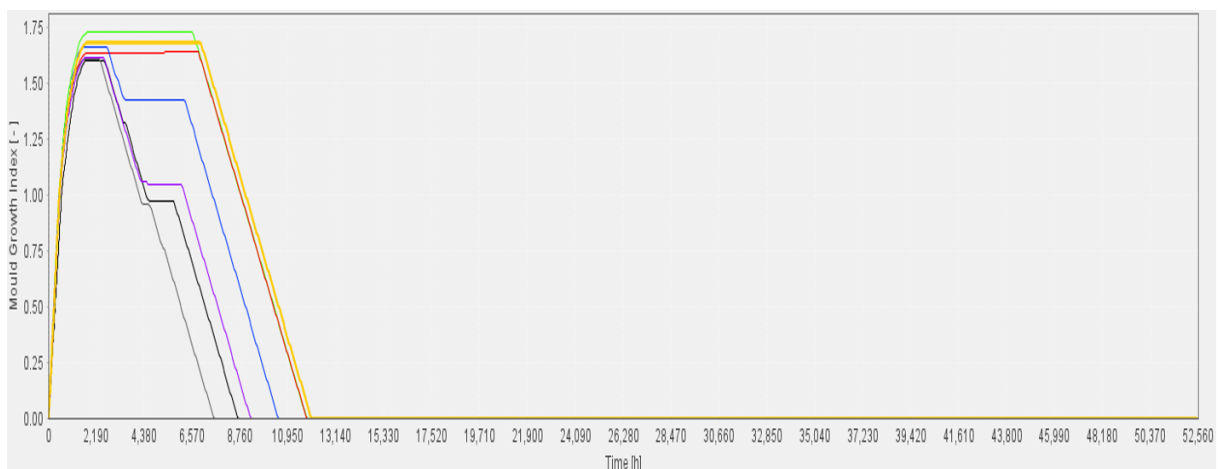
**Figur 5.2.4:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Effekt av uteklimate ved bruk av PE-folie. Beregningstilfelle 3 og 5 - 10. Farger samsvarer med figuren ovenfor.

### Dampbrems

Figur 5.2.5 og 5.2.6 nedenfor viser variasjonen i RF og muggindeks for ytterste mm av massivtreelementet for uteklimaene i beregningstilfelle 3 og 5 - 10 med dampbrems. Se figur E.1.15 i vedlegg E for variasjonen i muggindeks for ytterste mm av mineralullen.



**Figur 5.2.5:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av uteklima ved bruk av dampbrems. Beregningstilfelle 3 og 5 - 10.

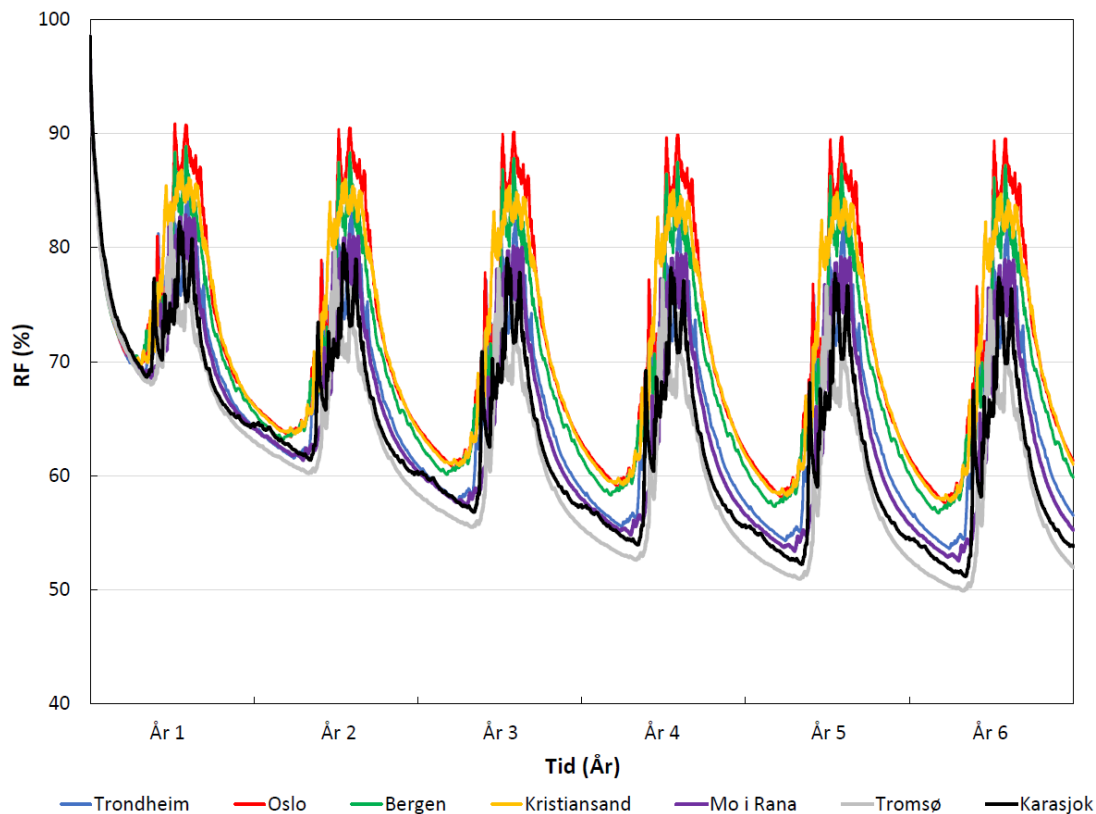


**Figur 5.2.6:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Effekt av uteklima ved bruk av dampbrems. Beregningstilfelle 3 og 5 - 10. Farger samsvarer med figuren ovenfor.

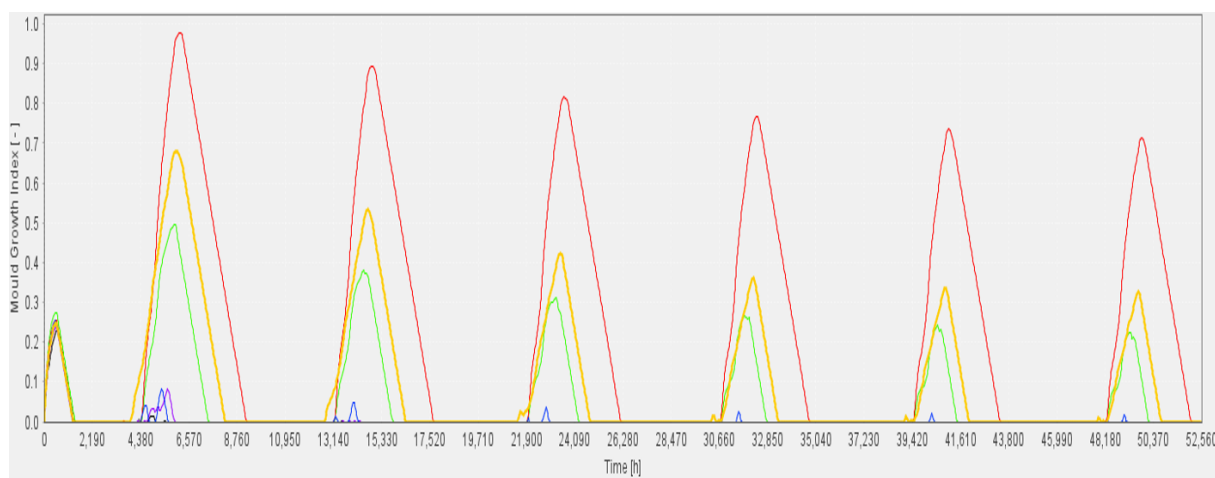


### AirGuard Smart

Figur 5.2.7 og 5.2.8 nedenfor viser variasjonen i RF og muggindeks for ytterste mm av massivtreelementet for uteklimaene i beregningstilfelle 3 og 5 - 10 med AirGuard Smart. Se figur E.1.16 i vedlegg E for variasjonen i muggindeks for ytterste mm av mineralullen.



**Figur 5.2.7:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av uteklima ved bruk av AirGuard Smart. Beregningstilfelle 3 og 5 - 10.



**Figur 5.2.8:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Effekt av uteklima ved bruk av AirGuard Smart. Beregningstilfelle 3 og 5 - 10. Farger samsvarer med figuren ovenfor.

### 5.2.2 Maksimal muggindeks og trafikklysfarge

Tabell 5.2.1 og 5.2.2 nedenfor viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge for kontrollene i ytterste mm av massivtreelementet og mineralullen. I tabellene er cellene enten farget grønn (akseptabelt), gul (usikkert, må vurderes ytterligere) eller rød (ikke akseptabelt). Se kapittel 4.3.1 for ytterligere beskrivelser av de ulike trafikklysfargene. Muggindeksverdiene presenteres med to desimaler for å bedre kunne illustrere forskjellene mellom de ulike konstruksjonsvariantene. I figurene står BT for beregningstilfelle og tallene i parentes representerer nummeret på beregningstilfellet. Figur E.1.11 (BT = 3) og E.1.13 til E.1.16 (BT = 5 - 10) i vedlegg E viser hvordan muggindeksene vil variere over beregningperioden for ytterste mm av mineralullen.

Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av massivtreelement				
Konstruksjonsvariant → Uteklima (BT) ↓	Ingen dampsperre	PE-folie	Dampbrems	AirGuard Smart
Trondheim (3)	0,18	4,19	1,67	0,26
Oslo (5)	0,99	4,17	1,64	0,98
Bergen (6)	0,46	4,08	1,73	0,50
Kristiansand (7)	0,63	4,14	1,69	0,68
Mo i Rana (8)	0,13	4,29	1,62	0,24
Tromsø (9)	0,15	4,33	1,61	0,24
Karasjok (10)	0,09	4,46	1,6	0,23

**Tabell 5.2.1:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelementet for konstruksjonsvarianter i beregningstilfelle 3 og 5 - 10

Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av mineralull				
Konstruksjonsvariant → Uteklima (BT) ↓	Ingen dampsperre	PE-folie	Dampbrems	AirGuard Smart
Trondheim (3)	3,5	3,3	3,5	3,5
Oslo (5)	3,5	2,67	3,49	3,49
Bergen (6)	3,5	3,42	3,5	3,5
Kristiansand (7)	3,5	3,17	3,5	3,5
Mo i Rana (8)	3,49	2,86	3,49	3,49
Tromsø (9)	3,46	2,57	3,46	3,46
Karasjok (10)	3,37	0,66	3,36	3,37

**Tabell 5.2.2:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av mineralullen for konstruksjonsvarianter i beregningstilfelle 3 og 5 - 10

### 5.2.3 Vurderinger - Kontroll ytterste mm av massivtreelement

Ser av figurene ovenfor at forskjellige uteklima i kombinasjon med ulike dampsperrsjikt vil ha en stor effekt på fuktforholdene i ytterste mm av massivtreelementet. De største forskjellene i RF-nivå ser man for variantene med ingen dampsperre, dampbrems og AirGuard Smart. Disse vil også ha flere likheter mellom hverandre i forhold til hvilke uteklima som yter best. Det skilles mellom sørlige og nordlige uteklima. Med sørlige uteklima menes: Oslo, Bergen og Kristiansand og nordlige uteklima menes: Mo i Rana, Tromsø og Karasjok. Trondheim blir en mellomting mellom disse. For de nordlige uteklimaene vil byggfukten tørke hurtigst ut og oversiden av massivtreelementet oppfuktes mindre på sommerstid og tørker ut mer på vinterstid. For de sørlige uteklimaene blir situasjonen motstatt. Her tørker byggfukten tregest ut og oversiden av massivtreelementet oppfuktes mer på sommerstid og tørker ut mindre på vinterstid.

For variantene med PE-folie vil forskjellene i RF være relativt små. Her vil derimot de nordlige uteklimaene yte dårligere enn de sørlige uteklimaene.

Forskjellene i RF-nivå kommer trolig av forskjellene i uteklimaenes klimaparametere. Med klimaparametere menes solstråling, skydekkeindeks, utelufttemperatur, relativ fuktighet m.m. Se tabell 4.3.5 for noen utvalgte klimaparametere. Slik beskrevet i kapittel 2.2 vil drivkraften for fukttransport ved diffusjon være damptrykkforskjeller. Slike forskjeller oppstår som regel ved temperaturforskjeller, og fukttransporten vil her gå fra områder med høyt damptrykk (høy temperatur) til områder med lavt damptrykk (lav temperatur). På sommerstid når temperaturen i de øverste delene av mineralullsjiktet blir høy, vil fukt bevege seg innover fra isolasjonen til massivtreelementet. De sørlige uteklimaene vil få høyere temperaturer i mineralullsjiktet enn de nordlige uteklimaene, som gir en økt drivkraft for fukttransport ved diffusjon innover. På vinterstid når temperaturen i de øverste delene av mineralullsjiktet blir lav, vil fukt bevege seg utover fra massivtreelementet til isolasjonen. De nordlige uteklimaene vil få lavere temperaturer i mineralullsjiktet enn de sørlige uteklimaene, som gir en økt drivkraft for fukttransport ved diffusjon utover. Disse forskjellene blir mer synlig for variantene med ingen dampsperre i forhold til dampbrems og AirGuard Smart, som kommer av at det ikke er et dampsperrsjikt som begrenser fukttransporten.

#### Ingen dampsperre

Ser av figur 5.2.1 og 5.2.2 at dersom ingen dampsperre benyttes vil uteklimaet gi størst effekt på fuktforholdene og muggvekstrisikoen i ytterste mm av massivtreelementet. De nordlige uteklimaene blir her mest gunstig, mens de sørlige uteklimaene blir mindre guns-

fig. Det vil være merkbare forskjeller i muggvekstrisiko dersom konstruksjonen bygges i Karasjok (mest gunstig variant) i forhold til Oslo (minst gunstig variant). Derimot får alle varianter maksimal muggindeks under 1,0, og WUFI Mould Index VTT vurderer disse til å være akseptable med hensyn på muggvekst.

### PE-folie

Ser av figur 5.2.3 og 5.2.4 at konstruksjonsvarianter med PE-folie og middels-høyt startfuktnivå vil bli ugunstig for alle uteklima både med hensyn på høy RF og risiko for muggvekst i ytterste mm av massivtreelementet. RF-nivået ligger over kritisk nivå gjennom omtrent hele beregningsperioden og alle varianter får en muggindeks over 4. Dette vil ikke være akseptabelt og disse variantene bør derfor unngås. Figur 5.2.3 viser også at de nordlige uteklimaene blir mer ugunstig enn de sørlige uteklimaene. Her blir det overraskende store forskjeller i RF-nivå mellom Karasjok og de andre nordlige uteklimaene, spesielt på vinterstid. Dette skyldes trolig at klimaet i Karasjok er betydelig kaldere. Dette ser man at tabell 4.3.5 hvor midlere utelufttemperatur er 5,2 °C kaldere for Karasjok (mest ugunstig) enn Tromsø (nest mest ugunstig). I Karasjok vil oversiden av massivtreelementet få betydelig lavere temperatur på vinterstid, som medfører økt transport av fukt til dette punktet.

### Dampbrems

Ser av figur 5.2.5 at ved bruk av dampbrems vil uteklimaet ha en betydelig effekt på fuktforholdene i ytterste mm av massivtreelementet, spesielt i de siste beregningsårene. Muggindeksene presentert i tabell 5.2.1 viser derimot at uteklimaet vil ha liten påvirkning på maksimal muggindeks. Dette skyldes at oversiden av massivtreelementet vil tørke ned til kritisk RF-nivå (80 %) omtrent like hurtig uansett uteklima. Ser man på figur 5.2.6 som viser variasjonen i muggindeksen, vil de sørlige uteklimaene få noe større risiko for muggvekst enn de nordlige uteklimaene. Likevel får alle konstruksjonsvarianter en maksimal muggindeks over 1,6 som er forholdsvis høyt. Slike varianter vil være akseptable, men har fortsatt en viss risiko.

### AirGuard Smart

Ser av figur 5.2.7 at ved bruk av AirGuard Smart vil uteklimaet ha en betydelig effekt på fuktforholdene i ytterste mm av massivtreelementet. I de første månedene i det første året vil byggfukten tørke ut tilnærmet like hurtig for alle uteklima, men det vil opptre større forskjeller etter hvert beregningsår. Her ser man at de nordlige uteklimaene vil bli mest gunstig, mens de sørlige uteklimaene vil bli minst gunstig. Oslo blir minst gunstige utekli-

ma, mens Tromsø blir mest gunstige utelima. Alle varianter får en maksimal muggindeks under 1,0, og vurderes derfor til å være akseptable med hensyn på muggvekst.

### 5.2.4 Vurderinger - Kontroll ytterste mm av mineralull

Slik beskrevet innledningsvis i kapittel 5.2 ble det for beregningstilfelle 5 til 10 kun presentert grafer som viser variasjonen i RF i ytterste mm av mineralullen for variantene med PE-folie. Grafer for ingen dampsperre, dampbrems og AirGuard Smart viste små forskjeller, ga utydelige og ulesbare grafer og ble vurdert til å være unødvendig å presentere. Effekter uteklimate har på RF-nivåene for variantene med PE-folie, vil man i realiteten også kunne se for de andre dampsperretilfellene.

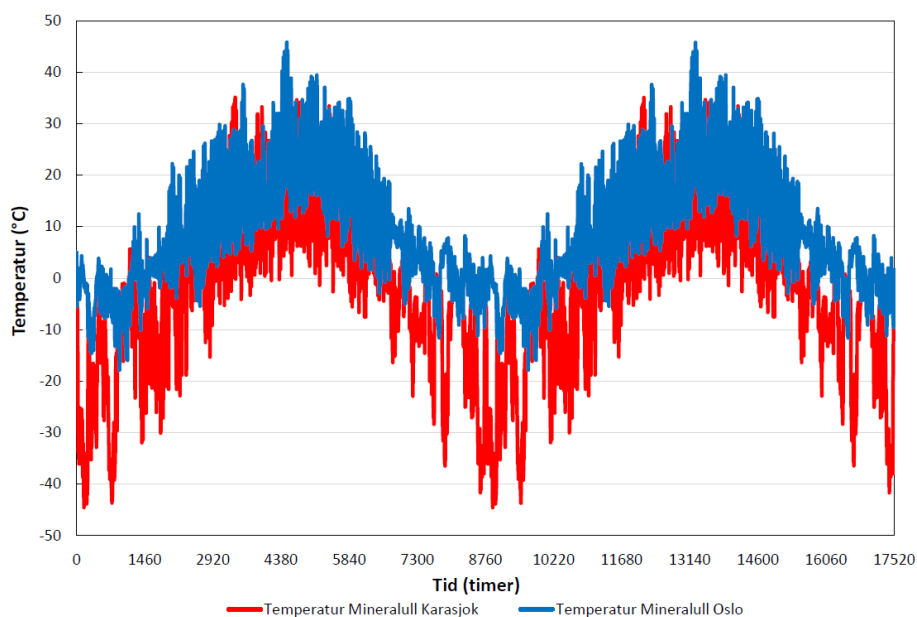
For å bedre kunne illustrere forskjellene i RF mellom de ulike uteklimate, ble det valgt å dele opp i to figurer. Figur E.1.7 viser variasjonen i RF for de sørlige uteklimate: Oslo, Bergen og Kristiansand, mens E.1.8 viser variasjonen i RF for de nordlige uteklimate: Mo i Rana, Tromsø og Karasjok hvor resultater fra beregningstilfelle 3 med Trondheim er tatt med som sammenligningsgrunnlag.

Ser av figur E.1.7 og E.1.8 at RF på vinterstid vil ligge på 100 % for alle uteklimate, mens det på sommerstid vil være en viss uttørking. Denne uttørkingen vil være størst for Oslo og de sørlige uteklimate, mens denne vil være minst for Tromsø og de nordlige uteklimate. Uttørkingen på sommerstid blir gradvis mindre over beregningsperioden, mens forskjellene i RF mellom de ulike uteklimate blir gradvis høyere. Om sommeren første beregningsår vil det være en forskjell i RF mellom Oslo og Tromsø på ca. 20 %, mens det på sommerstid i beregningsår 6 vil være en forskjell på ca. 27 %. Forskjellene i RF skyldes trolig forskjellene i temperatur og solstråling på de geografiske plasseringene. Mellom Oslo og Tromsø som hadde mest og minst uttørking, vil det være betydelige forskjeller i disse to klimaparameterne. Slik beskrevet i kapittel 2.2 vil drivkraften for fukttransport ved diffusjon være damptrykkforskjeller, som oppstår ved temperaturforskjeller. For de sørlige uteklimate vil de øverste sjiktene av mineralullen få betraktelig høyere temperaturer på sommerstid enn for de nordlige uteklimate. Beregningene i WUFI Pro viser at maksimal temperatur på sommerstid i ytterste mm av mineralullen vil være 45 °C for Oslo, og 33 °C for Tromsø. Dette medfører en større drivkraft for fukttransport via diffusjon innover på sommerstid for de sørlige uteklimate.

Dersom man ser på tabell 5.2.2 på side 66 som viser maksimal muggindeks i ytterste mm av mineralullen, ser man at uteklimate vil ha stor betydning for maksimal muggindeks og derav muggvekstrisikoen for konstruksjonsvariantene med PE-folie. For de andre undersøkte dampsperretilfellene vil uteklimate ha mindre betydning, siden maksimal

muggindeks her blir nært maksimal verdi (3,5) for alle varianter. Figur E.1.14 i vedlegg E viser hvordan muggindeksene vil variere for variantene med PE-folie. Her ser man at det blir store forskjeller i muggindeks mellom de ulike uteklimaene. Disse blir betydelig lavere for de nordlige uteklimaene i forhold til de sørlige uteklimaene, med Karasjok som mest gunstige variant. Karasjok blir også det eneste uteklimaet som vurderes til å gi akseptable forhold med hensyn på muggvekst. Årsaken til at de nordlige uteklimaene og Karasjok spesielt får en lavere muggindeks, kommer trolig av at disse uteklimaene har en betydelig lavere utelufttemperatur enn de sørlige uteklimaene. Dette ser man av tabell 4.3.5 i kapittel 4.3.3. Lavere utelufttemperatur gir lavere temperatur i ytterste mm av mineralullsjiktet, som igjen gir mindre gunstige vekstforhold for muggsopp. Slik gitt i tabell 4.3.3 tar VTT-modellen hensyn til at muggvekst ikke skjer ved temperaturer under 0 °C og at kritisk fuktnivå øker når temperaturen synker. I Karasjok vil temperaturen i ytterste mm av mineralullsjiktet være forholdsvis lav i de fleste månedene i året. Dette underbygges av figur 5.2.9 nedenfor som viser temperaturen i ytterste mm av mineralullsjiktet for Karasjok sammenlignet med Oslo over 2 år. Her ser man at for Karasjok vil temperaturforholdene i store deler av året være svært ugunstig med hensyn på muggvekst. Dette indikerer at selv om RF i mineralullsjiktet er høyt, vil temperaturforholdene også ha stor betydning for muggvekstrisikoen til konstruksjonen.

En mulig årsak til at Oslo får en mye lavere muggindeks enn de andre sørlige uteklimaene, er at uttørkingen her på sommerstid vil være såpass høy at RF-nivået synker under kritisk RF-nivå for muggvekst, samt at temperaturen på vinterstid blir såpass lav at muggvekstforholdene blir ugunstige.



**Figur 5.2.9:** Temperatur i ytterste mm av mineralull for Karasjok og Oslo over 2 år. Beregningstilfelle 5 og 10. Dampsperre = PE-folie.

## 5.3 Oppsummering og evaluering

I dette kapittelet gis en oppsummering og evaluering av resultatene og vurderingene for beregningstilfelle 1 - 10, hvor følgende effekter ble undersøkt:

- Beregningstilfelle 1 - 4: Effekt av dampsperrsjikt med ulike startfuktnivå
- Beregningstilfelle 5 - 10: Effekt av uteklima med ulike dampsperrsjikt

Grafer som variasjon i RF og muggindeks for ytterste mm av mineralullen er presentert i kapittel E.1 i vedlegg E. Slik beskrevet innledningsvis i kapittel 5 vil det generelt være en liten risiko for muggvekst i ytterste mm av isolasjonssjiktet i kompakte tak. Resultatene i dette studie viste derimot det motsatte. På bakgrunn av dette ble disse resultatene ikke satt i fokus. Nedenfor vil det bli prøvd å beskrive usikkerheter og momenter med studie som kunne ha ført til at resultatene viser det de viser.

### 5.3.1 Beregningstilfelle 1 - 10

Nedenfor vil det gis en evaluering av konstruksjonsvariantene i beregningstilfelle 1 - 10, samt en beskrivelse av hvilken parameter som vil være mest kritisk med hensyn på muggvekst i konstruksjonen. Evalueringen vil hovedsakelig ta utgangspunkt i resultatene og vurderingene for kontrollene i ytterste mm av massivtreelementet. Her vil muggvekstrisikoen, RF-nivået og den generelle hygrotermiske ytelsen bli tatt hensyn til. Evalueringen benytter en fargeskala for å bedre kunne tydeliggjøre hvilke konstruksjonsvarianter som blir akseptable og hvilke som bør unngås. Her er det viktig å poengtere at dette ikke vil være det samme som trafikklysvurderingen fra WUFI Mould Index VTT, og det blir brukt andre farger for å skille mellom disse. Blå farge vil her representere at konstruksjonsvarianten er akseptabel og har liten til ingen risiko. Grå vil representere at konstruksjonsvarianten er akseptabel, men har en viss risiko. Oransje vil representere at konstruksjonsvarianten ikke blir akseptabel og bør unngås. Med akseptabel og risiko menes i forhold til muggvekst og høyt fuktnivå i massivtreelementet.

#### Evaluering beregningstilfelle 1 - 4

Tabell 5.3.1 på neste side gir en evaluering av konstruksjonsvariantene i beregningstilfelle 1 - 4 i henhold til fargeskalaen beskrevet ovenfor. Her vil det også belyses hvilket dampsperretilfelle som blir mest og minst gunstig/ugunstig for hvert startfuktnivå. Pilen under tabellen illustrerer hvilken vei denne vurderingen gjøres. I tabellen står forkortelsene for følgende: SFN = Startfuktnivå, L = Lavt, M-L = Middels-lavt, M-H = Middels-høyt og H = Høyt.





Evaluering av konstruksjonsvarianter i beregningstilfelle 5 - 10				
Dampsperretilfelle → Uteklima (BT) ↓	Ingen dampsperre	PE-folie	Dampbrems	AirGuard Smart
Oslo (5)	Minst gunstig	Minst ugunstig	Minst gunstig	Minst gunstig
Bergen (6)	Mest gunstig			Mest ugunstig
Kristiansand (7)				
Mo i Rana (8)				
Tromsø (9)				
Karasjok (10)	Mest gunstig	Mest ugunstig	Mest gunstig	Mest gunstig

Akseptabelt (liten risiko)    
 Akseptabelt (noe risiko)    
 Ikke akseptabelt (bør unngås)

**Tabell 5.3.2:** Evaluering av konstruksjonsvarianter i beregningstilfelle 5 - 10

Ser av tabellen ovenfor at hvilket uteklima som velges vil ha mindre betydning for om konstruksjonen blir akseptabel eller ikke. Dette skyldes at uteklimaet gir en relativt liten effekt på fukt- og muggvekstforholdene i konstruksjonen. Tabellen viser at bruk av PE-folie ikke blir akseptabelt for noen av de undersøkte uteklimaene, og denne konstruksjonsvarianten bør derfor unngås. Bruk av dampbrems blir akseptabelt, men vil for alle uteklima også ha en viss risiko. Her vil risikoen være størst dersom konstruksjonen bygges i Bergen. Variantene med ingen dampsperre eller AirGuard Smart vil generelt ha en liten risiko og disse konstruksjonsvariantene blir svært gunstige for omtrent alle uteklima. Her ser man derimot at disse konstruksjonene får noe høyere risiko i Oslo.

Av de undersøkte uteklimaene vil massivtrekonstruksjonen få gjennomsnittlig minst risiko dersom den bygges i Karasjok og bruker enten ingen dampsperre, dampbrems eller AirGuard Smart. Dersom PE-folie skal benyttes bør Karasjok unngås, siden risikoen blir størst her. Konstruksjonsvariantene som er blitt farget grå vil ha en viss risiko for muggvekst, men vurderes til å være akseptable løsninger dersom lufttettheten til massivtrelementet ivaretas.

### Kritisk parameter for muggvekst

I beregningstilfelle 1 - 10 ble parameterne: startfuktnivå (byggfuktnivå), dampsperrsjikt og uteklima undersøkt mer i detalj. Resultatene viste at startfuktnivået og bruk av ulike dampsperrsjikt vil ha større betydning for fuktforholdene og muggvekstrisikoen til konstruksjonen enn forskjellige uteklima. Siden muggvekstrisikoen til en konstruksjon med bruk av ulike dampsperrsjikt vil være svært avhengig av startfuktnivået i massivtrelementet, bedømmes startfuktnivået til å være den parameteren som vil ha størst betydning for muggvekstrisikoen til massivtrekonstruksjonen.

### 5.3.2 Usikkerheter og begrensninger ved kontroll ytterste mm av mineralullen

Innledningvis i kapittel 5 ble det beskrevet at kompakte tak som regel har en lav risiko for muggvekst på ytre overflate av isolasjonssjiktet. Dette skyldes at isolasjon er et dårlig vekstmedium og at vekstforholdene her ofte vil være ugunstige. Gjennom arbeidet og undersøkelsene i hovedstudie, som ble utført i programmene WUFI Pro og WUFI Mould Index VTT, ble det belyst av muggvekstrisikoen på ytre overflate av mineralullen ble svært høy for omtrent alle beregningsvarianter.

Det kunne tenkes at risikoen for muggvekst ville bli høy for noen av de undersøkte variantene i studiet. Dette eksempelvis for variantene med middels-høyt/høyt startfuktnivå og ingen dampsperrsjikt som begrenser omfordelingen av fukt fra massivtreelementet til isolasjonen på vinterstid. Derimot når resultatene viser at det vil bli svært høy muggvekstrisiko selv ved lave byggefuktnivå og bruk av relativt damptette sjikt mellom isolasjonen og massivtreelementet, kan det tenkes at resultatene gir urealistiske verdier.

Nedenfor vil det først gis en beskrivelse av hvorfor muggvekstrisikoen som regel vil være lav på ytre overflate av isolasjonssjiktet i kompakte tak, deretter vil det beskrives begrensningene og usikkerhetene med studie som kunne hatt påvirkning på hvorfor resultatene viser det de viser. Det anerkjennes at det kan være mange andre usikkerheter og begrensninger enn hva som er spesifisert nedenfor, derimot vil det her gis et innblikk i noen av disse.

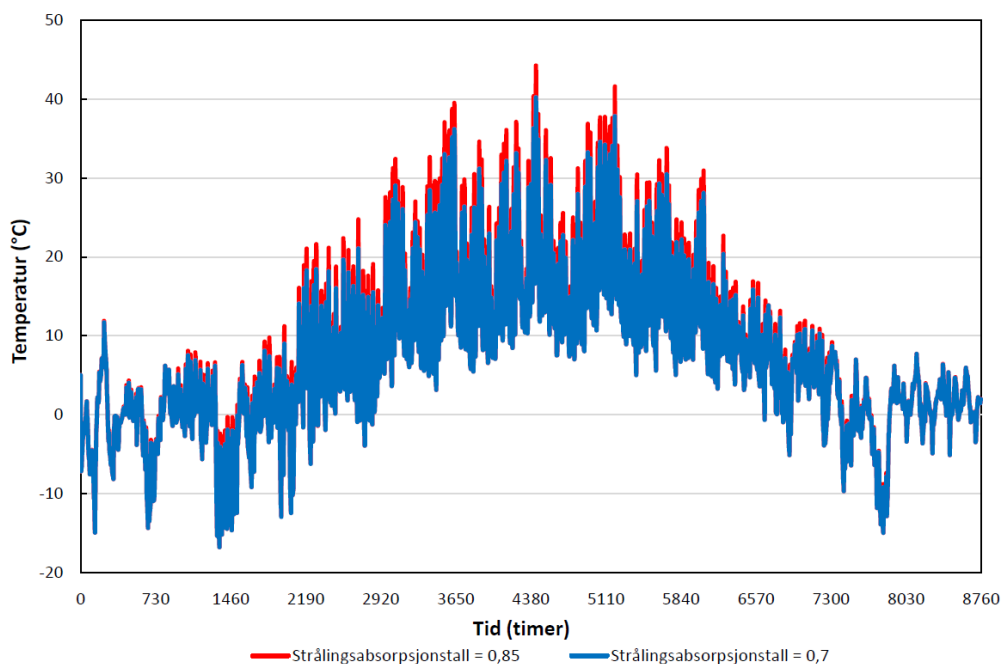
#### Muggvekstrisiko på ytre overflate av isolasjonssjikt i kompakte tak

Slik beskrevet i kapittel 2.5 må visse forutsetninger være tilstede for at muggsopp skal kunne utvikle seg på en materialoverflate. Av disse vil fukt- og temperaturforholdene som regel være mest kritisk. Litteratur viser derimot til at temperaturforholdene på ytre overflate av isolasjonssjiktet ofte vil være den faktoren som gjør at muggvekstrisikoen her vil være lav (Time et al. 2008, Uvsløkk 2008). I kapittel 2.5 ble det vist til at muggvekst vil stoppe ved lave temperaturer (ned mot 0 °C), mens de fleste muggsopper normalt vil dø ved høye temperaturer (opp mot 40 - 50 °C). På vinterstid når RF som regel er høy og ugunstig, vil temperaturen i de øverste delene av isolasjonssjiktet ofte bli lav og ugunstig med hensyn på muggvekst. Mens på sommerstid når RF synker på grunn av uttørking og blir mindre ugunstig, kan temperaturen på ytre overflate av isolasjonssjiktet bli langt høyere enn 40 - 50 °C som følge av solstråling. Dette kan da føre til at eventuell muggsopp her vil dø. Begge disse vil være årsaker til at muggvekst ofte holdes i sjakk på slike materialoverflater.

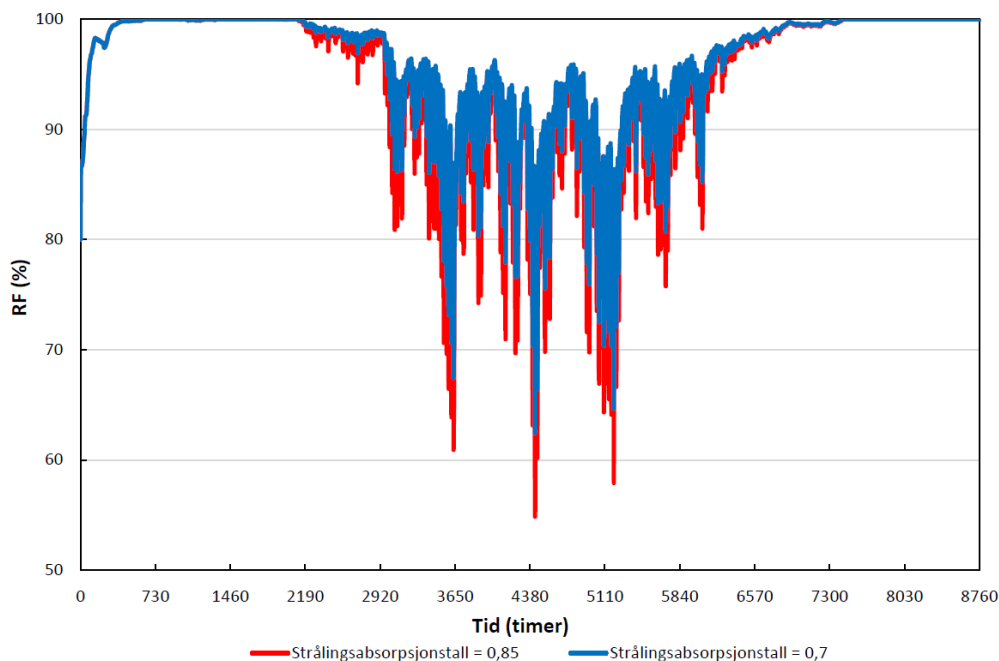
Nedenfor vil det bli prøvd å gi en beskrivelse av ulike begrensninger og usikkerheter som kunne hatt påvirkning på resultatene for kontrollen i mineralullen.

### Strålingsabsorpsjonstall til taktekning:

Slik beskrevet i kapittel 4.3.8 ble det benyttet et strålingsabsorpsjonstall til taktekningen lik 0,7. Dette skulle representere en grå/mørkegrå overflate. Enkle innledende beregninger i WUFI Pro viste at høyere verdi for strålingsabsorpsjonstallet ga høyere temperaturer på taktekningen og de øverste sjiktene av mineralullen. Med hensyn til at drivkraften for fukttransport ved diffusjon øker ved større temperaturforskjeller, kan det tenkes at uttørkingen i isolasjonssjiktet på sommerstid blir større ved et økt strålingsabsorpsjonstall. For å dokumentere om dette vil være re-ellt er det presentert to figurer nedenfor. Figurene viser temperatur- og RF-nivået i ytterste mm av mineralullen for to konstruksjonsvarianter. Disse er helt identiske med unntak av at den ene har et strålingsabsorpsjonstall lik 0,7, mens den andre har et strålingsabsorpsjonstall lik 0,85. Et strålingsabsorpsjonstall lik 0,85 skal her representere en mørkegrå/svart overflate. Det er tatt utgangspunkt i konstruksjonen i beregningstilfelle 3 med PE-folie, middels-høyt startfuktnivå og Trondheimsklima.



**Figur 5.3.1:** Effekt av økt strålingsabsorpsjonstall til taktekningen på temperaturnivå i ytterste mm av mineralullen. Beregningsperiode = 01.01 år 1 til 01.01 år 2. Dampspærre = PE-folie. Startfuktnivå = Middels-høyt. Uteklime = Trondheim



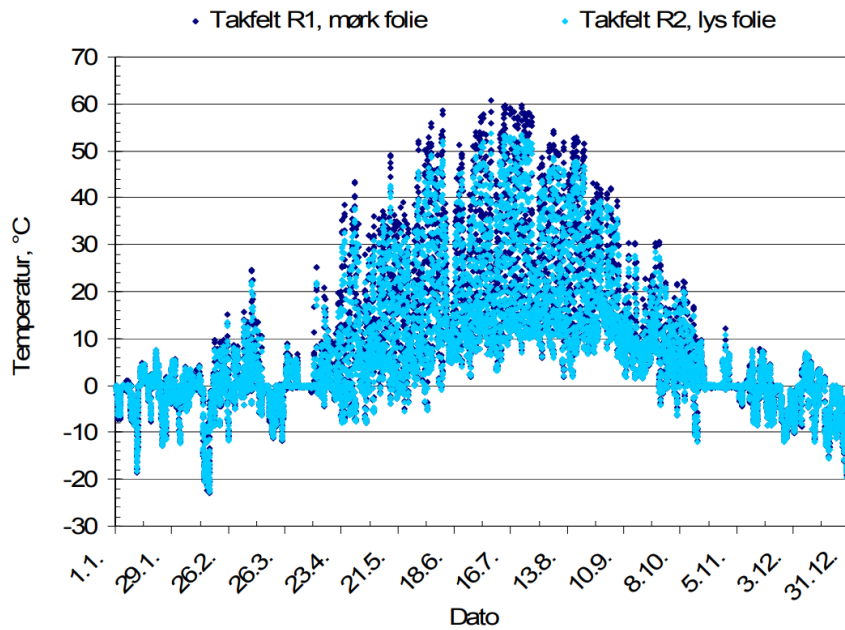
**Figur 5.3.2:** Effekt av økt strålingsabsorpsjonstall til taktekingen på RF-nivå i ytterste mm av mineralullen. Beregningsperiode = 01.01 år 1 til 01.01 år 2. Dampsperre = PE-folie. Startfuktinnivå = Middels-høyt. Uteklime = Trondheim

Ser av figurene ovenfor at en økning i strålingsabsorpsjonstallet fra 0,7 til 0,85 vil gi gjennomsnittlig høyere temperaturer og en vesentlig større uttørking i isolasjonssjiktet på sommerstid. Disse forskjellene vil kunne hatt en påvirkning på forholdene i ytterste mm av mineralullen, spesielt med hensyn på muggvekstrisikoen. En verdi på strålingsabsorpsjonstallet lik 0,7 var derfor noe konservativt i beregningstilfellene i hovedstudiet.

#### Temperaturnivå på ytre overflate av isolasjonssjikt:

Litteratur viste til at temperaturforholdene på ytre overflate av isolasjonssjiktet ofte vil være den faktoren som holder muggvekst her i sjakk i løpet av året.

I 1997 ble det gjennomført temperaturmålinger på takfolien på to takelementer på et forsøkshus på Voll i Trondheim. Resultatene fra målingene er presentert i detalj i Uvsløkk (2008). Hensikten med målingene var å kartlegge hvor høy temperaturen vil bli på en utvendig takfolie over et år i trondheims klima. Her ble effekter av mørk og lys takfolie undersøkt. Figur 5.3.3 på neste side viser temperaturvariasjonene over året for den mørke og lyse takfolien.



**Figur 5.3.3:** Målte temperaturer på mørk og lys takfolie på et forsøkshus på Voll i Trondheim i 1997 (Uvsløkk 2008)

Figuren viser at temperaturene på høst- og vintermånedene blir lave og påvirkes i ubetydelig grad av type takteknig. Temperaturen på vår- og sommermånedene blir derimot svært høy og påvirkes i stor grad av type takteknig. I de varmeste månedene vil temperaturen på takteknigen komme helt opp i 60 °C for den mørke takfolien, mens denne blir noe lavere for den lyse takfolien. Dette underbygger resultatene beskrevet ovenfor for endring av takteknigenes strålingsabsorpsjonstall. Hvis man sammenligner temperaturverdiene i figur 5.3.3 med figur 5.3.1 lenger opp, ser man at det vil bli betydelige forskjeller. Verdiene fra WUFI Pro beregningene blir litt høyere på vinterstid, og betraktelig lavere på sommerstid. Her er det viktig å poengtere at temperaturene på ytre overflate av isolasjonssjiktet aldri vil bli like høy som temperaturene på selve takteknigen på sommerstid. Likevel kan det forventes at temperaturen vil kunne bli en god del høyere enn hva som er fått ut fra WUFI Pro beregningene, eksempelvis noen få °C mindre enn hva som er presentert i figur 5.3.3. Temperaturnivåene fra WUFI Pro beregningene blir derfor mer gunstige i forhold til muggvekst på vinterstid og når aldri høye nok verdier på sommerstid til at eventuell muggsopp her vil dø, noe som i realiteten kan skje. Dette vil derfor være en stor usikkerhet i beregningene av muggvekstrisikoen på ytre overflate av mineralullsiktet.

#### **Muggvekstmodell i WUFI Mould Index VTT:**

Programmet WUFI Mould Index VTT ble brukt til vurdering av muggvekstrisikoen til konstruksjonvariantene. Denne modellen baserer seg på visuell muggvekst på materialoverflater. Nedenfor vil det beskrives to begrensninger med programmet som kunne hatt stor påvirkning på resultatene fra muggvekstrisikovurderingene.

Programmet tar ikke hensyn til at noen typer muggsopp dør ved temperaturer mellom 40 - 50 °C og at noen typer muggsopp går i dvale ved temperaturer over 0 °C. I programmet er det i stedet antatt at muggvekst ikke skjer ved temperaturer under 0 °C og over 50 °C, og at muggsopp går i dvale ved temperaturen under -5 °C.

Programmet har satt at kritisk RF-nivå for muggvekst på en mineralullsoverflate vil være 85 % ved temperaturer mellom 20 og 50 °C. Mineralull vil generelt være et dårlig vekstmedium for muggsopp, så dette forutsetter at det er mye avsetninger av organisk materiale på mineralulloverflaten. For noen tilfeller kan denne verdien være for lav.

#### **MRDY Klimadata:**

En annen stor usikkerhet i oppgaven som kunne ha spilt inn på resultatene er klimadataene. I studie ble det valgt Moisture Design Reference Years (MDRY) som klimadata. Dette finnes for 12 forskjellige steder i Norge. Disse klimadataene baserer seg på referanseår med større fuktbelastning på konstruksjonen enn et ordinært gjennomsnittså. Dette vil foreksempel kunne gi lavere temperatur og mindre solstråling på konstruksjonen på sommerstid, samt noe høyere temperatur på vinterstid enn hva det i realiteten vil være.

#### **Materialparametere og -egenskaper til mineralull:**

To veldig store årsaker til at muggvekstrisikoen i mineralullsjiktet blir veldig høyt, kommer av at mer fukt akkumuleres i isolasjonssjiktet enn hva som er reelt og at isolasjonen opptar mer fuktighet enn hva den i realiteten vil gjøre. Slik beskrevet i kapittel 4.3.5 vil mineralull være et ikke-hygroskopisk materiale, som betyr at materialet ikke vil oppta fuktighet (vanndamp) fra omgivelsene rundt. Mineralull vil heller ikke være kapillærsugende dersom det kommer i kontakt med vann (Glava u.å). For å kunne utføre en beregning i WUFI Pro er programmet avhengig av et materials sorpsjonskurve. Mineralull har ikke en definert sorpsjonskurve og får derfor tildelt en standardisert sorpsjonskurve av programmet. I forhold til mineralull sin reelle sorpsjonskurve, som i realiteten vil være tilnærmet lik 0 for alle RF-nivå, vil den standardiserte sorpsjonskurven gi vesentlig høyere fuktnivåer. Det ble valgt å ikke endre sorpsjonskurven til mineralull da Stellander (2012) hadde kartlagt i sin

oppgave at bruk av mineralull sin reelle sorpsjonskurve i WUFI Pro ga numeriske problemer på grunn av for lave verdier.

Ved å undersøke ofte stilte spørsmål (FAQ) på WUFI-Wiki kom det fram at andre brukere av programmet har møtt på samme problemstilling som i denne oppgaven, hvor mer fukt akkumuleres og tas opp i isolasjonsjiktet enn hva som vil være reellt. Her ble det belyst at den standardiserte sorpsjonskurven i WUFI Pro tillater kapillærkondensasjon i materialet ved RF-nivå over ca. 50 %. Med kapillærkondensasjon menes materialets evne til å ta opp fritt vann. Dette vil være en sekundær effekt av adhesjonskreftene (tiltrekningskreftene), og innebærer at poresystemet i materialet trekker til seg vanddamp som kondenseres til flytende form (Geving & Thue 2002). Dette vil ikke være normalt for mineralull, spesielt ikke ved så lave RF-nivå, og medfører at fuktinnholdene i materialer blir høyere enn hva som er reellt. Dette vil derfor være en svært stor usikkerhet med resultatene for kontroll av mineralullen.

#### 5.3.3 Valg til tilleggsstudie

Nedenfor vil det beskrives de valgene som ble tatt i forhold til gjennomføringen av tilleggsstudie. Her ble det bestemt å undersøke følgende effekter: innvendig fukttilskudd, isolasjonstype, taktekning, massivtretykkelse, isolasjonstykkelse, skygge og strålingsabsorpsjon stall.

##### **Konstruksjonsvariant med PE-folie og middels-lavt startfuktnivå:**

Ser av figur 5.1.2 og 5.1.3 på side 52 at konstruksjonsvarianten med PE-folie får relativt høy RF og en viss risiko for muggvekst i ytterste mm av massivtreelementet for middels-lavt startfuktnivå og trondheimsklima. Dersom man ser på figur 5.2.3 og 5.2.4 på side 63 hvor konstruksjonsvarianter med PE-folie og middels-høyt startfuktnivå sammenlignes for alle uteklima, ser man at de sørlige uteklimaene: Oslo, Bergen og Kristiansand vil få lavere RF og muggindeks på oversiden av massivtreelementet enn Trondheim. Det vil derfor være interessant å undersøke om varianter med PE-folie og middels-lavt startfuktnivå vil kunne bli gunstig for noen av de sørlige uteklimaene. Dette blir undersøkt i beregningstilfelle 11.

##### **Standardkonstruksjon for beregningstilfeller tilleggsstudie:**

Resultatene fra beregningstilfellene i hovedstudie viser at startfuktnivået, dampsperrsjikt og uteklima vil ha stor betydning får både fuktforholdene og muggvekstrisikoen til ytterste mm av massivtreelementet og mineralullen. Nedenfor vil det beskrives hvilke valg som ble tatt med hensyn på standardkonstruksjonen i tilleggsstudie.

Fra hovedstudie ser man at startfuktnivået har stor betydning og gir størst effekt av de undersøkte parameterne. Av de ulike startfuktnivåene ble middels-høyt startfuktnivå vurdert til å være mest interessant å undersøke for, og er derfor valgt som standard startfuktnivå for beregningstilfellene i tilleggsstudie.

Resultatene presentert i kapittel 5.1 viser at for middels-høyt startfuktnivå vil bruk av ingen dampsperre og AirGuard Smart bli mest gunstig, mens dampbrems blir noe ugunstig og PE-folie blir svært ugunstig. Siden det vil være store forskjeller ved bruk av ulike dampsperrersjikt med middels-høyt startfuktnivå, er det valgt å undersøke effektene i tilleggsstudie for to ulike dampsperretilfeller. Dette skal gjøres for ingen dampsperre og dampbrems. PE-folie ble ansett som uinteressant å undersøke for da dette trolig vil bli ugunstig for alle effekter.

Med hensyn til uteklima viser resultatene i hovedstudie at Trondheim blir en mellomting mellom de sørlige uteklimaene: Oslo, Bergen og Kristiansand og de nordlige uteklimaene: Mo i Rana, Tromsø og Karasjok. På bakgrunn av dette er det derfor valgt å fortsette og bruke Trondheim som standard uteklima i tilleggsstudiet.

#### **Strålingsabsorpsjonstall til taktekning:**

Slik diskutert i kapittel 5.3.2 ovenfor vil et strålingsabsorpsjonstall større enn 0,7 gi mer realistiske temperaturnivåer på ytre overflate av isolasjonssjiktet. Dette vil bidra til å gi økt inadrettet uttørkingsevne om sommeren fra isolasjonssjiktet til massivtreelementet som gir mer gunstige fuktforhold for isolasjonssjiktet. Det vil derfor være interessant å undersøke hvordan denne økningen i strålingsabsorpsjonstallet vil påvirke RF-nivåene og muggvekstrisikoen i ytterste mm av massivtreelementet. Det kan trolig antas at dette vil gi forverrede fuktforhold basert på det som er diskutert i kapittel 5.3.2. I tilleggsstudie er det valgt et strålingsabsorpsjonstall til taktekningen lik 0,85 som standardparameter. Hvilken effekt dette har er videre dokumentert i beregningstilfelle 12 i tilleggsstudie.



---

# Kapittel 6

## Resultater og vurderinger tilleggsstudie

I dette kapitlet presenteres resultater og vurderinger for beregningstilfelle 11 - 18 i tilleggsstudie hvor totalt 19 beregningsvarianter ble analysert. Følgende effekter ble undersøkt:

- Variant med PE-folie og middels-lavt startfuktnivå (Beregningstilfelle 11)
- Effekt av strålingsabsorpsjonstall til taktekning (Beregningstilfelle 12)
- Effekt av innvendig fukttilskudd (Beregningstilfelle 13)
- Effekt av isolasjonstype (Beregningstilfelle 14)
- Effekt av taktekning (Beregningstilfelle 15)
- Effekt av massivtretrykkelse (Beregningstilfelle 16)
- Effekt av isolasjonstykkelse (Beregningstilfelle 17)
- Effekt av skygge (Beregningstilfelle 18)

Beregningstilfelle 11 er et videreføringstilfelle fra hovedstudie og følger ikke samme standardkonstruksjonsoppbygging som resterende beregningstilfeller i tilleggsstudie. Resultatene for dette tilfellet vil sammenlignes mot resultatene fra beregningstilfelle 2 i hovedstudie.

Beregningstilfelle 12 danner standardkonstruksjonen og sammenligningsgrunnlaget for alle resterende undersøkelser som utføres i tilleggsstudie. Resultater for dette beregningstilfellet vil sammenlignes med resultater fra beregningstilfelle 3 i hovedstudie.

I tilleggsstudie ble det også tatt kontroller av RF og temperatur i ytterste mm av massivtreelementet og mineralullen for å kunne vurdere fuktforholdene og muggvekstrisikoen til beregningsvariantene. På bakgrunn av det som er skrevet innledningsvis i kapittel 5 og usikkerhetene rundt kontroll av mineralullen beskrevet i kapittel 5.3.2, er det i tilleggsstudie også valgt å fokusere på kontrollene for massivtreelementet. Resultater for kontrollene

---

i mineralullen presenteres, men disse plasseres i vedlegg E kapittel E.2.

Videre i kapittelet vil det for hvert beregningstilfelle, med unntak av beregningstilfelle 11, presenteres følgende:

- Grafer som viser hvilken effekt den undersøkte parameteren vil ha på RF i ytterste mm av massivtreelementet i forhold til standardkonstruksjonen.
- Tabell som viser hvilken effekt den undersøkte parameteren vil ha på maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelementet i forhold til standardkonstruksjonen. Dette hentes fra muggvekstrisikovurderinger i WUFI Mould Index VTT.
- Vurdering av effekten den undersøkte parameteren vil ha på både RF-nivåene og muggvekstrisikoen i ytterste mm av massivtreelementet. Det vil også kommenteres hvordan den undersøkte parameteren vil påvirke forholdene i ytterste mm av mineralullen.

Maksimal muggindeks vil i de fleste tilfeller være et egnet mål for muggvekstrisikoen til en materialoverflate. Derimot er det også presentert grafer som viser variasjonen i muggindeks over beregningsperioden for ytterste mm av massivtreelementet. Dette er vist i vedlegg D figur D.1.5 - D.1.12.

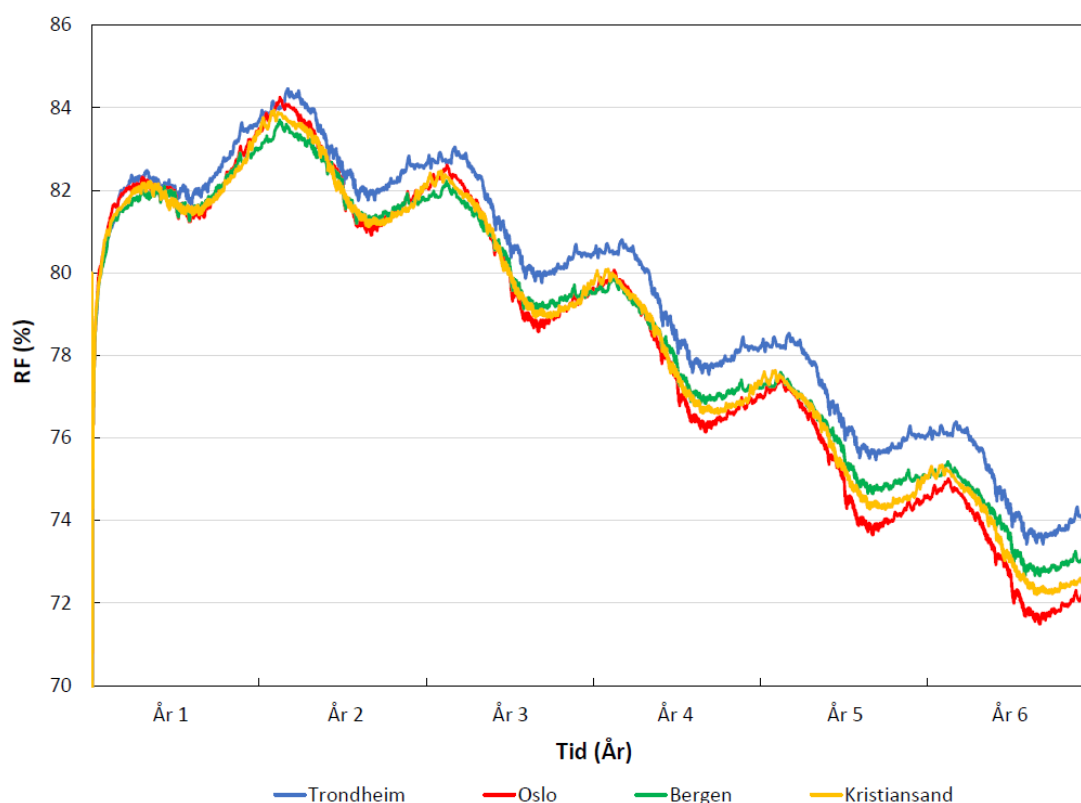
Til slutt vil det gis en oppsummering av resultatene, samt en evaluering av beregningsvariantene i tilleggsstudie. Det vil også belyses hvilken parameter i tilleggsstudie som vil være mest kritisk for muggvekstrisikoen til konstruksjonen.

## 6.1 Videreføringstilfelle fra hovedstudie

I dette kapittelet presenteres resultater og vurderinger for beregningstilfelle 11, hvor standardkonstruksjonen fra hovedstudie med PE-folie og middels-lavt startfuktnivå undersøkes for de sørlige uteklimate: Oslo, Bergen og Kristiansand. Se kapittel 5.3.3 for begrunnelse bak beregningstilfellet. Resultater fra beregningstilfelle 2 (med PE-folie) i hovedstudie tas med som sammenligningsgrunnlag.

### Resultat

Figur 6.1.1 nedenfor viser variasjonen i RF i ytterste mm av massivtreelementet for hvert undersøkte uteklimate. Se vedlegg E figur E.2.1 for variasjonen i RF for ytterste mm av mineralullen.



**Figur 6.1.1:** RF ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 11. Sammenligning med beregningstilfelle 2 (med PE-folie). Startfuktnivå = Middels-lavt. Dampspærre = PE-folie.

Tabell 6.1.1 på neste side viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelementet og mineralullen for hvert undersøkte uteklimate. Figur D.1.5 i vedlegg D viser hvordan muggindeksene vil variere for ytterste mm av massivtreelementet, mens figur E.2.16 i vedlegg E viser hvordan muggindeksene vil variere for ytterste mm av mineralullen.

Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for begge ytelseskontroller				
Uteklima (Beregningstilfelle) → Kontroller ↓	Trondheim (2)	Oslo (11)	Bergen (11)	Kristiansand (11)
Ytterste mm av massivtreelement	1,32	1,23	1,14	1,19
Ytterste mm av mineralull	3,23	2,35	3,4	3,01

**Tabell 6.1.1:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelementet og mineralullen. Beregningstilfelle 11. Sammenligning med beregningstilfelle 2 (med PE-folie).

## Vurdering

Ser av figur 6.1.1 og tabell 6.1.1 at et sørlig uteklima vil ha liten effekt på RF og muggvekstrisikoen i ytterste mm av massivtreelementet. RF-nivåene og muggindeksene blir her litt lavere for de sørlige uteklimaene i forhold til Trondheim. Figur D.1.5 viser at konstruksjonsvariantene fortsatt vil ha en risiko for muggvekst, men disse vurderes likevel til å være akseptable.

Ser av figur E.2.1 at de sørlige uteklimaene gir bedre fuktforhold i ytterste mm av mineralullen. Dette vil hovedsakelig være på sommerstid hvor uttørkingen innover øker. Effekten vil være størst for varianten med Oslo, og her blir maksimal muggindeks og derav muggvekstrisikoen redusert betraktelig.

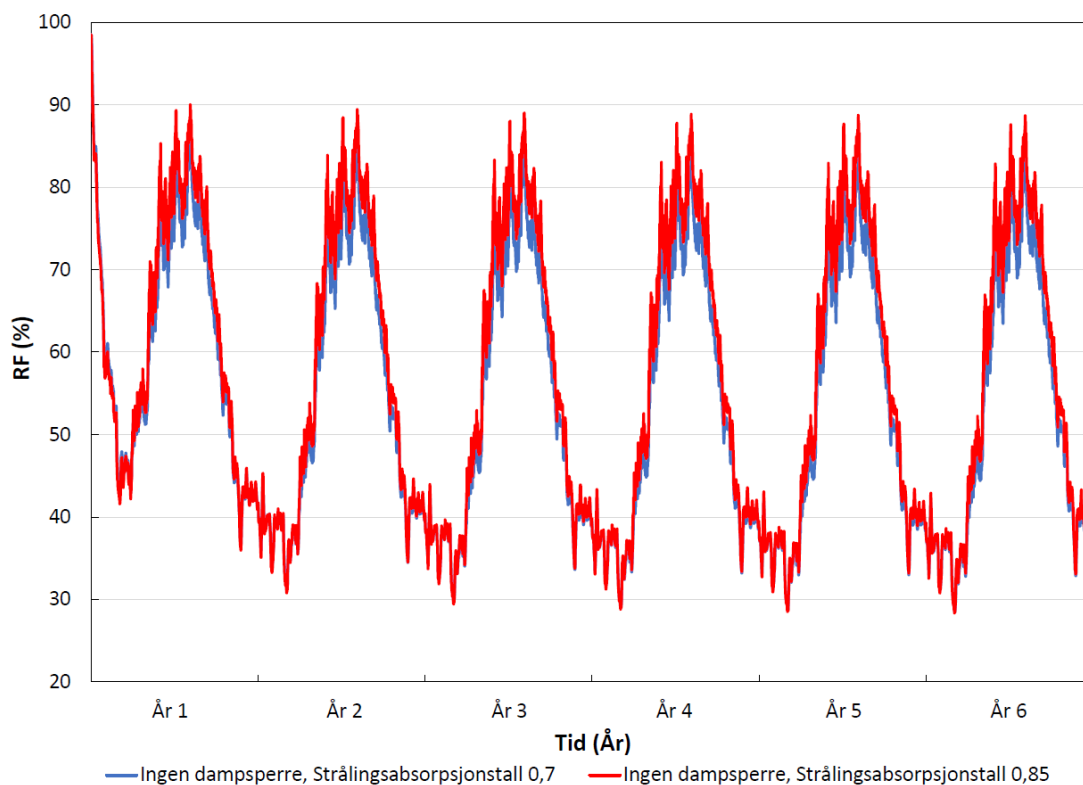
## 6.2 Effekt av strålingsabsorpsjonstall

I dette kapittelet presenteres resultater og vurderinger for beregningstilfelle 12, hvor effekter av strålingsabsorpsjonstallet til taktekningen undersøkes. Se kapittel 5.3.3 for begrunnelse bak beregningstilfellet. Resultater fra beregningstilfelle 3 i hovedstudie (med ingen dampspærre, dampbrems og strålingsabsorpsjonstall lik 0,7) tas med som sammenligningsgrunnlag. Dette beregningstilfellet danner videre standardkonstruksjonen og sammenligningsgrunnlaget for alle resterende undersøkelser og parametervariasjoner som utføres i tilleggsstudie.

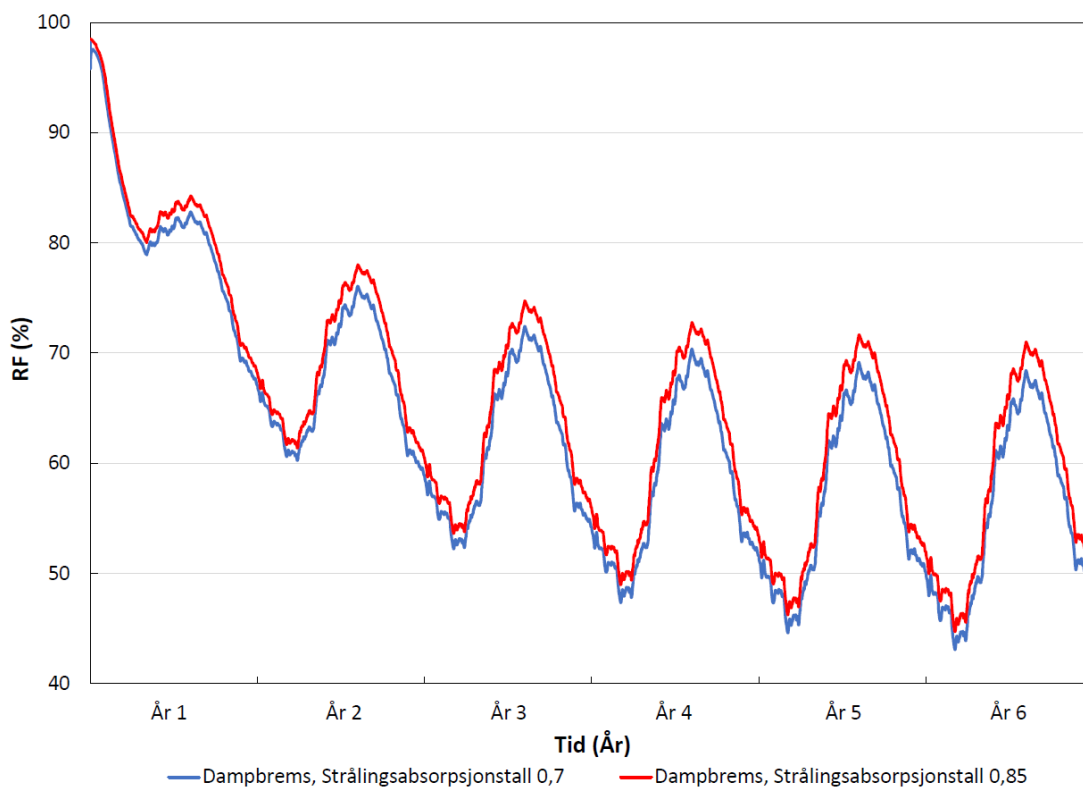
### Resultat

Figur 6.2.1 og 6.2.2 på neste side viser variasjonen i RF i ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Se figur E.2.2 og E.2.3 i vedlegg E for variasjonen i RF for ytterste mm av mineralullen.

## 6.2. Effekt av strålingsabsorpsjonstall



**Figur 6.2.1:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av strålingsabsorpsjonstall. Beregningstilfelle 12 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 3 (blå). Dampsperre = Ingen dampsperre.



**Figur 6.2.2:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av strålingsabsorpsjonstall. Beregningstilfelle 12 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 3 (blå). Dampsperre = Dampbrems.

Tabell 6.2.1 nedenfor viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Her står BT for beregningstilfelle. Figur D.1.6 viser hvordan muggindeksene varierer for ytterste mm av massivtreelementet, mens figur E.2.17 viser hvordan muggindeksene varierer for ytterste mm av mineralullen.

Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av massivtreelement		
Strålingsabsorpsjonstall (BT) → Dampspersesjikt ↓	Strålingsabsorpsjonstall = 0,7 (3)	Strålingsabsorpsjonstall = 0,85 (12)
Ingen dampsperre	0,18	0,24
Dampbrems	1,67	1,87

**Tabell 6.2.1:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 12. Sammenligning med beregningstilfelle 3.

## Vurdering

Ser av figur 6.2.1 og 6.2.2 at en økning i strålingsabsorpsjontallet til taktekningen gir forverrede fuktforhold i ytterste mm av massivtreelementet, spesielt på sommerstid. Dette kan komme av at taktekningen og de øverste sjiktene av mineralullen vil få høyere temperaturer i disse månedene på grunn av økt absorpsjon av solstråling. Høyere temperaturer i mineralullen gir høyere damptrykk, som igjen gir en økt drivkraft for fukttransport ved diffusjon fra isolasjonen til massivtreelementet på sommerstid.

Muggindeksene i tabell 6.2.1 tilsier at det vil bli en økt risiko for muggvekst for begge konstruksjonsvarianter, spesielt for varianten med dampbrems. Årsaken til dette er at økningen i strålingsabsorpsjontallet medfører at byggfukten i massivtreelementet vil tørke tregere ut, og oversiden av elementet vil derfor bli eksponert for RF-nivå over kritisk nivå (80 %) i en lengre tidsperiode. Derimot blir begge varianter vurdert til å være akseptable med hensyn på muggvekst.

Figur E.2.2 og E.2.3 i vedlegg E viser at en økning i strålingsabsorpsjontallet vil ha en positiv effekt på RF-nivåene for ytterste mm av mineralullen. På sommerstid blir RF her noe lavere på grunn av økt uttørking innover.

## 6.3 Effekt av innvendig fukttilskudd

I dette kapittelet presenteres resultater og vurderinger for beregningstilfelle 13, hvor effekter av innvendig fukttilskudd undersøkes. Resultatene sammenlignes med beregningstilfelle 12. Innvendig fukttilskudd viser seg å ha svært liten effekt på RF-nivåene og maksimal muggindeks for kontroll av massivtreelementet. Grafer som viser variasjonen i RF for ytterste mm av massivtreelementet er derfor plassert i vedlegg D kapittel D.1.

### Resultat

Figur D.1.1 og D.1.2 i vedlegg D viser variasjonen i RF i ytterste mm av massivtreelementet, mens figur E.2.4 og E.2.5 i vedlegg E viser variasjonen i RF for ytterste mm av mineralullen.

Tabell 6.3.1 nedenfor viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelementet for alle beregningsvarianter. Her står BT for beregningstilfelle. Figur D.1.7 viser hvordan muggindeksene varierer for ytterste mm av massivtreelementet, mens figur E.2.18 viser hvordan muggindeksene varierer for ytterste mm av mineralullen.

<b>Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av massivtreelement</b>			
Innvendig fukttilskudd (BT) → Dampspersesjikt ↓	Lavt innvendig fukttilskudd (13)	Middels innvendig fukttilskudd (12)	Høyt innvendig fukttilskudd (13)
Ingen dampspærre	0,24	0,24	0,24
Dampbrems	1,87	1,87	1,87

**Tabell 6.3.1:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 13. Sammenligning med beregningstilfelle 12.

### Vurdering

Ser av figur D.1.1 og D.1.2 at innvendig fukttilskudd vil ha svært liten betydning for RF-nivåene for ytterste mm av massivtreelementet. Av tabellen ovenfor og figur D.1.7 ser man at dette ikke vil påvirke risikoen for muggvekst i det hele tatt for noen av beregningsvariantene. Dette kan komme av at et 200 mm tykt massivtreelementet vil ha en forholdsvis høy vanddampmotstand ( $S_d$ -verdi = ca. 14 m ved 60 % RF). Massivtreelementet vil her begrense utadrettet fukttransport ved diffusjon betraktelig og inneluftens fuktnivå får dermed mindre betydning.

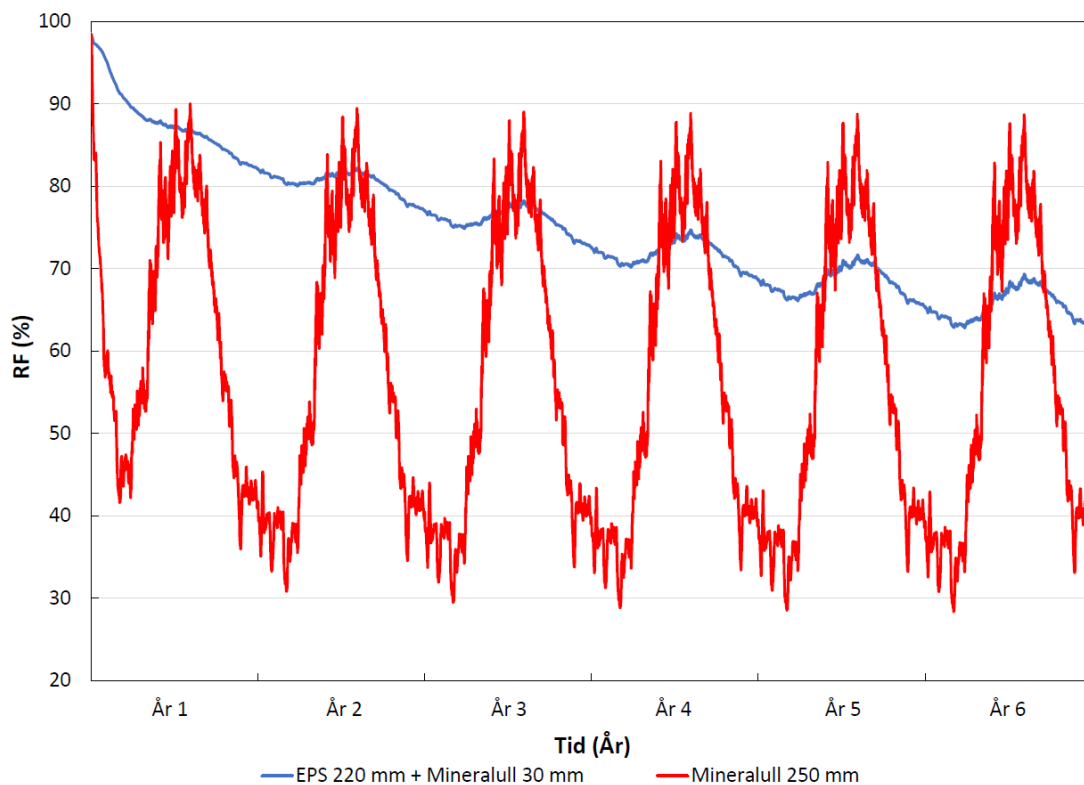
Figur E.2.4 og E.2.5 viser at innvendig fukttilskudd vil ha liten betydning for RF-nivåene i ytterste mm av mineralullen. Figurene viser derimot at effektene av fukttilskuddet blir gradvis større for hvert beregningsår. Dette vil trolig stabilisere seg etter 7 eller 8 år.

## 6.4 Effekt av isolasjonstype

I dette kapittelet presenteres resultater og vurderinger for beregningstilfelle 14, hvor effekter av isolasjonstype undersøkes. Resultatene sammenlignes med beregningstilfelle 12.

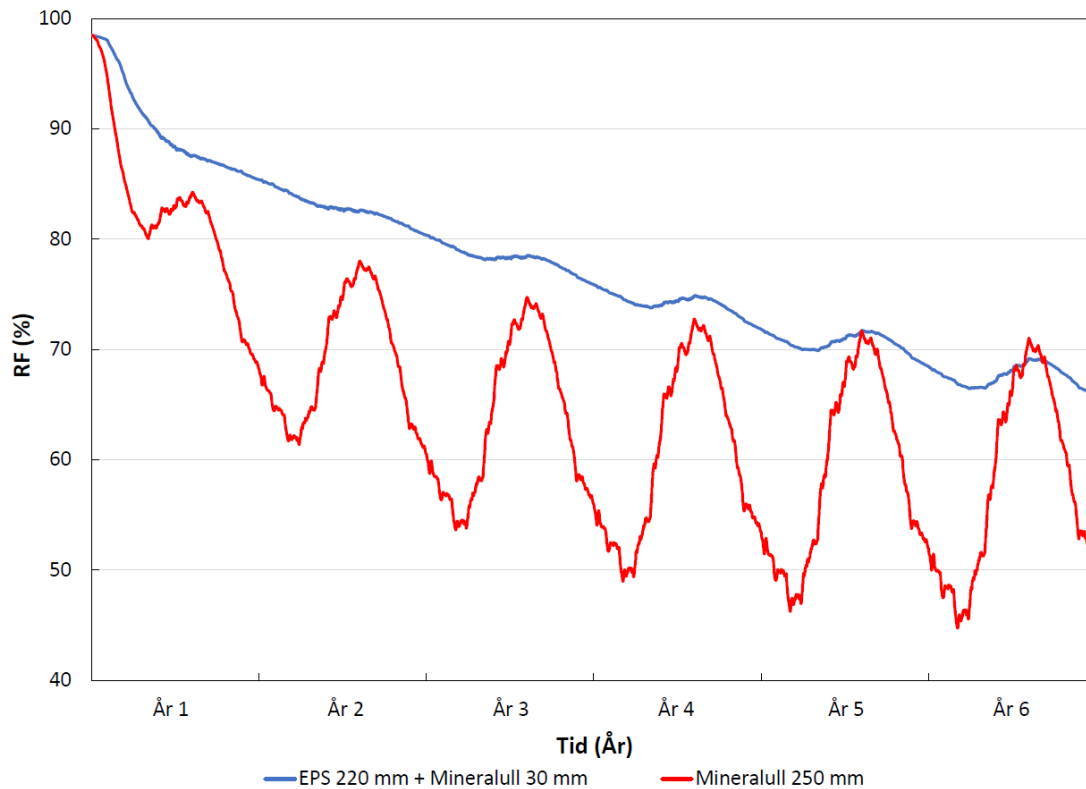
### Resultat

Figur 6.4.1 og 6.4.2 viser variasjonen i RF i ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Se figur E.2.6 og E.2.7 i vedlegg E for variasjonen i RF for ytterste mm av mineralull.



**Figur 6.4.1:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av isolasjonstype. Beregningstilfelle 14 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (rød). Dampspærre = Ingen dampspærre.





**Figur 6.4.2:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av isolasjonstype. Beregningstilfelle 14 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (rød). Dampspærre = Dampbrems.

Tabell 6.4.1 nedenfor viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Figur D.1.8 viser hvordan muggindeksene varierer for ytterste mm av massivtreelementet, mens figur E.2.19 viser hvordan muggindeksene varierer for ytterste mm av mineralullen.

Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av massivtreelement		
Isolasjonstype (Beregningstilfelle) →	Mineralull 250 mm (12)	EPS 220 mm + Mineralull 30 mm (14)
Dampspærresjikt ↓		
Ingen dampspærre	0,24	2,48
Dampbrems	1,87	3,35

**Tabell 6.4.1:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 14. Sammenligning med beregningstilfelle 12.

## Vurdering

Ser av figur 6.4.1 og 6.4.2 at isolasjonstype vil ha svært stor betydning for fuktforholdene i ytterste mm av massivtreelementet. Her vil RF-nivåene bli vesentlig mer ugunstig for begge konstruksjonsvarianter dersom det benyttes isolasjon av EPS i forhold til mineralull. Dette kommer trolig av at EPS er mye mer damptett enn mineralull. 220 mm EPS vil ha en  $S_d$ -verdi lik 6,6 m, mens 220 mm mineralull vil ha en  $S_d$ -verdi lik ca. 0,3 m. EPS-isolasjonen vil fungere som en relativt damptett dampbrems som begrenser omfordelingen

av fukt fra massivtreelementet til mineralullen på vinterstid og motsatt på sommerstid. Byggfukten vil derfor bruke lengre tid på å tørke ut, som gjør at RF blir mer ugunstig over en lengre periode.

Muggindeksene i tabell 6.4.1 tilsier at risikoen for muggvekst vil bli betydelig høyere for begge konstruksjonsvarianter for ytterste mm av massivtreelementet ved bruk av EPS. Disse får vurdering gul (ingen dampspærre) og rød (dampbrems) av WUFI Mould Index VTT og bedømmes til å være ikke akseptable løsninger. For slike byggfuktnivå bør disse konstruksjonsvariantene derfor unngås.

Figur E.2.6 og E.2.7 viser at bruk av EPS vil ha en positiv effekt på RF-nivåene for ytterste mm av mineralullen de første tre årene, spesielt ved bruk av ingen dampspærre. Dette kommer av at fukttransporten fra massivtreelementet til isolasjonen begrenses ved bruk av EPS i forhold til mineralull, og RF blir derfor lavere her de første årene.

## 6.5 Effekt av taktekning

I dette kapitlet presenteres resultater og vurderinger for beregningstilfelle 15, hvor effekter av taktekning undersøkes. Resultatene sammenlignes med beregningstilfelle 12. Ulik type taktekning viser seg å ha svært liten effekt på RF-nivåene og maksimal muggindeks for kontroll av massivtreelementet. Grafer som viser variasjonen i RF for ytterste mm av massivtreelementet er derfor plassert i vedlegg D kapittel D.1.

### Resultat

Figur D.1.3 og D.1.4 viser variasjonen i RF i ytterste mm av massivtreelementet, mens figur E.2.8 og E.2.9 viser variasjonen i RF for ytterste mm av mineralullen.

Tabell 6.5.1 nedenfor viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Figur D.1.9 viser hvordan muggindeksene varierer for ytterste mm av massivtreelementet, mens figur E.2.20 viser hvordan muggindeksene varierer for ytterste mm av mineralullen.

Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av massivtreelement		
Type takbelegg (beregningstilfelle) → Dampspærresjikt ↓	To-lags asfalt takbelegg (12)	PVC takbelegg (15)
Ingen dampspærre	0,24	0,23
Dampbrems	1,87	1,87

**Tabell 6.5.1:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 15. Sammenligning med beregningstilfelle 12.

## Vurdering

Ser av figur D.1.3 og D.1.4 at bruk av en mer dampåpen taktekning (PVC  $\rightarrow S_d = 15$  m) i forhold til en damp tett taktekning (To-lags asfalt  $\rightarrow S_d = 270$  m), vil ha minimal effekt på fuktforholdene i ytterste mm av massivtreelementet. RF blir her noe lavere, men endringene anses til å være neglisjerbare. Tabell 6.5.1 på forrige side viser at dette heller ikke vil ha noen betydelig effekt på muggvekstrisikoen i ytterste mm av massivtreelementet.

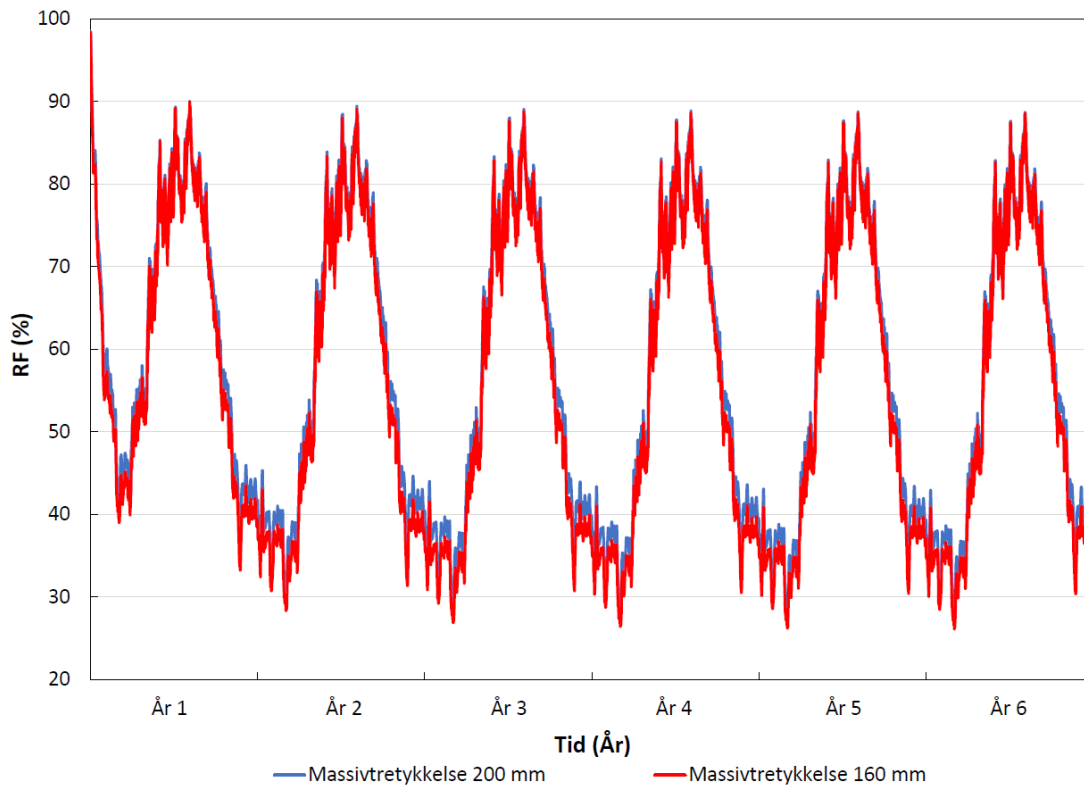
Figur E.2.8 og E.2.9 viser at konstruksjonsvariantene med bruk av PVC vil få en liten reduksjon i RF i ytterste mm av mineralullen på sommerstid. Dette skyldes at en mer dampåpen taktekning vil gi konstruksjonen en viss uttørkingsmulighet mot uteluft, og fuktigheten i isolasjonen vil derfor tørke ut raskere.

## 6.6 Effekt av massivtretykkelse

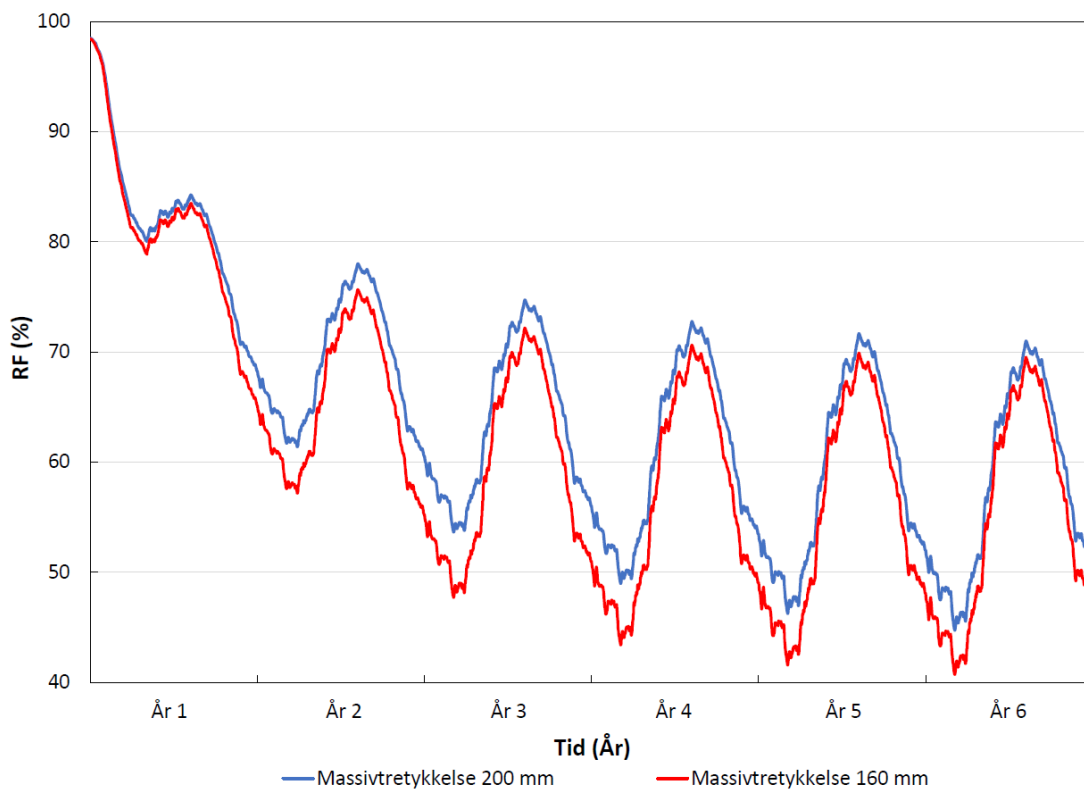
I dette kapittelet presenteres resultater og vurderinger for beregningstilfelle 16 hvor effekter av massivtretykkelse undersøkes. Resultatene sammenlignes med beregningstilfelle 12.

### Resultat

Figur 6.6.1 og 6.6.2 på neste side viser variasjonen i RF i ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Se figur E.2.10 og E.2.11 for variasjonen i RF for ytterste mm av mineralullen.



**Figur 6.6.1:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av massivtetrykkelse. Beregningstilfelle 16 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (blå). Dampsperre = Ingen dampsperre.



**Figur 6.6.2:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av massivtetrykkelse. Beregningstilfelle 16 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (blå). Dampsperre = Dampbrems.

Tabell 6.6.1 nedenfor viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Figur D.1.10 viser hvordan muggindeksene varierer for ytterste mm av massivtreelementet, mens figur E.2.21 viser hvordan muggindeksene varierer for ytterste mm av mineralullen.

Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av massivtreelement		
Massivtretykkelse (Beregningstilfelle) → Dampspersesjikt ↓	Massivtretykkelse 200 mm (12)	Massivtretykkelse 160 mm (16)
Ingen dampsperre	0,24	0,19
Dampbrems	1,87	1,82

**Tabell 6.6.1:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 16. Sammenligning med beregningstilfelle 12.

## Vurdering

Ser av figur 6.6.1 og 6.6.2 på forrige side at en reduksjon av massivtretykkelsen fra 200 mm til 160 mm gir mer gunstige RF-nivå i ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Endringene blir her mest synlig på vinterstid, og disse blir størst for varianten med dampbrems. Muggindeksene i tabell 6.6.1 tilsier at risikoen for muggvekst blir noe lavere for konstruksjonsvariantene med redusert massivtretykkelse. Endringen er derimot liten og varianten med dampbrems vil fortsatt ha en viss muggvekstrisiko. Slik nevnt i kapittel 6.3 vil et 200 mm tykt massivtreelement være relativt damp tett ( $S_d = \text{ca. } 14 \text{ m ved } 60 \% \text{ RF}$ ). En reduksjon i massivtretykkelsen medfører en reduksjon i vanddampmotstanden til elementet (reduksjon av  $S_d$  på ca. 3 m ved 60 % RF), som igjen gjør at byggfukten får en økt uttørkingsmulighet innover mot inneluft. For det undersøkte startfuktnivået (middels-høyt) vil de ytterste 2,5 cm av massivtreelementet være oppfuktet av nedbør, mens resterende av elementet har et gjennomgående fuktinnhold på 16 vekt-%. Når tykkelsen til massivtreelementet reduseres, vil det totale byggfuktnivået som må tørkes ut også reduseres. Begge disse kan være mulige årsaker til at konstruksjonsvariantene med redusert massivtretykkelse oppnår lavere RF-nivå og redusert risiko for muggvekst på oversiden av massivtreelementet.

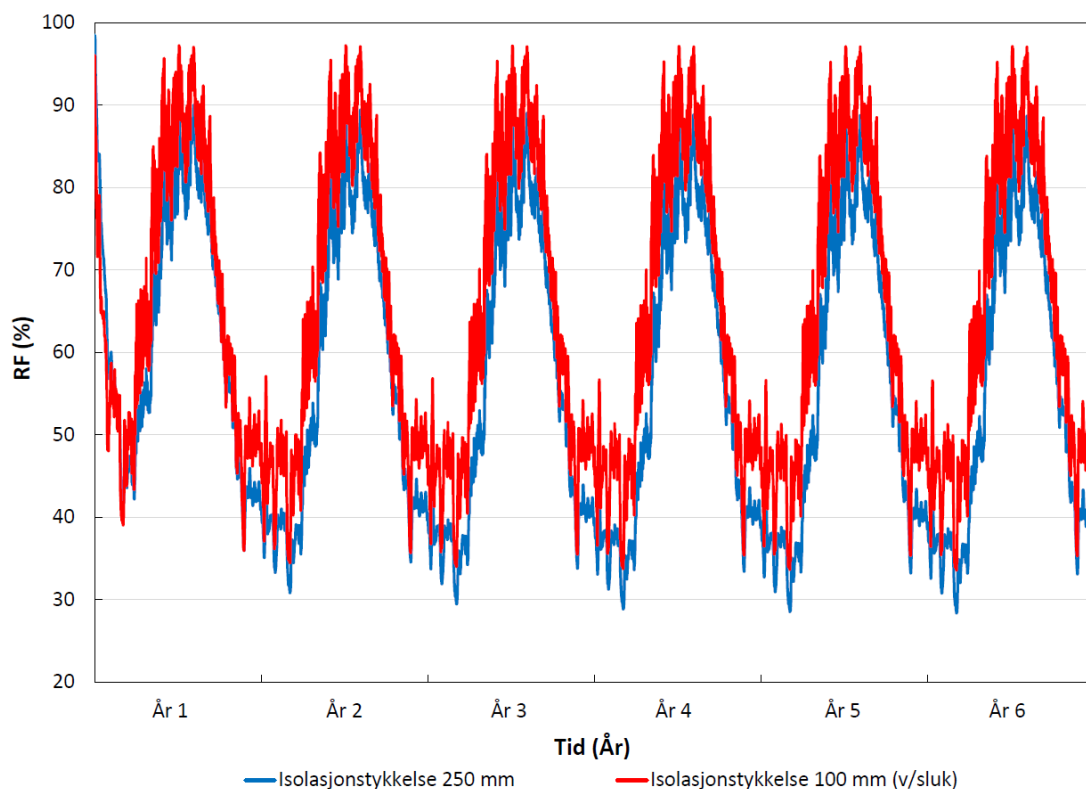
Figur E.2.10 og E.2.11 viser at en reduksjon i massivtretykkelsen vil ha en negativ effekt på fuktforholdene i ytterste mm av mineralullen. Dette gjelder de første 2 til 3 årene hvor RF-nivåene blir litt høyere på sommerstid.

## 6.7 Effekt av isolasjonstykkelse

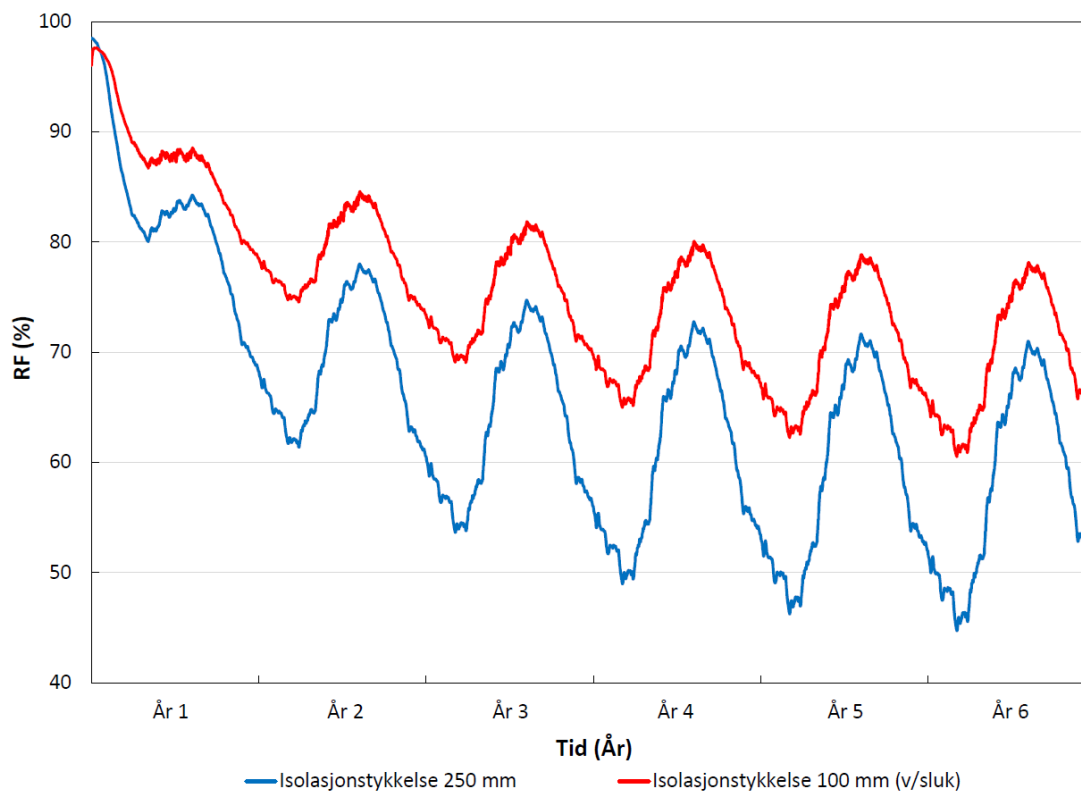
I dette kapitlet presenteres resultater og vurderinger for beregningstilfelle 17, hvor effekter av isolasjonstykkelse undersøkes. Dette tilfellet skal representere isolasjonstykkelsen ved et sluk. Resultatene sammenlignes med standardkonstruksjonen beregningstilfelle 12.

### Resultat

Figur 6.7.1 og 6.7.2 viser variasjonen i RF i ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Se figur E.2.12 og E.2.13 for variasjonen i RF for ytterste mm av mineralullen.



**Figur 6.7.1:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av isolasjonstykkelse. Beregningstilfelle 17 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (blå). Dampspærre = Ingen dampspærre.



**Figur 6.7.2:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av isolasjonstykkelse. Beregningstilfelle 17 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (blå). Dampspærre = Dampbrems.

Tabell 6.7.1 nedenfor viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge i ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Figur D.1.11 viser hvordan muggindeksene varierer i ytterste mm av massivtreelementet, mens figur E.2.22 viser hvordan muggindeksene varierer i ytterste mm av mineralullen.

Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av massivtreelement		
Isolasjonstykkelse (Beregningstilfelle) → Dampspærresjikt ↓	Mineralull 250 mm (12)	Mineralull 100 mm (17)
Ingen dampspærre	0,24	1,45
Dampbrems	1,87	2,48

**Tabell 6.7.1:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 17. Sammenligning med beregningstilfelle 12.

## Vurdering

Ser av figur 6.7.1 og 6.7.2 at en reduksjon i isolasjonstykkelsen fra 250 mm til 100 mm vil ha stor betydning for fuktforholdene i ytterste mm av massivtreelementet. RF-nivåene vil her bli vesentlig høyere for begge konstruksjonsvarianter dersom isolasjonstykkelsen reduseres med 150 mm. For variantene med isolasjonstykkelse lik 250 mm vil massivtreelementet utgjøre ca. 20 % av takets totale varmemotstand, mens det for en isolasjonstykkelse lik 100 mm vil utgjøre ca. 37 % (regnet ut fra verdier gitt i tabell B.0.1 i vedlegg B). Ut i fra formel

6.7.1 nedenfor vil temperaturfallet over massivtreelementet bli større for variantene med isolasjonstykkelse lik 100 mm. Dette medfører at oversiden av massivtreelementet vil få større svingninger i temperatur, hvor temperaturen blir lavere på vinterstid og høyere på sommerstid. På grunn av disse temperaturforskjellene vil oversiden av massivtreelementet oppfuktes mer på sommerstid og tørke ut mindre på vinterstid.

Av tabell 6.7.1 ser man at maksimal muggindeks for ytterste mm av massivtreelementet blir betydelig høyere for begge konstruksjonsvarianter, spesielt for varianten med ingen dampsperre. Årsaken til at maksimal muggindeks blir mye høyere for varianten med ingen dampsperre, er at vekstforholdene for muggsoppen blir betydelig mer gunstig. På sommerstid blir RF her opp til 95 %, samt at temperaturen på oversiden av massivtreelementet øker og blir mer gunstig for muggvekst. Varianten med dampbrems var noe risikabel fra før av med hensyn på muggvekst, og blir enda mer ugunstig ved en reduksjon av isolasjonstykkelsen. Konstruksjonsvariantene får vurdering grønn (ingen dampsperre) og gul (dampbrems) av WUFI Mould Index VTT. Selv om varianten med ingen dampsperre vurderes av programmet til å være akseptabel, bør denne likevel unngås. Dersom man ser på figur D.1.11 som viser variasjonen i muggindeksen, ser man at det vil bli omtrent like høy risiko for muggvekst hvert eneste beregningsår. Siden programmet også tar hensyn til muggvekst ved ugunstige RF-nivå ( $RF < RF_{crit}$ ), vil det være en viss risiko for muggvekst gjennom omtrent hele beregningsperioden, med unntak av de kaldeste vintermånedene. Dette bedømmes derfor til å være ikke akseptabelt.

Figur E.2.12 og E.2.13 viser at en reduksjon i isolasjonstykkelsen vil ha en positiv effekt på fuktforholdene i ytterste mm av mineralullen. Her vil RF-nivåene bli noe lavere på sommerstid.

$$\Delta\theta_{massivtre} = \frac{(\theta_1 - \theta_2) \cdot R_{massivtre}}{R_{tot}} \quad (6.7.1)$$

Hvor:

$\Delta\theta_{massivtre}$  = Temperaturfall over massivtreelement [ $^{\circ}C$ ]

$\theta_1$  og  $\theta_2$  = Temperatur på hver side av takkonstruksjonen [ $^{\circ}C$ ]

$R_{massivtre}$  = Varmemotstand til massivtreelement [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]

$R_{tot}$  = Total varmemotstand til takkonstruksjonen [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]

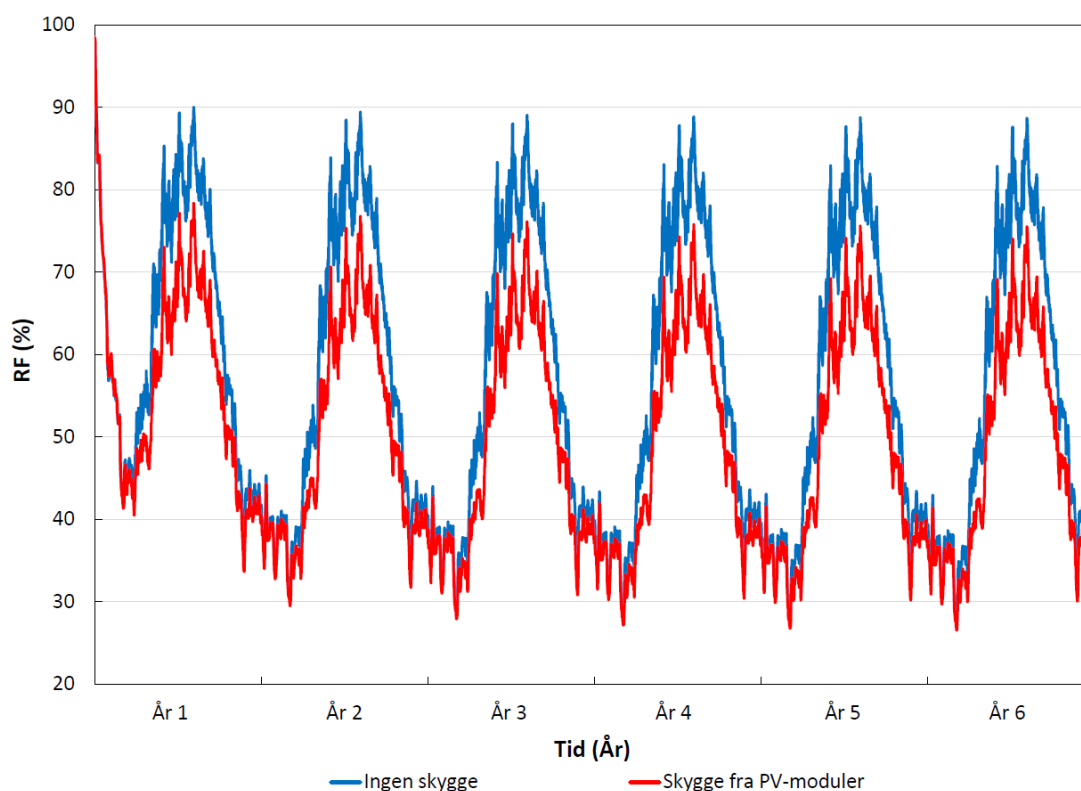


## 6.8 Effekt av skygge

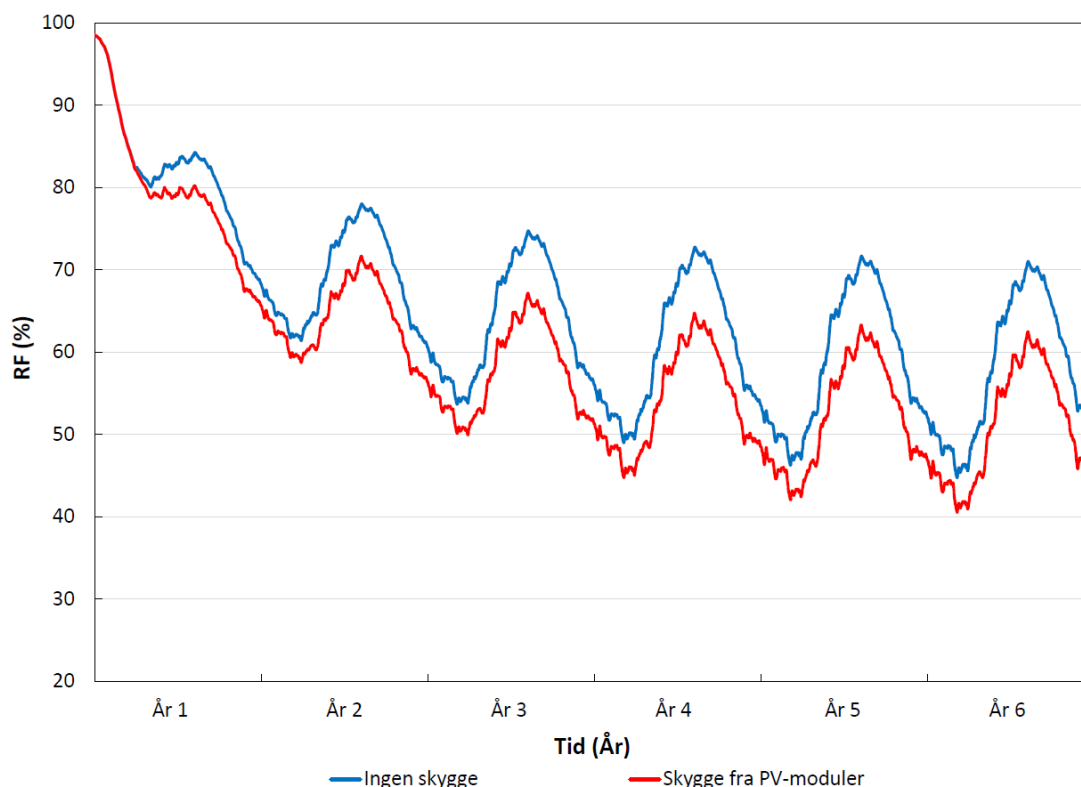
I dette kapitlet presenteres resultater og vurderinger for beregningstilfelle 18, hvor effekter av skygge på takteknningen undersøkes. Dette tilfellet skal representere skygge fra PV-moduler på taket. Resultatene sammenlignes med beregningstilfelle 12.

### Resultat

Figur 6.8.1 og 6.8.2 viser variasjonen i RF i ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Se figur E.2.14 og E.2.15 for variasjonen i RF i ytterste mm av mineralullen.



**Figur 6.8.1:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av skygge. Beregningstilfelle 18 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (blå). Dampspærre = Ingen dampspærre.



**Figur 6.8.2:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av skygge. Beregningstilfelle 18 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (blå). Dampsperre = Dampbrems.

Tabell 6.8.1 nedenfor viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge i ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter. Figur D.1.12 viser hvordan muggindeksene varierer i ytterste mm av massivtreelementet, mens figur E.2.23 viser hvordan muggindeksene varierer i ytterste mm av mineralullen.

Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av massivtreelement		
Skygge (Beregningstilfelle) →	Ingen skygge (12)	Skygge fra PV-moduler (18)
Dampsperrersjikt ↓		
Ingen dampsperre	0,24	0,15
Dampbrems	1,87	1,87

**Tabell 6.8.1:** Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 18. Sammenligning med beregningstilfelle 12.

## Vurdering

Ser av figur 6.8.1 og 6.8.2 at skygge fra PV-moduler på taket gir mer gunstige fuktforhold i ytterste mm av massivtreelementet for begge konstruksjonsvarianter, spesielt på sommerstid. Endringene blir størst for varianten med ingen dampsperre, og her holder RF seg under kritisk nivå (80 %) gjennom hele beregningsperioden med unntak av den første måneden etter lukking. En mulig årsak til at RF-nivåene blir lavere, kan være at skygge fra PV-modulene vil redusere temperaturen på taktekningen og de øverste sjiktene av

mineralullen. Dette reduserer fukttransporten ved diffusjon innover på sommerstid, som medfører at oversiden av massivtreelementet oppfuktes mindre.

Selv om skygge fra PV-moduler vil ha en stor effekt på RF-nivåene, viser tabell 6.8.1 at dette vil ha liten påvirkning på maksimal muggindeks i ytterste mm av massivtreelementet, spesielt for varianten med dampbrems. Årsaken til at maksimal muggindeks ikke endres for varianten med dampbrems, er at oversiden av massivtreelementet vil tørke ned til 80 % RF omtrent like raskt både med og uten skygge. Forskjellen er derimot at oversiden av elementet ikke oppfuktes i noen særlig grad den første sommeren, og RF holder seg her rett under 80 %. Derfor vil det i realiteten være større risiko for muggvekst for varianten med ingen skygge. Dette ser man hvis man sammenligner de røde grafene i figur D.1.6 og D.1.12. WUFI Mould Index VTT vurderer begge konstruksjonsvarianter til å være akseptable. Derimot vil det fortsatt være en viss risiko for muggvekst for varianten med dampbrems, og dette bør brukes med varsomhet.

## 6.9 Oppsummering og evaluering

I dette kapitlet gis en oppsummering og evaluering av resultatene og vurderingene for beregningstilfelle 11 - 18, hvor følgende effekter ble undersøkt (her er standardparametere vist i fet skrift):

- Beregningstilfelle 11 - Videreføringstilfelle fra hovedstudie
- Beregningstilfelle 12 - Effekt av strålingsabsorpsjontall til taktekning (0,7 → **0,85**)
- Beregningstilfelle 13 - Effekt av innvendig fukttilskudd (Lavt ← **Middels** → Høyt)
- Beregningstilfelle 14 - Effekt av isolasjonstype (**Mineralull** → EPS)
- Beregningstilfelle 15 - Effekt av taktekning (**To-lags asfalt** → PVC)
- Beregningstilfelle 16 - Effekt av massivtretykkelse (**200 mm** → 160 mm)
- Beregningstilfelle 17 - Effekt av isolasjonstykkelse (**250 mm** → 100 mm)
- Beregningstilfelle 18 - Effekt av skygge (**Ingen** → Fra PV-moduler)

### Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) og kritisk parameter for muggvekst

Tabell 6.9.1 og 6.9.2 nedenfor viser maksimal muggindeks og trafikklysfarge for begge kontroller, både ytterste mm av massivtreelementet og mineralullen, for beregningstilfelle 12 - 18. Her representerer beregningstilfelle 12 standardkonstruksjonen og sammenligningsgrunnlaget til resterende beregningstilfeller. Maksimal muggindeks og trafikklysfarge for beregningstilfelle 11 er vist i tabell 6.1.1 i kapittel 6.1.

Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av massivtreelement								
Beregningstilfelle → Dampsperrsjikt ↓	12	13 - L	13 - H	14	15	16	17	18
Ingen dampsperre	0,24	0,24	0,24	2,48	0,23	0,19	1,45	0,15
Dampbrems	1,87	1,87	1,87	3,35	1,87	1,82	2,48	1,87

**Tabell 6.9.1:** Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 12 - 18.

Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av mineralull								
Beregningstilfelle → Dampsperrsjikt ↓	12	13 - L	13 - H	14	15	16	17	18
Ingen dampsperre	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Dampbrems	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

**Tabell 6.9.2:** Maksimal muggindeks (trafikklysfarge) for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 12 - 18.

Ser av tabell 6.9.1 på forrige side og figur D.1.6 - D.1.12 i vedlegg D at de fleste undersøkte effektene i tilleggsstudie vil ha liten til ingen betydning for muggvekstrisikoen på oversiden av massivtreelementet. Derimot vil det være to effekter som gir en betydelig høyere muggvekstrisiko. Dette er beregningstilfelle 14 hvor det ble brukt isolasjon av EPS i stedet for mineralull, og beregningstilfelle 17 hvor konstruksjonen hadde 150 mm mindre isolasjon. Disse to parameterne vil derfor være av størst betydning med hensyn på muggvekst på oversiden av massivtreelementet. Av disse vil isolasjonstypen være mest kritisk.

Tabell 6.9.2 på forrige side viser at for middels-høyt startfuktnivå og dampsperretilfellene ingen dampsperre og dampbrems, vil ikke noen av de undersøkte effektene i tilleggsstudie ha betydning for maksimal muggindeks og trafikklysfarge for ytterste mm av mineralullen. Alle beregningsvariantene får her den største muggindeksverdien som er mulig å få for en mineralulloverflate. Figurene i vedlegg E kapittel E.2 som viser variasjonen i muggindeks for ytterste mm av mineralullen, viser at de ulike effektene vil påvirke muggindeksene noe, men at denne påvirkningen vil være minimal. Usikkerheter og momenter som kunne ha ført til at resultatene viser det de viser er beskrevet i detalj i kapittel 5.3.2.

### **Evaluering beregningstilfelle 11 - 18**

Tabell 6.9.3 på neste side gir en evaluering av konstruksjonsvariantene i beregningstilfelle 11 - 18 i henhold til fargeskalaen beskrevet innledningsvis i kapittelet. Evalueringen vil hovedsakelig ta utgangspunkt i resultatene og vurderingene for kontrollene i ytterste mm av massivtreelementet. Her vil muggvekstrisikoen, RF-nivået og den generelle hygrottermiske ytelsen bli tatt hensyn til. Evalueringen benytter en fargeskala for å bedre kunne tydeliggjøre hvilke konstruksjonsvarianter som blir akseptable og hvilke som bør unngås. Her er det viktig å poengtere at dette ikke vil være det samme som trafikklysvurderingen fra WUFI Mould Index VTT, og det blir brukt andre farger for å skille mellom disse. Blå farge vil her representere at konstruksjonsvarianten er akseptabel og har liten til ingen risiko. Grå vil representere at konstruksjonsvarianten er akseptabel, men har en viss risiko. Oransje vil representere at konstruksjonsvarianten ikke blir akseptabel og bør unngås. Med akseptabel og risiko menes i forhold til muggvekst og høyt fuktnivå i massivtreelementet. For beregningstilfelle 11 vil det belyses hvilket uteklima som ble mest gunstig/ugunstig, mens for beregningstilfelle 12 til 18 vil det belyses hvilken av de undersøkte konstruksjonsvariantene som blir mest og minst gunstig/ugunstig for hvert dampsperretilfelle.

Evaluering av konstruksjonsvarianter i tilleggsstudie		
Dampsperretilfelle → Beregningstilfelle ↓	Ingen dampsperre	Dampbrems
Beregningstilfelle 11 - Oslo	Mest gunstig <sup>[1]</sup>	
Beregningstilfelle 11 - Bergen		
Beregningstilfelle 11 - Kristiansand		
Beregningstilfelle 12	Akseptabelt (liten risiko)	Akseptabelt (noe risiko)
Beregningstilfelle 13 - Lavt IFT		
Beregningstilfelle 13 - Høyt IFT		
Beregningstilfelle 14	Mest ugunstig	Mest ugunstig
Beregningstilfelle 15	Akseptabelt (liten risiko)	Akseptabelt (noe risiko)
Beregningstilfelle 16		
Beregningstilfelle 17	Ikke akseptabelt (bør unnås)	Ikke akseptabelt (bør unnås)
Beregningstilfelle 18	Mest gunstig	Mest gunstig

<sup>[1]</sup> Dampsperrersjikt = PE-folie

■ Akseptabelt (liten risiko)    
 ■ Akseptabelt (noe risiko)    
 ■ Ikke akseptabelt (bør unnås)

**Tabell 6.9.3:** Evaluering av konstruksjonsvarianter i tilleggsstudie

Ser av tabellen ovenfor at konstruksjonsvariantene med isolasjon av EPS i forhold til mineralull (beregningstilfelle 14) og en isolasjonstykkelse lik 100 mm i forhold til 250 mm (beregningstilfelle 17) blir ikke akseptable, og bør unngås for begge undersøkte dampsperretilfeller. Dette gjelder derimot for takkonstruksjoner hvor massivtreelementene har et byggefuktnivå tilsvarende middels-høyt startfuktnivå. Det kan trolig hende disse konstruksjonsvariantene vil bli akseptable ved mindre byggefuktnivå, men dette er ikke blitt undersøkt i oppgaven. Av isolasjonstype og isolasjonstykkelse vil isolasjonstype bli den mest ugunstige parameteren.

Resterende konstruksjonsvarianter i tilleggsstudie vurderes til å være akseptable. Derimot ser man her at det vil være en større risiko dersom det benyttes dampbrems i forhold til ingen dampsperre. For byggefuktnivå tilsvarende middels-høyt startfuktnivå, vil det derfor være mer gunstig å bruke ingen dampsperre i massivtrekonstruksjonen. Dette underbygger mye av resultatene og vurderingene fra undersøkelsene i hovedstudie for samme startfuktnivå.

Siden evalueringen av konstruksjonsvariantene hovedsakelig baseres på forholdene i ytterste mm av massivtreelementet, vurderes begge konstruksjonsvarianter i beregningstilfelle 18 til å bli mest gunstig. Dette beregningstilfellet er et fint eksempel på et tilfelle hvor maksimal muggindeks ikke gir en god nok beskrivelse av muggvekstrisikoen til konstruk-

sjonen. Selv om konstruksjonsvarianten med dampbrems ikke får lavere maksimal muggindeks enn standardkonstruksjonen, viser figur D.1.12 at muggvekstrisikoen på oversiden av massivtreelementet blir noe lavere her enn for de andre variantene. Disse konstruksjonsvariantene vil også få de mest gunstige RF-nivåene på oversiden av massivtreelementet. Derimot viser figur E.2.14 og E.2.15 at skygge på taktekningen fører til en svært redusert uttørking av fukt i isolasjonssjiktet på sommerstid. Dette er derimot ikke tatt like mye hensyn til siden alle varianter som er blitt undersøkt blir ugunstige med hensyn på muggvekst i ytterste mm av mineralullen.

---

# Kapittel 7

## Konklusjon

I oppgaven er det utført en parameterstudie av et flatt kompakt tak med massivtreelementer i det endimensjonale beregningsprogrammet WUFI Pro 6.3. Parameterstudien består av en hovedstudie og en tilleggsstudie med totalt 59 beregningsvarianter. Effekter av følgende parametere er undersøkt: startfuktnivå (byggfuktnivå), dampsperssjikt, uteklima, innvendig fukttilskudd, isolasjonstype, isolasjonstykkelse, taktekning, massivtretykkelse, skygge og strålingsabsorpsjonstall. Kontroller av RF og temperatur i ytterste mm av massivtreelementet og mineralullen er tatt for å kunne vurdere fuktforholdene og muggvekstrisikoen til beregningsvariantene.

De undersøkte parameterne rangeres nedenfor ut i fra hvor stor effekt disse har på fukt- og muggvekstforholdene i konstruksjonen:

Stor effekt → Byggfuktnivå, dampsperssjikt, isolasjonstype, isolasjonstykkelse

Middels effekt → Uteklima

Liten effekt → Strålingsabsorpsjonstall til taktekning, skygge på taktekning, takteknings-type, massivtretykkelse

Neglisjerbar effekt → Innvendig fukttilskudd

Byggfuktnivået og dampsperssjikt viser seg å være de parameterne som har størst effekt på fuktforholdene, mens byggfuktnivået vil være mest kritisk for muggvekstrisikoen til konstruksjonen. Hvilken isolasjon som brukes samt tykkelsen på denne, påvirker også forholdene i stor grad. Her viser resultatene at ved høye byggfuktnivå bør bruk av EPS i stedet for mineralull og redusert isolasjonstykkelse unngås. Dette gjelder for alle typer dampsperssjikt.

Ulike uteklima vil også ha en betydning for konstruksjonen, men effekten blir en del mindre og avhenger mye av byggfuktnivået og type dampsperssjikt som benyttes. Resultatene viser at noen typer dampsperssjikt er mer fordelaktig å bruke i bestemte uteklima. Bruk



---

av dampbrems, AirGuard Smart eller ingen dampsperre blir mer fordelaktig for de nordlige uteklimaene: Mo i Rana, Tromsø og Karasjok inklusiv Trondheim, mens dette blir mindre fordelaktig for de sørlige uteklimaene: Oslo, Bergen og Kristiansand. Ved bruk av PE-folie blir situasjonen motsatt. Dette blir mer fordelaktig i de sørlige uteklimaene i forhold til de nordlige uteklimaene.

Om det bør brukes dampsperre eller ikke i takkonstruksjonen viser seg å være svært avhengig av byggfuktnivået i massivtreelementene. Dersom massivtreelementene beskyttes mot direkte oppfukting fra nedbør under byggefasen, og kun har tatt opp fuktighet fra luften omkring, vil effekten ved bruk av dampsperre eller ikke ha mindre betydning for fuktforholdene i konstruksjonen. For slike tilfeller hvor byggfuktnivået er lavt, blir bruk av dampbrems mest gunstig. Alle undersøkte dampsperretilfeller gir derimot akseptable fuktforhold i konstruksjonen. Dersom fuktsikringen under byggefasen har vært dårlig og oversiden av massivtreelementene er blitt oppfuktet av nedbør rett før lukking, vil effekten ved bruk av dampsperre eller ikke ha stor betydning for fuktforholdene i konstruksjonen. For slike tilfeller hvor byggfuktnivået er høyt, bør bruk av PE-folie og dampbrems unngås siden dette gir ugunstige fuktforhold i konstruksjonen. I disse tilfellene vil det være mer fordelaktig å bruke AirGuard Smart eller å sløyfe dampsperreren. Av disse to gir tilfellet med ingen dampsperre mest gunstige fuktforhold.

Bruk av massivtreelementer i kompakte tak virker lovende, men kan fortsatt by på noen utfordringer. Basert på det som er skrevet ovenfor bør det tas spesielt hensyn til fuktsikring av massivtreelementene under byggefasen for å unngå at disse oppfuktes av nedbør. Når det gjelder de undersøkte parameterne som ble ugunstige kan det trolig hende at disse blir gunstige for tilfeller med lavere byggfuktnivå. Derimot er ikke dette blitt undersøkt tilstrekkelig i oppgaven. Ytterligere undersøkelser og forsøk bør derfor gjennomføres for å kunne gi mer konkrete anbefalinger rundt hva som bør og ikke bør velges for kompakte tak med massivtreelementer.

---

# Kapittel 8

## Videre Arbeid

### **Materialparametere massivtre (KLT):**

Materialparameterne til massivtre (KLT) som ble brukt i WUFI Pro beregningene ble kartlagt gjennom en litteraturstudie. Verdier for disse parameterne baserer seg på laboratoriemålinger på KLT av SPF-trelast. Det kan være mange usikkerheter med verdiene og disse samsvarer nødvendigvis ikke med verdier for massivtreelementer av andre typer treslag. Det hadde vært interessant å utføre laboratoriemålinger av materialparametere til massivtreelementer av norske treslag, og bruke disse videre i hygrotermiske beregningsprogrammer.

### **Todimensjonale effekter:**

Fuktberegningene i oppgaven er utført i det endimensjonale beregningsprogrammet WUFI Pro 6.3. Dette programmet er mindre komplekst og tar ikke hensyn til todimensjonale effekter i beregningene. Det ville derfor vært interessant å utføre lignende studier for massivtrekonstruksjoner i beregningsprogrammet WUFI 2D, hvor todimensjonale effekter tas hensyn til.

### **Vurdering av muggvekstrisiko:**

Muggvekstrisikoen til massivtrekonstruksjonen er vurdert ved bruk av tilleggsprogrammet WUFI Mould Index VTT. WUFI Bio er et annet tilleggsprogram som kan benyttes til vurdering av muggvekstrisikoen til bygningskonstruksjoner. Det hadde vært interessant å vurdere og sammenligne bruk av begge disse programmene.

### **Kritiske parametre:**

Parameterstudie viste at startfuktnivå (byggfuktnivå), dampsperrsjikt, isolasjonstype og isolasjonstykkelser hadde størst effekt på fukt- og muggvekstforholdene i massivtrekonstruksjonen. Av disse ble byggfuktnivået mest kritisk med hensyn på muggvekst. Mer nøye undersøkelser og forskning rundt byggfuktnivå og massivtrekonstruksjoner vil derfor være interessant, eksempelvis se på hvordan en oppfukting

---

av isolasjonen vil påvirke disse forholdene i konstruksjonen. På grunn av tids- og arbeidsomfang i oppgaven ble gunstige og ugunstige kombinasjoner av parametere i studie ikke undersøkt. Eksempler på kombinasjoner som det hadde vært interessant å undersøke er: isolasjonstype og lave byggfuktnivå, isolasjonstype og dampåpen taktekning, oppfuktet isolasjon og ulike typer dampsperrer, isolasjonstykkelse og lave byggfuktnivå m.m.

#### **Vurdering av andre konstruksjoner:**

Konstruksjonen det er utført beregninger på er et flatt kompakt tak med massivtreelementer som bærekonstruksjon. Det ville vært interessant å undersøke bruk av massivtreelementer i andre konstruksjoner, eksempelvis: yttervegger over terreng, terrasser, tak over ikke oppvarmede rom, tak på bygninger med svært høy innvendig fuktproduksjon (eks: svømmehaller el.) m.m.

#### **Resultater fra kontroll ytterste mm av mineralull:**

Resultatene fra studiene for kontroll av ytterste mm av mineralullen ga mindre realistiske verdier enn forventet. Noen av usikkerhetene og begrensningene som kunne ført til dette er blitt beskrevet i kapittel 5.3.2. Med hensyn til at WUFI Pro er et mye brukt beregningverktøy for bygningskonstruksjoner, bør denne problemstillingen undersøkes mer i detalj.

# Referanser

- Aarstad, J., Glasø, G. & Bunkholt, A. (2008), *Massivtre*, FOKUS på tre nr.20, Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Aasheim, E., Kleven, B., Sund, H., Jakobsen, B., Skaar, S. A., Kirkegaard, K. H., Landrø, H., Bunkholt, A., Glasø, G. & Aarstad, J. (2006), *Bygge med massivtreelementer*, Teknisk håndbok nr.1, Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Agnalt, M. (2013), *Smarte dampsperrer i bindingsverksvegger. Innadrettet uttørking i høyisolerte konstruksjoner*, Masteroppgave, Institutt for bygg, anlegg og transport, Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet.
- AlSayegh, G. (2012), *Hygrothermal Properties of Cross Laminated Timber and Moisture Response of Wood at High Relative Humidity*, Masteroppgave, Master of Applied Science in Civil and Environmental Engineering, Carleton University.
- Baylor, C. (2020), *What is SPF Lumber?*, URL: <https://www.thesprucecrafts.com/what-is-spf-lumber-3970453> (Hentet: 03.06.20).
- Bredesen, A. (2019), *Fukt- og lufttetthetsproblematikk med massivtreelementer*, Prosjekt-oppgave, Institutt for bygg, anlegg og transport, Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet.
- Byggforskserien (2001), *520.205 Massive treelementer. Typer og bruksområder*, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien (2003a), *471.010 Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer*, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien (2003b), *573.121 Materialer til luft- og damptetting*, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien (2004), *573.344 Varmeisolasjonsmaterialer. Typer og egenskaper*, Oslo: SINTEF Byggforsk.

- Byggforskserien (2005), *701.401 Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for innneklimaet*, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien (2010), *700.110 Byggskader. Oversikt*, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien (2012), *725.118 Skader i kompakte tak. Årsaker og utbedring*, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien (2015), *571.523 Trevirke. Treslag og materialegenskaper*, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien (2018a), *421.132 Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien (2018b), *520.339 Bruk av brennbar isolasjon i bygninger*, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien (2018c), *525.207 Kompakte tak*, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Direktoratet for byggkvalitet (2020a), *Byggteknisk forskrift (TEK17): Kapittel 11 Sikkerhet ved brann*, URL:<https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/11/i/innledning/> (Hentet 09.04.20).
- Direktoratet for byggkvalitet (2020b), *Byggteknisk forskrift (TEK17): Kapittel 14 Energi*, URL: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/14/innledning-til-kapittel-14-energi/> (Hentet 16.04.20).
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, T. (2014), *Trehus*, Håndbok 5, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Geving, S. & Holme, J. (2011), *Mean and diurnal indoor air humidity loads in residential buildings*, SAGE Publications, *Journal of Building Physics*, 35(4), s. 392-421.
- Geving, S., Holme, J. & Uvsløkk, S. (2010), *Alternative dampsperrer med uttøringsmulighet mot innelufta*, Prosjektrapport 65, Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Geving, S. & Thue, J. V. (2002), *Fukt i bygninger*, Håndbok 50, Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Glass, S. V., Wang, J., Easley, S. & Finch, G. (2013), *CLT Chapter 10: Building enclosure design for cross-laminated timber construction*, CLT Handbook - Cross laminated timber, U.S. Edition, s. 1-41, Québec, Canada: FP Innovations and Binational Timber Council.

- Glass, S. V. & Zelinka, S. L. (2010), *Chapter 4: Moisture Relations and Physical Properties of Wood*, Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, Centennial Edition, United States Department of Agriculture Forest Service, General Technical Report FPL- GTR-190, s. (4-1)-(4-19), Madison, USA: Forest Products Laboratory.
- Glava (u.å), *TEORI FUKT*, URL: <https://www.glava.no/bygg/dokumentasjon-montering/teori/teori-fukt/> (Hentet: 18.05.20).
- Hukka, A. & Viitanen, H. A. (1999), *A mathematical model of mould growth in wooden material*, *Wood Science and Technology*, Vol 33(6), s. 475-485.
- Kordziel, S. (2018), *Study of Moisture Conditions in a Multi-Story Mass Timber Building Through the use of Sensors and WUFI Hygrothermal Modeling*, Masteroppgave, Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado School of Mines.
- Mattsson, J. & Stensrød, O. (2009), *Håndbok om vannskader. Årsak, undersøkelser, tiltak og gjenoppbygging*, Oslo: Mycoteam.
- Mukhopadhyaya, P., Bundalo-Perc, S., van Reenen, D. & Wang, J. (2014), *Mid-rise wood: characterization of hygrothermal properties: report to Research Consortium for Wood and Wood-Hybrid Mid-Rise Buildings*, Client Report: A1-100035-03.4, Canada: National Research Council of Canada, URL: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/fulltext/?id=8706c9a4-9780-4a35-8dea-b020ff40315b> (Hentet: 05.04.20).
- Noreng, K., Gåsbak, J. & Bøhlerengen, T. (2012), *Unngå byggskader i flate, kompakte tak*, *Byggaktuell*, s. 60-61, URL: <https://www.byggforsk.no/file/index/547> (Hentet: 22.03.2020).
- Noreng, K. & Hisdal, J. M. (2013), *Dampsperrer i tak*, Informasjonsblad nr.7, Trondheim: Takprodusentenes Forskningsgruppe.
- Noreng, K. & Uvsløkk, S. (2010), *Robuste kompakte tak med luftkanaler i isolasjonssjiktet og økt selvuttørkingsevne*, Prosjektrapport 63, Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Standard Norge (2010), *NS-EN ISO 10456:2007+NA:2010 Byggematerialer og -produkter - Hygrotermiske egenskaper - Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarererte og praktiske termiske verdier*.
- Standard Norge (2017), *NS-EN ISO 6946:2017 Bygningskomponenter og -elementer - Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient - Beregningsmetoder*.

- Stellander, M. (2012), *Smarte dampsperrer med uttørkingsmulighet mot innelufta*, Masteroppgave, Institutt for bygg- og miljøteknikk, Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet.
- Thorsrud, E. (2013), *Smarte dampsperrer - betydningen av vinterforhold*, Masteroppgave, Institutt for bygg, anlegg og transport, Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet.
- Thue, J. V. (2016), *Bygningsfysikk. Grunnlag*, Trondheim: Fagbokforlaget.
- Thue, J. V., Oustad, M. & Gustavsen, A. (2007), *WUFI 1D Pro 4.1 Brukermanual*, Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, URL: <http://www.wufi.no/WUFI1D-4.1-Bruker-v3.1.pdf> (Hentet: 02.04.2020).
- Time, B., Geving, S., Friquin, K. L., Grynning, S., Noreng, K. & Sandland, K. M. (2008), *Tak basert på massivtreelementer. Klimapåkjenninger, bygningsfysiske og bygningstekniske forhold*, Prosjektrapport 30, Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Uvsløkk, S. (2008), *Selvuttørkingsmekanismer for kompakte tak*, Prosjektrapport 19, Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Viitanen, H. A. (1996), *Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures*, Department of Forest Products, Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Viitanen, H. A., Hanhijärvi, A., Hukka, A. & Koskela, K. (2000), *Modelling mould growth and decay damages, Proceedings of Healthy Buildings*, Vol 3, s. 341-346.
- WUFI (2006), *WUFI - Innhold*, Holzkirchen, Tyskland: Fraunhofer Institut für Bauphysik, URL: [https://wufi.de/download/WUFI41\\_help\\_e.pdf](https://wufi.de/download/WUFI41_help_e.pdf) (Hentet 23.01.20).
- WUFI (2017), *WUFI® Mould Index VTT*, URL: <https://wufi.de/en/2017/03/31/wufi-mould-index-vtt/> (Hentet: 02.05.20).

---

# Vedlegg A

## Beskrivelse av muggvekstmodell

### WUFI Mould Index VTT

Modellen operer med faktoren  $RF_{crit}$  som beskriver det laveste RF-nivået som muliggjør muggvekst når materialoverflaten er eksponert for forholdene over en lang tidsperiode.  $RF_{crit}$  vil være avhengig av temperaturen på materialoverflaten. Dette er illustrert i tabell A.0.1 nedenfor. Verdier for  $RF_{min}$  avhenger av muggfølsomhetsklassen til materialet. Se tabell A.0.3.

Temperatur [ $^{\circ}C$ ]	Kritisk relativ fuktighet $RF_{crit}$ [%]
$T < 0$	Antas ingen vekst
$0 \leq T \leq 20$	$-0,00267 \cdot T^3 + 0,160 \cdot T^2 - 3,13 \cdot T + 100,0$
$20 < T \leq 50$	$RF_{min}$
$50 < T$	Antas ingen vekst

**Tabell A.0.1:** Beskrivelse av kritisk RF-nivå for muggvekst  $RF_{crit}$  i forhold til temperaturnivå

Maksimal muggindeks på materialoverflaten bestemmes ut fra formelen nedenfor. Her vil verdier for A, B og C være avhengig av muggfølsomhetsklassen til materialet. Se tabell A.0.3.

$$MI_{max} = A + B \cdot \frac{RF_{crit} - RF}{RF_{crit} - 100} - C \cdot \left( \frac{RF_{crit} - RF}{RF_{crit} - 100} \right)^2 \quad (\text{A.0.1})$$

Hvor:

$MI_{max}$  = Maksimal muggindeks [-]

A, B og C = Koeffisienter som avhenger av muggfølsomhetsklassen til materiale

$RF_{crit}$  = Kritisk RF-nivå for muggvekst [%]

RF = Relativ fuktighet [%]



Modellen operer med muggvekst ved gunstige og ugunstige forhold:.

Ved gunstige forhold, hvor  $RF \geq RF_{crit}$ , kan muggveksthastigheten regnes ut ved formelen nedenfor. For andre materialer enn trevirke vil verdien for overflatekvalitet SQ og treslag W settes lik 0. Verdier for  $k_1$  bestemmes ut fra muggfølsomhetsklassen til materialet. Se tabell A.0.3 nedenfor.

$$\frac{dMI}{dt} = \frac{k_1 \cdot k_2}{7 \cdot e^{(-0,68 \cdot \ln(T) - 13,9 \cdot \ln(RF) + 0,14 \cdot W - 0,33 \cdot SQ + 66,02)}} \quad (A.0.2)$$

Hvor:

$\frac{dMI}{dt}$  = Muggveksthastighet [-]

$MI$  = Muggindeks [-]

$k_1$  og  $k_2$  = Muggvekstkoeffisienter [-]

$T$  = Temperatur [ $^{\circ}C$ ]

$RF$  = Relativ fuktighet [%]

$W$  = Treslag (0 = furu og 1 = gran) [-]

$SQ$  = Overflatekvalitet (0 = nysagd og 1 = ovnstørket) [-]

Her kan  $k_2$  regnes ut ved følgende formel:

$$k_2 = \max[1 - e^{2,3 \cdot (MI - MI_{max})}, 0] \quad (A.0.3)$$

Hvor:

$MI$  = Muggindeks [-]

$MI_{max}$  = Maksimal muggindeks [-]

Ved ugunstige forhold, hvor  $RF < RF_{crit}$ , kan reduksjonen i muggveksthastigheten regnes ut ved formelene nedenfor. Her vil formel A.0.4 gjelde for trematerialer, mens formel A.0.5 gjelder for andre materialer enn trevirke.

$$\left(\frac{dMI}{dt}\right)_0 = \begin{cases} -0,032 & \text{når } t - t_1 \leq 6h \\ 0 & \text{når } 6 < t - t_1 \leq 24h \\ -0,016 & \text{når } t - t_1 > 24h \end{cases} \quad (A.0.4)$$

Hvor:

$\left(\frac{dMI}{dt}\right)_0$  = Reduksjon muggveksthastighet trematerialer [-]

$t$  = Tid fra  $t_1$  i [h]

$t_1$  = Tid når forholdene på den kritiske overflaten endrer seg fra gunstige vekstforhold til ugunstige vekstforhold i [h]

$$\left(\frac{dMI}{dt}\right)_{mat} = C_{mat} \cdot \left(\frac{dMI}{dt}\right)_0 \quad (\text{A.0.5})$$

Hvor:

$\left(\frac{dMI}{dt}\right)_{mat}$  = Reduksjon muggveksthastighet andre materialer [–]

$\left(\frac{dMI}{dt}\right)_0$  = Reduksjon muggveksthastighet trematerialer [–]

$C_{mat}$  = Reduksjonsfaktor [–]

$C_{mat}$  vil ha følgende verdier ut fra reduksjonen til materialet: omtrent ingen reduksjon = 0,1, relativt lav reduksjon = 0,25, betydelig reduksjon = 0,5 og 1,0 svært høy reduksjon.

I tabellene nedenfor er det gitt en beskrivelse av de ulike muggfølsomhetsklasene og parameterene for hver av disse.

Muggfølsomhetsklasse	Material
Veldig følsom	Ubehandlet trevirke, materialer med mye næring for biologisk vekst
Følsom	Høvlet tre, papirbelagte produkter, trebaserte plater
Medium motstandsdyktig	Sement- og plastbaserte materialer, mineralfibre
Motstandsdyktig	Glass- og metallprodukter, materialer med beskyttelsessjikt

**Tabell A.0.2:** Beskrivelse av muggfølsomshetsklasser i WUFI Mould Index VTT

Muggfølsomhetsklasse	$k_1$		$k_2 (MI_{max})$			$RF_{min}$ [%]
	MI < 1	MI ≥ 1	A	B	C	
Veldig følsom	1	2	1	7	2	80
Følsom	0,578	0,386	0,3	6	1	80
Medium motstandsdyktig	0,072	0,097	0	5	1,5	85
Motstandsdyktig	0,033	0,014	0	3	1	85

**Tabell A.0.3:** Muggfølsomhetsklasser og deres innvirkning på parametere

---

# Vedlegg B

## U-verdi beregninger

Varmegjennomgangskoeffisienten  $U$  til takkonstruksjonen er beregnet etter NS-EN ISO 6946 (Standard Norge 2017). Følgende formler er benyttet i beregningen:

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (\text{B.0.1})$$

$$R_{tot} = \sum R_i \quad (\text{B.0.2})$$

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (\text{B.0.3})$$

Hvor:

$R_i$  = Varmemotstand til hvert enkelt sjikt [ $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ ]

$d_i$  = Tykkelse til hvert enkelt sjikt [ $m$ ]

$\lambda_i$  = Termisk konduktivitet til hvert enkelt sjikt [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]

$R_{tot}$  = Summen av alle sjiktene varmemotstand [ $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ ]

$U$  = Varmegjennomgangskoeffisienten til takkonstruksjonen [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]

Byggforskserien (2018c) gir at varmeisolasjon brukt til kompakte tak normalt har en termisk konduktivitet mellom 0,032 - 0,040  $\frac{W}{m \cdot K}$ . Tabellen på neste side presenterer verdier for termisk konduktivitet  $\lambda$  og varmemotstand  $R$  til de ulike materialsjiktene.

Sjikt	$\lambda \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$	$R \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$	Referanse
Utvendig overgangsmotstand $R_{se}$	-	0,04	(Standard Norge 2017)
PVC og asfalt takbelegg	-	0,03	(Byggforskserien 2003a)
Mineralull og EPS	0,038	6,58 <sup>[1]</sup>	(Byggforskserien 2003a)
Dampsperrer	-	0,03	(Byggforskserien 2003a)
Massivtreelement	0,12	1,67 (1,33) <sup>[2]</sup>	(Standard Norge 2010)
Innvendig overgangsmotstand $R_{si}$	-	0,10	(Standard Norge 2017)
$R_{tot}$		8,45 (8,11) <sup>[2]</sup>	

<sup>[1]</sup> Verdier er gjeldende for isolasjonstykkelser lik 250 mm

<sup>[2]</sup> Verdier er gitt for følgende massivtreelement tykkelser: 200 mm (160 mm)

**Tabell B.0.1:** Materialdata til U-verdi beregninger av takkonstruksjonen

Ser av tabell B.0.1 ovenfor at samlet varmemotstand  $R_{tot}$  for massivtreelement tykkelse lik 200 mm er  $8,45 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ , mens det for elementtykkelse lik 160 mm er  $8,11 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ . Dette vil i følge formel B.0.3 gi U-verdier lik  $0,118 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  og  $0,123 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ .

Byggteknisk Forskrift (TEK17) gir at kravet til U-verdi for tak i henhold til energitiltaksmetoden vil være  $\leq 0,13 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  (Direktoratet for byggkvalitet 2020b). Takkonstruksjonen med begge massivtreelement tykkelser vil derfor oppfylle kravet gitt i TEK17.

---

## Vedlegg C

# Fuktmålingsoversikt massivtredekker ZEB-laboratoriet

I prosjektoppgaven ble det utført fuktmålinger i massivtre dekkekonstruksjonene på ZEB-laboratoriet på Gløshaugen i Trondheim høsten 2019, over en periode hvor bygningen gradvis ble lukket (tett fasade og tak). Dekkekonstruksjonene besto av krysslimte massivtre-elementer av gran og målingene ble tatt i overflaten og 3 cm dybde i hvert hjørne av dekkekonstruksjonene, ca. 1 meter fra hver dekkekant. Fuktmålingsapparatet som ble brukt var et håndholdt FME moisture meter koblet til en hammerelektrode med to målepigger. Se prosjektoppgaven for ytterligere informasjon og beskrivelser rundt fuktmålingene m.m.

Tabellen på neste side er hentet fra prosjektoppgaven og viser en oversikt over fuktmålingene som ble utført i dekkekonstruksjonene på ZEB-laboratoriet. Fukttinnholdsverdiene er her oppgitt i vekt-%.

Dekker									
Måling	Etasje	Dybde	Trefuktighet [vekt %]						
			13.09.2019	20.09.2019	04.10.2019	16.10.2019	23.10.2019	31.10.2019	11.11.2019
D1	2	Overflate	16,1	24,4	18	16,3	15,8	16,7	
		3 cm	12	17,9	17,2	18,4	17,7	16,8	
D2	2	Overflate	42	54	20,8	17,6	16,3	14,1	
		3 cm	15,1	19,7	19,7	20,4	19,5	18,9	
D3	2	Overflate	46	51	19,2	16,7	16,4	16,2	
		3 cm	22,6	24	21,4	18	18,6	18,2	
D4	2	Overflate	30	38	17,9	16,7	16,8	44	
		3 cm	14,6	15,4	19,9	20,1	19,2	20,4	
D5	3	Overflate	38	46	18,6	16,8	15,7	16,1	14,8
		3 cm	15,2	18,6	22,5	19,9	18,1	17,1	17,3
D6	3	Overflate	36	52	20,2	16,8	16,8	16,6	15,1
		3 cm	15,3	17	21,4	19,8	19,8	17,8	17,7
D7	3	Overflate	36,5	47	18,7	17,5	16,5	16,7	15,4
		3 cm	20	17,6	19,6	19,8	18,4	18,1	16,9
D8	3	Overflate	21,1	39	19,2	17,2	15,8	15,9	14,8
		3 cm	13,5	17	16,7	19	18,4	16,8	16,7
D9	4	Overflate	36,5	34	20,3	17	13,6	13,1	
		3 cm	15,2	17,2	15,4	16,8	15,3	13,3	
D10	4	Overflate	42,5	46	22,1	17,4	16,4	14,9	
		3 cm	26,1	26,5	26	18,7	21	18,4	
D11	4	Overflate	35	41,5	19,1	17,6	15,2	14,7	
		3 cm	15,2	16,2	19,2	19	18,1	17,1	
D12	4	Overflate	37,5	47	20,2	17,2	15,5	14,4	
		3 cm	23,8	16,9	17,7	16,8	21,4	14,1	

Figur C.0.1: Fuktmålingsoversikt massivtredekker ZEB-laboratoriet

---

# Vedlegg D

## Grafer for kontroll av massivtreelement

### D.1 Beregningstilfeller tilleggsstudie

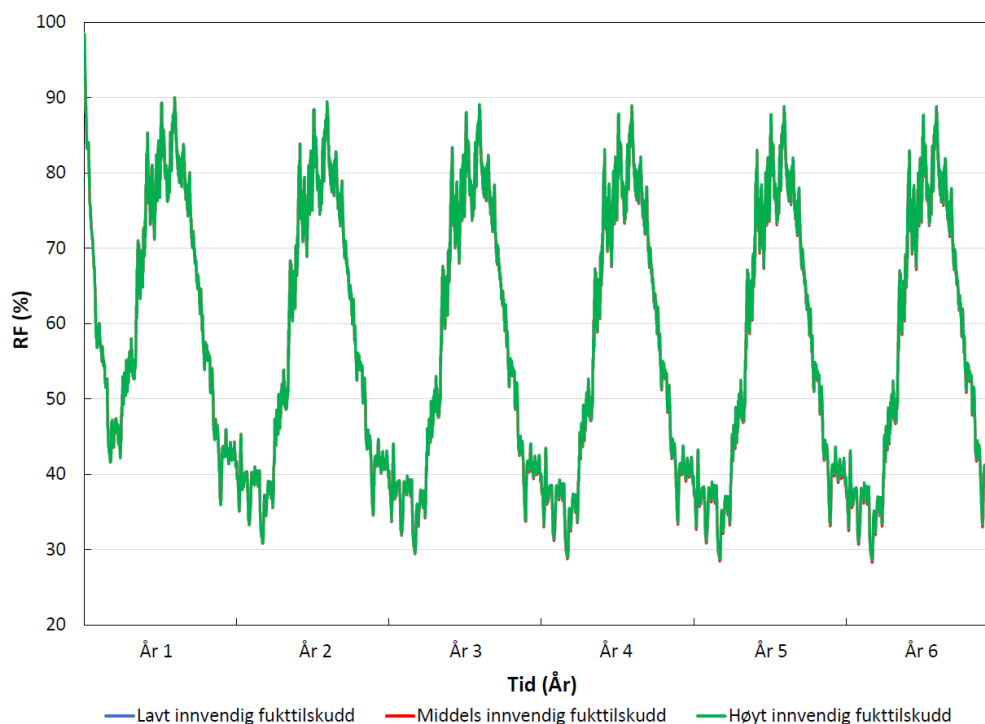
I dette kapitlet presenteres grafer for variasjonen i RF og muggindeks for ytterste mm av massivtreelementet for noen beregningstilfeller i tilleggsstudie. Følgende grafer presenteres:

- Variasjon i RF for ytterste mm av massivtreelement
  - Beregningstilfelle 13 og 15
- Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement
  - Beregningstilfelle 11 - 18

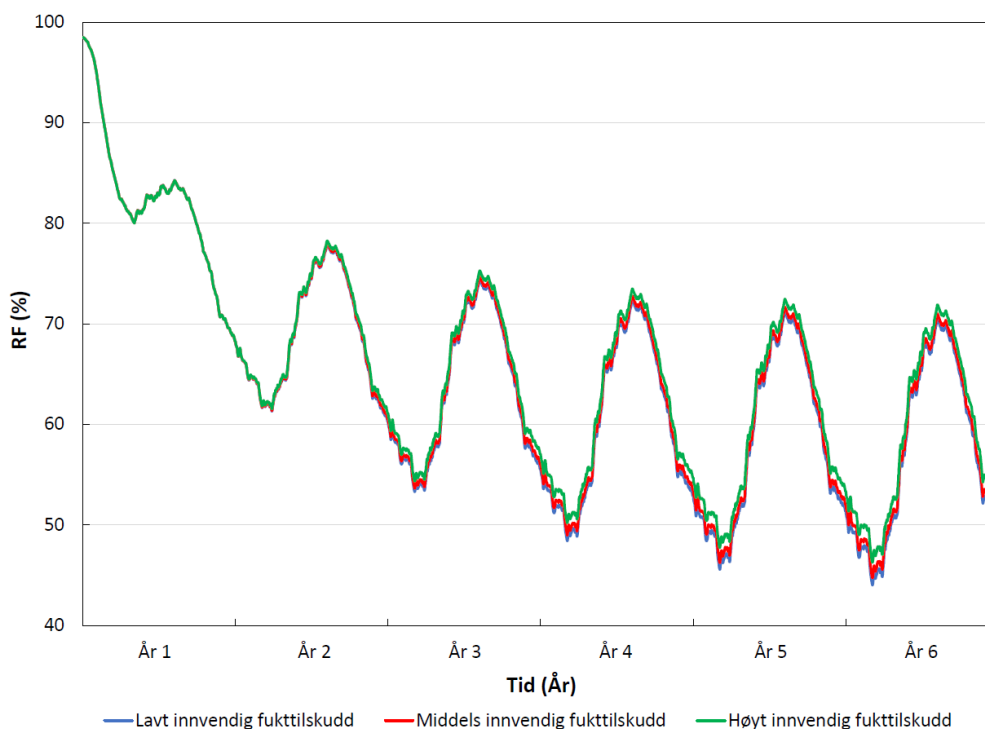
Fargekoder brukt i figurene blir enten beskrevet i selve figuren, figurteksten eller over figuren.

## D.1.1 Variasjon i RF for ytterste mm av massivtreelement

## Beregningstilfelle 13 - Effekt av innvendig fukttilskudd



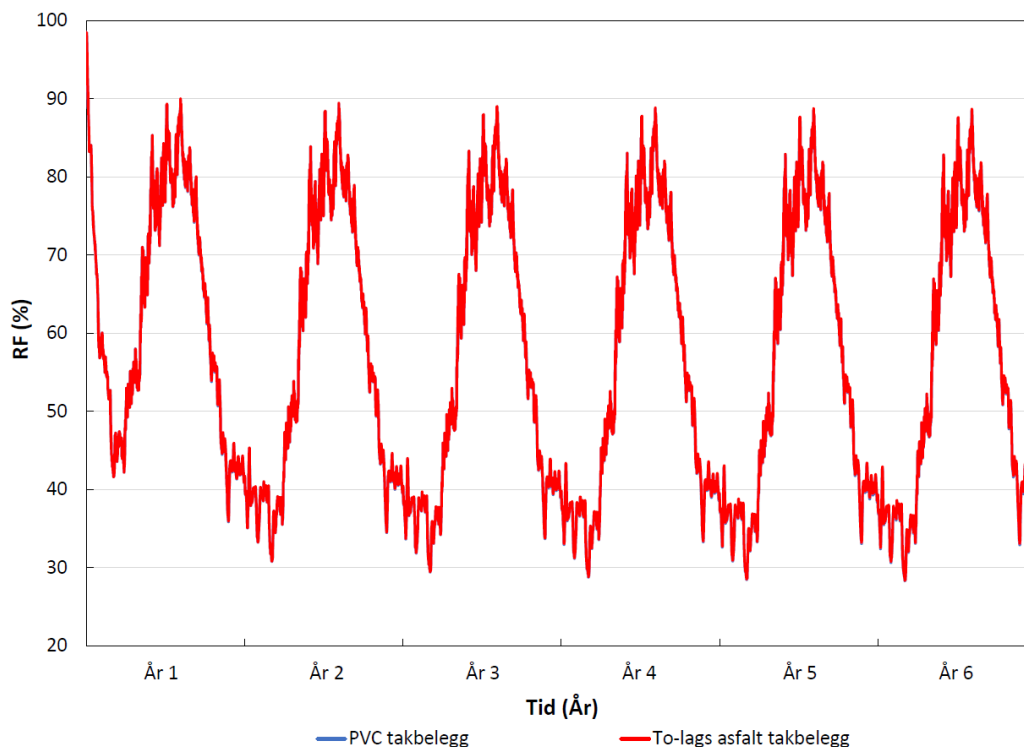
**Figur D.1.1:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av innvendig fukttilskudd. Beregningstilfelle 13 (blå og grønn). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (rød). Dampsperre = Ingen dampsperre.



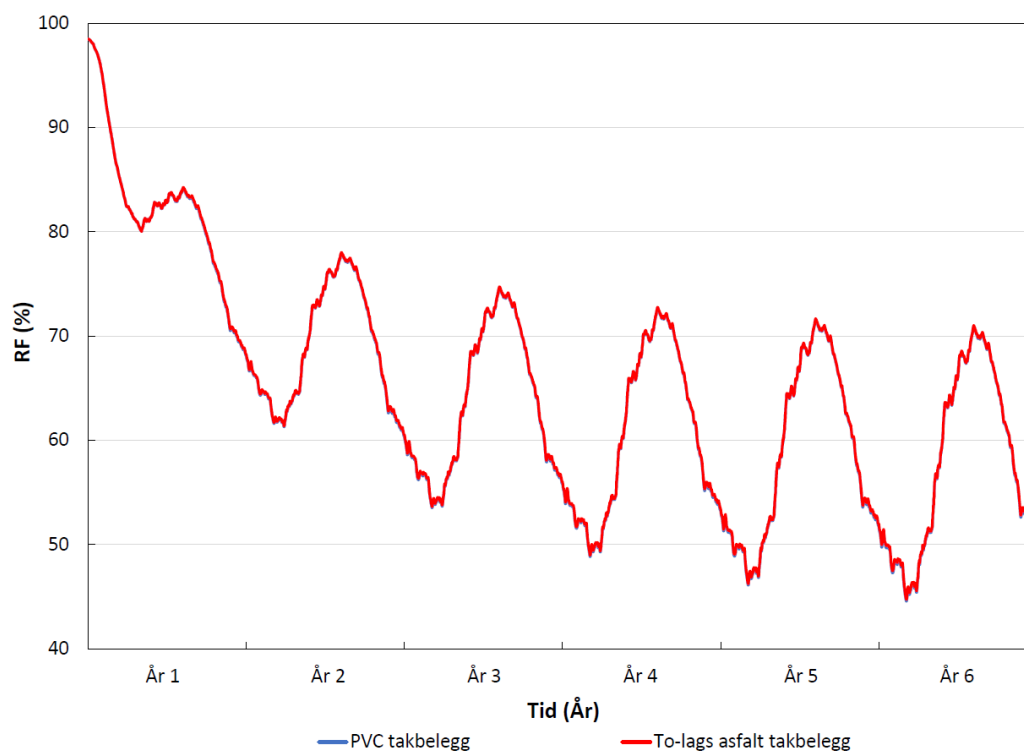
**Figur D.1.2:** RF ytterste mm av massivtreelement. Effekt av innvendig fukttilskudd. Beregningstilfelle 13 (blå og grønn). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (rød). Dampsperre = Dampbrems.



## Beregningstilfelle 15 - Effekt av taktekning



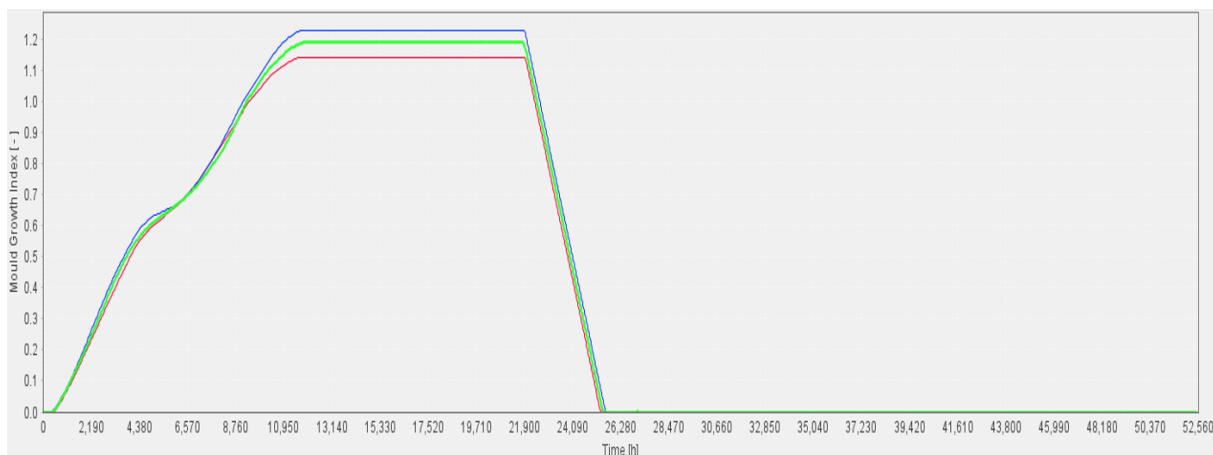
**Figur D.1.3:** RF ytterste mm av massivtrelement. Effekt av taktekning. Beregningstilfelle 15 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (rød). Dampspærre = Ingen dampspærre.



**Figur D.1.4:** RF ytterste mm av massivtrelement. Effekt av taktekning. Beregningstilfelle 15 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (rød). Dampspærre = Dampbrems.

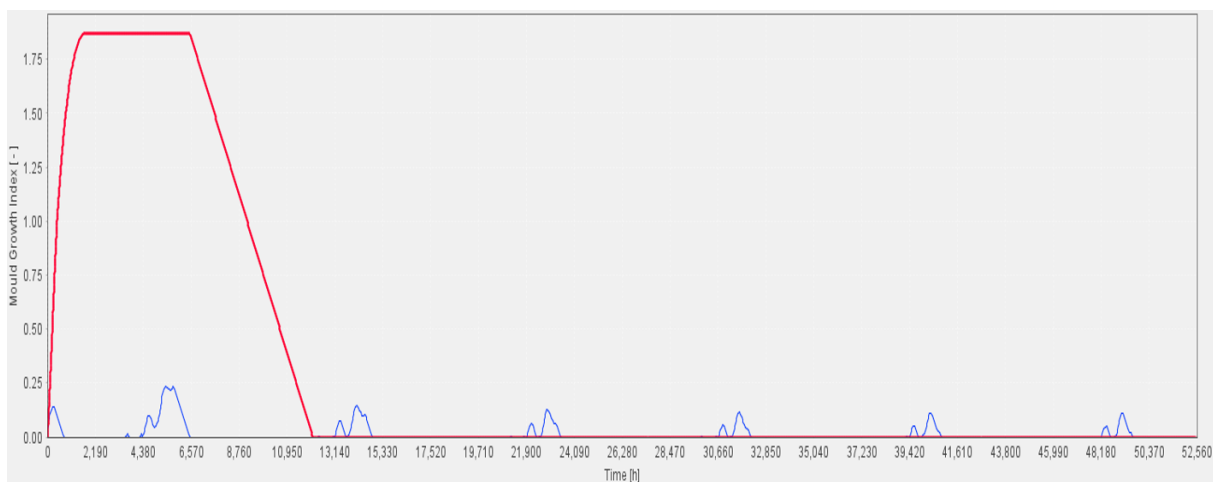
## D.1.2 Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement

### Beregningstilfelle 11 - Videreføringstilfelle fra hovedstudie



**Figur D.1.5:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 11. Blå = Oslo. Rød = Bergen. Grønn = Kristiansand.

### Beregningstilfelle 12 - Effekt av strålingsabsorpsjonstall

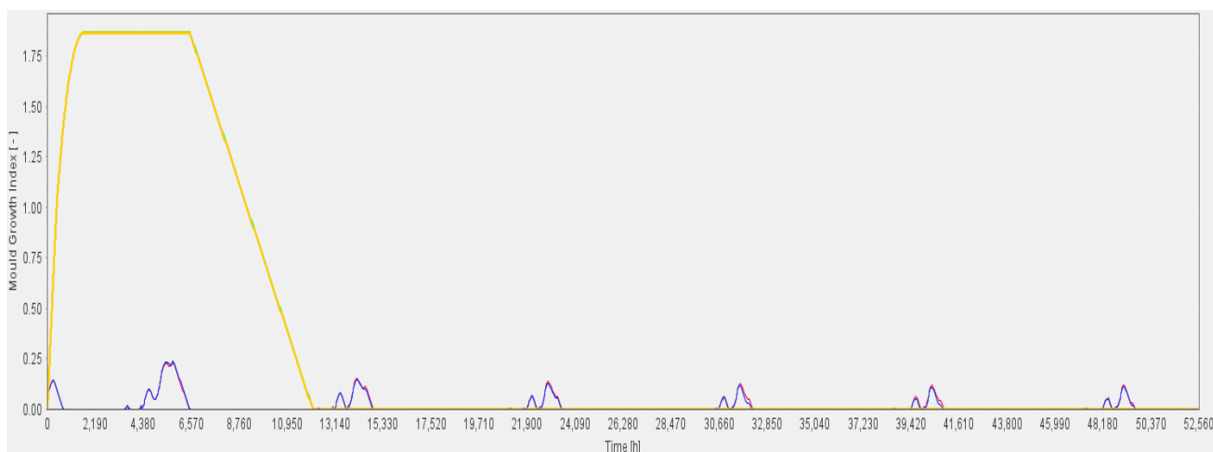


**Figur D.1.6:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 12. Blå = Ingen dampsperre. Rød = Dampbrems.

### Beregningstilfelle 13 - Effekt av innvendig fukttilskudd

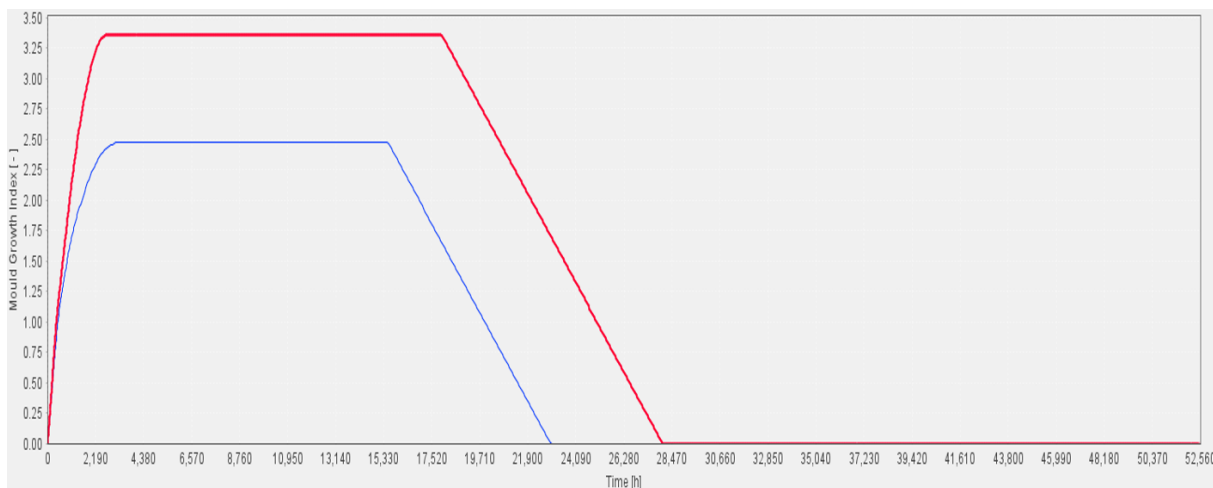
Forklaring til figur D.1.7 nedenfor.

- Blå = Ingen dampsperre, Lavt innvendig fukttilskudd
- Rød = Ingen dampsperre, Høyt innvendig fukttilskudd
- Grønn = Dampbrems, Lavt innvendig fukttilskudd
- Gul = Dampbrems, Høyt innvendig fukttilskudd



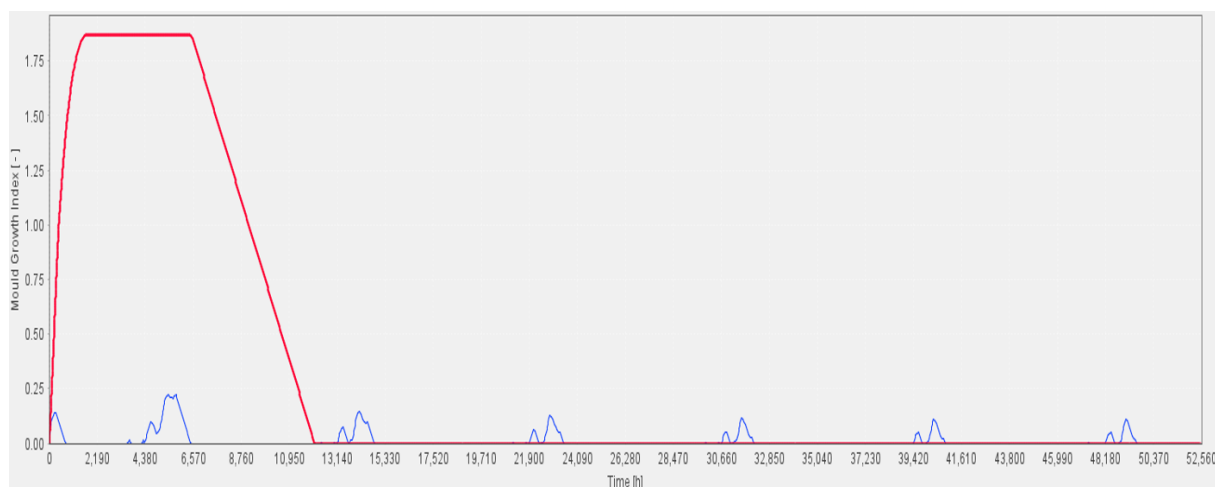
Figur D.1.7: Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 13.

### Beregningstilfelle 14 - Effekt av isolasjonstype



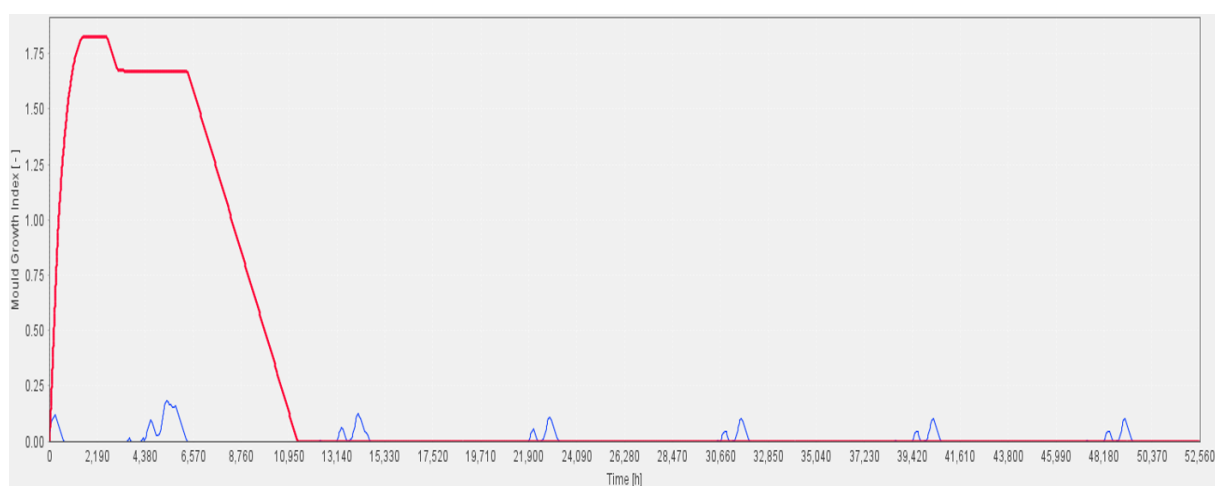
Figur D.1.8: Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 14. Blå = Ingen dampsperre. Rød = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 15 - Effekt av takteking



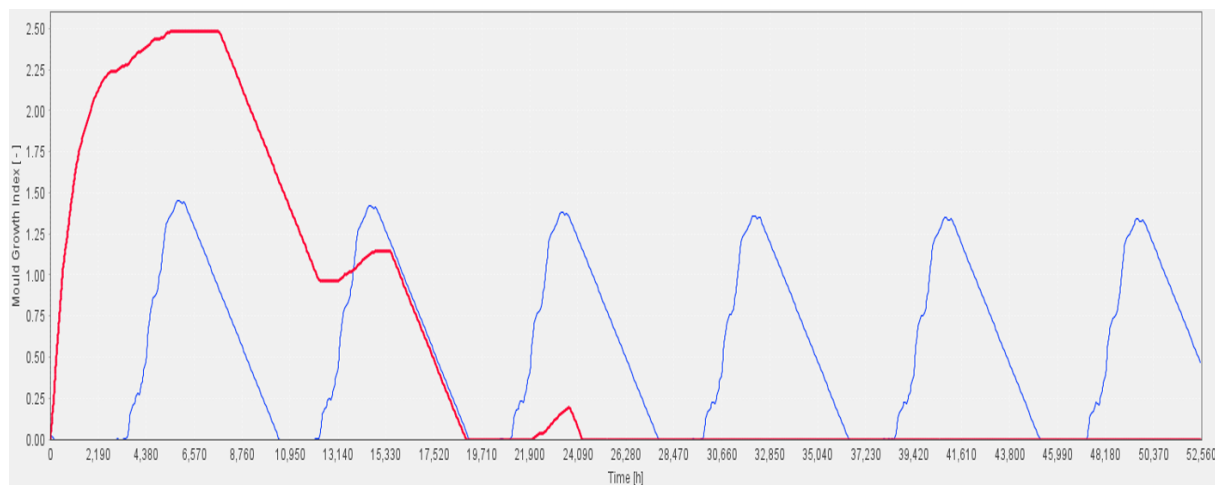
**Figur D.1.9:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 15. Blå = Ingen dampsperre. Rød = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 16 - Effekt av massivtreeykkelse



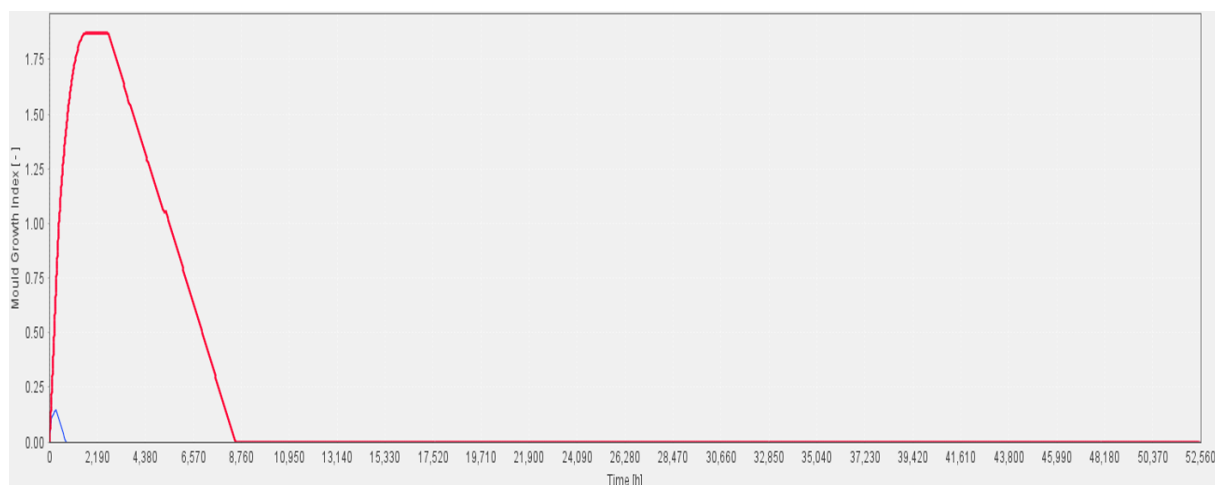
**Figur D.1.10:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 16. Blå = Ingen dampsperre. Rød = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 17 - Effekt av isolasjonstykkelse



**Figur D.1.11:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 17. Blå = Ingen dampspærre. Rød = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 18 - Effekt av skygge



**Figur D.1.12:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av massivtreelement. Beregningstilfelle 18. Blå = Ingen dampspærre. Rød = Dampbrems.

---

# Vedlegg E

## Grafer for kontroll av mineralull

### E.1 Beregningstilfeller hovedstudie

I dette kapittelet presenteres grafer for variasjonen i RF og muggindeks for ytterste mm av mineralullen for beregningstilfeller i hovedstudie. Følgende grafer presenteres:

- Variasjon i RF for ytterste mm av mineralullen
  - Beregningstilfelle 1 - 10 (for beregningstilfelle 5 - 10 er det kun presentert for varianter med PE-folie)
- Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralullen
  - Beregningstilfelle 1 - 10

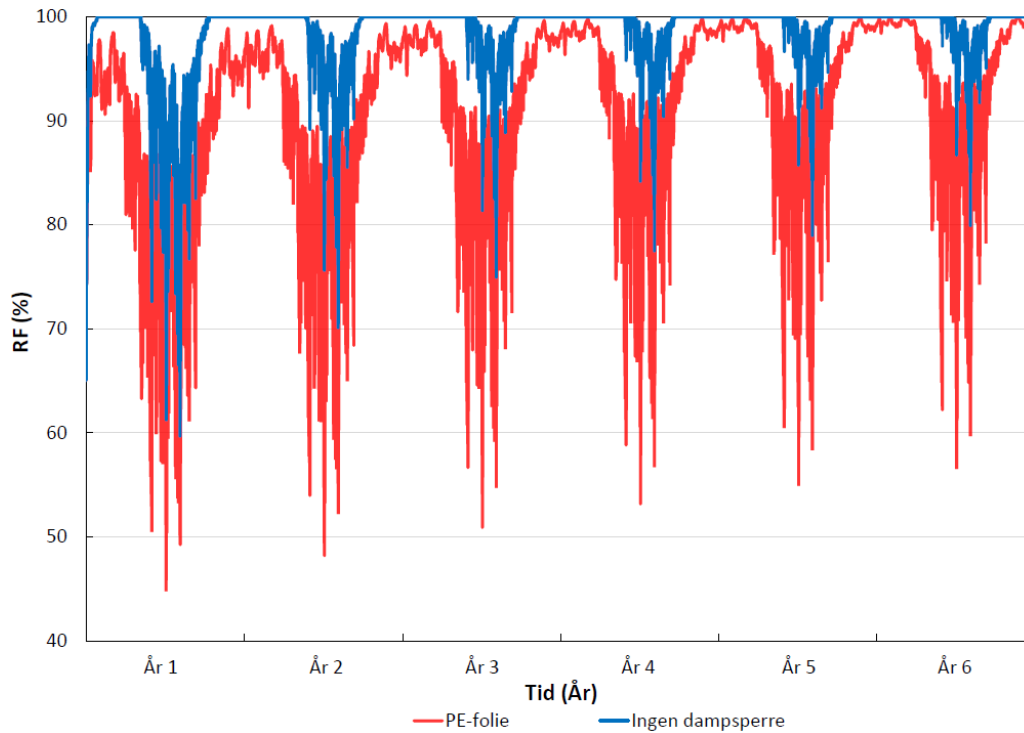
For å enklere kunne vise forskjellene i RF-nivå mellom beregningsvariantene ble noen av figurene delt opp i to. Hvilke figurer som tilhører samme beregningstilfelle blir tydelig beskrevet.

Fargekoder brukt i figurene blir enten beskrevet i selve figuren eller figurteksten. For variasjonen i muggindeks for beregningstilfelle 5 - 10 er det brukt følgende fargekoder til grafene:

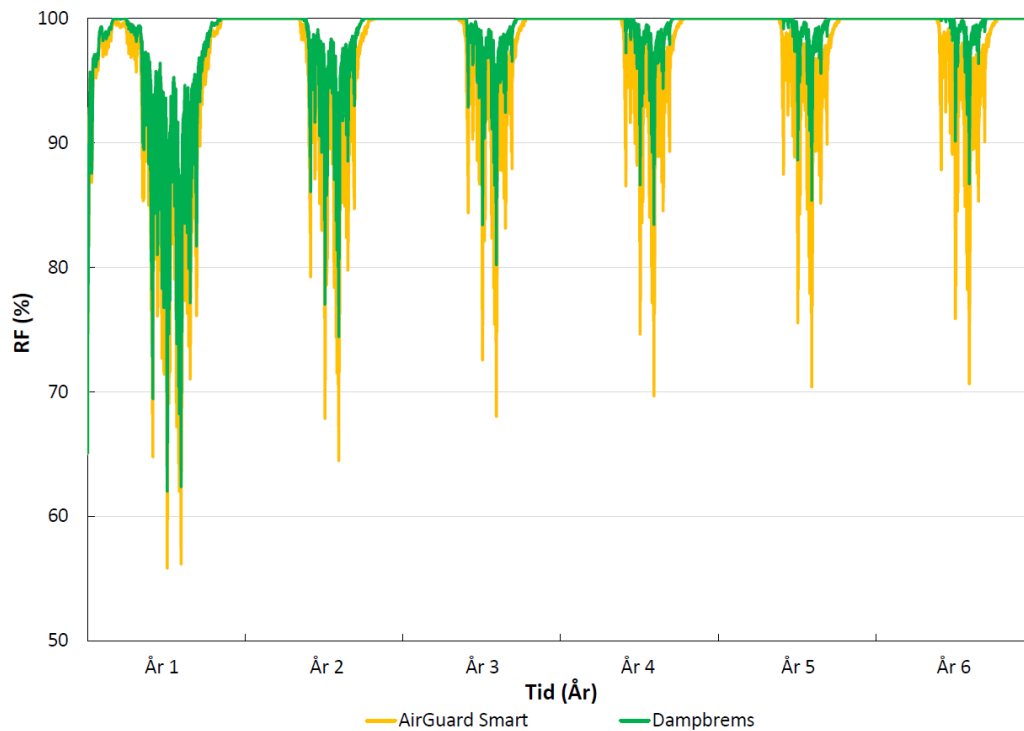
- Blå = Trondheim
- Rød = Oslo
- Grønn = Bergen
- Gul = Kristiansand
- Lilla = Mo i Rana
- Grå = Tromsø
- Svart = Karasjok

## E.1.1 Variasjon i RF for ytterste mm av mineralull

## Beregningstilfelle 1 - Lavt startfuktnivå

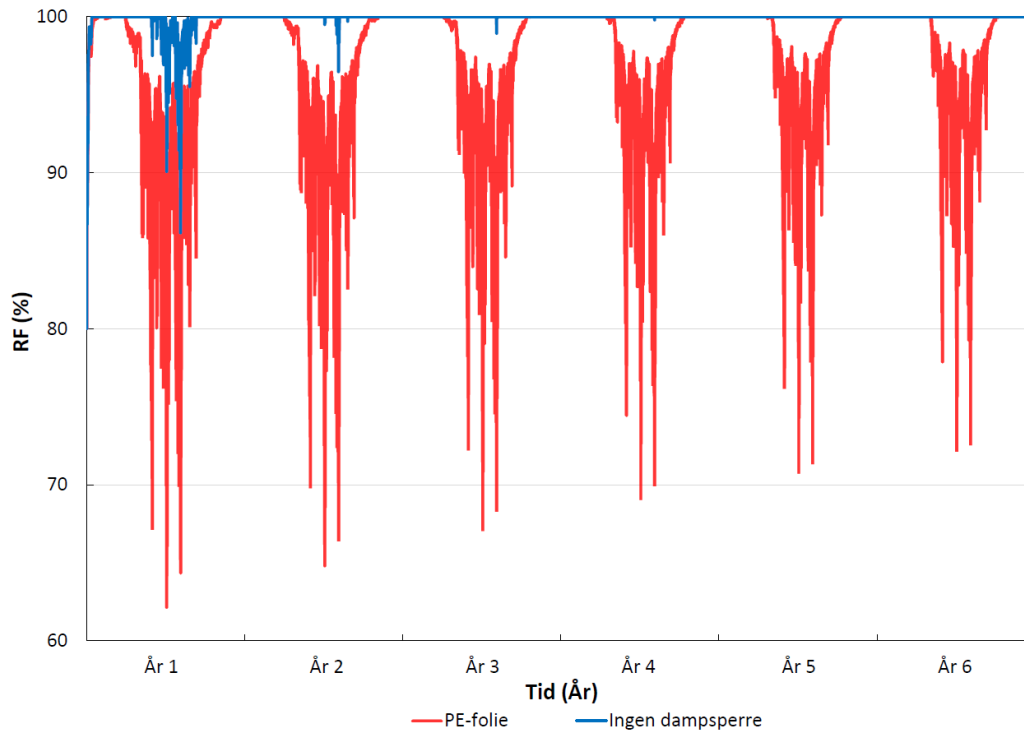


**Figur E.1.1:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av dampsperrsjikt. Beregningstilfelle 1. Startfuktnivå = Lavt.

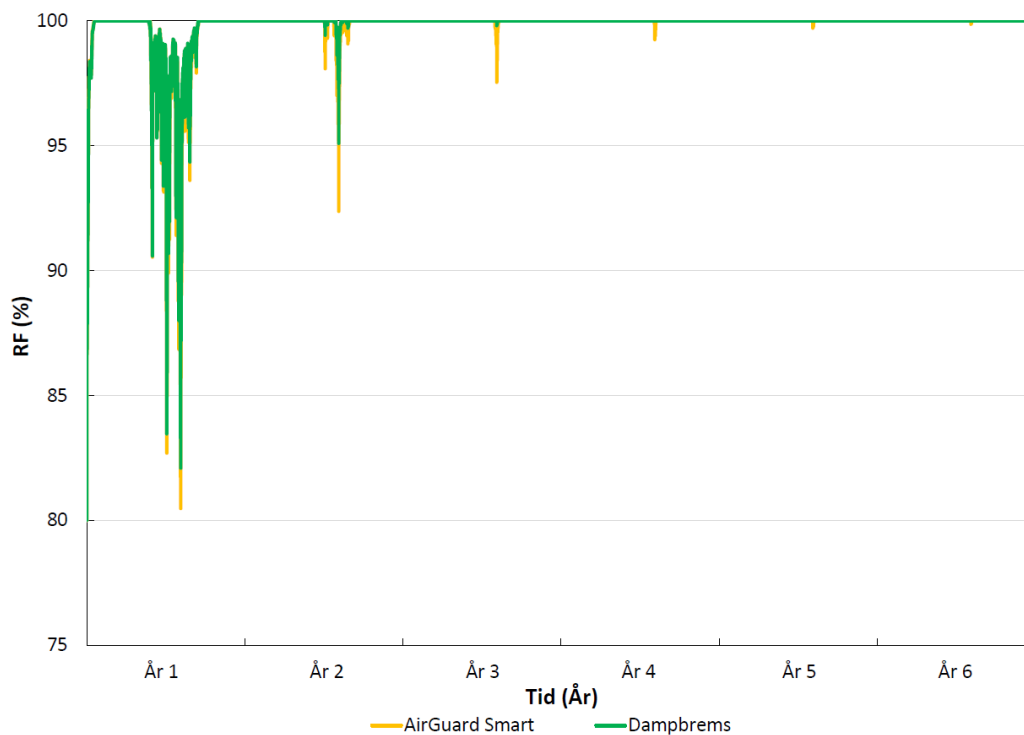


**Figur E.1.2:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av dampsperrsjikt. Beregningstilfelle 1. Startfuktnivå = Lavt.

## Beregningstilfelle 2 - Middels-lavt startfuktnivå



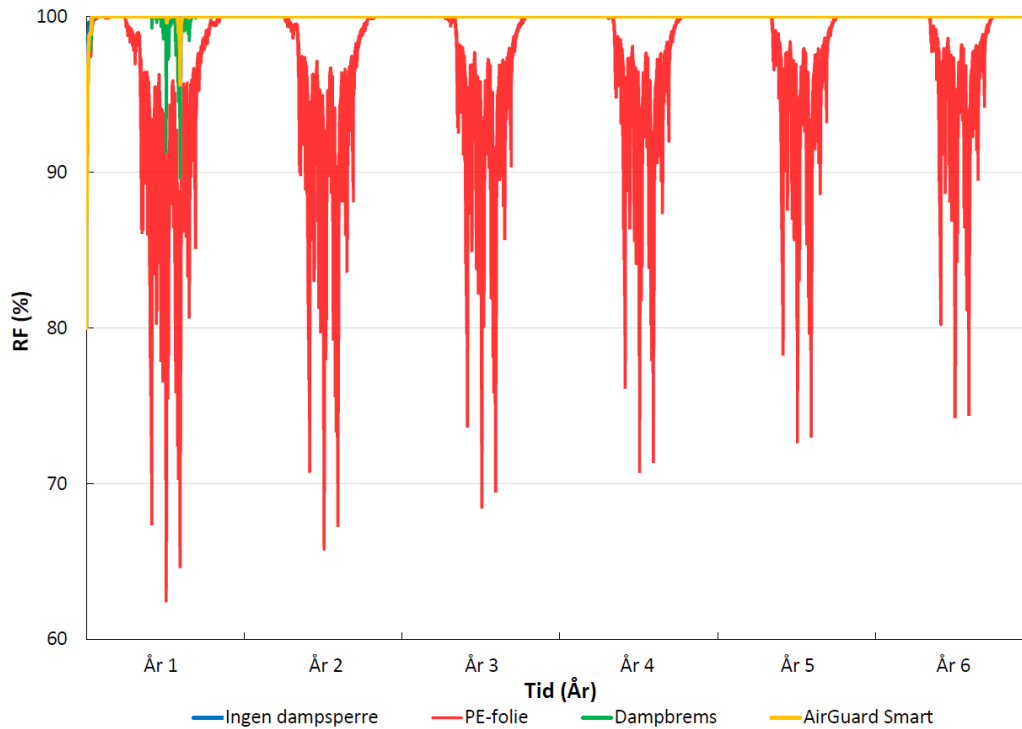
**Figur E.1.3:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av dampsperrsjikt. Beregningstilfelle 2. Startfuktnivå = Middels-lavt.



**Figur E.1.4:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av dampsperrsjikt. Beregningstilfelle 1. Startfuktnivå = Middels-lavt.

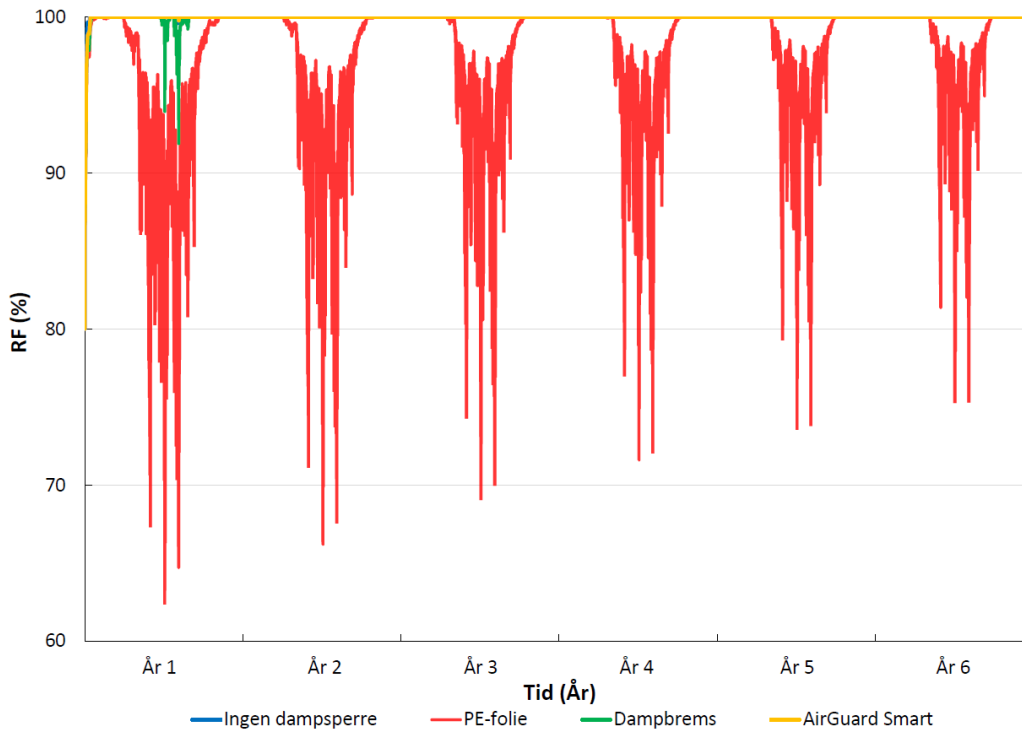


## Beregningstilfelle 3 - Middels-høyt startfuktnivå



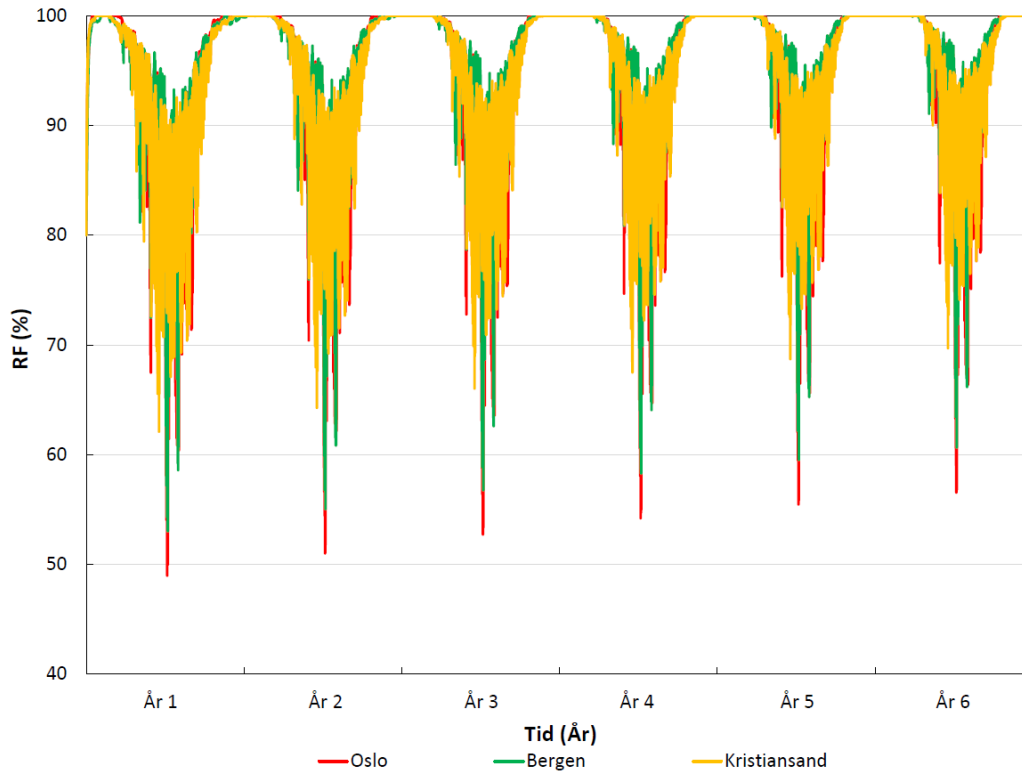
Figur E.1.5: RF ytterste mm av mineralull. Effekt av dampsperrsjikt. Beregningstilfelle 3. Startfuktnivå = Middels-høyt.

## Beregningstilfelle 4 - Høyt startfuktnivå

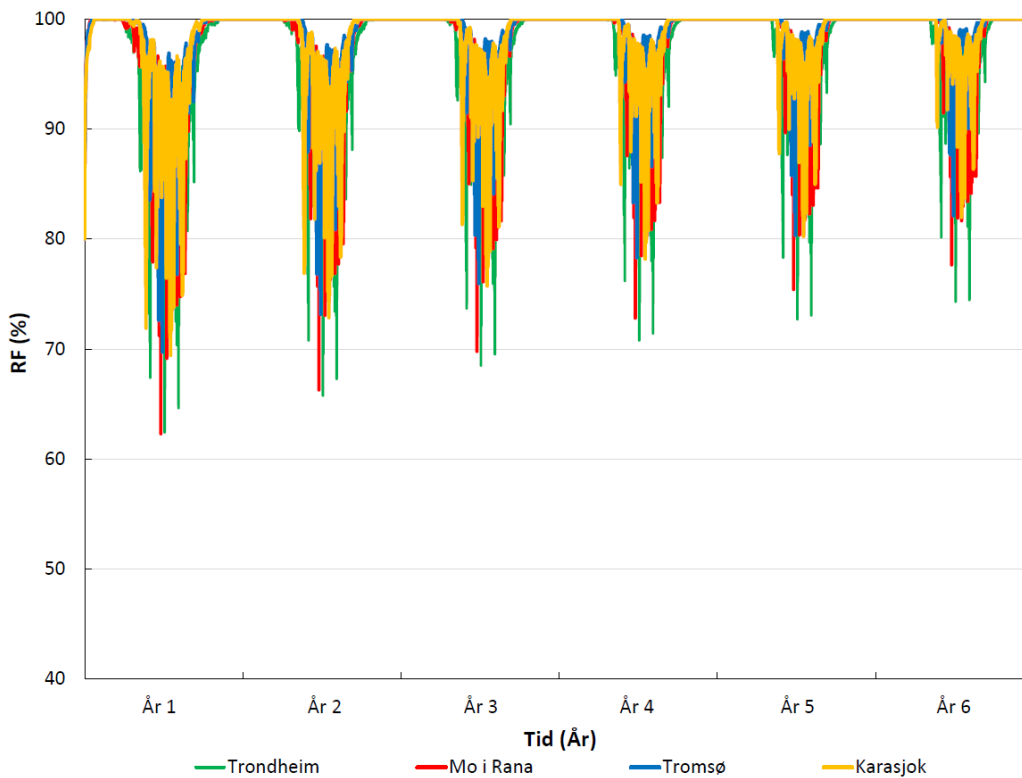


Figur E.1.6: RF ytterste mm av mineralull. Effekt av dampsperrsjikt. Beregningstilfelle 4. Startfuktnivå = Høyt.

## Beregningstilfelle 5 til 10 - PE-folie



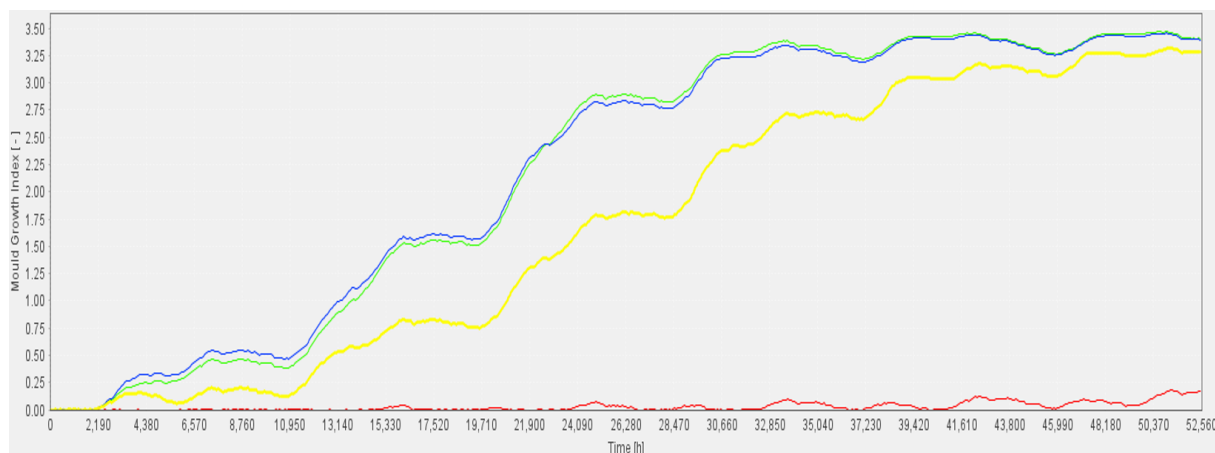
**Figur E.1.7:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av uteklima ved bruk av PE-folie. Beregningstilfelle 5 - 7. Startfuktnivå = Middels-høyt.



**Figur E.1.8:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av uteklima ved bruk av PE-folie. Beregningstilfelle 3, 8 - 10. Startfuktnivå = Middels-høyt.

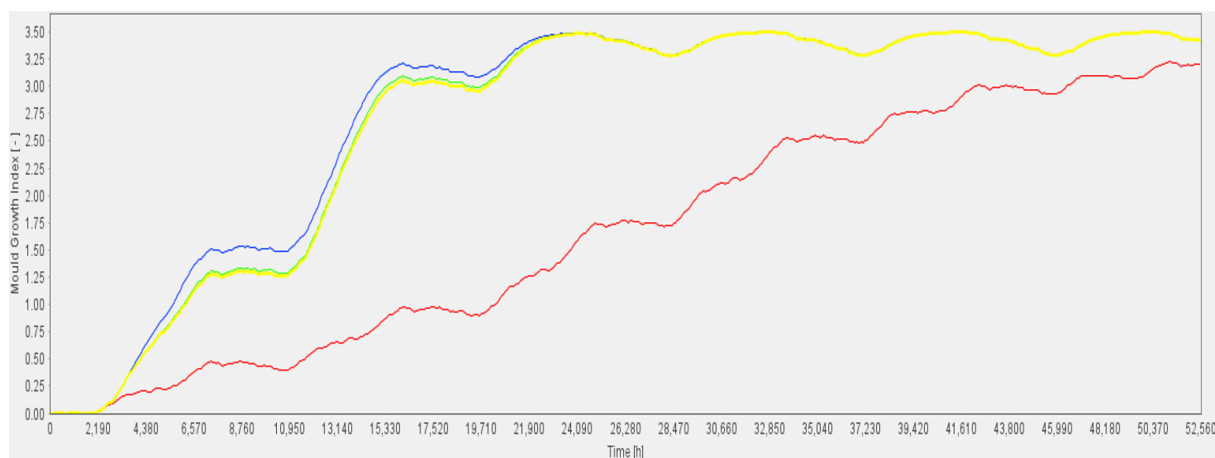
## E.1.2 Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull

## Beregningstilfelle 1 - Lavt startfuktnivå



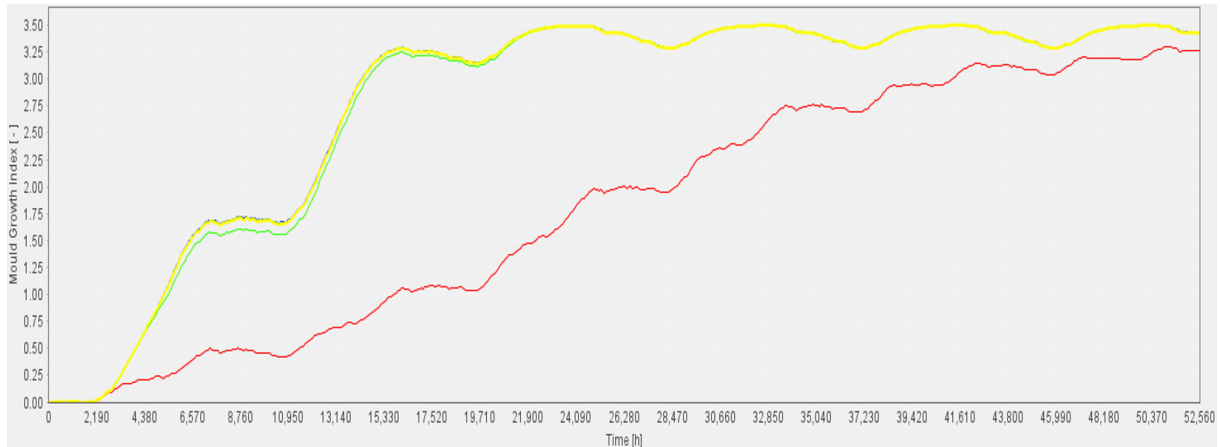
**Figur E.1.9:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 1. Startfuktnivå = Lavt. Blå = Ingen dampsperre. Rød = PE-folie. Grønn = Dampbrems. Gul = AirGuard Smart.

## Beregningstilfelle 2 - Middels-lavt startfuktnivå



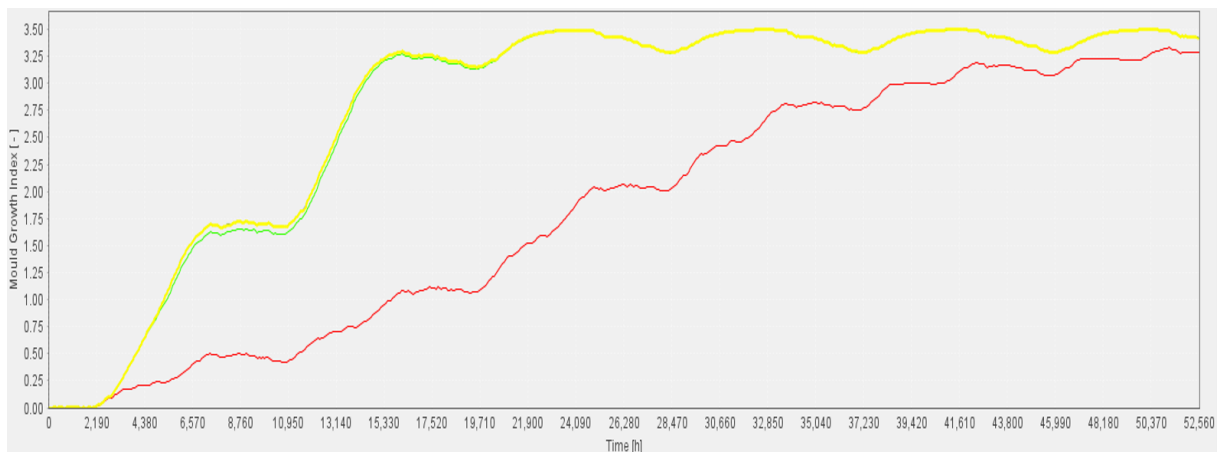
**Figur E.1.10:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 2. Startfuktnivå = Middels-lavt. Blå = Ingen dampsperre. Rød = PE-folie. Grønn = Dampbrems. Gul = AirGuard Smart.

## Beregningstilfelle 3 - Middels-høyt startfuktnivå



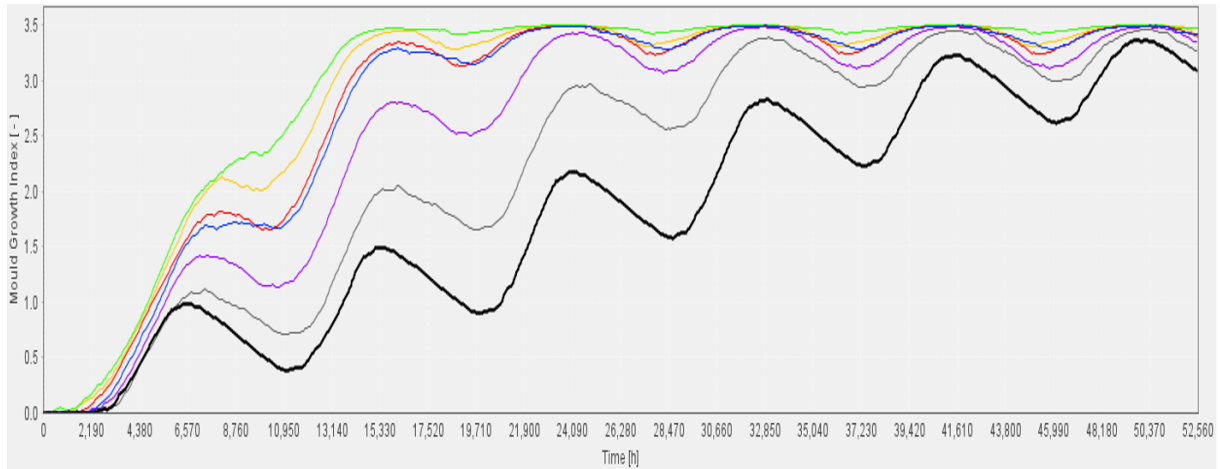
**Figur E.1.11:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 3. Startfuktnivå = Middels-høyt. Blå = Ingen dampspærre. Rød = PE-folie. Grønn = Dampbrems. Gul = AirGuard Smart.

## Beregningstilfelle 4 - Høyt startfuktnivå



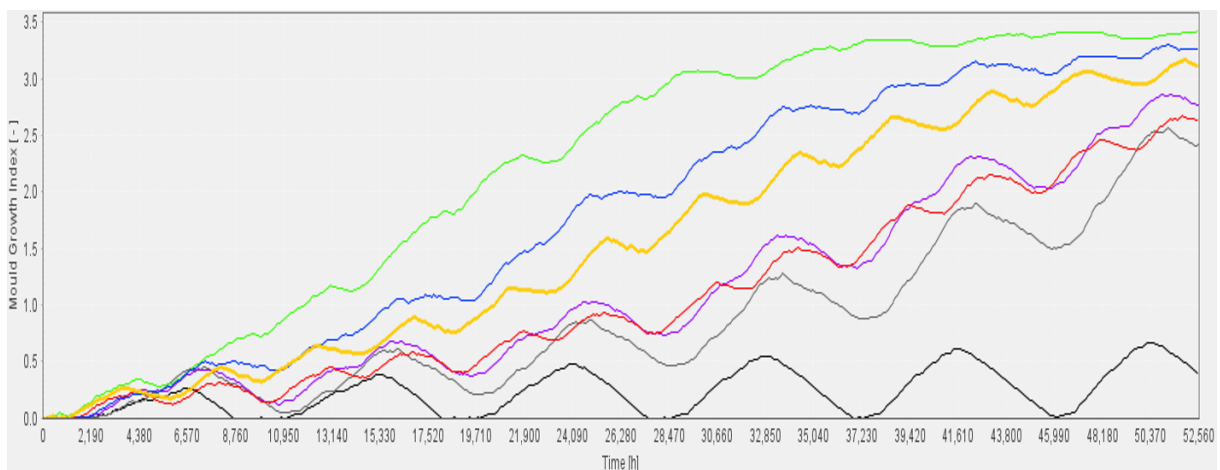
**Figur E.1.12:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 4. Startfuktnivå = Høyt. Blå = Ingen dampspærre. Rød = PE-folie. Grønn = Dampbrems. Gul = AirGuard Smart.

## Beregningstilfelle 5 til 10 - Ingen dampsperre



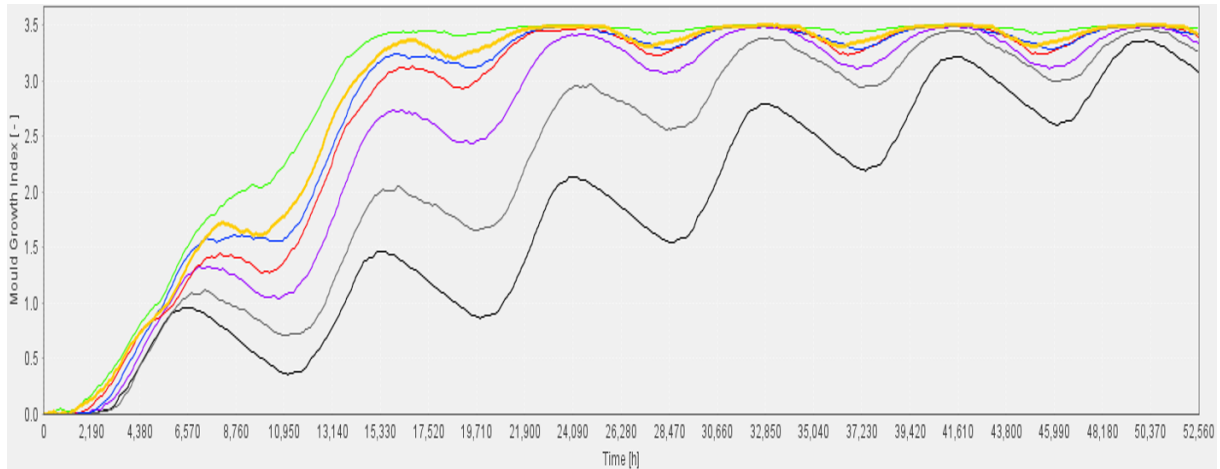
**Figur E.1.13:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Effekt av uteklima ved bruk av ingen dampsperre. Beregningstilfelle 3, 5 - 10. Startfuktnivå = Middels-høyt.

## Beregningstilfelle 5 til 10 - PE-folie



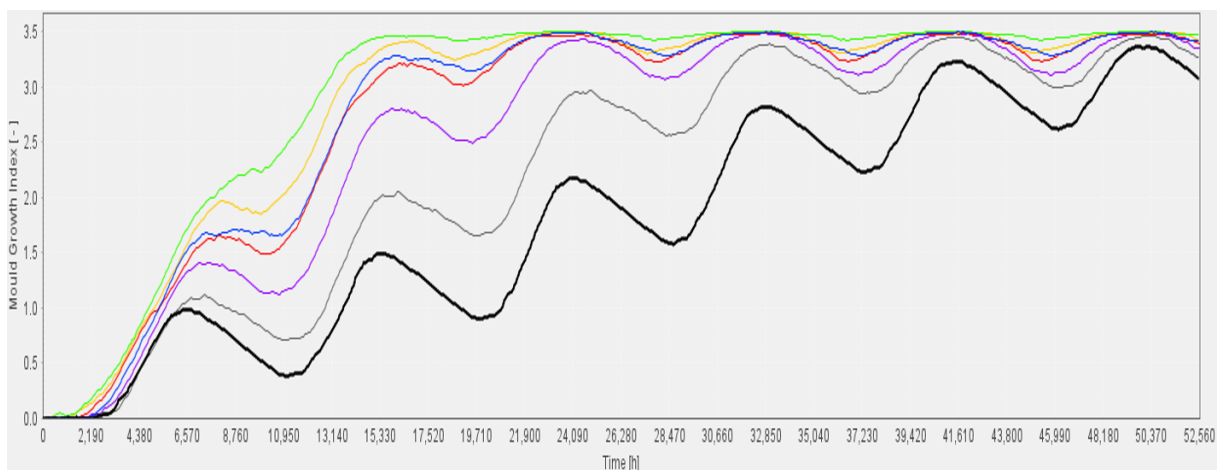
**Figur E.1.14:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Effekt av uteklima ved bruk av PE-folie. Beregningstilfelle 3, 5 - 10. Startfuktnivå = Middels-høyt.

Beregningstilfelle 5 til 10 - Dampbrems



**Figur E.1.15:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Effekt av uteklima ved bruk av dampbrems. Beregningstilfelle 3, 5 - 10. Startfuktnivå = Middels-høyt.

Beregningstilfelle 5 til 10 - AirGuard Smart



**Figur E.1.16:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Effekt av uteklima ved bruk av AirGuard Smart. Beregningstilfelle 3, 5 - 10. Startfuktnivå = Middels-høyt.

## E.2 Beregningstilfeller tilleggsstudie

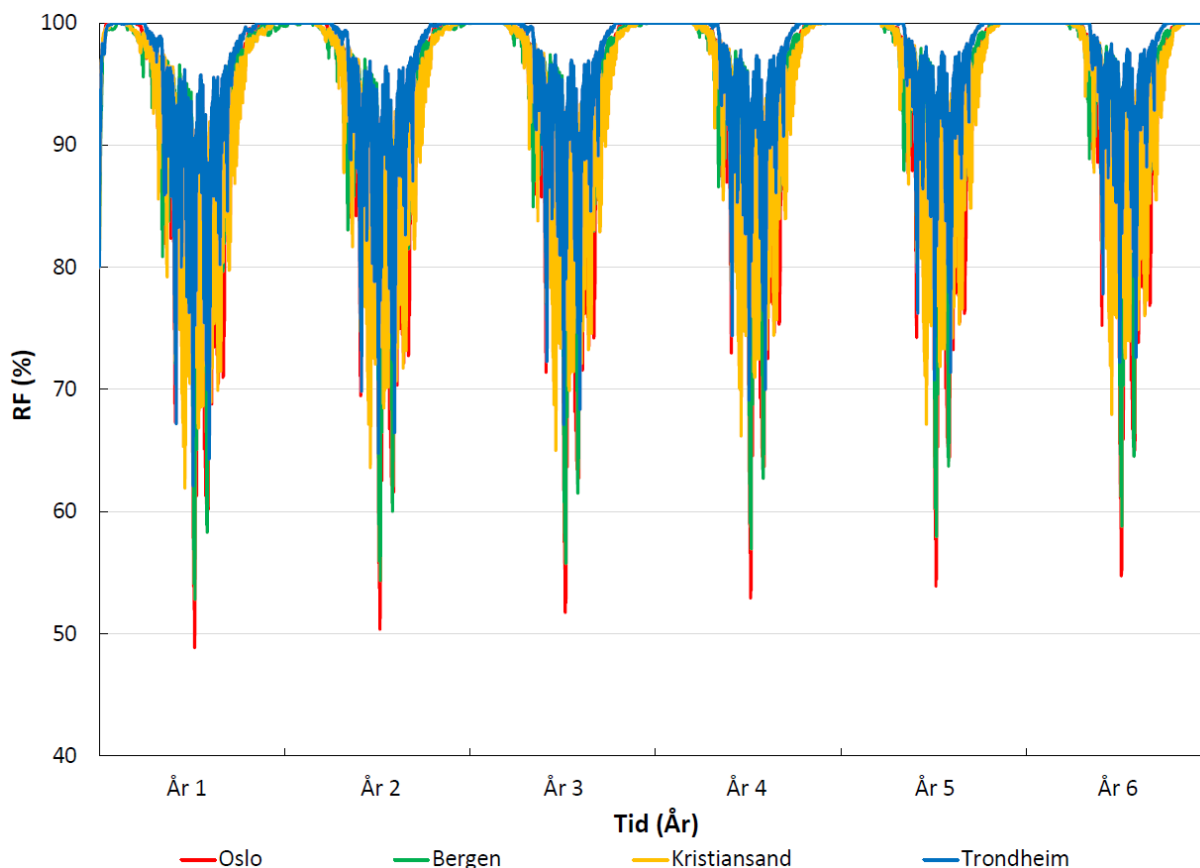
I dette kapittelet presenteres grafer for variasjonen i RF og muggindeks for ytterste mm av mineralullen for beregningstilfeller i tilleggsstudie. Følgende grafer presenteres:

- Variasjon i RF for ytterste mm av mineralullen
  - Beregningstilfelle 11 - 18
- Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralullen
  - Beregningstilfelle 11 - 18

Det er blitt eksperimentert med ulike farger for å bedre kunne vise forskjellene mellom de ulike beregningsvariantene. Fargekoder brukt i figurene blir enten beskrevet i selve figuren eller figurteksten.

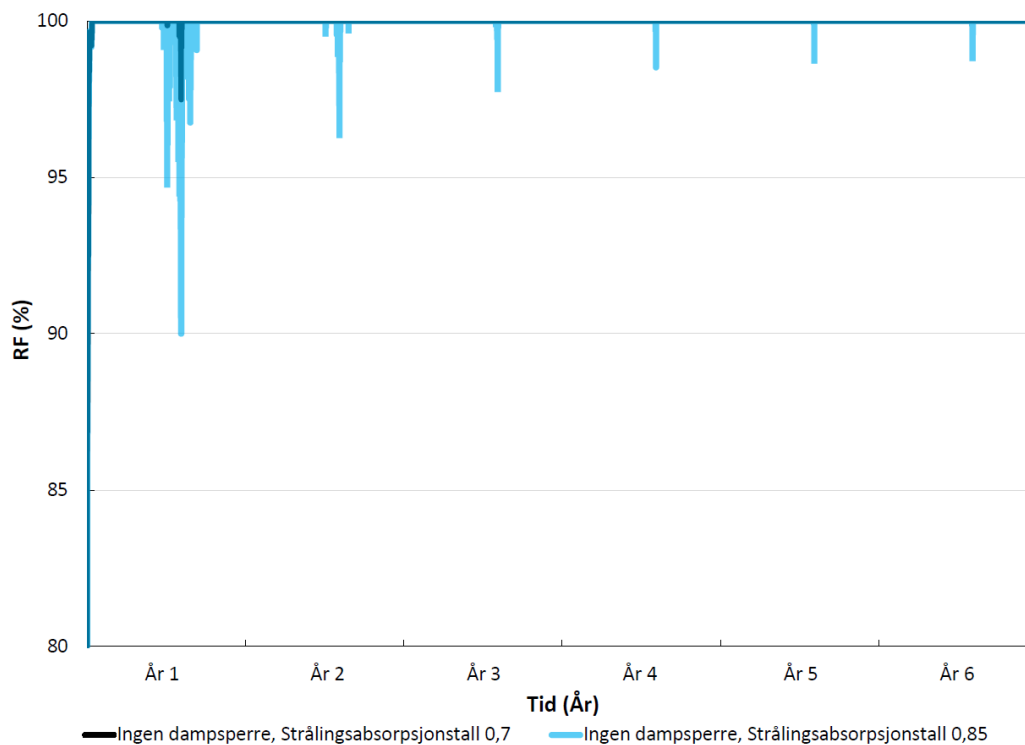
### E.2.1 Variasjon i RF for ytterste mm av mineralull

Beregningstilfelle 11 - Videreføringstilfelle fra hovedstudie

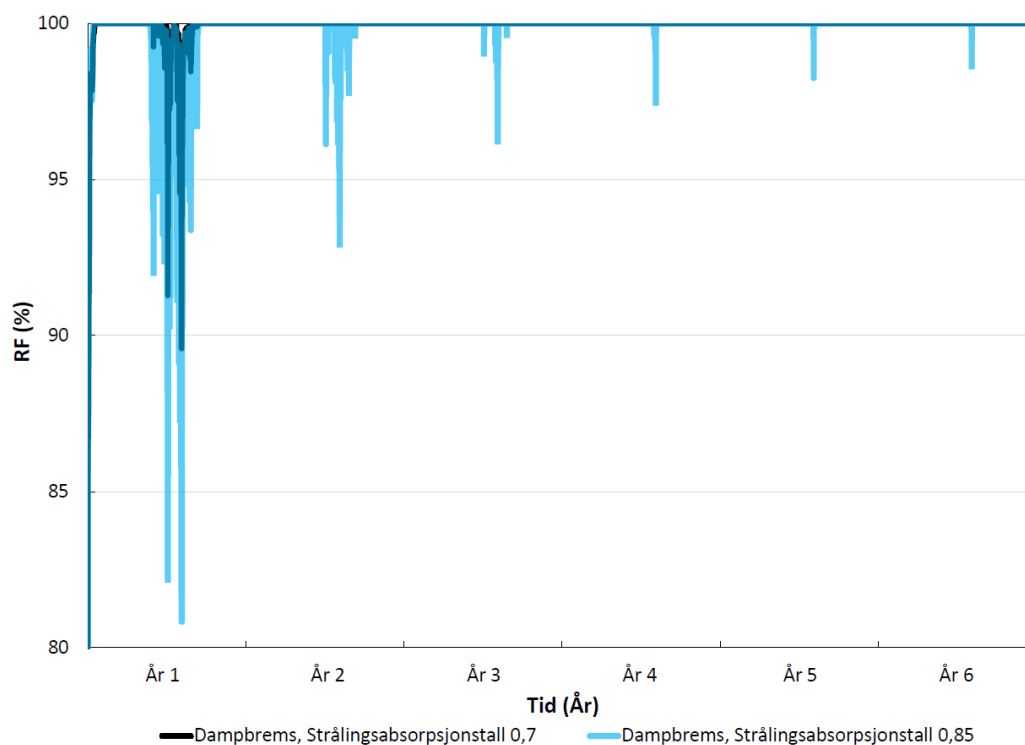


**Figur E.2.1:** RF ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 11 (rød, grønn og gul). Sammenligning med beregningstilfelle 2 (blå). Startfuktnivå = Middels-lavt. Dampsperre = PE-folie.

## Beregningstilfelle 12 - Effekt av strålingsabsorpsjontall



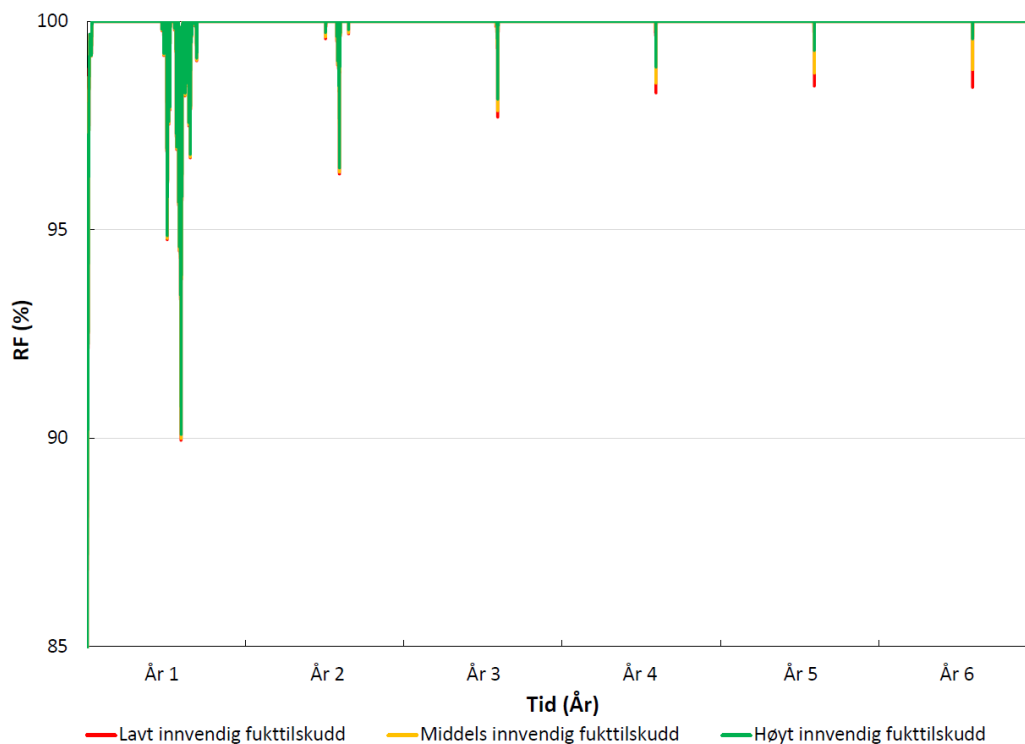
**Figur E.2.2:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av strålingsabsorpsjontall. Beregningstilfelle 12 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 3 (svart). Dampsperre = Ingen dampsperre.



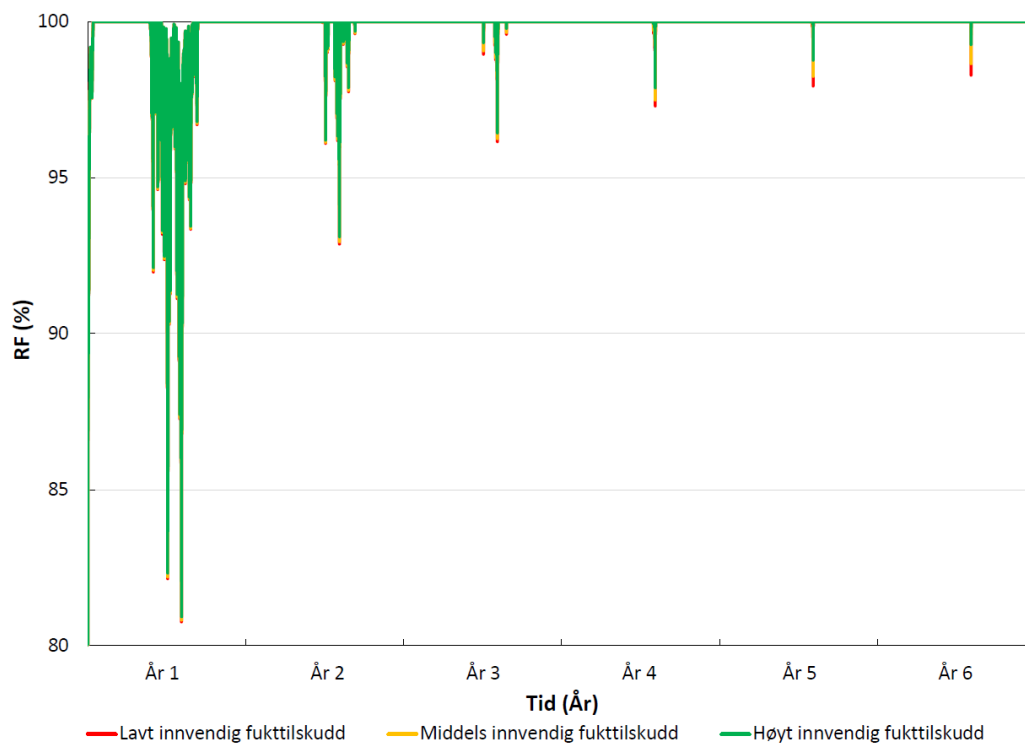
**Figur E.2.3:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av strålingsabsorpsjontall. Beregningstilfelle 12 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 3 (svart). Dampsperre = Dampbrems.



## Beregningstilfelle 13 - Effekt av innvendig fukttilskudd

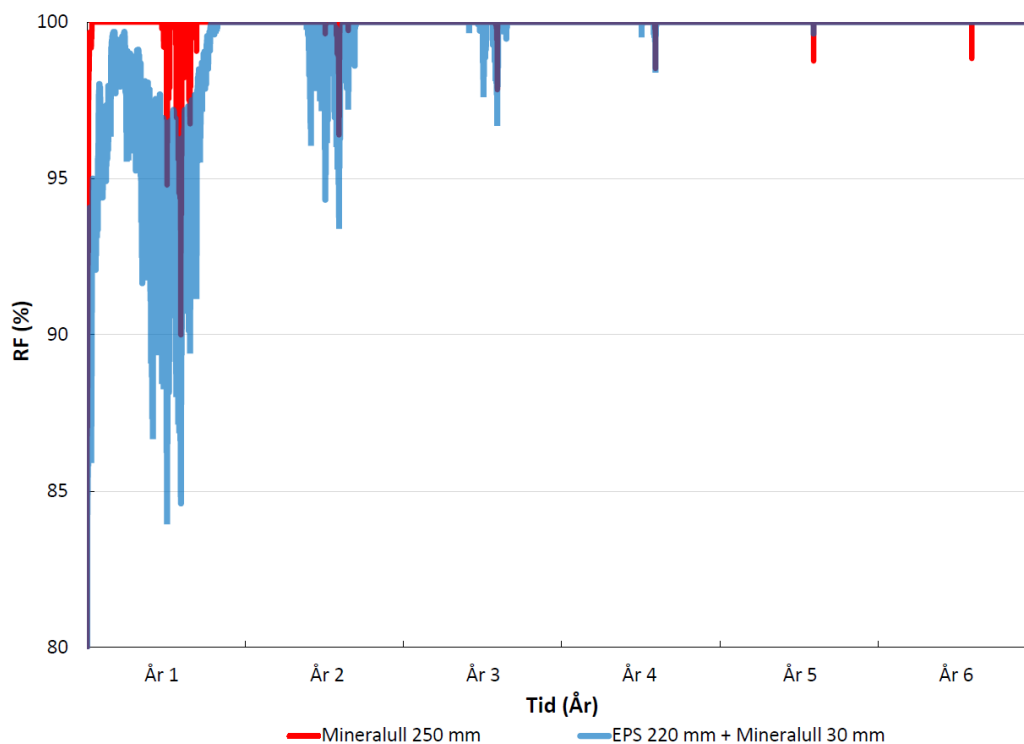


**Figur E.2.4:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av innvendig fukttilskudd. Beregningstilfelle 13 (rød og grønn). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (gul). Dampspærre = Ingen dampspærre.

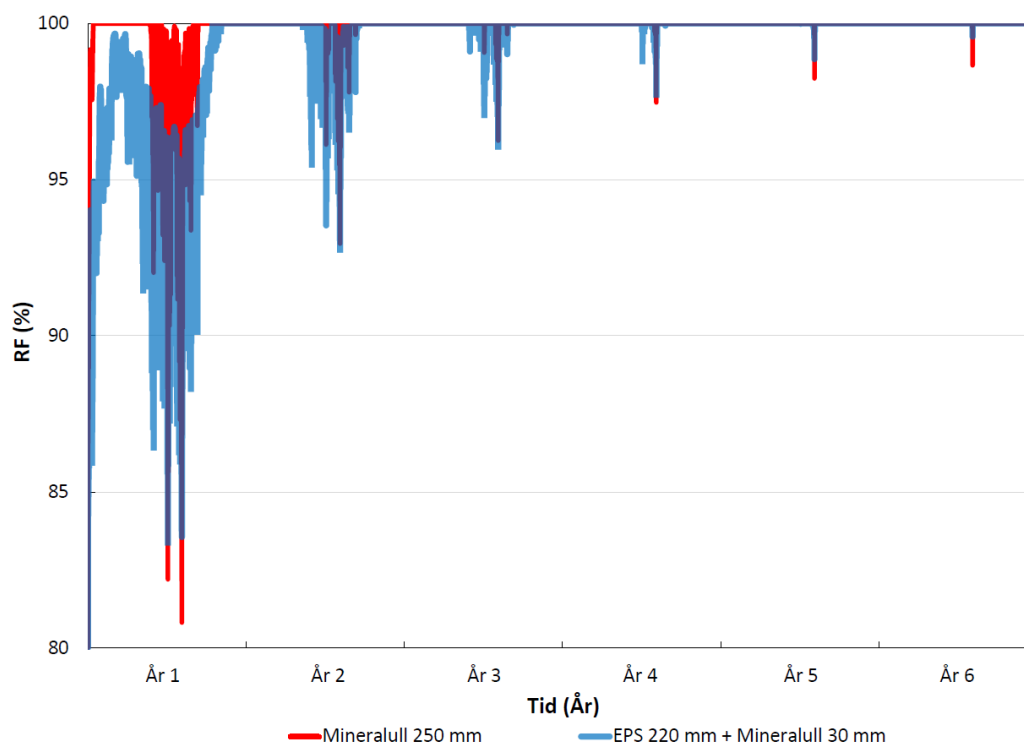


**Figur E.2.5:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av innvendig fukttilskudd. Beregningstilfelle 13 (rød og grønn). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (gul). Dampspærre = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 14 - Effekt av isolasjonstype

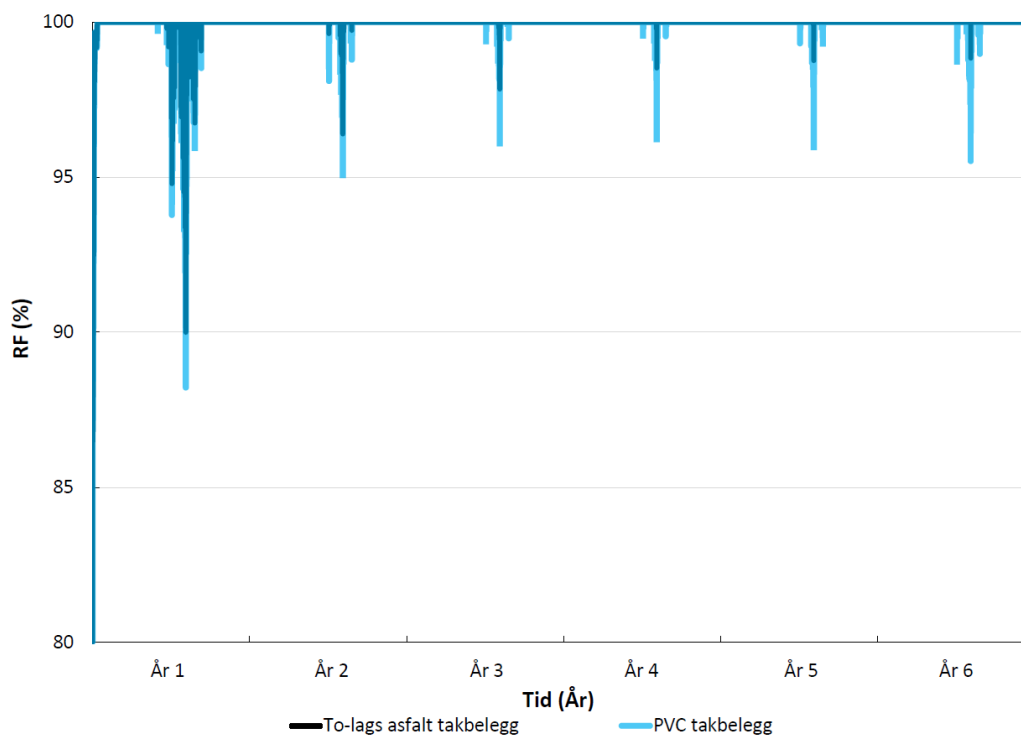


**Figur E.2.6:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av isolasjonstype. Beregningstilfelle 14 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (rød). Dampspærre = Ingen dampspærre.

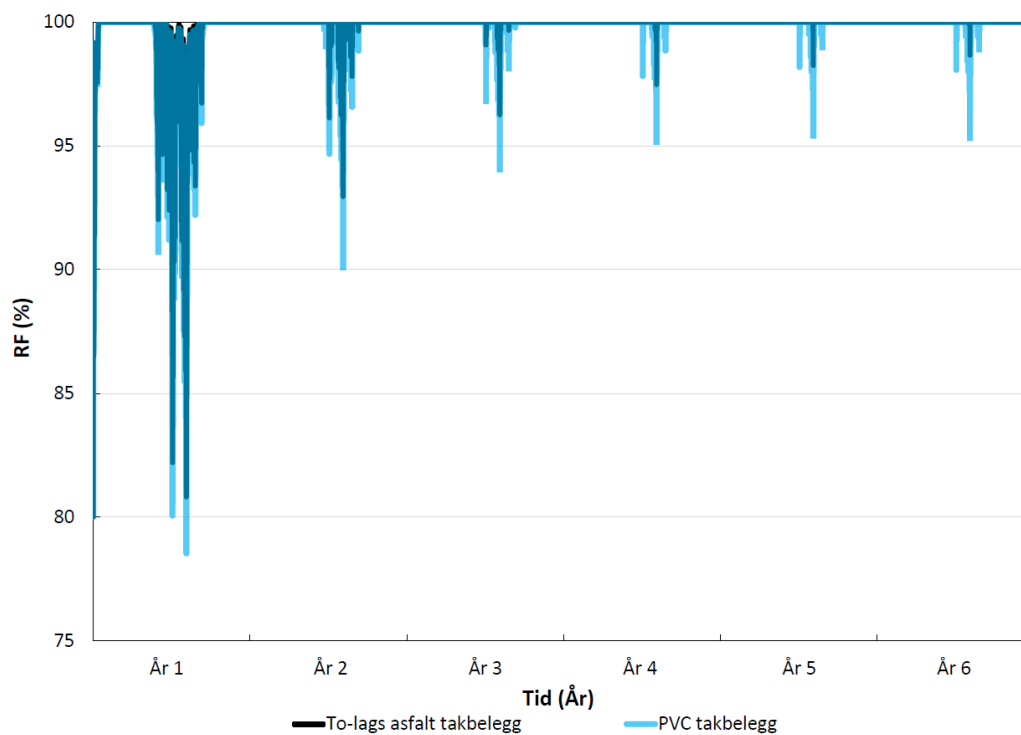


**Figur E.2.7:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av isolasjonstype. Beregningstilfelle 14 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (rød). Dampspærre = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 15 - Effekt av takteknig

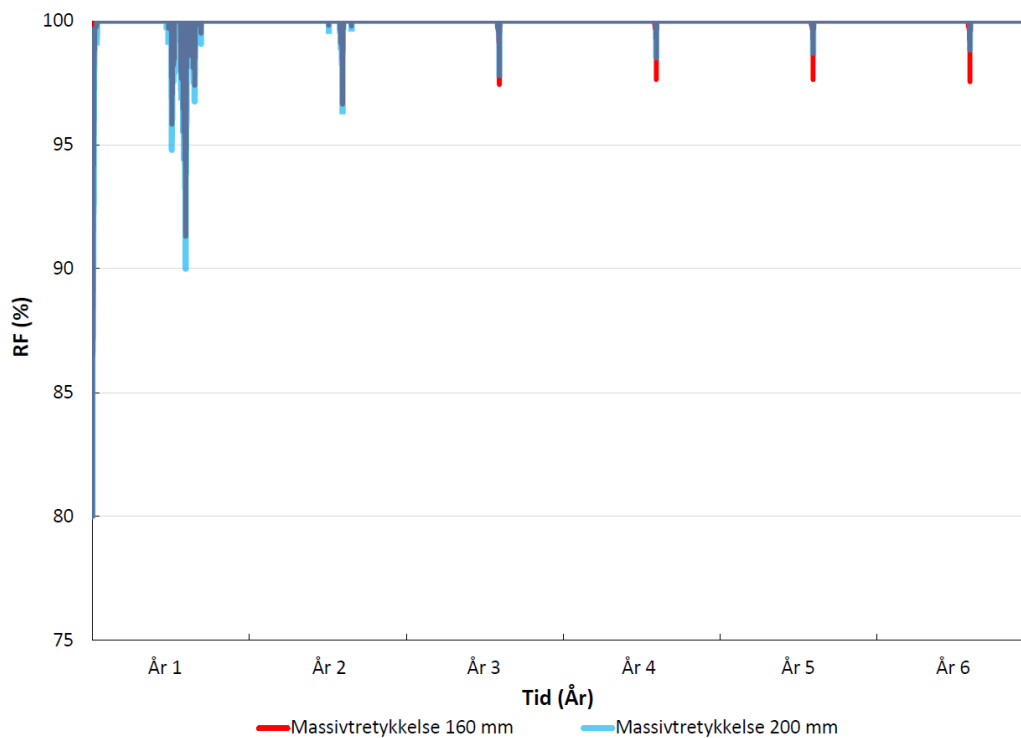


**Figur E.2.8:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av takteknig. Beregningstilfelle 15 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (svart). Dampspærre = Ingen dampspærre.

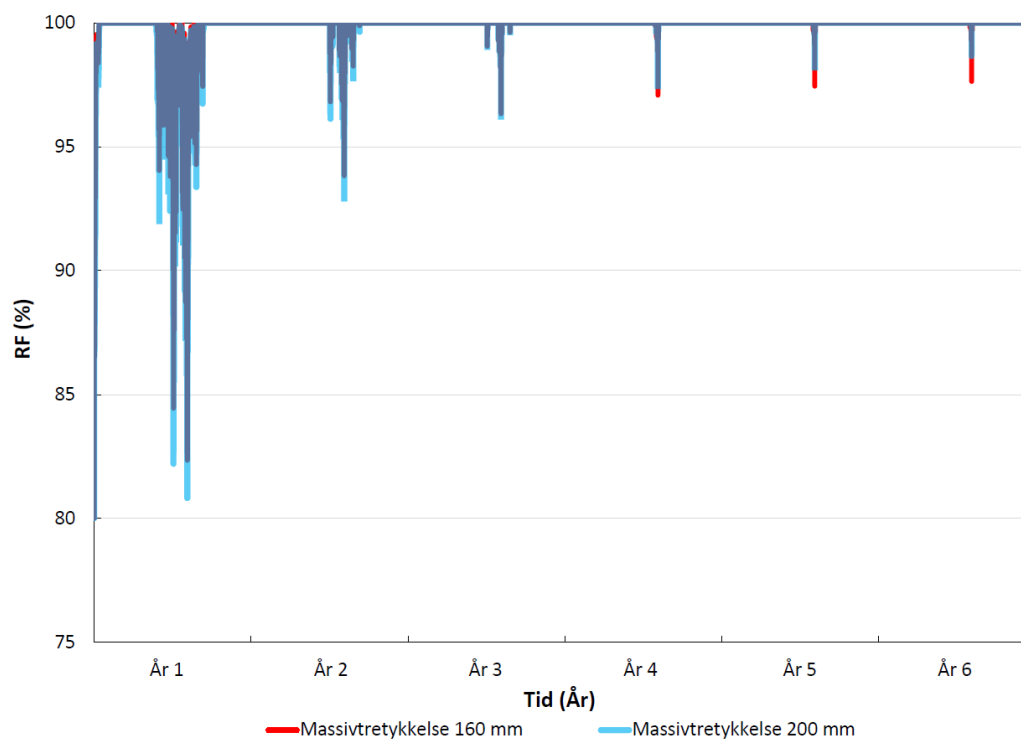


**Figur E.2.9:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av takteknig. Beregningstilfelle 15 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (svart). Dampspærre = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 16 - Effekt av massivtetrykkelse

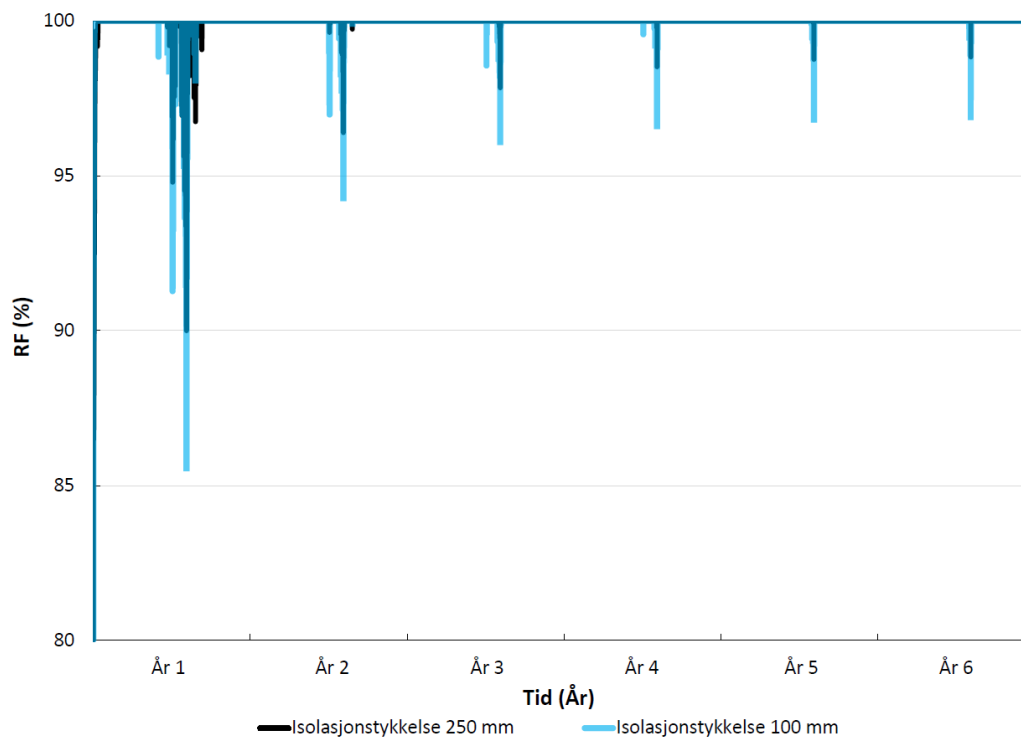


**Figur E.2.10:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av massivtetrykkelse. Beregningstilfelle 16 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (blå). Dampspærre = Ingen dampspærre.

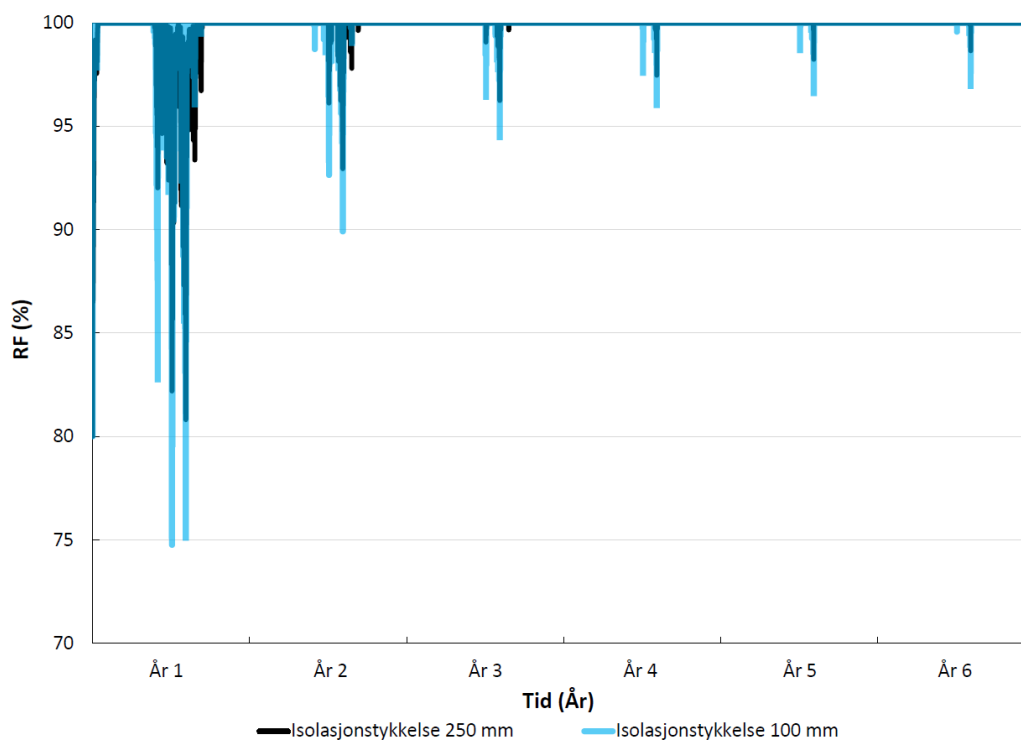


**Figur E.2.11:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av massivtetrykkelse. Beregningstilfelle 16 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (blå). Dampspærre = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 17 - Effekt av isolasjonstykkelse

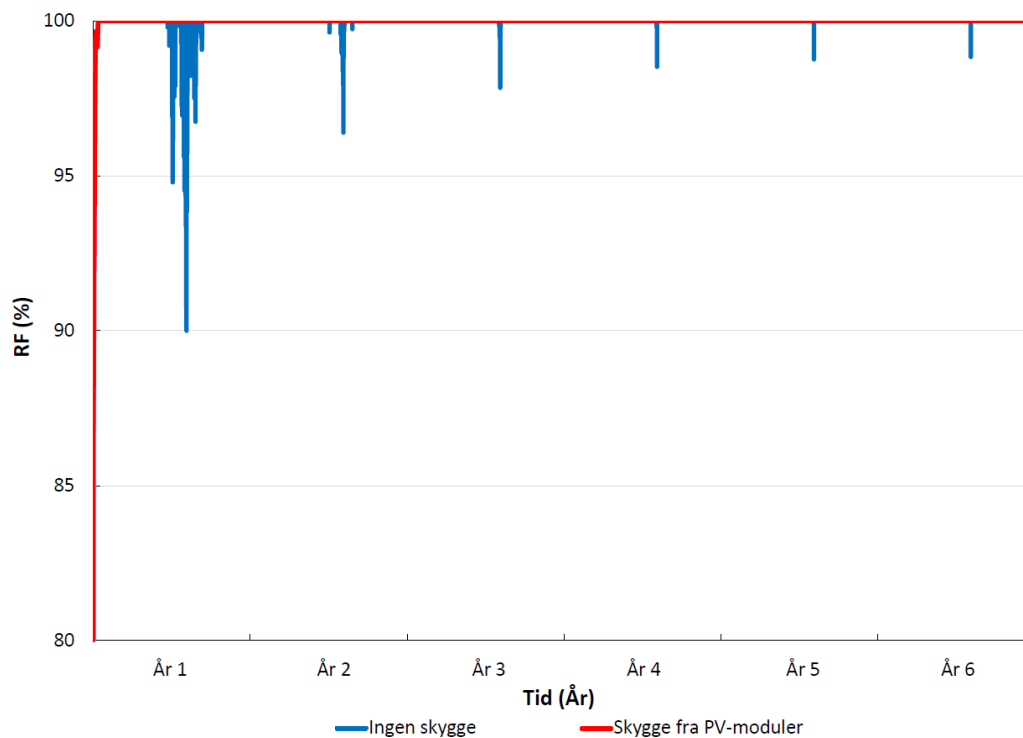


**Figur E.2.12:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av isolasjonstykkelse. Beregningstilfelle 17 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (svart). Dampspærre = Ingen dampspærre.

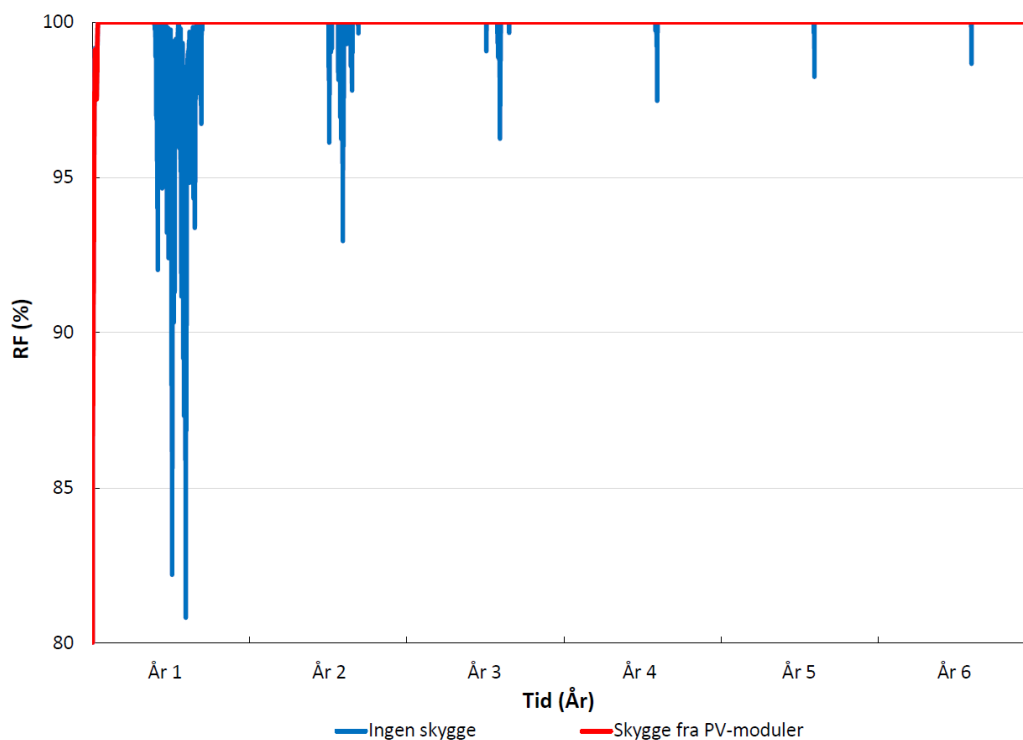


**Figur E.2.13:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av isolasjonstykkelse. Beregningstilfelle 17 (blå). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (svart). Dampspærre = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 18 - Effekt av skygge



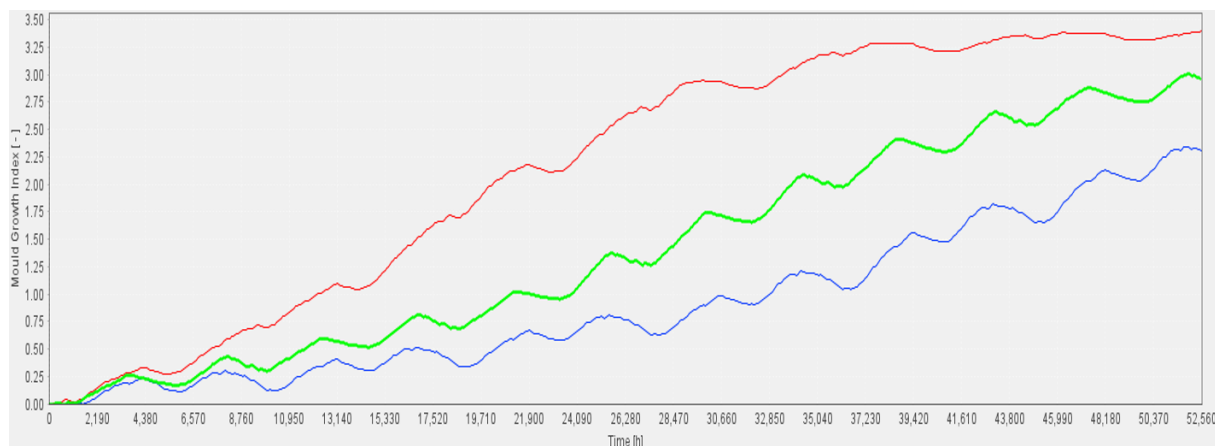
**Figur E.2.14:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av skygge. Beregningstilfelle 18 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (blå). Dampspærre = Ingen dampspærre.



**Figur E.2.15:** RF ytterste mm av mineralull. Effekt av skygge. Beregningstilfelle 18 (rød). Sammenligning med beregningstilfelle 12 (blå). Dampspærre = Dampbrems.

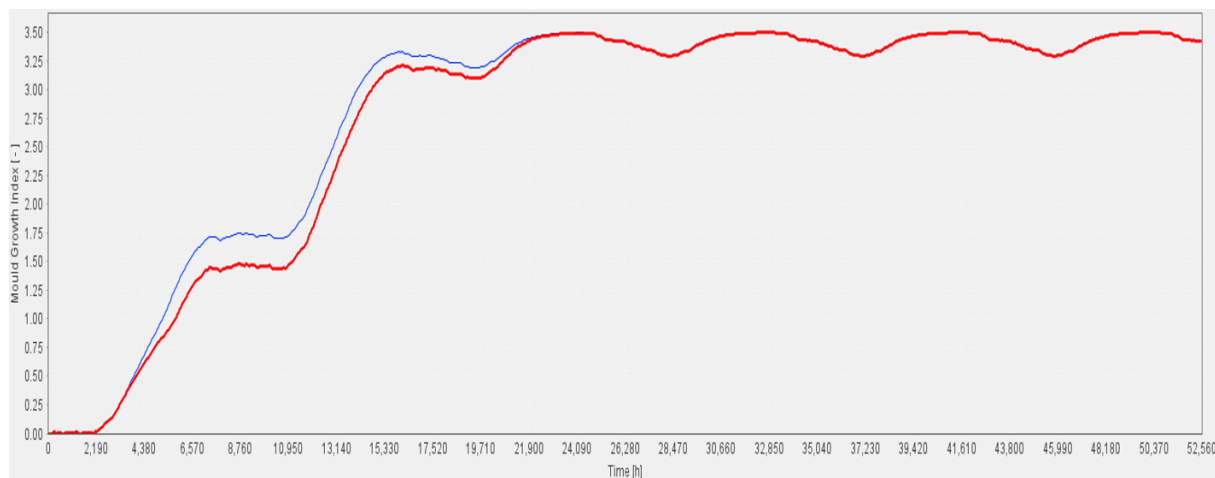
## E.2.2 Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull

## Beregningstilfelle 11 - Videreføringstilfelle fra hovedstudie



**Figur E.2.16:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 11. Startfuktnivå = Middels-lavt. Blå = Oslo. Rød = Bergen. Grønn = Kristiansand.

## Beregningstilfelle 12 - Effekt av strålingsabsorpsjonstall

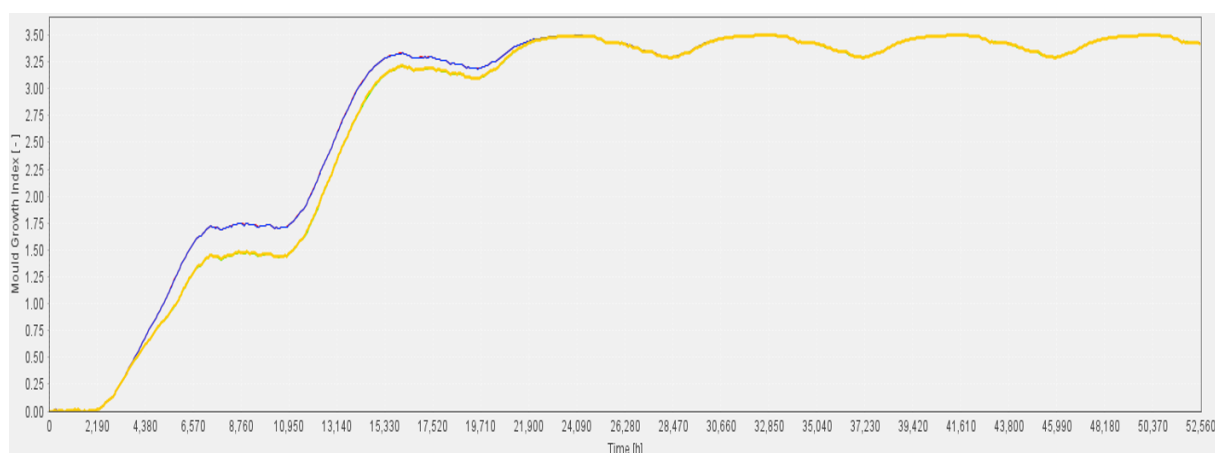


**Figur E.2.17:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 12. Blå = Ingen dampsperre. Rød = Dampbrems.

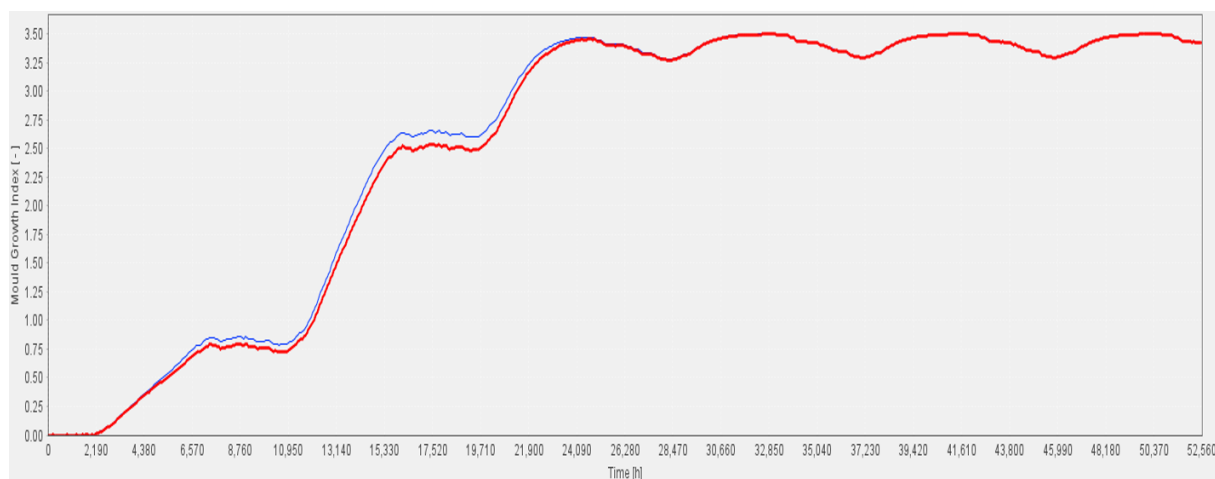
**Beregningstilfelle 13 - Effekt av innvendig fukttilskudd**

Forklaring til figur E.2.18 nedenfor:

- Blå = Ingen dampsperre, Lavt innvendig fukttilskudd
- Rød = Ingen dampsperre, Høyt innvendig fukttilskudd
- Grønn = Dampbrems, Lavt innvendig fukttilskudd
- Gul = Dampbrems, Høyt innvendig fukttilskudd



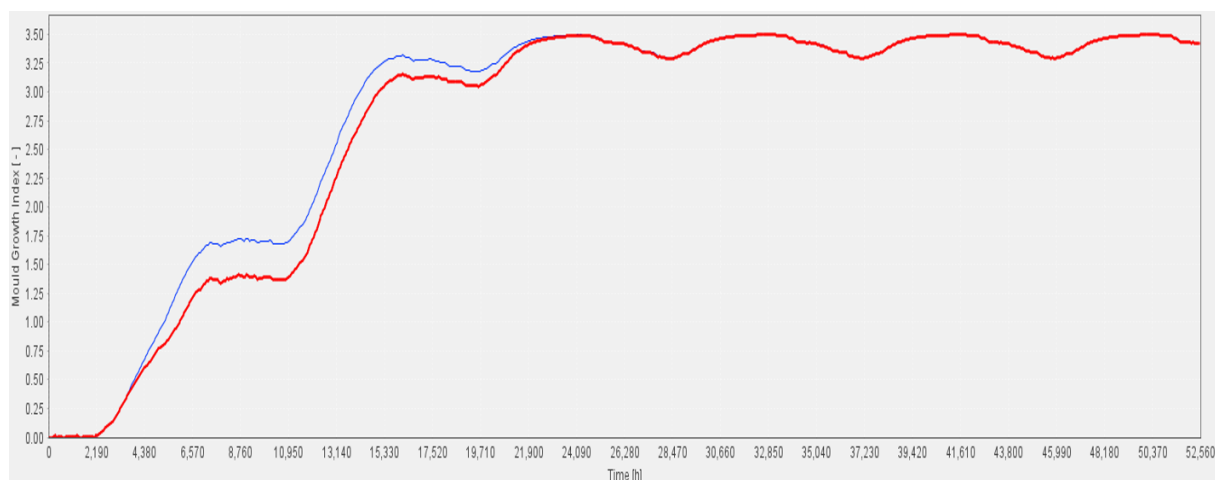
**Figur E.2.18:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 13.

**Beregningstilfelle 14 - Effekt av isolasjonstype**

**Figur E.2.19:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 14. Blå = Ingen dampsperre. Rød = Dampbrems.

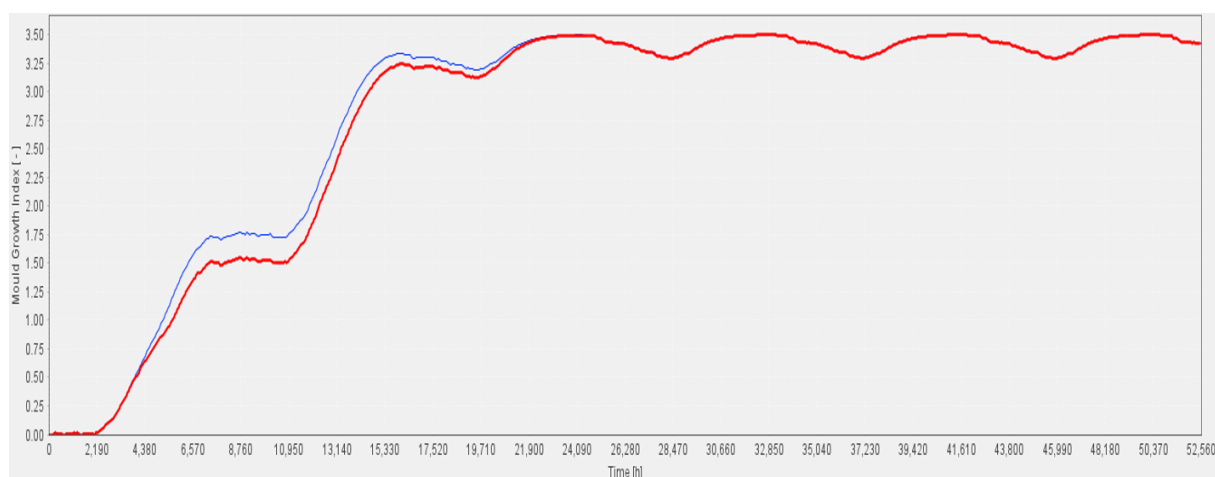


## Beregningstilfelle 15 - Effekt av taktekning



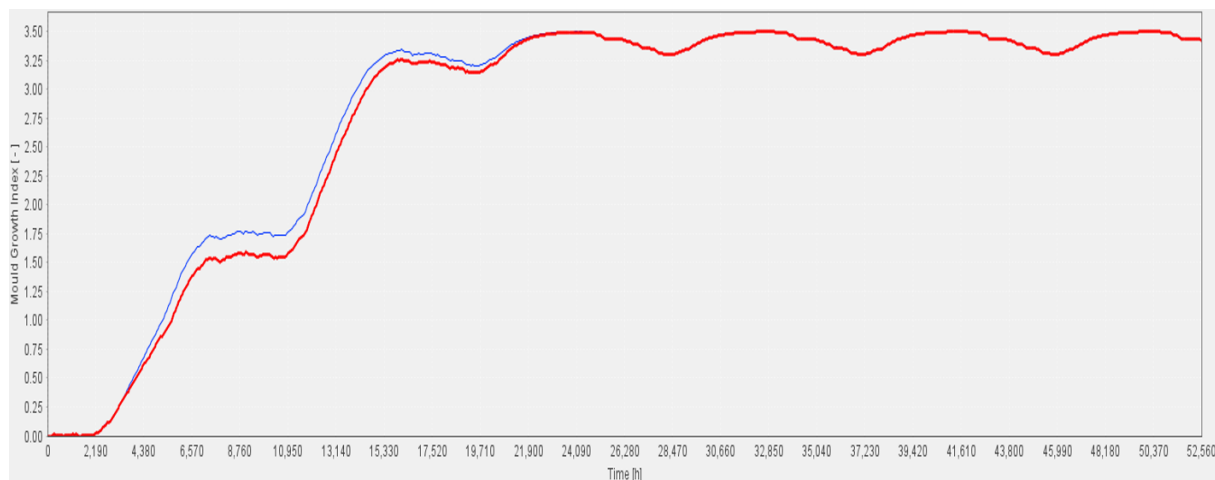
**Figur E.2.20:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 15. Blå = Ingen dampsperre. Rød = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 16 - Effekt av massivtretykkelse



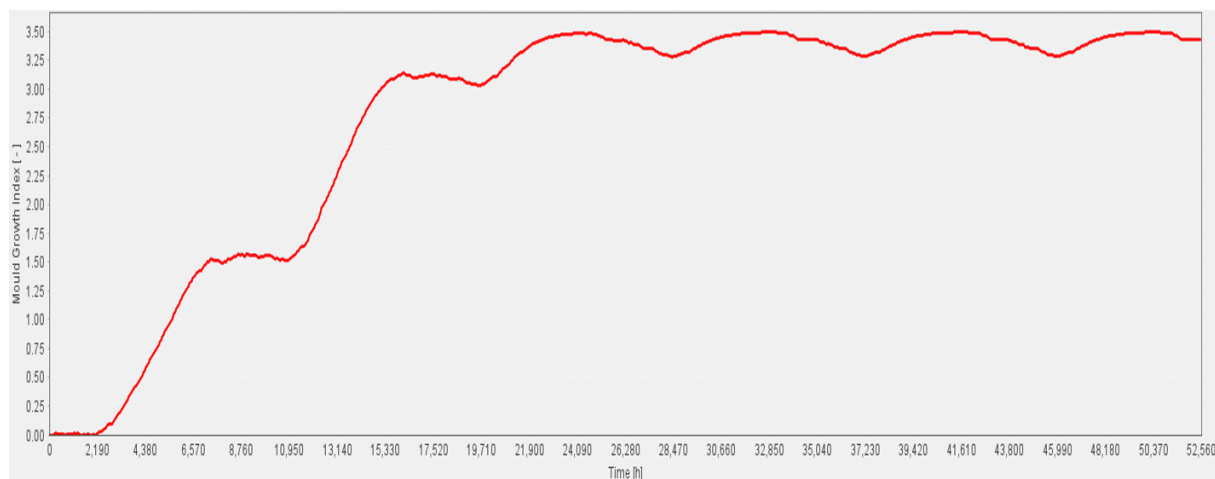
**Figur E.2.21:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 16. Blå = Ingen dampsperre. Rød = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 17 - Effekt av isolasjonstykkelse



**Figur E.2.22:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 17. Blå = Ingen dampsperre. Rød = Dampbrems.

## Beregningstilfelle 18 - Effekt av skygge



**Figur E.2.23:** Variasjon i muggindeks for ytterste mm av mineralull. Beregningstilfelle 18. Blå = Ingen dampsperre. Rød = Dampbrems.

