



## Utveckling och validering av modeller för att prediktera mögelväxt i byggnader

Pernilla Johansson, Lars Wadsö, Sanne Johansson,  
Thomas Svensson, Bengt Bengtsson

RISE Rapport 2018:167

# Utveckling och validering av modell för att prediktera mögelväxt i byggnader

Pernilla Johansson, Lars Wadsö, Sanne Johansson,  
Thomas Svensson, Bengt Bengtsson

# Abstract

## **Development and validation of a model to predict mould growth**

In this project we have tested a mould model originally developed by Skanska (the m-model) and a method used by RISE in Sweden (the GLC-method) on data from both laboratory and field measurements. The laboratory measurements had durations of a few months and were made in climate chambers at RISE; the field measurements were made in 12 buildings during 30 months. In both cases, temperature, relative humidity and mould growth was assessed on six different materials. The results were used to investigate if the m-model or the GLC-method could predict when there was mould growth. Both methods could differentiate between the (dry) cases without mould and the (moist) cases with mould. However, we could not find mould resistance parameters for the tested materials to be used with the m-model. This could be because the m-model cannot predict mould growth well enough, but it can also be because the types of measurements that we have made have relative large uncertainties in relative humidity. Isothermal calorimetry was also investigated as an interesting method to study how drying affects the activity of mould fungi.

Key words: mould, prediction, model, building materials, moisture, RH, critical moisture level

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2018:167

ISBN: 978-91-88695-51-2

Borås 2017

# Innehåll

<b>Samhällsbyggnad Byggt teknik</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>2</b>
<b>Innehåll</b> .....	<b>3</b>
<b>Förord</b> .....	<b>5</b>
<b>Sammanfattning</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Inledning</b> .....	<b>7</b>
<b>2 M-modellen</b> .....	<b>8</b>
<b>3 Kritiskt fukttillstånd</b> .....	<b>10</b>
3.1 Bestämning av $RF_{krit}$ .....	10
3.2 Användning av $RF_{krit}$ för att prediktera mögelväxt (GLC-modellen) .....	11
<b>4 Material och metoder</b> .....	<b>13</b>
4.1 Material.....	13
4.2 Fältprovningar .....	14
4.2.1 Provplatser och exponering av prover.....	14
4.2.2 Mätning av fukt och temperatur.....	15
4.2.3 Mikrobiologisk analys .....	16
4.3 Laborierstudier av mögeltillväxt .....	17
4.3.1 Metodik.....	17
4.3.2 $RF_{krit}$ vid låg temperatur .....	17
4.3.3 Lägsta $RF_{krit}$ .....	18
4.3.4 $RF_{krit}$ trä .....	18
4.3.5 Tillväxt vid fluktuerande RH .....	18
4.4 Kalorimeterstudier.....	18
4.5 Utvärdering av m-modellen.....	19
4.6 Utvärdering av GLC-modellen.....	19
<b>5 Resultat och diskussion</b> .....	<b>20</b>
5.1 Fältmätningar .....	20
5.2 Laborierprovningar av tillväxt.....	22
5.2.1 Lägsta $RF_{krit}$ .....	22
5.2.2 $RF_{krit}$ för trä.....	22
5.2.3 $RH_{krit}$ vid låg temp .....	22
5.2.4 Tillväxt vid fluktuerande klimat .....	23
5.3 Kalorimeterresultat.....	26
5.4 Fältmätningar och GLC-modellen .....	30
<b>6 Modellering, verifiering och förenkling av m-modellen</b> .....	<b>33</b>
<b>7 Programmering av m-modellen</b> .....	<b>39</b>

<b>8</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>40</b>
<b>9</b>	<b>Slutsatser .....</b>	<b>44</b>
<b>10</b>	<b>Framtida arbete .....</b>	<b>45</b>
<b>11</b>	<b>Referenser .....</b>	<b>46</b>

# Förord

Projektet som presenteras i denna rapport gäller utvärdering av m-modellen, en modell för mögelprediktering utvecklad av Skanska. Arbetet har planerats och genomförts i en projektgrupp bestående av Lars Wadsö (Byggnadsmaterial LTH), Sanne Johansson (Byggnadsmaterial LTH), Yuijing Li (Byggnadsmaterial LTH, numera Malmö Universitet) och Jesper Arfvidsson (Byggnadsfysik LTH), Pernilla Johansson (RISE), Thomas Svensson (Thomas Svensson Ingenjörstatistik), Bengt Bengtsson (Skanska), Jens-Erik Jörgensen (Skanska) samt Mette Eliasson (Skanska). Gunilla Bok (RISE) och Annika Ekstrand-Tobin (RISE) har genomfört laboratorieprovningar och mikrobiologiska analyser av de prover som exponerats i fält.

Projektet har fått ekonomiskt stöd från SBUF Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond genom två anslag: ”Utveckling och validering av modell för att prediktera mögelväxt i byggnader” (projektnummer 12894) samt ”Kompletterande försök av kritiska fukt-tillstånd” (projektnummer 13202). Sökande hos SBUF var Skanska och vi tackar dem för det stöd som de har gett till projektet. Vi vill särskilt tacka Jens-Erik Jörgensen och Mette Eliasson från Skanska som har lett projektet. Vi tackar även referensgruppen bestående av representanter från olika byggföretag som var knuten till projektet. Ett särskilt tack går till Mette Eliasson (Skanska), Charlotte Svensson Tengberg (Skanska) och Kristina Mjörnell (RISE) för deras noggranna och kritiska genomläsning av rapportutkastet.

Resultaten från projektet kommer att presenteras i vetenskapliga artiklar som är under utarbetande [1-7].

# Sammanfattning

I ett projekt finansierat av SBUF har en mögelmodell ursprungligen utvecklad av Skanska (m-modellen) och den metod som används av RISE (GLC-metoden) testats på data från både labb- och fältmätningar. De några månader långa labbmätningarna gjordes i klimatkammare på RISE och fältmätningarna gjordes i 12 byggnader under ca 30 månader. Resultaten har sedan använts för att testa om m-modellen och GLC-modellen kan förutsäga när det kommer att bli mögel. Båda metoderna fungerar för att skilja på (torra) fall utan mögel och (fuktiga) fall med betydande mögeltillväxt. Tyvärr kunde vi inte hitta mögelresistansparametrar för de olika materialen som skulle kunna användas tillsammans med m-modellen. Detta kan bero på att m-modellen inte kan förutsäga mögeltillväxt tillräckligt väl, men kan också bero på att denna typ av försök har stora felkällor, t ex var RH-sensorerna inte så stabila som vi hade önskat. Isoterm kalorimetri har utforskats och är en intressant metod för att i detalj studera hur t ex uttorkning påverkar en svamps aktivitet.

# 1 Inledning

Mögeltillväxt på byggnadsmaterial är en komplex process där miljöfaktorer (fukt och temperatur), materialegenskaper och mögelsvamparnas krav samspelar. Tillgång på vatten är den begränsande faktorn för att mögel ska växa. Är det inte tillräckligt fuktigt (tillräckligt hög relativ fuktighet) kommer inte materialen att mögla. Även temperaturen har betydelse och ju fuktigare och varmare det är i en byggnadsdel, desto större är risken för att mögel ska växa. Dessutom måste tiden med, för svampen, gynnsamma förhållanden vara tillräckligt lång för att mögeltillväxten ska komma igång.

I olika byggnadsdelar är relativ fuktighet och temperatur sällan konstanta utan varierar under dygnet och under året. Detta innebär oftast att gynnsamma perioder för mögeltillväxt växlar med ogynnsamma perioder och risken för påväxt varierar därför. Hur denna variation påverkar mögelsvamparnas tillväxt och aktivitet är inte helt känt. Det verkar dock som att längden på gynnsamma/ogynnsamma perioder påverkar hur lång tid det tar för mögel att växa till och om det är tillräckligt långa torrperioder uppkommer mögel inte alls [8].

För att kunna bedöma risken för mögelpåväxt vid ett känt klimat, från mätningar eller beräkningar, har det utvecklats mögelmodeller. Flera av dessa baseras på samma grunddata och dessutom på studier som i första hand genomförts under konstanta förhållanden. Några av dessa presenteras och diskuteras i [9] och i [10].

I projektet som presenteras i denna rapport har m-modellen undersökts med hjälp av laboriemätningar och fältmätningar. Dessutom kommer modellen att göras offentlig genom att den kommer att finnas tillgänglig som ett tillägg till byggnadsfysikprogrammet WUFI.

I de mätningar som är gjorda i detta projekt har vi använt metodik som är utvecklad vid RISE för bedömning av mögelpåväxt och mätningar för att bedöma kritiskt fuktillstånd ( $RF_{krit}$ ) baserad på laborieprovningar [11] och fältmätningar [12]. Mögelbedömningsmetodiken beskrivs i en SP-metod [13] och en teknisk specifikation [14]. Metoden beskrivs också i [15]. Arbetet med att ta fram metoden beskrivs i [16, 17]. En viktig slutsats från tidigare mätningar är att  $RF_{krit}$  är produktspecifik och inte kan gälla för produktgrupper.

Syftet med projektet som presenteras i denna rapport var att beskriva, och om möjligt verifiera och vidareutveckla, m-modellen som den tidigare presenterats. En del av vidareutvecklingen var att komplettera m-modellen med kunskaperna om  $RF_{krit}$  så att riskbedömningen för olika material skulle bli bättre i modellen. Dessutom skulle detta ge en möjlighet att från provningsresultat (enligt den standardiserade provmetoden för att prova  $RF_{krit}$ ) kunna ge ingångsdata för specifika produkter.

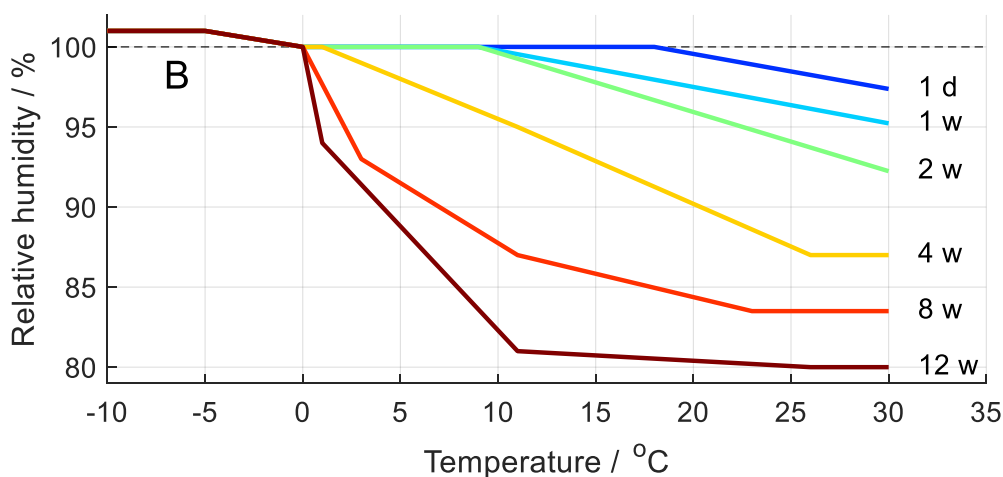
Målet för projektet var att presentera en modell som kan användas vid projektering och produktionsplanering av nya byggnader eller vid ombyggnad för att prediktera mögelpåväxt på byggnadsmaterial i konstruktioner. I detta projekt har vi därför utvecklat m-modellen till en mögelmodell som ska vara fritt tillgänglig för byggbranschen att använda tillsammans med både mätdata och data från simuleringar.



## 2 M-modellen

M-modellen är en mögelmodell som har utvecklats vid Skanska som ett internt verktyg, huvudsakligen för att bedöma om ännu ej byggda konstruktioner kommer att få problem med mögel i framtiden. Utvecklingsarbetet började för ca 10 år sedan och modellen byggde på data från Viitanen [18-20] kompletterat med Skanskas egna mätningar och erfarenheter. Modellen fungerade under ett antal år som ett internt verktyg på Skanska, men i och med att det publicerades (och användes) fler och fler andra mögelmodeller [21], så ville man från Skanska offentliggöra m-modellen, vilket sker i det SBUF-projekt som rapporteras här.

Kärnan i m-modellen är begränsningskurvor (isopleter) som beskriver vid vilka RF det möglar som funktion av temperaturen vid sex olika tidsskalor: 1 dag samt 1, 2, 4, 8 och 12 veckor. De sex isopleterna (Fig. 1) är baserade på resultat från Viitanen [18] vid konstanta förhållanden.



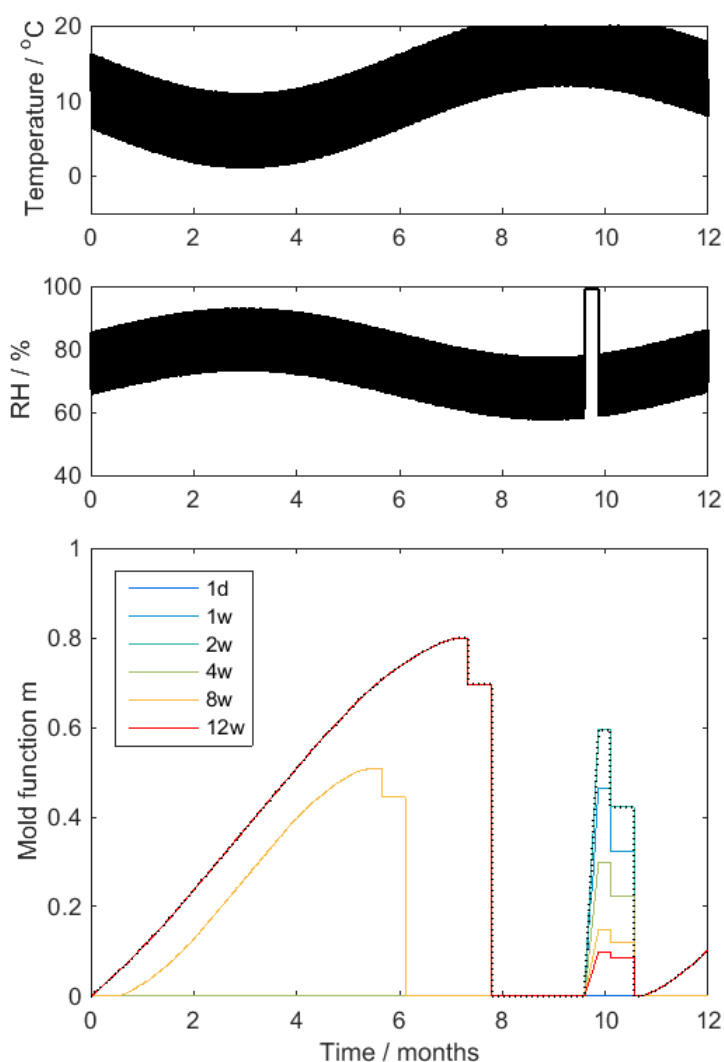
Figur 1. M-modellens sex tidsskalor [3].

Modellen bygger på att mögel antingen kan uppkomma på ett material dels efter korta tider med hög RF, dels efter längre tid vid lägre RF. Indata är temperatur och RF som funktion av tiden och i modellen betraktas dessa värden i relation till om de ligger över eller under någon av begränsningskurvorna. Beräkningar i modellen görs parallellt med dessa sex tidsskalor och den som ger högst värde (högst risk för mögel) används. Beräkningarna kan utföras med olika tidssteg (vi har använt tidssteg på 1 h).

För att modellen ska kunna hantera varierande klimat så räknar den ”torra” och ”fuktiga” perioder för alla tidsskalorna som minskas eller nollställs enligt vissa regler [1]. Dessa perioder har enheten tid och när de fuktiga perioderna divideras med motsvarande tidsskalor får man de riskfaktorer som är modellens resultat. Som nämnts tidigare väljer man vid varje tidpunkt den riskfaktor som är högst. Denna faktor kallas  $m$  och kan användas för att bedöma risken för mögelpåväxt. En fullständig beskrivning av m-modellen finns i en artikel [3]. I denna artikel finns också exempel på hur m-modellen uppför sig under olika temperatur- och RF-förhållanden.

Tanken med  $m$ -modellen var att om  $m$ -värdet överstiger vissa nivåer, så får man mögel (eller att det är hög risk för mögel), och att dessa värden som man ska jämföra med är materialspecifika. Slutsatsen av detta projekt (se avsnitt 6) är dock att det är svårt att hitta absoluta kritiska  $m$ -värden för olika material.

Ett exempel på resultat från  $m$ -modellen visas i Figur 2. De slutliga resultaten för de sex olika tidsskalorna visas i olika färger. Under den kalla och fuktiga perioden under den första halvan av simuleringen, så växer  $m$ -värdet och det är den längsta tidsskalan (12 veckor) som är aktiv, medan det under den korta fuktiga perioden är tidsskalan 1 vecka som ger högst resultat. Det senare beror på att RF var över 1 veckas-isopleten under mer än en vecka, men den var samtidigt under 1 dags-isopleten, så denna tidsskala ger  $m=0$ .



Figur 2. Exempel på resultat från  $m$ -modellen med syntetiska (simulerade) indata för ett år. Både temperatur och RF varierar under året och under dagen (dagsvariationerna syns som svarta band). Något före 10 månader var RF 99% under 8 dagar. En svart prickad linje markerar de högsta  $m$ -värdena och är det resultat som enligt modellen ska användas.

## 3 Kritiskt fukttillstånd

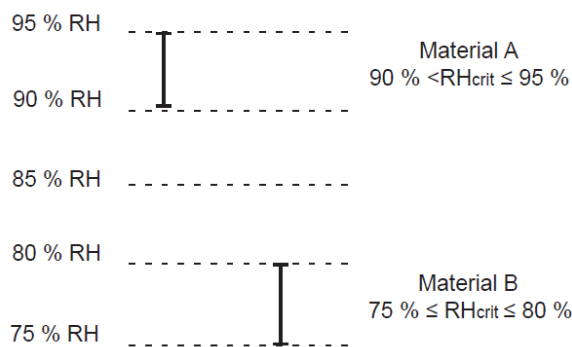
Motståndskraften mot mögel varierar mellan olika material. Det finns material som möglar vid runt 75% RF medan andra kan exponeras för  $RF > 95\%$  utan att mögel börjar växa på materialet. Det kritiska fukttillståndet ( $RF_{krit}$ ) kan definieras som den lägsta RF nivån där ett material kan börja mögla.

### 3.1 Bestämning av $RF_{krit}$

$RF_{krit}$  kan bestämmas genom laborierprovningar enligt metod som utvecklats på RISE. Metoden är publicerad på RISE som SP metod 4927 [13] och som en teknisk specifikation av SIS [14]. Metoden har utvecklats genom en mängd laborierprovningar [11] och fältmätningar [12] och beskrivs och diskuteras i [15]. Arbetet med att ta fram metoden beskrivs i [16, 17].

Vid bestämning ett materials kritiska fukttillstånd används provkroppar av materialet som är inokulerade med sporlösning. Fyra uppsättningar provprover om vardera sju prover inkuberas sedan i fyra olika RF (80%, 85%, 90% och 95%) vid 22 °C. Proverna inkuberas under 12 veckor i varje RH och inspekteras därefter visuellt för svamptillväxt vid  $\times 40$ -förstoring och påväxten bedöms enligt en femgradig betygsskala 0-4.

$RF_{krit}$  bestäms genom att man beaktar det RF vid vilken mögel etableras på materialet och det närmast under provade RF, där ingen tillväxt kan detekteras. Den faktiska kritiska fuktnivån förväntas då ligga någonstans mellan dessa två värden eller vid RF där påväxt uppkom.  $RF_{krit}$  rapporteras därför som ett intervall. Principen illustreras i Figur 3.



Figur 3. Ett exempel för principen för bestämning av  $RF_{krit}$ . Två exempelmaterial A och B har provats. Nivåerna av RF till vänster i bilden representerar nivåerna som provningen genomförs vid, med undantag för 75%. Denna används som lägsta gräns för mögeltillväxt, baserat på tidigare provningar och publicerade studier. Vid provningen finns det mögel på material A efter 12 veckor vid 95 % RF, men inget på prover som inkuberas 90 %. Det kritiska fukttillståndet bestäms till  $90\% < RF_{krit} \leq 95\%$ . Material B har möglat vid 80% RF och det kritiska fukttillståndet bestäms till  $75\% < RF_{krit} \leq 80\%$ .

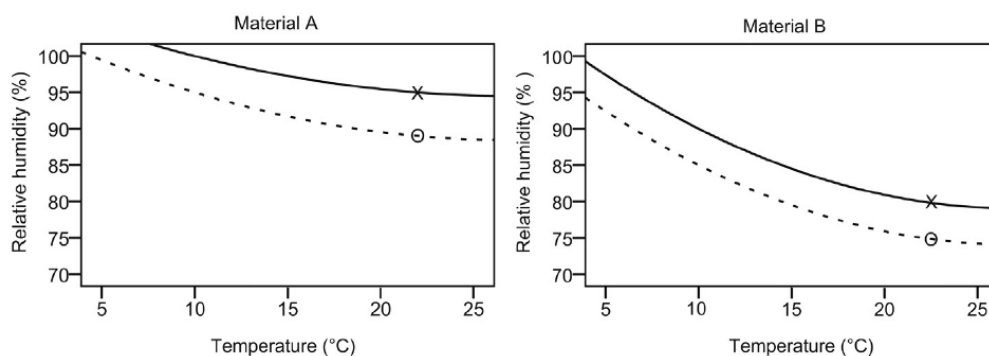
## 3.2 Användning av $RF_{krit}$ för att prediktera mögelväxt (GLC-modellen)

Eftersom  $RF_{krit}$  är temperaturberoende är testresultaten endast giltiga för den provade temperaturen, det vill säga 22 °C. För att kunna använda resultaten för applikationer i byggnader är det emellertid viktigt att även bestämma de kritiska fuktnivåerna vid andra temperaturer. Det görs genom att använda ekvationen nedan, som baseras på flera studier [16, 17, 22-24]. Genom att beräkningarna upprepas för en serie temperaturer kan de kritiska fuktnivåerna uttryckas som begränsningskurvor för tillväxt (se Figur 4).

$$RF_{kritT_2} = 105 + c(T_2^2 - 54 \cdot T_2), \quad (1)$$

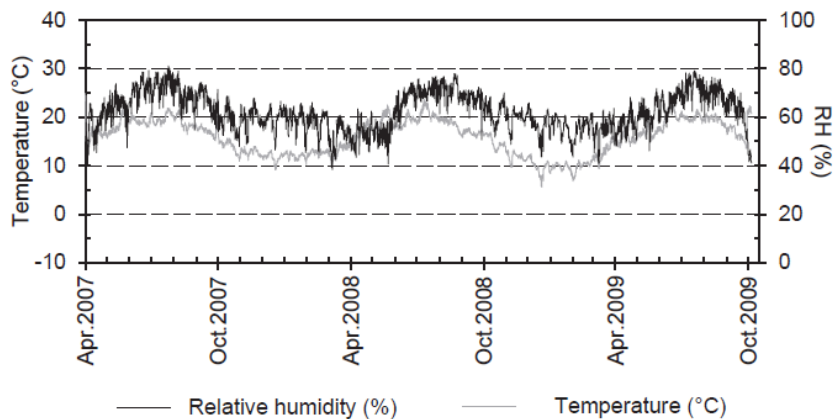
där  $RF_{kritT_2}$  är det sökta kritiska fuktillståndet (%) vid temperaturen  $T_2$ , och  $c$  är en konstant som räknas ut ur motsvarande ekvation vid 22 °C ( $T_1$ ):

$$c = \frac{RF_{kritT_2} - 105}{T_1^2 - 54 \cdot T_1}, \quad (2)$$

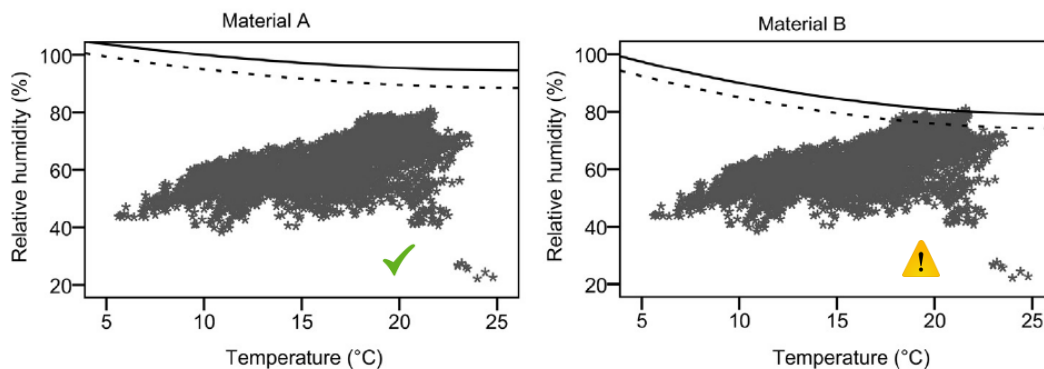


Figur 4. Övre och undre begränsningskurvor för mögelväxt, baserat på provningsresultat och ekvationerna 1 och 2, för två material. "x" markerar det  $RF$  där mögelpåväxt hittades och "o" är närmsta undre provade  $RF$ .

Genom att använda sig av begränsningskurvorna kan risk för mögelväxt på ett material i en byggnadsdel uppskattas, givet att temperatur och  $RF$  är kända, antingen baserat på mätningar eller predikteringar. Om inte det aktuella klimatet överskrider den lägre kurvan är risken för mögelväxt låg. Om det ibland överskrider övre kurvan, eller faller mellan de båda kurvorna, finns det risk för mögelväxt. Ett exempel på hur modellen används visas i Figur 5 och Figur 6. Uppmätta värden av  $RF$  och temperatur i en krypgrund under 2,5 år (Figur 5). Dessa värden har sedan plottats i Figur 6 som temperatur på x-axeln och  $RF$  på y-axeln, tillsammans med begränsningskurvorna från exemplen i Figur 4.



Figur 5. Uppmätt RF och temperatur i en krypgrund [12].



Figur 6. Illustration av hur GLC-modellen bedömer risk för påväxt. Begränsningskurvorna från Figur 3 har ritats in i ett diagram där värdena från mätningarna i Figur 4 plottats. Ingen mögelpåväxt förväntas på material A eftersom de uppmätta värdena ligger långt under begränsningskurvorna för påväxt. Däremot ligger de över eller mellan de båda begränsningskurvorna för material B och därför finns det risk för mögelpåväxt. I detta exempel har detta också verifierats med mikrobiologiska analyser [12].

Den modell som presenteras ovan kallas i denna rapport GLC-modellen (Growth Limit Curves) och är alltså modell som baseras på labbresultat och som tar hänsyn till om det kritiska fuktillståndet överskrids eller inte och som inte predikterar när i tiden en påväxt kommer uppkomma eller hur långa perioder av ogynnsamma förhållanden som kan påverka eventuell påväxt. Modellen har visats prediktera rätt i fältstudier [12], och hänsyn har då också tagits till den kumulativa tiden över begränsningskurvorna i relation till tiden som det tar innan mögel uppkommer i laboratoriet, där förhållandena är konstanta och gynnsamma. Modellen underskattar inte risken för påväxt utan innehåller även en säkerhetsmarginal.

Det är möjligt att man skulle kunna göra mer precisa prediktioner genom att utvidga metoden till att även ta hänsyn till längden av de ogynnsamma perioderna. Även hur fuktigt det är, det vill säga hur mycket över det kritiska fuktillståndet som de uppmätta värdena ligger, påverkar hur snabbt påväxt uppkommer. I detta projekt har detta delvis studerats liksom möjligheten till en kombination av m-modellen och GLC-modellen.

## 4 Material och metoder

Projektet har omfattat fältstudier, laboratorieprovningar och matematisk utvärdering och modellering. I provningar och fältstudier studerades tillväxten av mögel på materialprover av olika byggnadsmaterial. Dessa provningar syftade till att verifiera/utvärdera den befintliga m-modellen samt ge data och underlag till en eventuell vidareutveckling av metoden. De har också använts för att verifiera GLC modellen separat, eftersom det under arbetets gång visade sig att det inte gick att väga in  $RF_{krit}$  i m-modellen på det sätt som m-modellen är formulerad med tidsskalor.

Vid fältstudierna studerades mögeltillväxt över tid på prover exponerade i olika konstruktioner. Det omgivande klimatet, det vill säga RF och temperatur, mättes kontinuerligt under exponeringstiden.

Två typer av laboratorieprovningar genomfördes där den ena syftade till att studera tillväxten av mögel på olika material vid olika RF och temperatur, medan den andra syftade till att få indata till m-modellen under mindre gynnsamma förhållanden.

### 4.1 Material

Prover av fyra olika skivmaterial samt två olika typer av virke användes i fältstudien (avsnitt 4.2) och i de laboratorieprovningar där tillväxten av mögel studerades (avsnitt 0). Prover från samma skivmaterial har tidigare provats i både fältstudier [12] och i laboratorieprovningar [11]. Baserat på dessa provningar har  $RF_{krit}$  bestämts för materialen. Materialen redovisas i Tabell 1. Storleken på proverna var 5 cm × 10 cm. Tjockleken på proverna var desamma som materialens egna. Allt material, med undantag från Gran 1, köptes hos byggvaruhandlare i Borås.

Tabell 1 Material som användes i fält och laboratoriestudier

Material	Beskrivning	Intervall inom vilket det kritiska fuktillståndet förväntas ligga vid 22 °C [11]
K-plywood (plywood) (12 mm)	Tillverkad av korslagd faner limmat med fenollim	$75 < RH_{krit} \leq 80$
Spånskiva (12 mm)	Tillverkad av sågspån som blandas med lim och pressas till skivor	$80 < RH_{krit} \leq 85$
Tunn träfiberskiva (3,2 mm)	Tillverkad av trämassa som under högt tryck pressats samman. Träets eget lignin är bindemedel. Har två olika sidor, en porös och en hård. Det är den hårdare som studerats	$85 < RH_{krit} \leq 90$
Våtrumsgips (13 mm)	Skivan består av en kärna av gips som är klädd med ett kartongskikt. Det är detta skikt som har studerats	$90 < RH_{krit} \leq 95$
Trä (gran, mogen splint, 8 mm), Gran1	Splintved från gran från norra Sverige beskrivet i [25]	$75 < RH_{krit} \leq 80^*$
Trä, Gran 2	Brädor (22x95 mm) av obehandlad finsågad gran, inköpt hos två olika byggvaruhandlare i oktober 2014	$85 < RH_{krit} \leq 90^{**}$

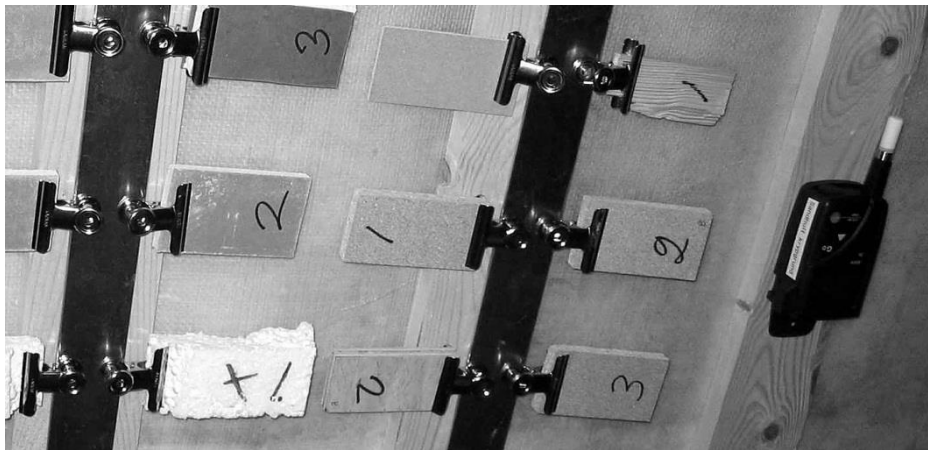
\*detta värde är en uppskattning baserad på erfarenheter från tidigare provningar

\*\* detta värde har tagits fram i projektet

## 4.2 Fältprovningar

### 4.2.1 Provplatser och exponering av prover

Materialproverna exponerades i olika konstruktioner och byggnadsdelar under knappt tre år. Provplatserna valdes så att det ingick både sådana ställen där vi förväntade oss att mögel snabbt skulle börja växa och sådana som förväntades vara så pass torra att inte mögel skulle uppstå under exponeringstiden. Proverna placerades i klämmor av rostfritt stål, som i sin tur var monterade på lister av aluminium, se Figur 7. Dessa monterades sedan på blindbotten i krypprunder och på insidan av taket på vindar.



Figur 7. *Montering av provbitar i studien. Denna bild är från en tidigare studie men tillvägagångssättet var detsamma i denna studie.*

Sju prover av varje material placerades på varje provplats. Några gånger per år togs proverna ned för mikrobiologisk analys (se 4.2.3). Målet var att analyserna av proverna från alla platser skulle göras ungefär samtidigt. Av olika praktiska skäl och omständigheter var detta inte möjligt. Antalet månader som proverna exponerats för klimatförhållandena på respektive provplats varierar därför, se Tabell 2. Proverna exponerades i närmare tre år med start från den 19 november 2014 och slut i början av september 2017 (exakt datum varierar mellan olika platser).

Tabell 2 Beskrivning av provplatser samt den tid (månader) som proverna varit exponerade innan de analyserades vid respektive analystillfälle (A1-A8)

Platsnr	Ort	Typ av konstruktion	Ansvarig	Tid (månader) som proverna exponerats innan analys							
				A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
1	Lund	Vind, äldre institutionsbyggnad	LTH	4	5	9	15	23	*	29	33
2	Kungälv	Krypgrund enfamiljshus	RISE	3	5	9	14	21	26	29	*
3	Lund	Fristående trädgårdsförråd	LTH	4	5	9	15	23	*	29	33
4	Borås	Vind, kontorsbyggnad	RISE	3	5	9	13	21	26	31	34
5	Lund	Vind, tom skolbyggnad	LTH	4	5	9	15	**	**	**	**
6	Borås	Plintgrund utomhus, enfamiljshus	RISE	3	5	9	*	*	*	30	*
7	Malmö	Vind, flerfamiljshus	LTH	4	5	9	15	23	*	29	33
8	Borås	Vind, kontorsbyggnad	RISE	3	5	9	13	22	25	31	34
9	LTH crawlspace	Krypgrund, testhus	LTH	4	5	9	15	22	*	29	33
10	Hultafors	Vind, enfamiljshus	RISE	3	5	9	13	*	26	30	34
11	LTH attic	Vind, testhus	LTH	4	5	9	15	23	*	29	33
12	Kungälv	Krypgrund, enfamiljshus	RISE	3	5	9	14	21	26	29	*

\* Ingen analys gjordes

\*\* Prover och loggers har plockats bort av fastighetsägare vid rivning och data finns inte efter detta

## 4.2.2 Mätning av fukt och temperatur

RF och temperatur på varje provplats registrerades varje timme med fältgivare (Testo 177-H1). Dessa var placerade bredvid proverna enligt Figur 6 för att säkerställa att det uppmätta klimatet var så likt som möjligt som det som proverna exponerades för. En givare placerades på varje testplats.

Fältgivare för mätning av RF är ofta behäftade med mätfel. Innan givarna placerades på sina respektive platser kalibrerades de därför i klimatskåp (CTS C-20/350, CTS GmbH, Hechingen, Germany) vid olika temperaturer och RF. Detta gjordes på RISE och kalibreringen gjordes mot referensgivare (Vaisala) som kalibrerats på ett ackrediterat laboratorium.

Av erfarenhet vet vi att fältgivare kan driva under fältexponering, det vill säga mätfelet blir större med tiden [26]. Därför kalibrerades också givarna efter exponering. Denna genomfördes vid olika temperaturer och RF i en kalibreringsutrustning (Thunder 2500, Thunder Corp., Albuquerque NM, USA) vid Byggnadsmaterial LTH. Anledningen till att kalibreringen utfördes på LTH var att kalibreringsutrustningen vid RISE inte var tillgänglig, på grund av tekniskt underhåll, vid projektets slut.



Kalibreringen gjorde det möjligt att justera de uppmätta värdena för RH med korrikeringsfaktorn från kalibrering (referens RF minus uppmätt RF). En multipel regression utfördes, och både temperatur och RH inkluderades. Varje sensor gav sedan en ekvation som användes för att justera de uppmätta värdena. Detta gjordes för både kalibreringen före och kalibreringen efter.

Vid jämförelse mellan RH-resultaten från kalibreringarna före och efter mätningarna hade alla sensorer hade drivit, i olika grad, så att de visade högre värden efter exponering än tidigare exponering i fält. De uppmätta värdena behövde därför justeras ytterligare. Driften (som antogs vara konstant under exponeringsperioden) uppskattades genom att beräkna skillnaden mellan kalibreringsfel före och efter mätning i fält. Genom att dividera denna skillnad med summan av antalet mätningar erhöll vi ett värde för driften vid varje loggad tid, den sk "driftfaktorn" [26].

Det faktiska värdet av RF vid varje tidpunkt beräknades för varje fältgivare genom att använda ekvationen erhållen från multipelregressionen av kalibreringen före och ett tillagt värde på driftfaktorn, enligt

$$RF_{justerad} = a_i + b_i \cdot RF_{fältgivare} + c_i \cdot T_{fältgivare} + \gamma \cdot t \quad (3)$$

där  $a-c$  är parametrar från den multipla regressionen för varje logger från kalibrering före fältmätningarna,  $RF_{fältgivare}$  och  $T_{fältgivare}$  är uppmätt RH (%) och temperatur (°C),  $\gamma$  är driftfaktorn, samt  $t$  är tiden.

Den utvidgade mätosäkerheten för varje mätning i fält beräknades genom att beakta variansen vid den multipla regressionen ( $s$ ), referenssensorns mätosäkerhet ( $u_{ref}$ ), mätosäkerheten vid kalibreringen ( $u_{kal}$ ) samt mätosäkerheten för justering av drift ( $u_d$ ). Den utvidgade mätosäkerheten ( $U$ ) beräknades genom att multiplicera summan av mätosäkerheterna enligt (4) med en täckningsfaktor  $k=2$  (5) vilket motsvarar en konfidensgrad på 95 %.

$$u = \sqrt{s^2 + u_{ref}^2 + u_{kal}^2 + u_d^2} \quad (4)$$

$$U = k \cdot u \quad (5)$$

### 4.2.3 Mikrobiologisk analys

Några gånger per år, enligt Tabell 2, togs proverna ned från provplatserna för mikrobiologisk analys. Ytan som exponerats mot den fria luften vid varje provplats analyserades under stereomikroskop vid  $\times 40$  förstoring.

Både mögelpåväxt synlig för blotta ögat och den som bara var synligt under mikroskopet bedömdes enligt en femgradig skala där 0=ingen påväxt, 1=mycket lite påväxt, 2=tydlig, etablerad påväxt, 3=kraftig fläckvis påväxt och 4=påväxt över hela ytan. Bedömningen gjordes i enlighet med [14] och finns också beskriven i [11]. Påväxten anses etablerad när den uppnått minst klass 2. Detta baseras på mätosäkerhetsbedömningar som gjordes i [7], där vi kunde konstatera att graden av mätosäkerhet för bedömning av klass 1 är för hög. Dessutom anses denna grad vara acceptabel i byggnader.

## 4.3 Laboratoriestudier av mögeltillväxt

### 4.3.1 Metodik

Prover av materialen beskrivna i avsnitt 4.1 har exponerats för olika klimat (RF och temp) på RISE i Borås. Metodiken följer SP metod 4927 [13] och SIS TIS 412 [14]. Denna innebär att en lösning med sporer från sex olika mögelsvampar, som är vanligt förekommande i byggnader och vars klimatkrav (RH, temperatur) för optimal tillväxt varierar, sprayas på provkropparna. Dessa inkuberas sedan i klimatskåp vid bestämd RF och temp och analyseras med avseende på mögelpåväxt på samma sätt som beskrivs i avsnitt 4.2.3.

Fyra olika grupper av provningar genomfördes, vars syfte var att svara på olika frågeställningar, enligt Tabell 3. Under inkuberingstiden loggades RF och temperatur i skåpen var 12 minut med externa kalibrerade givare (Vaisala). Efter provperiodens slut beräknades medelvärdet av mätningarna samt den utvidgade mätosäkerheten ( $U_c$ ) för varje provning. Det senare görs genom att summera mätosäkerheten för varje givare ( $u_{cal}$ ) samt mätosäkerheten från mätningarna (standardavvikelsen  $s$ ) enligt ekvation (6) och sedan multiplicera detta med en täckningsfaktor  $k=2$  vilket motsvarar en konfidenzgrad på 95 %, ekvation (7).

$$u_c = \sqrt{s^2 + u_{cal}^2} \quad (6)$$

$$U_c = k \cdot u_c \quad (7)$$

Tabell 3 Grupper av försök för att prova tillväxt av mögel på byggnadsmaterial i laboratorium

Syfte	Inkuberingsklimat (målvärden)	Material som provades
Studera tillväxt vid låga temperaturer samt verifiera $RF_{krit}$ vid temp under 10 °C.	95% RF, 5 °C 90% RF, 5 °C 85% RF, 5 °C	våtrumsgips, hård träfiberskiva, kryssfanér, spånskiva, gran1 (nysågade ytor), gran2, glasfiberfilter doppade i maltlösning
Studera om det lägsta $RF_{krit}$ är lägre än 75%?	71,5% RF, 22 °C	plywood, spånskiva, gran 1 (nysågade ytor), glasfiberfilter doppade i maltlösning
$RF_{krit}$ för Gran 2 (samt verifiera tidigare provningar)	80% RF, 22 °C 85% RF, 22 °C 90% RF, 22 °C	gran2, glasfiberfilter doppade i maltlösning
Hur påverkar fluktuerande RF tillväxten?	Cyklar med 90% RF i 12h och 60% RF i 12 h, 22 °C Cyklar med 90% RF i 1 vecka och 60% RF i 1 vecka, 22 °C	Våtrumsgips, hård träfiberskiva, kryssfanér, spånskiva, gran1, gran2, glasfiberfilter doppade i maltlösning

### 4.3.2 $RF_{krit}$ vid låg temperatur

Fältstudierna utvärderades i början av projektet genom att använda GLC-modellen (3.2). Vi såg då att mögel började växa på några av proverna vid ett par provplatser även då det varit relativt kallt och RF var under  $RF_{krit}$  för materialet. Frågan uppkom i projektgruppen om det är så att de  $RF_{krit}$  så som det skattas enligt modellen, ligger för högt vid

låga temperaturer. Därför bestämde vi att prova det kritiska fuktillståndet vid lägre temperaturer än 10 °C, vilket är den lägsta temperatur som det verifierats vid tidigare försök [26].

Det bör i sammanhanget noteras att i senare delen av fältprovningarna kunde vi konstatera att det varit en felbedömning av mögelpåväxten på de prover som hade oväntade resultat - ingen etablerad påväxt fanns på något av provena. Försöket kommer redovisas och diskuteras mer i detalj i [5].

### 4.3.3 Lägsta $RF_{krit}$

Generellt anser man att 75% RH vid rumstemperatur är den lägsta nivån för att mögel överhuvudtaget ska kunna växa på byggnadsmaterial, dvs det lägsta  $RF_{krit}$  är 75%. För att verifiera detta genomförde vi en provning vid lägre RF. Vi valde 70% RF som mål RF för denna lägre nivå, då det finns forskare som menar att t ex plywood (plywood) kan mögla vid denna nivå samt för att det följer metoden för kritiskt fuktillstånd med målRF med 5 % intervall (se avsnitt 3.13.1).

### 4.3.4 $RF_{krit}$ trä

Den ena typen av virke, Gran2, som användes i denna studie visade sig under tiden för fältprovningar vara oväntat tålig för relativt höga fuktnivåer, medan det andra virket (Gran1, mogen gransplint) var oväntat mögelbenäget enligt GLC-modellen. Av erfarenhet och från tidigare provningar vet vi att vissa typer av trä kan mögla vid relativt lågt RF, 75-80%, men samtidigt att det finns virke som kan stå emot mögelväxt även vid RF så högt som 90% RF vid 22 °C [27]. För att kunna utvärdera fältstudierna och ge input till m-modellen gjordes därför en provning kritiskt fuktillstånd av Gran2.

### 4.3.5 Tillväxt vid fluktuerande RH

I en tidigare studie [8] har vi undersökt mögeltillväxt på trä vid fluktuerande RF (mellan 90% och 60%) och jämfört det med konstanta förhållanden. Varierande RF medförde långsammare tillväxt och dessutom påverkades tillväxten mer om variationerna mellan de gynnsamma och ogynnsamma förhållandena var längre (1 vecka) än om varaktigheten av dessa förhållanden var kort (12 h).

I detta projekt ville vi göra om försöket med material vars kritiska fuktillstånd var känt för att undersöka om det även har betydelse hur fuktigt det är, det vill säga om skillnaden mellan  $RF_{krit}$  och RF är stort. Är då påverkan av fluktuerande förhållanden annorlunda än om variationen ligger nära det kritiska fuktillståndet? Dessutom ville vi prova m-modellen mot dessa fluktuerande förhållanden samt jämföra resultaten mot kalorimeterstudier (se 4.4). Försöket kommer att redovisas och diskuteras mer i detalj i [6].

## 4.4 Kalorimeterstudier

Aktiviteten av mögelpåväxt mättes med två isoterma kalorimetrar vid Byggnadsmaterial LTH, en TAM Air (Thermometric AB; nu TA Instruments, New Castle DE, USA) och en I-Cal Flex M (Calmetrix, Needham MA, USA). Isoterm kalorimetri är en metod som kan användas för att kvantifiera organismers aktivitet då metoden mäter den producerade värmen när organismers ämnesomsättning. Isoterm kalorimetri är därför ett sätt att

direkt och kontinuerligt mäta svampens aktivitet som funktion av olika parametrar (temperatur, RF etc) utan att förstöra provet och svampen [28, 29]. I detta projekt ville vi undersöka svampens återhämtning efter torkperioder.

Principen för kalorimetermätningarna är följande:

1. Tunna (0,5 mm) fanérbitar av gran (mogen splint) användes.
2. Proverna sprayas med sporslösning
3. Proverna torkas till 60% RF.
4. Proverna fuktas upp till 90% RF
5. Proverna placeras i kalorimetern
6. Mätning av värmeavgivningen sker kontinuerligt tills konstant nivå av värmeavgivning (svampaktivitet) uppnås
7. RF i proverna mäts
8. Proverna torkar till 60% RF
9. Proverna mäts kort i kalorimetern (resultatet bör ligga nära nollnivån)
10. RF i mäts proverna
11. Proverna fuktas upp till 90% RF
12. Proverna placeras i kalorimetern
13. Eventuell återhämtningen av mögelaktivitet mäts i kalorimetern
14. RF mäts i proverna

Som beskrivs i avsnitt 5.3, så fungerade inte ovanstående principiella metod fullständigt, utan ytterligare uppfuktningar och tillsats av näring fick göras för att kunna få tydliga resultat. De använda procedurerna är beskrivna i samband med de olika resultaten.

## 4.5 Utvärdering av m-modellen

M-modellen har utvärderats med både laboratorie- och fältmätningar. I båda dessa typer av mätningar så mäts temperatur och RF kontinuerligt, medan mögelpåväxten bedöms vid diskreta tillfällen. Vi har kört m-modellen med de mätta klimatdata och utvärderat modellen genom att jämföra dess predikteringar ( $m$ -värdet) med mögelbedömningarna.

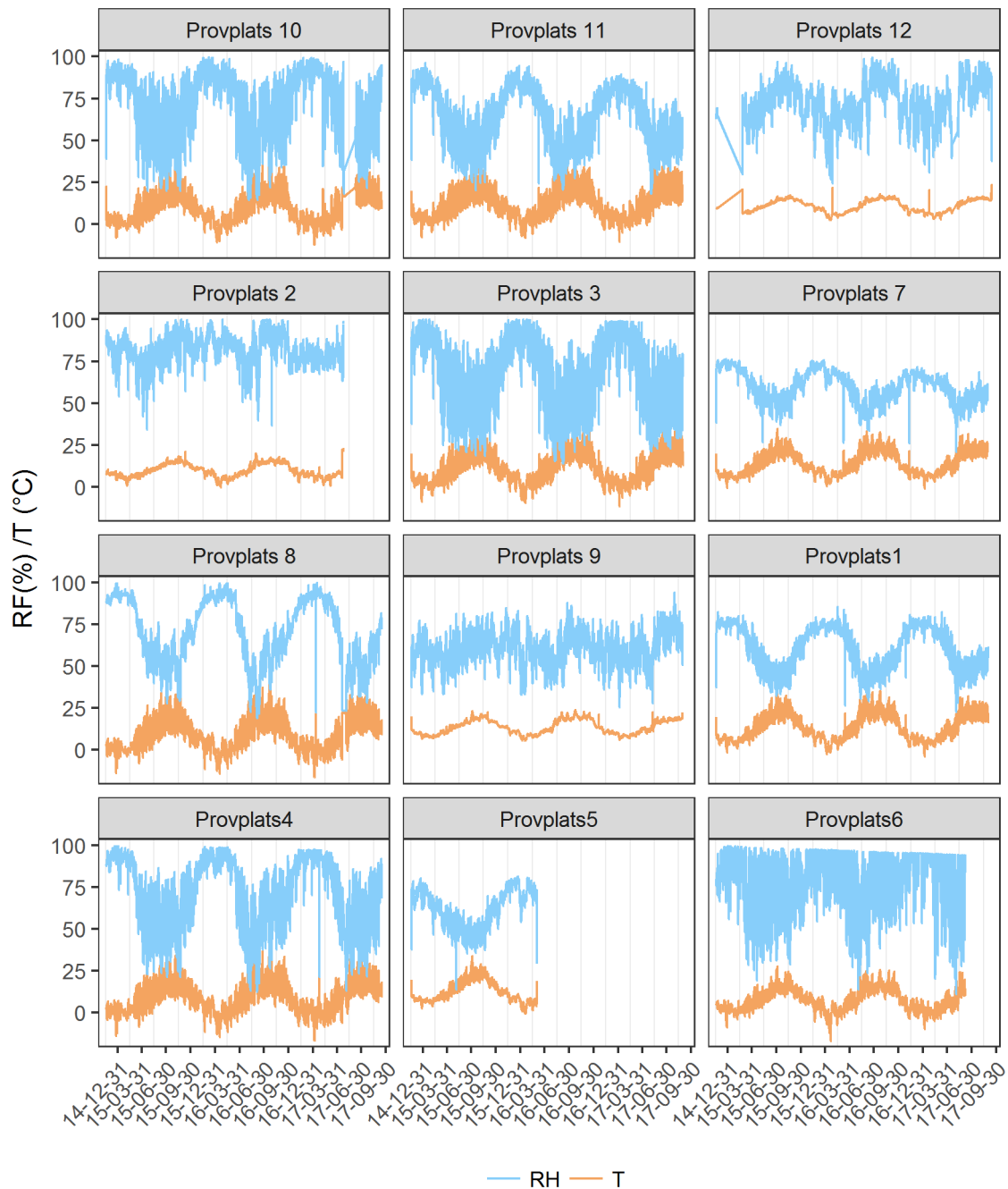
## 4.6 Utvärdering av GLC-modellen

Laborariestudierna har delvis syftat till att verifiera att de begränsningskurvor (ekvation (1) och (2) på sidan 11) som används i GLC-modellen stämmer överens med laboratorieresultat. Dessutom har risken för mögelväxt på materialen i laboratorieklimat och fältmätningar predikterats med GLC-modellen och utfallet jämförts med resultat från de mikrobiologiska analyserna, på samma sätt som i [12]. Förutom att ta hänsyn till om begränsningskurvorna överskrids har även tiden innan påväxt uppkommit beaktats och jämförts med resultat från laboratorieprovningar.

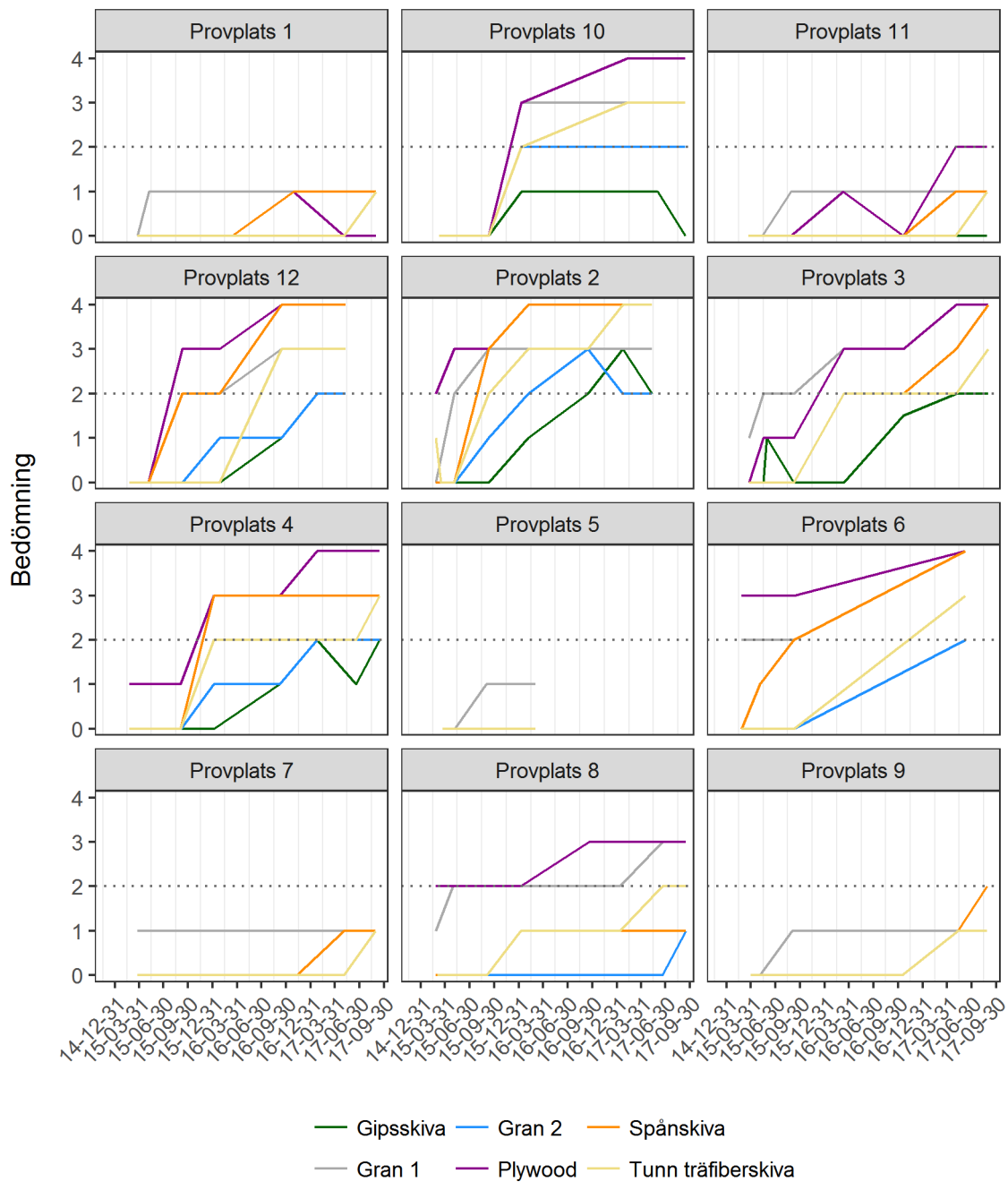
# 5 Resultat och diskussion

## 5.1 Fältmätningar

Resultatet från fältmätningarna (RF och temperatur) visas i Figur 7 och resultaten från de mikrobiologiska analyserna visas i Figur 8.



Figur 7 Mätningar av RF (kalibrerade data) och temperatur på de olika testplatserna.



Figur 8 Resultat av mikrobiologiska analyser, medianvärdet från bedömningar av sju prover enligt skalan 0-4 (se avsnitt 4.2.3). Den horisontella streckade linjen markerar median=2, vilket är den nivå då mögelpåväxten betraktas som säkert etablerad [11]. Att medianen varierar mellan klass 0 och klass 1 med tiden är en följd av mätosäkerheten vid denna nivå.

## 5.2 Laboratorieprovningar av tillväxt

### 5.2.1 Lägsta $RF_{krit}$

Det fanns ingen påväxt på något av proverna som exponerats för 71,5% RF under 32 veckor. Vi har tidigare visat att det känsligaste materialet som används i denna studie, plywood, får påväxt vid 75% RF [11] och det kritiska fukttilståndet är därför  $71,5\% < RF_{krit} \leq 75\%$ .

I försöket ingick också glasfiberfilter som doppats i maltagar innan spörlösningen tillfördes. Dessa utgör ett optimalt näringssubstrat och ingår alltid vid provning av kritiskt fukttilstånd [9,10], som en kontroll på att klimatet är gynnsamt för mögelväxt. Efter 32 veckors provning vid 71,5% RF fanns inte någon påväxt på detta material. Av detta drar vi slutsatsen att inte heller de mest känsliga byggnadsmaterialen på marknaden kan mögla vid denna fuktnivå och att uppgifterna om att det lägsta  $RF_{krit}$ , som går att mäta med god säkerhet, är 75 % stämmer.

### 5.2.2 $RF_{krit}$ för trä

Ingen etablerad påväxt kunde konstateras på något av proverna av Gran2 vid 80% RF eller 85% RF vid 22 °C. Däremot fanns etablerad påväxt efter 12 veckor på proverna vid 90% RF. Alltså är  $85\% < RF_{krit} \leq 90\%$  för detta material.

### 5.2.3 $RH_{krit}$ vid låg temp

I Tabell 4 redovisas resultaten från provningar vid ca 5 °C. Den första kolumnen visar målklimat, den andra och tredje kolumnen visar medelvärden av de uppmätta klimaten (RF och temperatur) i klimatskåpen under inkuberingstiden. För varje material vid den aktuella temperaturen beräknades det övre och lägre  $RF_{krit}$  enligt ekvation i avsnitt 3.2. Påväxt förväntades om dessa värden överskreds i enlighet med GLC-modellen (3.2).

Att hålla en konstant hög RF vid så låg temperatur som 5 °C visade sig vara svårt, vilket åskådliggörs av den utvidgade mätosäkerheten som är 3,4-3,8% RF, där det största bidraget utgörs av mätosäkerheten i mätningarna på grund av att RF varierade runt mål RF under inkuberingstiden. Detta klimat ligger också egentligen utanför det som klimatskåpen är konstruerade för.

Slutsatsen är att det beräknade kritiska fukttilståndet vid 5 °C (ekvation i avsnitt 3.2) stämmer väl överens med verkligheten, om även mätosäkerheten tas i beaktande.

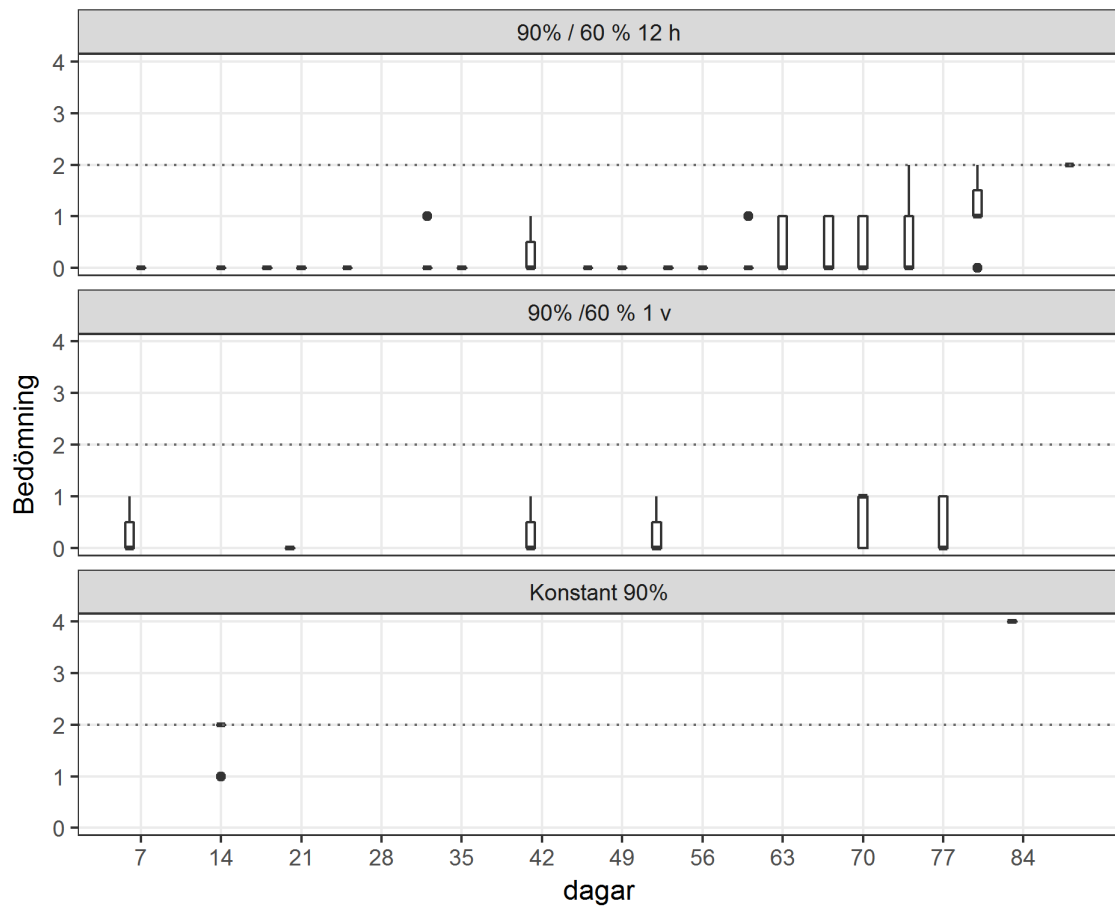
Tabell 4 Sammanfattning av resultat från provningar vid låg temperatur. I kolumnen RF redovisas medelvärde av uppmätt RF i klimatskåpet  $\pm$  mätosäkerheten  $U$  enligt ekvation (7) i avsnitt 4.3.1.

Mål RF/ Mål T	Uppmätt RF	Uppmätt temp	Total tid	Material	Beräknad RHkrit (%) undre	Beräknad RHkrit (%) övre	Resultat	Stämmer med förväntat resultat
95%, 5 °C	93,4 $\pm$ 3,4%	5,5 °C	12v	Plywood	>93	$\leq$ 95	Påväxt	Ja
				Spånskiva	>95	$\leq$ 97	Ingen påväxt	Ja
				Masonite	>97	$\leq$ 99	Påväxt	Nej
				Gips	>97	$\leq$ 100	Ingen påväxt	Ja
				Gran2	>97	$\leq$ 99	Ingen påväxt	Ja
				Gran1	>93	$\leq$ 95	Påväxt	Ja
90%, 5 °C	89,4 $\pm$ 1,4%	4,7 °C	12v	Plywood	>94	$\leq$ 96	Påväxt	Nej
				Spånskiva	>97	$\leq$ 98	Ingen påväxt	Ja
				Masonite	>99	$\leq$ 100	Ingen påväxt	Ja
				Gips	$\leq$ 100		Ingen påväxt	Ja
				Gran2	>99	$\leq$ 100	Ingen påväxt	Ja
				Gran1	>93	$\leq$ 95	Ingen påväxt	Ja
85%, 5 °C	80,8 $\pm$ 3,8%	5,3 °C	18v	Plywood	>93	$\leq$ 95	Ingen påväxt	Ja
				Gran1	>93	$\leq$ 95	Ingen påväxt	Ja

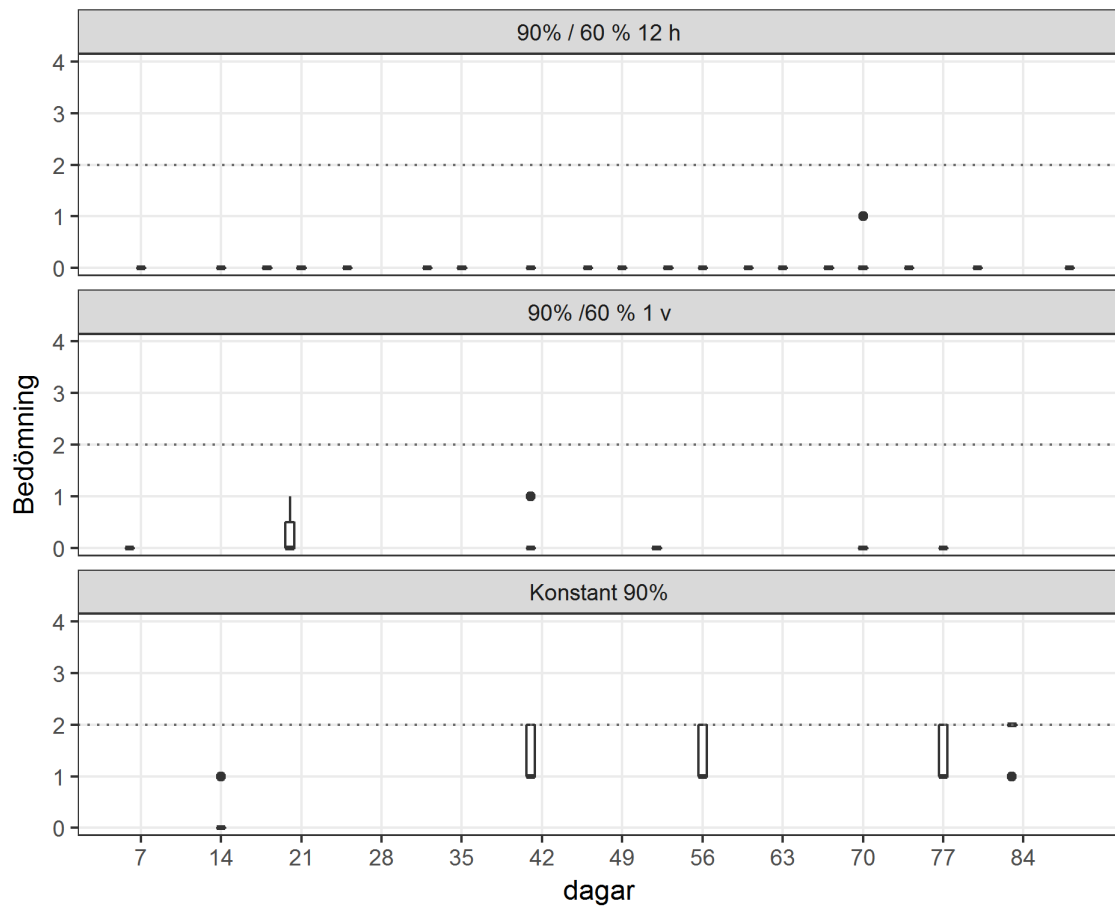
## 5.2.4 Tillväxt vid fluktuerande klimat

I Figurerna 9-11 visas resultaten från laboratorieprovningarna vid fluktuerande klimat. Tidigare studier [8] av provningar av träprover på samma sätt som i denna studie visade att det inte växte på prover där RF varierade med en periodtid på en vecka och att det växte på prover där variationen var 12 h och också att tillväxten då var långsammare jämfört med om RH hölls konstant vid 90%. I denna studie kan vi se samma mönster för spånskivor, se Figur 9. På Gran2, se Figur 10, fanns inte etablerad påväxt i något av de varierande klimaten, medan etablerad påväxt uppkom i det konstanta klimatet. Skillnaden kan spegla inverkan av det kritiska fuktillståndet, som för spånskiva är lägre än för Gran2. För plywood är inte mönstret det förväntade, se Figur 11. Där möglade det redan inom en vecka i det klimat där RF varierar veckovis medan det tog mellan 35 och 42 dagar innan mögel etablerade sig i det klimat där variationerna var 12 h. I denna studie provades inte plywood vid konstant RF 90%, men samma material har provats i en tidigare studie [11] och etablerad påväxt uppkom då inom en vecka.

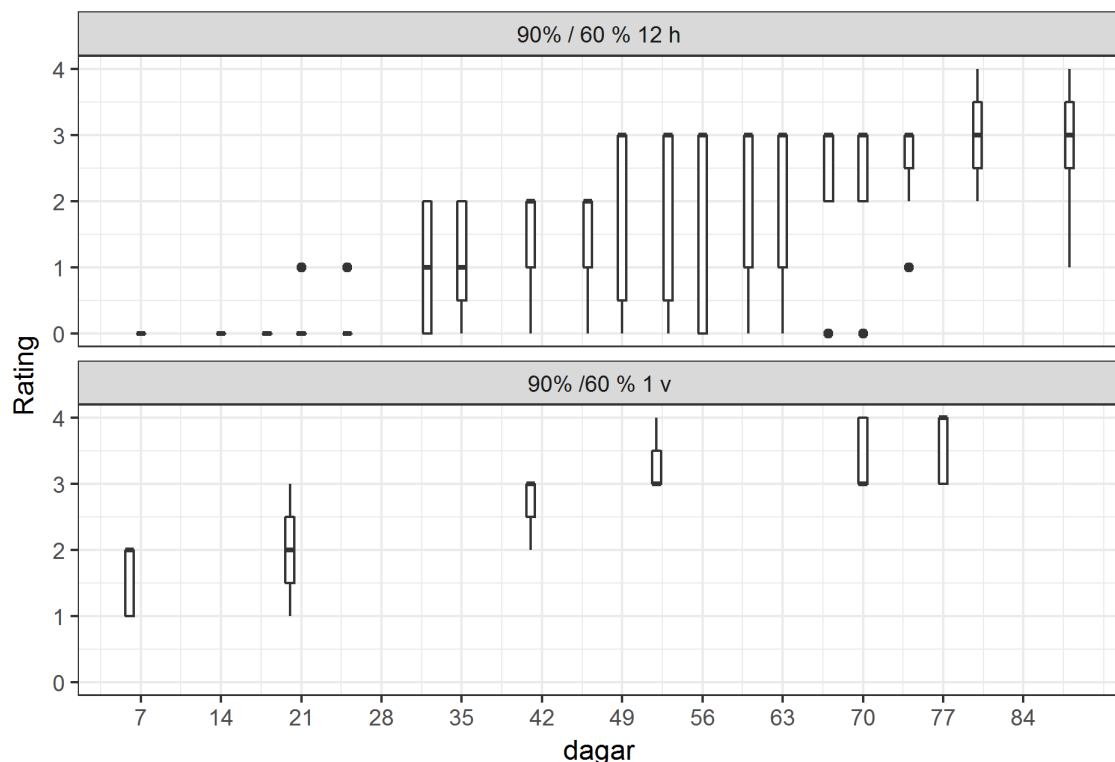




Figur 9. Påväxt på prover av spånskiva som inkuberats vid varierande RF och vid ett konstant referensklimat. Påväxten betraktas som etablerad då medianen av bedömningarna (Rating) > 2, vilket motsvarar den tjocka, horisontella linjen i varje box.



Figur 10. Påväxt på prover av Gran2 som inkuberats vid varierande RF och vid ett konstant referensklimat. Påväxten betraktas som etablerad då medianen av bedömningarna är större eller lika med 2, vilket motsvarar den tjocka, horisontella linjen i varje box.



Figur 11 Påväxt på prover av kryssfanér som inkuberats vid varierande RF. Påväxten betraktas som etablerad då medianen av bedömningarna är större eller lika med 2, vilket motsvarar den tjocka, horisontella linjen i varje box.

## 5.3 Kalorimeterresultat

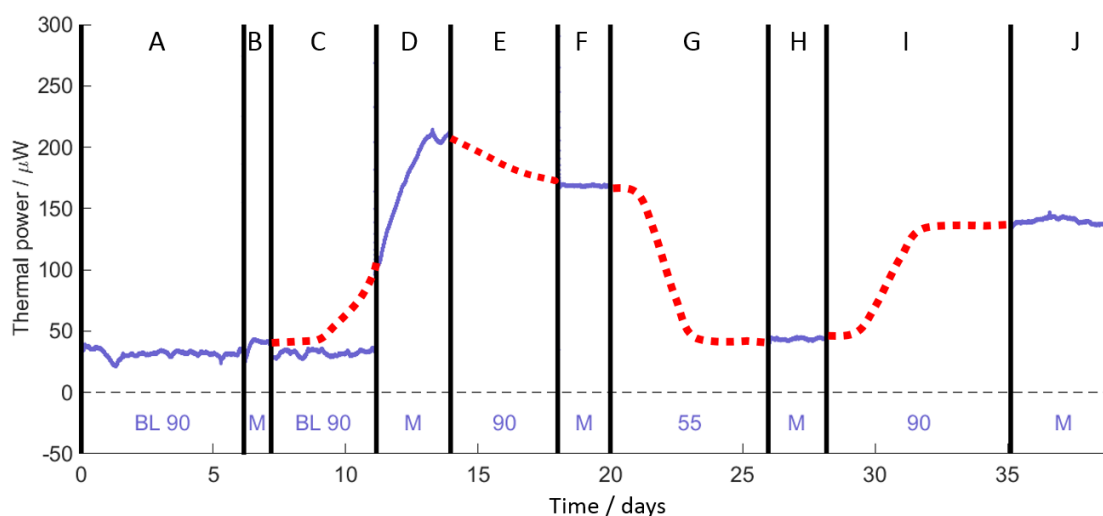
Det bestämdes att kalorimetrin skulle testa mögels förmåga att återhämta sig efter uttorkning-uppfuktning från 90% RF till 60% RF och tillbaka till 90% RF vid rums-temperatur. Detta är de RF-nivåer som användes vid labbförsöken (avsnitt 5.2) med varierande klimat. I en förstudie inokulerades med samma standardiserade sporrösning som användes vid laboriemätningarna (avsnitt 4.3). Resultatet i Figur 12 visar en nästan 40 dagar lång körning som har gjorts i följande steg:

- A. Här hålls provet (gran inokulerat med sporer) vid 90% RF i ett klimatskåp. Mätningen visar baslinjen i kalorimetern. Baslinjen är utsignalen med ett inert prov, i detta fall ca 30  $\mu$ W; observera att baslinjens läge beror på många olika faktorer (t ex hur väl elektronikens nollnivå är justerad och hur obalanserat ett generellt värme flöde genom kalorimetern är) och det som är intressant i denna typ av mätning är avvikelserna från baslinjen.
- B. Här gör vi en kort mätning med provet och ser att det fortfarande ligger nära noll aktivitet.
- C. Provet exponeras igen i klimatskåpet vid 90% RF. Mätning av baslinje igen.
- D. Här mäts provet under en längre tid och vi kan nu tydligt se en ökning av aktiviteten på grund av svampens tillväxt. Tillväxten verkar dock stanna av vid slutet av mätsteget, kanske för att näringsnivån börjar minska.

- E. Här är provet åter placerat i 90% RF (ingen kalorimetermätning).
- F. Provet mäts på igen. Nu ser vi en stabil aktivitetsnivå.
- G. Provet torkas ut i 55% RF (ingen kalorimetermätning).
- H. Här mäts aktiviteten i det torra provet. Den är nära noll eftersom svampaktiviteten har avstannat.
- I. Här är provet åter placerat i 90% RF för att fuktas upp (ingen kalorimetermätning).
- J. Här mäter vi slutligen aktiviteten på det uppfuktade provet och finner att den är något lägre än aktiviteten före uttorkningen.

Denna mätning och de andra 6 mätningarna som kördes samtidigt var lyckade såtillvida att vi kunde följa svampens tillväxt, såg en aktivitetsnivå nära noll innan uttorkningen, och kunde konstatera att vi hade en något lägre konstant nivå efter uppfuktningen än innan den. Det är också en framgång att vi har kunnat göra denna mätning på ett verkligt byggmaterial och inte på näringsrik agar.

Det som inte var så lyckat med denna mätning var att vi missade återhämtningen (den gissade rödstreckade kurvan i Figur 12). Målet med våra mätningar är ju att både kunna se hur snabbt återhämtningen sker och till vilken nivå.



Figur 12. Ett resultat från de senaste kalorimetermätningarna som förklaras i texten. De blålinjerna är resultat från kalorimetern medan de röda streckade linjerna är vår gissning av hur aktiviteten har sett ut när vi inte mäter på provet. Baslinjen (noll värmeeffekt, i detta fall ca 30  $\mu\text{W}$ ) är något osäker, men verkar ligga kring 35  $\mu\text{W}$ . Bilden tagen från vår presentation vid 13th Annual Meeting of the Northern European Network on Wood Science and Engineering (WSE2017) i Köpenhamn, september 28-29, 2017.

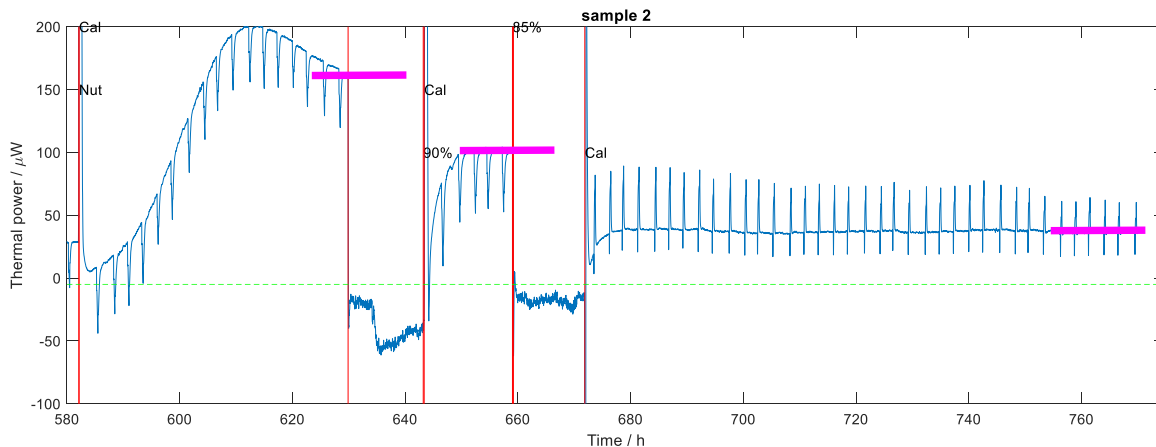
Efter ovanstående förförsök gjordes ett huvudförsöket med sammanlagt 16 prov av mogen gransplint på ca 0,5 mm och sedan inokulerats antingen med en blandad sporslösning eller med en sporslösning av *Penicillium rubens*. Dessa prov fuktades upp till ca 90% RF, och sedan något högre (93% RF) utan att mögeltillväxt kunde detekteras med kalorimetern. Vi tog då och fuktade upp proverna med vatten med tillsatt näring

(antingen maltextrakt eller avkok från provmaterialet). Uppfuktningen var till ca 50% fuktkvot. Vi fick då i samtliga fall en kraftigt ökad värmeutveckling som planade ut efter några dagar (vi kunde då också se mögel visuellt), då vi gjorde uttorkning till 60% RF och sedan uppfuktning till ca 90% RF. I inget fall kunde vi detektera återhämtning.

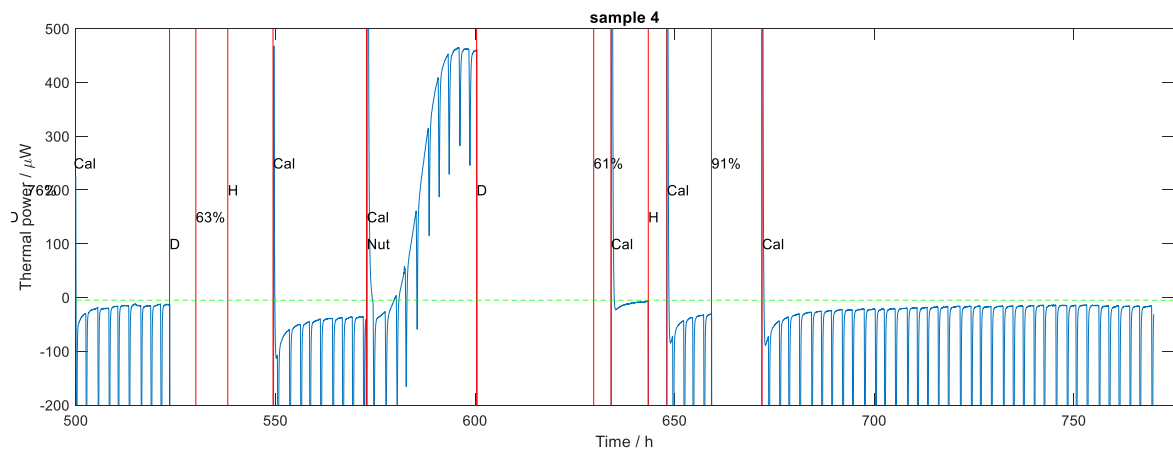
I dessa försök var uttorkning och uppfuktning betydligt effektivare och snabbare än i förförsöket.

Figurerna 13-17 visar utvalda resultat som ska tolkas på följande sätt:

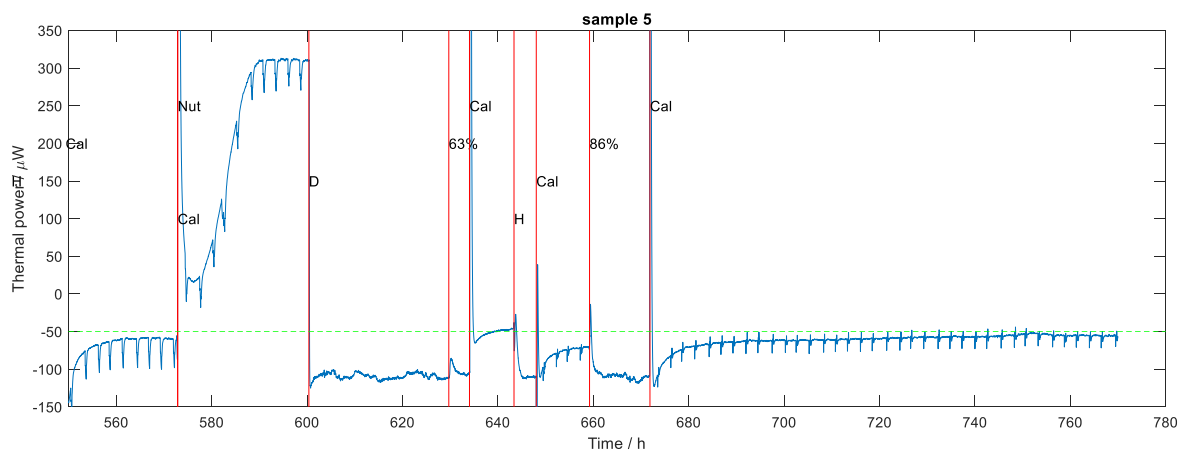
- Kurvorna visar värmeeffekten som funktion av tiden. Värmeeffekten är proportionell mot svampens respiration (syreförbrukning) och är ett mått på svampens aktivitet [28].
- De flesta kurvor visar korta/dalar (ca var tredje timma). Dessa är från luftningen av ampullerna för att svampen ska få syre. De prov som inte har toppar hade kontinuerlig luftning.
- I Figurerna 13-17 finns följande förkortningar: Nut=vatten och näring tillsattes; D=uttorkning vid 60% RF; H=uppfuktning vid cirka 93% RF; Cal=provet sätts i kalorimetern; XX%=RF i provet mättes till XX%.
- Den gröna streckade linjen i diagrammen är den ungefärliga baslinjen (dvs signalen då ingen värme produceras i kalorimetern).



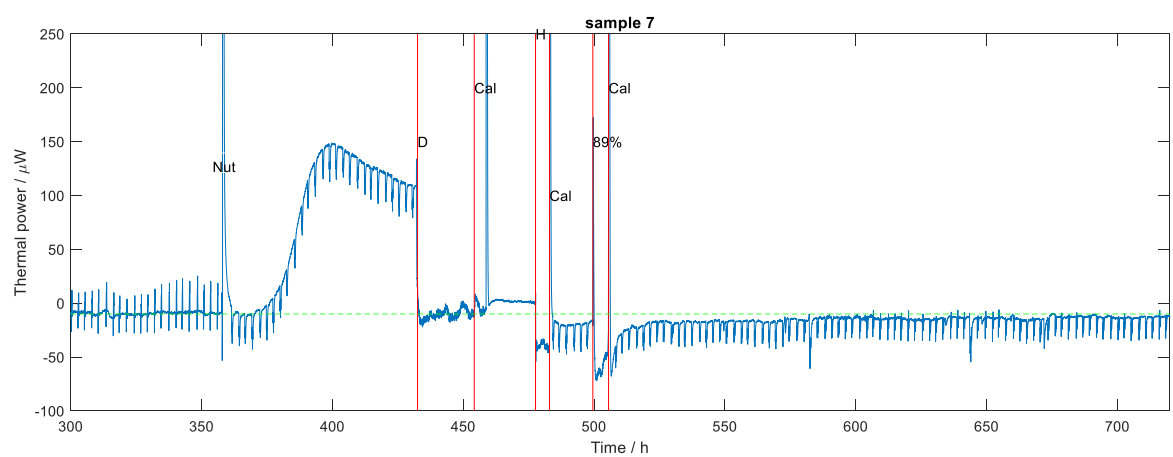
Figur 13. Ett exempel på ett försök då ett prov torkades stegvis. De magentafärgade linjerna visar aktiviteterna vid 100% RH, 90% RH och 85% RH [2].



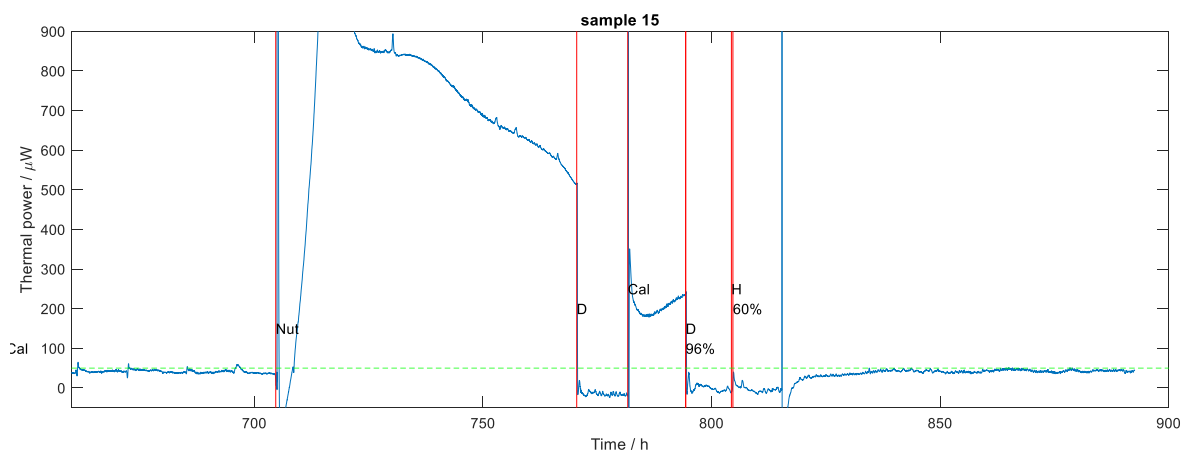
Figur 14. Resultatet av en uttorkning följt av en uppfuktning till 91% RF [2].



Figur 15. Resultatet av en uttorkning följt av en uppfuktning till 86% RF [2].



Figur 16. Resultatet av en uttorkning följt av en uppfuktning till 89% RF [2].



Figur 17. I detta exempel skedde uttorkningen i två steg (det var fortfarande ca halva aktiviteten efter första uttorkningen; RF mättes inte här och det var ingen uppfuktning) [2].

Vi vet inte vad det beror på att återhämtningen uteblev vid vårt huvudförsök, men inte vid vårt förförsök. En möjlig (men obevisad) anledning kan vara att uttorkningen och uppfuktningarna var betydligt snabbare i huvudförsöket. Både snabb uttorkning och snabb uppfuktning bör kunna leda till skador på mögelsvamparna eftersom svampen normalt ställer om metabolismen så att den är optimal för varje RF. Vid torka producerar t ex svampar (och många andra organismer) småmolekyler som sockerarter från större molkyler för att sänka vattenaktiviteten (RF) utan att organismen torkar i betydelsen "hårdnar". Småmolekylerna gör också att svampens molekylära struktur kan behållas om vattenhalten blir mycket låg. Det är troligt att processen att producera småmolekyler kräver en viss tid och att snabb uttorkning därför leder till större skador.

Även snabb uppfuktning kan vara skadlig eftersom den leder till snabbt vattenupptag som kan spränga mycelet om det inte har hunnit justera sina cellväggar till den nya vattenaktiviteten.

Observera att ovanstående förklaringar av det observerade fenomenet är spekulationer, som dock bör kunna kontrolleras i framtida försök.

## 5.4 Fältmätningar och GLC-modellen

GLC-modellen (3.2) användes för att prediktera om det finns "risk" att mögel växer på de olika materialen vid de olika provplatserna. Detta jämfördes sedan med resultaten från den mikrobiologiska analysen.

I Tabell 5 redovisas resultaten av analyser från de platser och material där GLC-modellen predikterat att det inte finns risk för påväxt. I samtliga fall stämde prediktion och verkligt utfall, det vill säga ingen mögelpåväxt förekom (dvs medianen av bedömningarna av 7 prover per material var <2).

Tabell 5 Förekomst av etablerad påväxt på prover på prover där GLC-modellen predikterat att det **inte** finns "risk" för påväxt. De grönmarkerade rutorna är de fall där det predikterade och verkliga utfallet överensstämde. De rutor som har en diagonal linje representerar fall där GLC-modellen predikterade att påväxt skulle uppkomma, resultaten redovisas i Tabell 6.

Plats	Plywood	Spånskiva	Tunn träfiberskiva	Gips	Gran1	Gran2
Provplats 1	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingick inte
Provplats 5	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingick inte
Provplats 7	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingick inte
Provplats 8				Ingen påväxt		
Provplats 9				Ingen påväxt	Ingen påväxt	Ingick inte
Provplats 11			Ingen påväxt	Ingen påväxt		Ingick inte

I Tabell 5 visas resultaten av analyser för de platser och material där GLC-modellen predikterat att det finns risk för påväxt. Överensstämmelsen med modellen var god (91%, det vill säga 40 av 44, fall stämde). För de material där det inte fanns påväxt har den sammanlagda tiden för gynnsamt klimat (RF över undre begränsningskurvan) varit kortare än den tid som det tog innan det kritiska fuktillståndet uppnåddes för materialet i laboratorium, se Tabell 6. Med kriteriet att även beakta denna tid så kan det konstateras att modellen även "fungerade" för dessa prover och överensstämmelsen var då 100 %.

Tabell 5. Förekomst av etablerad påväxt på prover (medianen av bedömning av 7 prover  $\geq 2$ ) på prover där GLC-modellen predikterat **risk för påväxt**. De grönmarkerade rutorna är de fall där det predikterade och verkliga utfallet överensstämde. De rutor som har en diagonal linje representerar fall där GLC-modellen predikterade att påväxt inte skulle uppkomma, resultaten redovisas i



Tabell . De orangefärgade rutorna är fall där det fanns överensstämmelse om även tiden beaktades.

Plats	Plywood	Spånskiva	Tunn träfiberskiva	Gips	Gran1	Gran2
Provplats 2	Påväxt	Påväxt	Påväxt			Ingick inte
Provplats 3	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Ingick inte
Provplats 4	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Påväxt
Provplats 5						Ingick inte
Provplats 6	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Påväxt
Provplats 7						Ingick inte
Provplats 8	Påväxt	Ingen påväxt <sup>1</sup>	Påväxt		Påväxt	Ingen påväxt <sup>2</sup>
Provplats 9	Påväxt	Påväxt	Ingen påväxt <sup>3</sup>		Påväxt	Ingick inte
Provplats 10	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Ingen påväxt	Påväxt	Påväxt
Provplats 11	Påväxt	Ingen påväxt <sup>4</sup>			Påväxt	Ingick inte
Provplats 12	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Påväxt	Påväxt

Tabell 6. Tid innan  $RF_{krit}$  uppmåddes som funktion of tiden som RF varit över den undre begränsningskurvan.

Indexnummer på prov i Tabell 5	Total tid (veckor) som RF varit högre än den undre begränsningskurvan	Kortaste tid (veckor) som det tog innan $RF_{krit}$ för materialet uppnåddes i laboratoriet [11]
1	1,4	6
2	0,2	6
3	0,1	11
4	0,7	6

## 6 Modellering, verifiering och förenkling av m-modellen

Grunderna i m-modellen har tidigare beskrivits av Skanska i ett konferenspaper [1]. I detta arbete utgick vi modellen som den var programmerad i Excel, samt från en intern Skanska-rapport. Efter att ha testat denna modell och olika förenklade varianter på simulerade data, labbdata och fältdata, gjordes följande förenklingar av den ursprungliga modellen [3, 30]:

- Metoden som används vid torra perioder för den första sänkningen av den summerade tiden för gynnsamma (fuktiga) förhållanden förenklades på ett sätt som endast marginellt ändrade resultaten. Anledningen till denna förenkling var att det bedömdes att den ursprungliga modellen både var svår att beskriva och att den hade alltför många parametrar med tanke på de begränsade data som den byggde på. Dock är det troligen så att denna funktion (sänkning vid torra perioder) är kritisk för funktionen hos mögelmodeller, så denna del kan behöva fortsatta studier.
- En parameter som justerade modellen vid temperatur under  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  togs bort. Denna parameter hade knappt någon inverkan på våra resultat.
- En säkerhetsfaktor togs bort. Detta gjordes inte för att det är fel att arbeta med säkerhetsfaktorer, utan för att resultaten kunde ändra sig väldigt mycket när man applicerade även en låg säkerhetsfaktor. Detta är ett problem inbyggt in m-modellen (och kanske även i andra mögel-modeller) när de ska hantera höga RF-nivåer. Detta diskuteras i artiklarna som skrivs om m-modellen [3, 4].

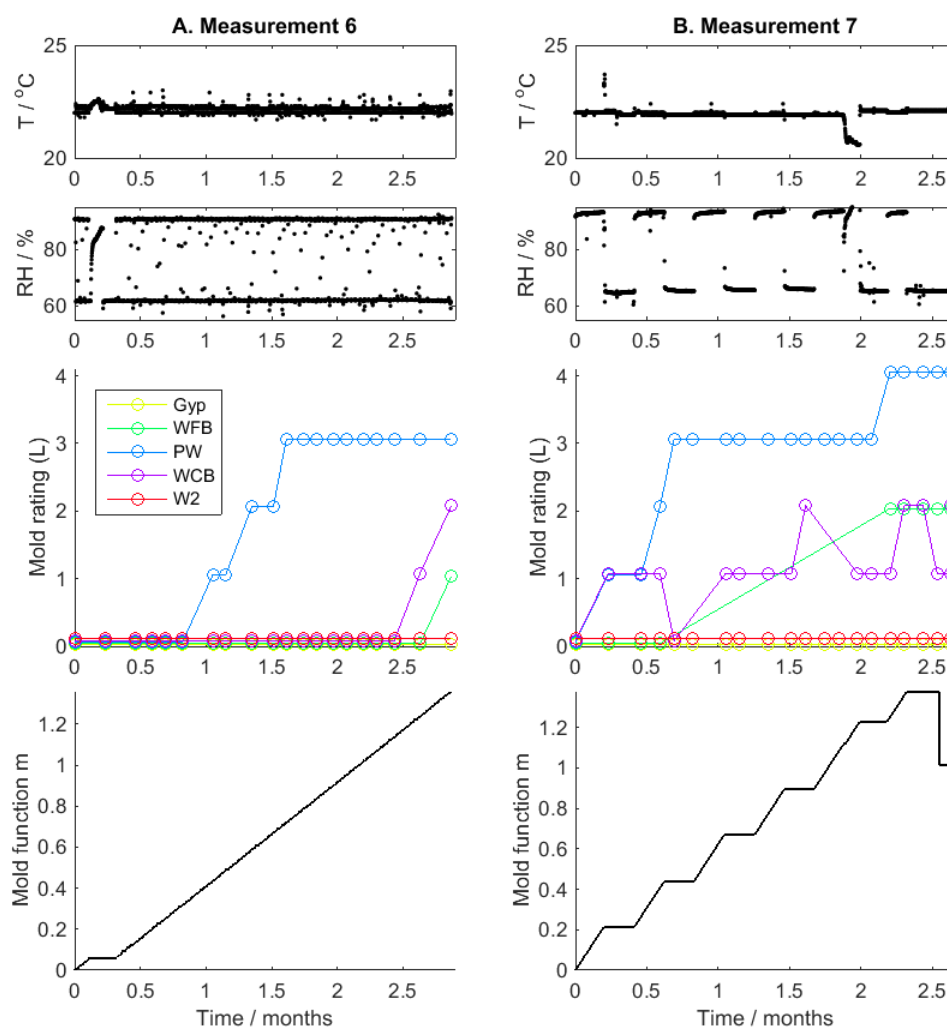
Den i projektet använda m-modellen beskrivs i referens [3]. Den har använts för att utvärdera resultaten från både labb- och fältstudier. Resultaten sammanfattas nedan; mer omfattande presentationer finns i artiklarna "The m-model for prediction of mold growth" (labbmätningar) och "A test of the m-model against field data" (fältmätningar). Huvudmålet med dessa utvärderingar var att se om det gick att ta fram kritiska *m*-värden (i artiklarna kallade "mold susceptibility *M*") för de testade materialen. I bakgrundsmaterialet till den ursprungliga m-modellen nämndes följande sådana värden (dessa värden är inverterade för att stämma med definitionen på *M* i artiklarna):

Mycket känsliga material:	0.6	(furusplint)
Känsliga material:	1	(träbaserade skivor, gran)
Halv-känsliga	4	(betong, glasull)
Okänsliga	17	(PUR)

Eftersom m-modellens isopleter bygger på Viitanens data [18] för konstanta klimat för det trämaterial som han använde (splintved av gran och furu), så motsvarar värdet 1 när just dessa material möglar (enligt det kriterium som han använde). PUR (polyuretan-skum) representerar en yta som det är svårt för mögel att växa på. Förutom den

pappklädda våtrumsgipsen tillhör de material som har testas i denna studie de två känsligaste klasserna.

Figur 18 ger två exempel på resultat från labbmätningarna vid varierande RF (notera att dessa exempel innehåller perioder då det blivit kortare fel i klimatkontrollen, men det gör inte så mycket eftersom klimatet som är indata till m-modellen är rätt uppmätt). Eftersom RF ligger lika länge på 60 och 90% i de två mätningarna, och tiderna under vilket det har varit 60% är för korta för att m-modellen ska minska nivåerna (detta sker först efter 1 vecka), är *m*-resultaten i stort sett desamma. Observera att det är motsvarande steg i *m* i den första mätningen som i den andra, men de är så snabba att de inte syns.



Figur 18. Resultat från två av labbmätningarna från referens [3]. I dessa två försök skiftade RF mellan två olika nivåer. Här är Gyp=våtrumsgips, WFB=tunn träfiberskiva, PW=plywood, WCB=spånskiva och W2=Gran2.

Observera att de uppmätta RF-nivåerna i Figur 18 är något olika vid de två mätningarna, och att även mindre skillnader som ligger inom felmarginalen för RF-mätningar kan ha

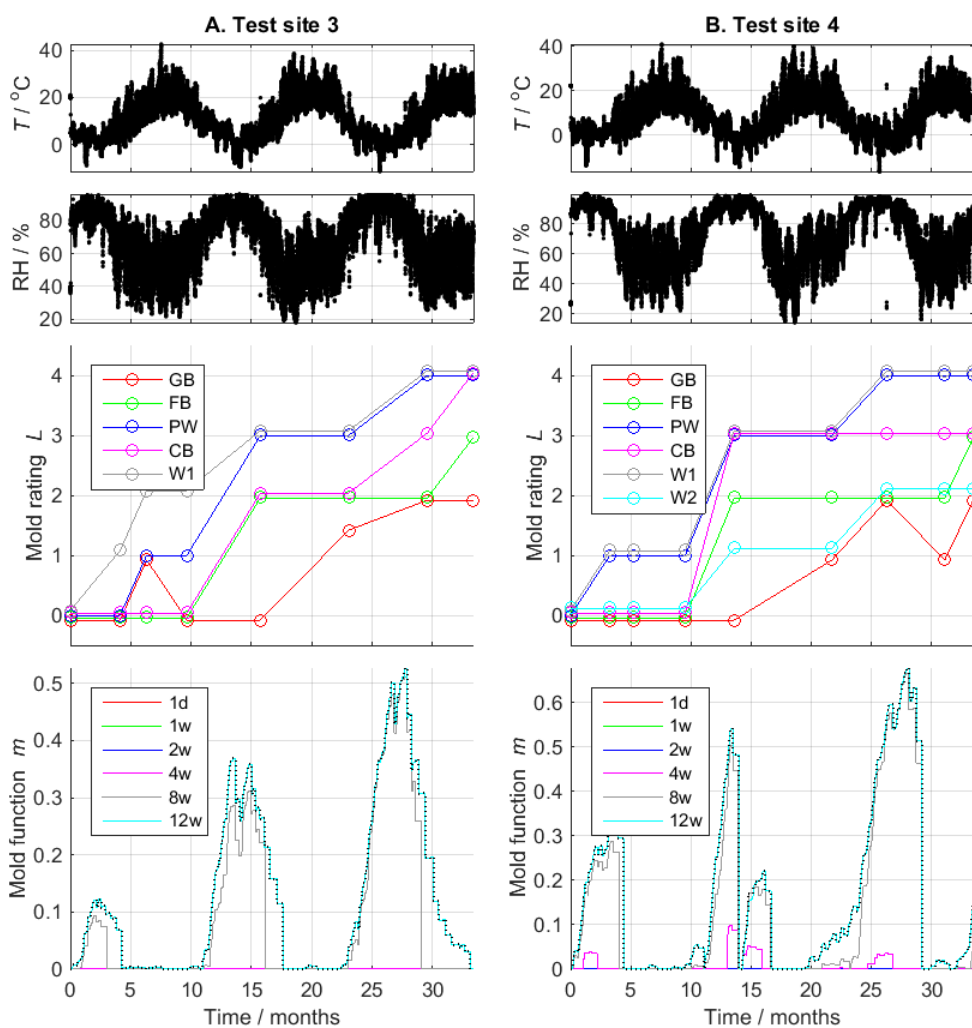
avgörande betydelse för resultatet hos laboratoriestudier (där RF-nivåerna kan ligga på samma nivåer under lång tid).

Utvärderingarna av labbstudierna, som huvudsakligen var vid konstanta klimat [3], visade att det grovt gick att gruppera de studerade materialen enligt följande ( $M$  är det kritiska  $m$ -värdet då ett material möglar):

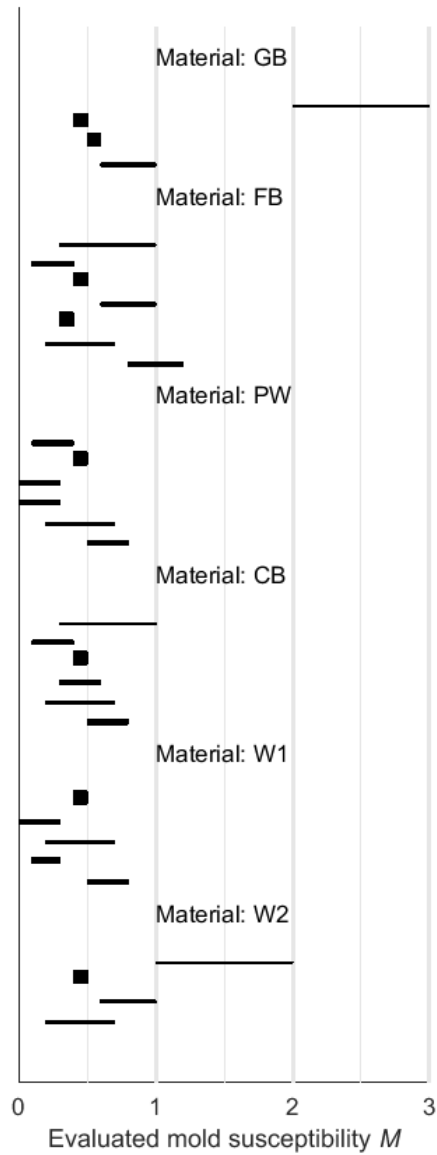
Plywood	$M < 0.5$
Fiberskiva, spånskiva	$M \approx 1$
Våtrumsgips	$M > 1.0$

Detta stämmer rätt bra med den indelning som Skanska använde för  $m$ -modellen, förutom för plywood som hamnar i den lägsta klassen.

Fältnätningarna var mer komplicerade att utvärdera än labbmätningarna och det gick inte att göra några klara bedömningar av  $M$  (kritiska  $m$ -värden) för de olika materialen. Figur 19 ger exempel på resultat från fältnätningarna och Figur 20 visar de olika intervall som  $M$  låg inom för de mätningarna som det gick att utvärdera detta från. Möjligtvis ligger värdena för plywood något lägre än för de andra materialen, men detta är osäkert. Positivt, ur modellens synvinkel, är att beräkningarna i nästan samtliga fall resulterar i  $M$ -värden som är 1 eller lägre (se Figur 19), vilket stämmer med resultatet från labbstudierna som redovisades ovan.



Figur 19. Två exempel på resultat från fältmätningarna utvärderade med *m*-modellen från referens [4]. GB=våtrumsgips, FB=träfiberskiva, PW=plywood, CB=spånskiva, W1=Gran1, W2=Gran2.



Figur 20. Utvärderade  $M$ -värden (kritiska  $m$ -värden) från de olika fältmätningarna för de olika materialen från referens [4] (GB=våtrumsgips, FB=träfiberskiva, PW=plywood, CB=spånskiva, W1=Gran1, W2=Gran2). Varje svart rektangel (de har samma area, så vissa syns som horisontella linjer) markerar ett  $M$ -intervall inom vilket  $M$  bör ligga enligt en utvärdering (ett material, en exponeringsplats) med  $m$ -modellen.

I referens [3] diskuteras olika anledningar till att det är svårt att validera  $M$ -värden med  $m$ -modellen på klimatdata. En anledning kan förstås vara att  $m$ -modellen inte helt kan modellera risk för mögel, men det finns flera andra problem, av vilka följande är särskilt viktiga:

- Det är svårt att mäta RF så bra som det skulle behövas för att testa mögelmodeller. Detta gäller framförallt vid höga RF. I referens [3] visas beräkningar med  $m$ -modellen utgående från fältdata där RF har ökat och minskats med 1 och 2 %-enheter. Dessa ändringar ligger helt inom den osäkerhet som man har vid RF-mätningar, men de kan ge stora förändringar i de beräknade  $m$ -värdena.
- Bestämningarna av hur mycket mögel det finns på materialytorna har en osäkerhet som är svår att kvantifiera och det finns också en möjlighet att själva mögelbedömningarna stör försöket. Det är tyvärr svårt att bedöma mögelpåväxt när proverna sitter på sina exponeringsplatser, utan de plockas ofta ner och tas in i ett (oftast) varmare (och torrare) utrymme eftersom bedömningen måste göras med mikroskop. Detta kan göra att våra mögelbedömningar gör att proverna då och då utsätts för något torrare klimat än vad RF-mätningarna visar.

Sammanfattningsvis kan vi dra följande slutsatser:

- $M$ -modellen ger värden på  $m$  som ligger nära noll på alla fältplatser där vi inte får mögeltillväxt och värden över noll där vi får mögel på de flesta material, vilket bekräftar att modellens resultat i stämmer med verkligheten i stora drag.
- I alla tester (både labb och fält) möglar materialen i ungefär samma ordning (plywood är t ex mest känsligt), men detta leder inte till att våra utvärderingar ger tydliga kritiska  $m$ -värden ("mold susceptibilities  $M$ ") för olika material.
- Det finns ett antal felkällor till denna typ av studier som man bättre skulle behöva kontrollera.

## 7 Programmering av m-modellen

I projektet har m-modellen testats i programspråket MATLAB, men kommer även inom det snaraste att ha implementerats av Jesper Arfvidsson (Byggnadsfysik LTH) i en exekverbar post-processor som kommer att vara allmänt tillgänglig i två versioner:

- Som ett enkelt program som läser en indata-text-fil med tid, temperatur och RF och ger en m-modellsberäkning som utdata. Detta program kommer att vara tillgängligt genom Fuktcentrums hemsida [fuktcentrum.lth.se](http://fuktcentrum.lth.se).
- Som en integrerad del i byggnadsfysikprogrammet WUFI, på samma sätt som Sedlbauers biohygrothermal model och MRD-modellen är. Efter att man har kört en WUFI-simulering kan man markera en punkt i en konstruktion och få en m-modellsberäkning gjord i denna punkt. Denna version kräver att man har WUFI installerat.

I båda fallen kommer utdata att se ut som visat i de undre delfigurerna i Figurerna 2 och 19 i denna rapport, det vill säga sex kurvor för de olika tidsskalorna. I manualerna för programmen kommer det att beskrivas hur resultaten ska tolkas. Det kommer där att understrykas att dessa program är expert-program som kräver att användarna är kunniga i byggnadsfysik m m. Osäkerheten i WUFI-beräkningar kan ju t ex vara stor beroende på osäkerheter i materialdata och om man lägger till de stora osäkerheterna i en mögelmodell, så måste man vara försiktig när man tolkar sådana resultat.



## 8 Diskussion

I den ursprungliga planeringen av projektet var avsikten att *m*-modellen skulle kompletteras med GLC-modellens funktion för att beräkna kritiskt fuktillstånd baserat på värden från laboratorieprovningar. Under projektets gång insåg vi att det inte var möjligt på det sätt som *m*-modellen är uppbyggd. Större förändringar av metoden skulle då vara nödvändiga, detta rymdes inte inom projektets ram. Istället har vi valt att utvärdera och presentera de båda modellerna var för sig i denna rapport. Samma data från fält- och laboriemätningar har använts.

Grunden för *m*-modellen är sex isopleter som har olika nivåer beroende på olika tidsskalor. Sex parallella beräkningar görs genom att betrakta hur länge klimatet i byggnadsdelen överskrider, respektive ligger under, de olika isopleterna. Isopleterna baseras på laboratorieprovningar och utifrån resultaten finns olika grupperingar av material för att användas vid tolkningen av resultaten. *M*-modellen är, som de flesta andra mögelmodeller, inte helt enkel att förstå. Den huvudsakliga svårigheten är att alla beräkningar sker parallellt med sex olika tidsskalor och att resultaten ("fuktiga perioder") från dessa beräkningar divideras med respektive tidsskalors längd för att få ett "mögelindex" (*m*-värdet) som är slutresultatet.

*M*-modellen har tidigare endast varit presenterad i en konferensartikel [1]. I projektet har arbete lagts på att beskriva metoden och ett utkast till vetenskaplig artikel där denna beskrivs finns. Modellen har även programmerats i MATLAB för att förenkla arbetet vid utvärderingarna, samt kommer att programmeras i två varianter som ska vara mer användbara i byggbranschen. De bör betraktas som experthjälpmedel för personer som t ex är kunniga inom byggnadsfysik och de komplexa frågeställningar som handlar om mögelpåväxt på byggnadsmaterial och resultaten kan inte användas helt okritiskt.

Generellt finns en överensstämmelse mellan *m*-modellens predikteringar för om det finns en risk för mögel eller inte på de olika provplatserna i försöket och resultaten från den mikrobiologiska analysen. Projektet har dock inte kunnat verifiera de kritiska *m*-värden som i den befintliga metoden används för att bedöma risken för att olika material möglar och inte heller har arbetet lett till ett sätt att bestämma kritiska *m*-värden för olika material. En anledning till detta kan vara att de grunddata som *m*-modellen baseras på inte är tillräckligt omfattande för detta. Olika materialgrupper varierar i hur känsliga de är för mögelpåväxt och även inom samma materialgrupp varierar det kritiska fuktillståndet för olika produkter [11]. Den lägsta nivå för mögelväxt som isopletkurvorna i *m*-modellen använder är 80%. Från tidigare provningar vet vi att det kritiska fuktillståndet för plywood som finns med i försöket är 75%. *M*-modellen använder också ett kritiskt *m*-värde för obehandlad gran och ett för obehandlad fur, medan vi vet att känsligheten varierar mellan olika "kvaliteteter" av virke [27] något som också bekräftats i våra fältstudier i detta projekt där två olika trämaterial av gran användes.

I alla tester (både labb och fält) möglar materialen tidsmässigt i ungefär samma ordning: plywood, Gran1, spånskiva, masonite, Gran2, våtrumsgipsskiva. Detta avspeglas dock inte i jämförelsen mellan *m*-modellens resultat och mögelbedömningarna. Det kan bero på att *m*-modellen nollställer mögeltillväxten alltför snabbt. Under fältförhållande

kommer t ex nollställning ofta att ske varje sommar då RF är låg (se t ex Figur 19). Flera av våra mätningar har haft resultat av typen att det är liknande klimat varje år och att m-värdet nollställs varje sommar. Då kommer varje år ge liknande cykler av m-värden. Om det då uppkommer mögel på ett material år 1, ett annat material år 2 och ett tredje material år 3, så tänker vi att de tre materialen har olika mögelbenägenhet, men m-modellen ger resultatet att de möglar vid liknande m-nivåer.

Sammantaget indikerar våra två studier att trä och träbaserade skivor möglar vid  $m$ -värden under 1.0. Resultatet för våtrumsgipsskivan är något bättre och den kräver  $m$ -värden över 1.0 för att mögla. Observera att resultatet för våtrumsgipsskivan med största sannolikhet inte gäller för andra gipsskivor (som inte fanns med i denna studie).

Förenklingar av den ursprungliga  $m$ -modellen gjordes genom att ta bort parametrar som vid simuleringar visade sig inte ge någon större skillnad i utfallet från modellen men som komplicerar den onödigt mycket. Det är möjligt att dessa parametrar kan läggas till i en framtida version om de kan verifieras.

Grunden för GLC-modellen är liksom vid  $m$ -modellen isopleter, i modellen kallas dessa för "mould growth limit curves" (begränsningskurvor för tillväxt), och modellen predikerar risk om den verkliga RH ligger över dessa kritiska kurvor. Till skillnad från  $m$ -modellen är dessa kurvor unika för varje materialprodukt och baseras på det kritiska fuktillståndet för produkten, vilket bestäms genom provning enligt en standardiserad metod. Detta ger en ökad säkerhet eftersom det kan vara svårt att klassa en viss produkt till en grupp utan provningar. En annan skillnad mot  $m$ -modellen är att GLC-modellen inte är dynamisk, det vill säga ingen hänsyn tas till variationerna mellan för mögel gynnsamma och ogynnsamma förhållanden och risken för mögel predikteras inte olika beroende på hur långa dessa perioder är.

Tidigare försök [12] har visat god överensstämmelse mellan GLC-modellens predikterade värden och uppkomst av påväxt i fältförsök. De nya resultaten i detta projekt verifierar de tidigare. I de fall där GLC-modellen predikterade att det inte fanns risk för påväxt kunde inte heller någon påväxt konstateras på proverna i fält. Även när modellen predikterade att det fanns förutsättningar för påväxt så fanns en god överensstämmelse, etablerad påväxt fanns på proverna, med några få undantag. I dessa fall hade tiden betydelse, den kumulativa tiden som kurvorna överskridits var mycket kort i förhållande till tiden i labbprovningarna under konstanta gynnsamma förhållanden. Överensstämmelsen mellan predikterad risk och utfall av fältprovningar är alltså mycket god. I de fall då överensstämmelse saknas predikterade modellen risk för mögel även om det inte i verkligheten uppkom påväxt. Predikerar modellen att det inte finns risk för mögel så uppstår inte heller mögelväxt. Vid användning av modellen kan man därför förvänta sig att man hamnar på "den säkra sidan", det vill säga det finns en säkerhetsmarginal.

Det kan finnas anledning att vidareutveckla en dynamisk modell för att i forskningssyfte kunna förstå hur miljö- och materialparametrar påverkar mögelväxt. Praktiskt har dynamiska modeller ett berättigande för att t ex prova hur olika förändringar i en byggnadsdels konstruktion kan öka respektive minska risken för påväxt av mögel på materialen som används.

Det finns flera felkällor i de studier som genomförts. Dessa omfattar till exempel osäkerheter i mätningar av RF och mätosäkerhet vid bedömningar av påväxt på prover. Relativt långa intervall mellan analystillfällena har också påverkat jämförelsen med  $m$ -

modellens m-värden. Dessutom är de biologiska processerna inte helt kända. Framtida modeller bör, med bakgrund av dessa osäkerheter, hållas på en rimlig komplexitetsnivå.

Trots de tillkortakommande som våra mätningar har är de bland de mest omfattande samlingar av mätresultat som kan användas för att testa mögelmodeller som finns tillgänglig. Vi kommer därför att på sikt offentliggöra relevanta resultat från detta projekt, så att de kan användas av andra forskare.

I projektet studerades mögeltillväxt vid varierande förhållanden av fukt, där för mögelsvampar ogynnsamma och gynnsamma förhållanden varierades med olika lång varaktighet. Resultaten verifierar resultat från tidigare studier, att längden på de ogynnsamma/gynnsamma förhållandena har en påverkan på om och när mögel uppkommer på ett material. Dessutom har projektet visat att den kritiska fuktnivån hos materialet har betydelse om det kritiska fukttillståndet ligger ”långt” under det aktuella gynnsamma RF så kommer tillväxten gå fortare än om det ligger ”nära”. Detta indikerar att inte bara längden på perioderna av gynnsamma/gynnsamma förhållanden utan även hur högt RF är bör tas hänsyn till i dynamiska modeller.

För att ytterligare förstå vad som händer fysiologiskt hos svampen provades även kalorimetermätningar, det vill säga mätningar av svampens värmeutveckling som ett mått på dess aktivitet. Från tidigare studier vet vi att isoterm kalorimetri kan mäta värmeutvecklingen från små mögelkolonier på agar och andra näringsrika substrat och skulle potentiellt användas för att ge indata till mögelmodeller, t ex vad gäller hur återhämtning efter torka sker. Denna studie visade att det är svårt att arbeta med mögel på rent trä i den kalorimetermetod som vi har använt eftersom det växer långsamt och ger ifrån sig låga värmeeffekter. Detta problem skulle kunna lösas med mer känsliga kalorimetrar; i detta projekt gav vi istället svampen näringstillskott i form av maltextrakt eller träextrakt, så att den kom att växa på näringsberikat trä. Två studier som genomfördes gav olika resultat. I en förstudie såg vi återhämtning efter en torr period, medan huvudstudien inte gav någon återhämtning inom 3-4 dagar efter en uppfuktning. En möjlig förklaring till denna skillnad är att torkning och uppfuktning gjordes betydligt snabbare i huvudstudien och att detta skadade svampen eftersom den inte hann anpassa sig till det ändrade klimatet.

Sammanfattningsvis kan vi konstatera att mögeltillväxt ett komplext problem och det att det inte är trivialt att modellera tillväxt av mögel under dynamiska förhållanden. Då m-modellen används tillsammans med simulerade klimatdata från beräkningsprogram, t ex WUFI, finns ibland stora osäkerheter eftersom materialdata är okända och konstruktionerna inte perfekt beskrivna. När modellens osäkerhet läggs till byggnadsfysikprogrammets osäkerhet kan därför den kombinerade osäkerheten bli mycket stor, vilket gör att man måste vara försiktig när man tolkar resultaten. Vi ser att det framförallt följande användningsområden för m-modellen:

- för att öka sin allmänna förståelse för mögel i byggnader genom att studera hur olika parametrar påverkar resultatet
- för att skatta och jämföra hur en konstruktionsvariant beter sig under olika klimat, t ex ett framtida fuktigare klimat
- för att uppskatta om det generellt finns risk för att mögel ska uppkomma i en konstruktion eller inte

Detta projekt har detaljgranskat m-modellen och visat att mögelmodellering är ett svårt område. Dock är det viktigt att framhålla att mögel är ett stort samhällsproblem, så är det viktigt att det förebyggande arbetet fortsätter. Ett sätt är att använda mögelmodeller på det sätt vi föreslår ovan, och att detta görs av kunniga fuktexperter hos byggbranschen med kritiska ögon.

## 9 Slutsatser

M-modellen, som utvecklats av Skanska och som modifierats i detta projekt, kan användas som ett hjälpmedel för att bedöma risken för att mögel ska uppkomma i en byggnad där klimatet (RF och temperatur) är känt, men osäkerheterna är stora och resultaten måste användas med försiktighet. Arbetet i projektet har inte kunnat ta fram kritiska m-värden (den parameter som m-modellen beräknar) för olika material och det är därför svårt att jämföra risken för mögel på olika material. Istället ska m-värdets tolkas som att det ökad risk för mögel om m ökar.

Den andra modellen som presenteras i rapporten (GLC-modellen) som utvecklats på RISE kan, i kombination med kända värden på  $RF_{krit}$  enligt standardiserad metod, användas för att bedöma om det finns risk eller inte att mögel uppkommer på ett specifikt material under kända klimatförhållanden. Resultaten visar en god överensstämmelse mellan predikterade värden och verkliga utfall. Resultaten från laboratorieprovningar i projektet har också verifierat att de värden som skattas för  $RF_{krit}$  vid låg temperatur är korrekta.

Laboratorieprovningar visar att förutom längden på gynnsamma respektive ogynnsamma perioder så har fuktnivån i relation till byggnadsmaterialets  $RF_{krit}$  betydelse för om mögel ska växa på material. Även kalorimetermätningarna gav en indikation på att uttorknings- och uppfuktningshastighet kan vara av stor betydelse för mögelmodellering.

De laboratorie- och fältdata som framtagits i detta projekt kan användas för att testa nuvarande och framtida mögelmodeller.

# 10 Framtida arbete

Vi ser följande områden som mest intressanta för en fortsatt utveckling av mögelmodeller:

- En djupare diskussion om mögelmodellering. Vid utveckling av tidigare modeller har inte detaljerade diskussioner förts om t ex vad som modelleras (sporgroning eller hyftillväxt?), hur modeller är kopplade till mätningarna som används för att validera modellen (betyder nollställning i modellen att mögelhyferna försvinner?), hur komplex modelleringen ska göras (hur många parametrar får en modell innehålla?), hur mycket information (icke-brus) finns det i de valideringsdata i litteraturen som man använder (troligtvis en hel del), och hur väl skulle vi kunna bestämma nya valideringsdataset?
- Det är känt att olika material är olika känsliga för mögelpåväxt och detta är viktigt att ta hänsyn till i mögelmodeller. Data för detta bör komma från standardiserade provningar, t ex den metod som utvecklats på RISE för att bedöma ett materials  $RF_{krit}$ , men arbetet med att göra kopplingen mellan mögelmodeller och dessa resultat återstår att göra.
- Fortsatt fokus på dynamiska klimatförhållanden. De flesta data som används som grund för utveckling och verifiering av dynamiska modeller är framtagna under konstanta förhållanden. Fler studier behövs där RF och temperatur varierar.
- En koppling mellan mögelfysiologi och hur modellerna är uppbyggda. Idag finns ingen sådan koppling och det gör det svårt att komma vidare, framförallt vad gäller dynamiska klimat. Om vi kunde utgå från vad som händer i mögelsvampen när klimatet blir t ex torrare bör det leda till betydligt bättre modeller. För att kunna göra en koppling till mögelfysiologi krävs det nya mätmetoder av t ex biomassa eller svampaktivitet (isoterm kalorimetri skulle kunna vara en sådan metod).
- Kan de oförstörande metoderna för att bedöma mögelpåväxt på ytor i fältstudier förbättras för att bli mer tidseffektiva och ge noggrannare och mer frekventa mögelbedömningar?

# 11 Referenser

1. Togerö, Å., C. Svensson Tengberg, and B. Bengtsson, *m-model: a method to assess the risk for mould growth in wood structures with fluctuating hygrothermal conditions*, in *Healthy Buildings*. 2011: Espoo, Finland. p. 317-322.
2. Wadsö, L. and S. Johansson, *Influence of dry periods on the activity of mold on wood*. (to be submitted).
3. Wadsö, L., et al., *The m-model for prediction of mold growth*. (to be submitted).
4. Wadsö, L., et al., *A test of the m-model against field data*. (to be submitted).
5. Johansson, P. and T. Svensson, *Critical moisture levels for mould growth on building materials at low temperature* (to be submitted).
6. Johansson, P., *Mould growth on building materials with different RHkrit at varying climatic conditions* (to be submitted).
7. Johansson, P., L. Lång, and C.-M. Caperner, *Conformity of predicted outcome and results of field studies-a comparison among different mould models* (to be submitted).
8. Johansson, P., G. Bok, and A. Ekstrand-Tobin, *The effect of cyclic moisture and temperature on mould growth on wood compared to steady state conditions*. *Building and Environment*, 2013. **65**: p. 178-184.
9. Vereecken, E. and S. Roels, *Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation*. *Building and Environment*, 2012. **51**(0): p. 296-310.
10. Thelandersson, S. and T. Isaksson, *Mould resistance design (MRD) model for evaluation of risk for microbial growth under varying climate conditions*. *Building and Environment*, 2013. **65**(0): p. 18-25.
11. Johansson, P., et al., *Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials*. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2012. **73**: p. 23-32.
12. Johansson, P., T. Svensson, and A. Ekstrand-Tobin, *Validation of critical moisture conditions for mould growth on building materials*. *Building and Environment*, 2013. **62**: p. 201-209.
13. SP-Method-4927, *SP Method 4927. Laboratory Test Method for Determining Critical Moisture Level for Mould Growth on Building Materials*. 2012, SP Technical Research Institute of Sweden.
14. SIS, *Byggnadsmaterial – Laboriemetod inför bedömning av lägsta hygrotermiska förhållanden för mögelpåväxt*, S.S.S. Institute, Editor. 2014: SIS-TS 41:2014.
15. Johansson, P., A. Ekstrand-Tobin, and G. Bok, *An innovative test method for evaluating the critical moisture level for mould growth on building materials*. *Building and Environment*, 2014. **81**: p. 404-409.
16. *WOOD DECAY, AND WOOD-ROTTING FUNGI*. Available from: <http://www.biology.ed.ac.uk/research/groups/jdeacon/FungalBiology/woodrots.htm>.

17. Johansson, P., *Determination of the Critical Moisture Level for Mould Growth on Building Materials*. Vol. TVBH 1020. 2014: Byggnadsfysik, LTH, Lunds Tekniska Högskola. 208.
18. Viitanen, H., *Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden structures*, in *Dept. of Forest Prod.* 1996, The Swedish Univ. of Agric. Sci.: Uppsala.
19. Viitanen, H. and J. Bjurman, *Mould growth on wood under fluctuating humidity conditions*. *Material und Organismen*, 1995. **29**(1): p. 27-46.
20. Ojanen, T., et al. *Classification of material sensitive - new approach for mould growth modeling*. in *NSB 2011*. 2011. Tampere, Finland.
21. Vereecken, E. and S. Roels, *Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation*. *Build. Environ.*, 2012. **51**: p. 296-310.
22. Hofbauer, W., et al. *Mould resistance assessment of building materials – Material specific isopleth-systems for practical application*. in *Indoor Air 2008*. 2008. Copenhagen, Denmark.
23. Hofbauer, W., et al., *Mould resistance assessment of building materials. Material specific isopleth-systems for practical application*, in *Indoor Air 2008*. 2008: Copenhagen, Denmark.
24. Sedlbauer, K., *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components*. 2001, Fraunhofer Institute for Building Physics.
25. Fredriksson, M., et al., *Microclimate and moisture content profile measurements in rain exposed Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) joints*. *Wood Material Science and Engineering*, 2014. **11**(4): p. 189-200.
26. Johansson, P., T. Svensson, and A. Ekstrand-Tobin, *Validation of critical moisture conditions for mould growth on building materials*. *Building and Environment*, 2013. **62**(0): p. 201-209.
27. Johansson, P., K. Mjörnell, and J. Arfvidsson, *Examples of characteristics of wood that affect mould growth: a meta-analysis*. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2016: p. 1-11.
28. Li, Y. and L. Wadsö, *Fungal activities of indoor moulds on wood as a function of relative humidity during desorption and adsorption processes*. *Engineering in Life Sciences*, 2013. **13**(6): p. 528-535.
29. Wadsö, L., *Principles of a microcalorimetric technique for the study of mould activity as a function of relative humidity*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1997. **49**(2): p. 1053-1060.
30. Wadsö, L., et al., *The m-model for prediction of mold growth (supplementary material)*. (to be submitted).