



EXAMENSARBETE INOM BYGGTEKNIK OCH DESIGN
GRUNDNIVÅ 15 HP
STOCKHOLM, SVERIGE 2025

Kritiska fuktnivåer ur ett sorptionsperspektiv

En tvärvetenskaplig litteraturstudie

Critical Moisture Levels From a Sorption Perspective

An interdisciplinary literature review

Maja Wennerström



Sammanfattning

Efter decennier av omfattande forskning finns ett gediget underlag för att mögelrelaterade skador i byggnader orsakar ohälsosamma inomhusmiljöer. De följaktligen erforderliga åtgärderna innebär dessutom höga kostnader på både ett ekonomiskt och miljömässigt plan, vilket vidare gör problematiken till en direkt fråga om hållbarhet. För ett effektivt förebyggande av mögelskador krävs en tvärvetenskaplig förståelse för deras uppkomst, där länken mellan byggnadsfysik och mikrobiologi spelar en fundamental roll. Att en fuktig miljö är avgörande för mögelsvampars tillväxt är känt sedan länge, men det finns fortfarande många oklarheter rörande detaljerna av de ingående fuktmekaniska och biofysikaliska processerna. Detta examensarbete har därmed haft för avsikt att göra ett inledande försök att reda ut några av dessa.

Med ett fokus på hur dynamiska klimatförhållanden påverkar inre fukttillstånd i material och dess vidare konsekvenser avseende mögeltillväxt, gjordes en sammanställning och analys av betydelsefull forskning som utförts inom de två områdena. Resultatet av denna litteraturstudie indikerade att sorptionsbeteenden som vanligen försummas kan ha en signifikant påverkan på jämviktsprocesser, framförallt i organiska byggnadsmaterial. Detta kan innebära att förhållanden vid materialets yta feluppskattas, och i själva verket ger andra förutsättningar för mögeltillväxt än de som förmodas vid riskbedömningar. Från mikrobiologiskt håll kunde det samtidigt konstateras att fluktuationer i tillgängligt vatten påverkar tillväxtbeteenden, och att det i vissa fall kan räcka med kortare perioder av gynnsamma förhållanden för att tillväxten ska återhämta sig. Relativ fuktighet ses i allmänhet som den kritiska faktorn för tillväxt, men intressanta upptäckter har gjorts gällande en eventuellt separat inverkan av självaste fukttinnehållet. Eftersom det är materialegenskaper som reglerar det sorptionsmässiga beteendet är det möjligt att känsligheten för mögel kan återspeglas i dessa.

Forskning relevant för ämnet har inte utförts i tillräckligt stor skala för att kunna dra några definitiva slutsatser. Då förutsättningarna för mögeltillväxt kommer att förstärkas av kommande klimatförändringar, är kunskaper kring vilka material som är bäst lämpade för olika sammanhang av speciellt stor betydelse. Fortsatt forskning riktad mot denna typ av frågeställning är därmed nödvändig för att kunna fatta hållbara beslut.

Nyckelord: hygrokopisk fukt, materialegenskaper, sorption, temperaturberoende, hysteres, dynamiskt klimat, mögeltillväxt, kritisk fuktnivå

Abstract

After decades of extensive research, there is ample evidence suggesting mold related building damages cause unhealthy indoor environments. Remediating these damages consequently means high costs and additional environmental strains, thus making the problem a question of sustainability at large. Effective prevention requires a thorough understanding for the synergetic mechanisms at play, where interdisciplinary knowledge of building physics and microbiology is fundamental. Moisture being the key to fungal growth is well established, but there are still many uncertainties in regard to the details of the relationship between moisture mechanics and biophysical processes. This bachelor's thesis has thereby attempted to uncover and make sense of some of these details.

With a focus towards how dynamic climate conditions impact the moisture conditions of materials and the subsequent effects on mold growth, relevant research from both areas were compiled and analyzed. The results from this literature review indicated that often disregarded sorption behaviors actually might play a more crucial role in equilibrium processes, primarily in organic materials. Neglecting these may cause misjudgements of material surface conditions, meaning further that assumptions made for mold risk assessments could prove incorrect. From a microbial point of view it could also be concluded that fluctuations in water availability highly influences growth behaviors, and that shorter periods of favorable conditions sometimes can be enough to ensure growth recovery. Relative humidity is generally seen as the critical factor, but compelling discoveries have been made that suggest moisture content possibly has a separate and independent effect on mold growth. Since material properties determine these sorption behaviors, it is possible that knowledge of certain properties could provide insights regarding the material's mold susceptibility.

Due to a lack of research on this particular subject, there isn't enough comparative data to allow for any definitive conclusions to be drawn. Upcoming climate changes will provide means for increased mold growth, meaning knowledge of what materials are best suited under different circumstances is of great importance. Deepend research aimed at answering questions such as the ones discussed in this paper is therefore necessary to ensure that sustainable decisions are being made.

Keywords: hygroscopic moisture, material properties, sorption, temperature dependence, hysteresis, dynamic climates, mold growth, critical moisture levels

Förord

Med detta examensarbete avslutar jag min treåriga högskoleingenjörsutbildning inom byggteknik och design. Samtidigt som det valda ämnesområdet varit otroligt fascinerande och lärorikt, har det varit oerhört krångligt att ta sig an på en kandidatnivå. Jag vill därför ägna ett stort tack till mina handledare Erica Bloom och Anders Kumlin för all vägledning, stöttning och inte minst de många intressanta diskussionerna. Ert engagemang har varit av enorm betydelse. Jag vill även uttrycka min tacksamhet till Pernilla Johansson på RISE som tappert försökt besvara mina förvirrade frågor. Utan att riktigt veta vart frågeställningen skulle leda har resan varit utvecklande på många plan, och det är med en mängd nya kunskaper och insikter som jag nu fortsätter min resa framåt.

Avslutningsvis vill jag tacka min examinerare Gunilla Teofilusson för att du valt att lita på processen. Jag har försökt mitt yttersta för att göra innehållet begripligt!

Stockholm, juni 2025

Maja Wennerström

Innehållsförteckning

Sammanfattning	iii
Abstract	iv
Förord.....	v
1 Introduktion.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte och mål	2
1.2.1 Frågeställningar.....	2
1.3 Avgränsningar.....	2
2 Teoretisk bakgrund	3
2.1 Grundläggande fuktmekanik.....	3
2.1.1 Hygroskopisk fukt.....	3
2.1.2 Sorptionskurvan	4
2.1.3 Hygroskopisk jämvikt.....	5
2.1.4 Hysteres.....	6
2.1.5 Scanningkurvor	7
2.2 Grundläggande mikrobiologi	8
2.2.1 Mikrobiell påväxt och tillväxt.....	8
2.2.2 Vattenaktivitet.....	9
2.2.3 Kritiskt fuktillstånd	9
3 Metod	10
4 Resultat	11
4.1 Dynamisk fuktmekanik.....	11
4.1.1 Zhang et al.....	11
4.1.2 Huttunen & Vinha.....	16
4.2 Dynamisk mögeltillväxt.....	19
4.2.1 Ruijten et al	19
4.2.2 van Laarhoven et al.....	22
5 Diskussion och slutsatser	24
5.1 Diskussion.....	24

5.1.1 Analys av resultat.....	24
5.1.2 Kritiska fuktnivåer	26
5.1.3 Forskningens begränsningar	27
5.2 Slutsatser	29
5.3 Fortsatta studier.....	30
Litteratur	31

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Förekomst av mögel i konstruktioner och på invändiga ytor till följd av höga fuktnivåer har av WHO (2009) klassats som en av de ledande orsakerna till ohälsosamma inomhusmiljöer. Detta är efter djupgående analyser av en bred dokumentation av försämrade hälsotillstånd med koppling till fuktiga byggnader, där man på en global nivå kunnat påvisa konsekventa samband avseende en rad olika luftvägssymtom. Både aktiv och passiv påväxt utgör en risk, men det finns fortfarande oklarheter när det kommer till de exakta mekanismerna som ligger bakom den associerade ohälsan, såväl som dos-responssamband. Enligt riktlinjerna behöver därför all förekomst av mögel som kan påverka inomhusmiljön åtgärdas (WHO 2009). Detta erfordrar i sin tur rivnings- och saneringsarbeten som sammantaget inte bara blir kostsamma, utan även utgör onödiga miljöpåfrestningar. Problematiken berör alltså samtliga hållbarhetsaspekter, vilket trycker på vikten av ett grundligt förebyggande arbete rotat i en förståelse för de samverkande fuktmekaniska och biofysikaliska processerna som föranleder uppkomsten av mögel.

Tillgången till vatten anses vara den enskilt största faktorn för mögeltillväxt (Adan & Samson 2011). I byggnader är källan till detta vatten den fukt som material håller i det inre porsystemet, vilken varierar med omgivande klimat och därför så gott som alltid är i rörelse. Riskanalyser grundar sig vanligen i kritiska fuktnivåer för mögelpåväxt som bedöms vara en produktspecifik materialegenskap (Johansson et al 2022). Dessa värden bestäms genom tester utförda i klimatkammare under kontrollerade stationära förhållanden, vilket således innebär ett försummande av en potentiell inverkan från de fluktuationer i temperatur och relativ fuktighet som representerar verkliga förhållanden. Hur fukten beter sig inom material under dynamiska förhållanden till följd av olika materialegenskaper och hur detta vidare påverkar mögelsvampars tillväxt, är ett område där forskningen är gles (van Laarhoven 2016). Med detta till bakgrund riktar sig det här examensarbetet mot att undersöka just interaktionen mellan klimat, material och mögelsvamp. Förutom att bidra till kunskaper om samtida kritiska fukttillstånd, kan sådana samband även vara av betydelse när det kommer till att uppskatta effekterna av ett framtida förändrat klimat.

1.2 Syfte och mål

Syftet med studien är att granska uppkomsten av mögel på byggnadsmaterial ur ett i huvudsak fuktmekaniskt perspektiv för att skapa en bättre förståelse kring vad det dynamiska klimatet kan innebära för mögeltillväxt och kritiska fuktförhållanden. Med hänsyn till arbetets begränsade omfattning och områdets komplexitet, utförs detta med en målsättning att i första hand starta en diskussion som kan leda till fortsatt forskning. I det längre loppet förväntas frågeställningarna kunna bidra till ökad kunskap som förstärker ett fuktsäkert byggande och en effektiviserad användning av material.

1.2.1 Frågeställningar

- Hur ser sorptionens jämviktsprocesser ut under dynamiska klimatförhållanden?
- Vad innebär dessa processer för den mikrobiella tillväxten?
- Finns det särskilda egenskaper avseende sorption som gör ett material mer eller mindre känsligt för mögelskador?

1.3 Avgränsningar

Arbetet är avgränsat till att enbart undersöka den fuktrelaterade interaktionen mellan mögelsvampar och porösa byggnadsmaterial, vars fukttinnehåll varierar inom det hygroskopiska området. Ämnena har behövt behandlas på en nivå anpassad efter den kunskapsmässiga utgångspunkten. Detta har inneburit beskrivningar i en förenklad och sammanfattad form, med ett fokus på några få forskningsstudier som varit av intresse för ändamålet. Undersökningen bygger därmed även i huvudsak på resonemang från observationer i dessa studier, medan mer djupgående beskrivningar av de metoder och ekvationer som utgjort grunden för dessa överlag behövt uteslutas.

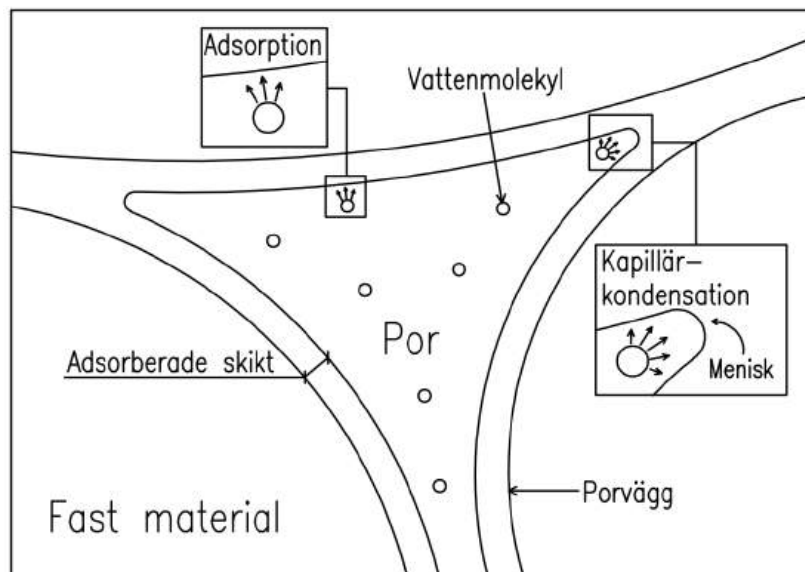
2 Teoretisk bakgrund

2.1 Grundläggande fuktmekanik

2.1.1 Hygroskopisk fukt

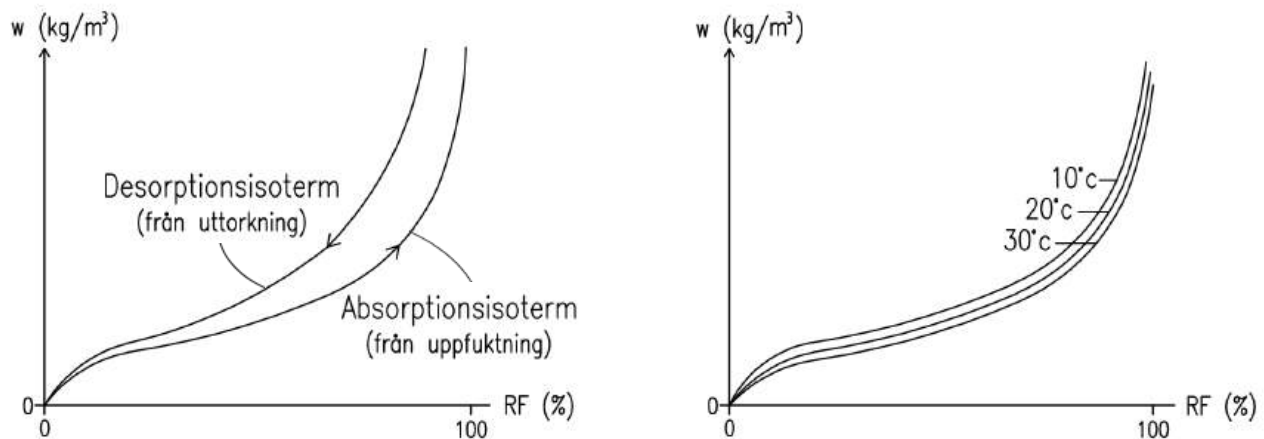
Fukt förekommer i porösa material i olika former och halter beroende på både omgivande miljö och materialegenskaper. Ett material som inte står i direkt kontakt med vatten i vätskefas har ett fuktinnehåll som varierar inom ett hygroskopiskt område som karakteriseras av att fuktutbytet sker direkt med omgivande luft, i samspel med den relativa fuktigheten (Arfvidsson et al 2017). Hygroskopisk fukt innefattar allt förångningsbart vatten i materialets porsystem som tagits upp från luften vid en RF upp till ca 98%. Till en början sker detta genom *adsorption*, vilket innebär att vattenmolekyler i luften attraheras och binds till materialets porytor genom van der Waalska krafter. De bundna molekylerna bildar sedan skikt som ökar i antal med en ökad relativ fuktighet. I material med oregelbundna porer börjar dessa skikt så småningom gå ihop och skapa kapillära vattensamlingar i porens smalare delar. I ytterkanten av dessa bildas en konkav menisk som skapar ännu starkare attraktionskrafter och fångar in vattenmolekyler som då kondenserar trots att mätnadsånghalten inte är uppnådd ($RF < 100\%$), så kallad *kapillärkondensation*. Ju högre den relativa fuktigheten blir, desto större porer kan vattenfyllas genom dessa kapillära krafter. När RF överstiger 98% träder materialet in i ett överhygroskopiskt område där fuktförhållandena är av betydligt mer oförutsägbar karaktär (Burstrom & Nilvér 2019). Material klassas som mer eller mindre hygroskopiska baserat på hur mycket fukt de kan binda från luften genom dessa attraktionskrafter. Denna förmåga återspeglas vanligen i materialets porositet och porstorleksfördelning, där en stor mängd fina porer innebär att mer vatten kan tas upp. Trä och andra organiska material är speciellt hygroskopiska då de innehåller molekyler som binder ytterligare vatten genom starkare vätebindningar. Hos just trä har kapillärkondensation liten betydelse och sker endast vid en mycket hög RF.

Figur 2.1 Illustration av adsorption och kapillärkondensation i en por.
Inspirerat av Burstrom & Nilvér (2019).



2.1.2 Sorptionskurvan

För att ta reda på hur mängden fukt förhåller sig till den relativa fuktigheten med hänsyn tagen till materialets egenskaper, utförs kontrollerade tester i klimatkammare (Arfvidsson et al 2017). Under isoterma förhållanden mäts då fukthalten (w) kontinuerligt i från början torra material som utsätts för en successivt ökande relativ fuktighet. Motsvarande test görs även från ett vattenmättat stadium där materialen istället utsätts för en sjunkande RF. Erhållen empirisk data kan sedan användas för att illustrera sambanden grafiskt i form av en sorptionskurva som är unik för varje material (vänstra grafen i figur 2.2). I denna återfinns för de flesta materialen både en absorptions- och desorptionsisoterm. Att två olika kurvor fås innebär att sorptionen påverkas av materialets tidigare fukthistoria, så kallad *hysteres*.



Figur 2.2 Generell sorptionskurva (vänster) och illustration av sorptionens temperaturberoende (höger).
Inspirerat av Arfvidsson et al (2017).

Sorptionen har ett visst temperaturberoende där en något förhöjd fukthalt kan observeras i takt med en sjunkande temperatur, förutsatt konstant relativ fuktighet (högra grafen i figur 2.2). Hur stort detta beroende är varierar, men effekterna har visat sig större i organiska än oorganiska material (Burström & Nilvér 2019). Temperaturberoendet anses dock i allmänhet vara relativt lågt inom det temperaturområde som kan förväntas i en byggnad och brukar därmed bortses från vid fuktberäkningar i dessa sammanhang. Fukthalt och RF i materialet antas då enbart förhålla sig till varandra enligt de samband som kan avläsas i sorptionskurvan fastställd vid 20°C. Detta är annorlunda från det som sker i omgivande luft, vars relativa fuktighet är starkt temperaturberoende.

RF i luften beräknas vanligen som förhållandet mellan luftens ånghalt v och den aktuella temperaturens mättnadsånghalt $v_s(T)$ enligt ekvation 2.1.

$$RF = \frac{v}{v_s(T)} \quad (2.1)$$

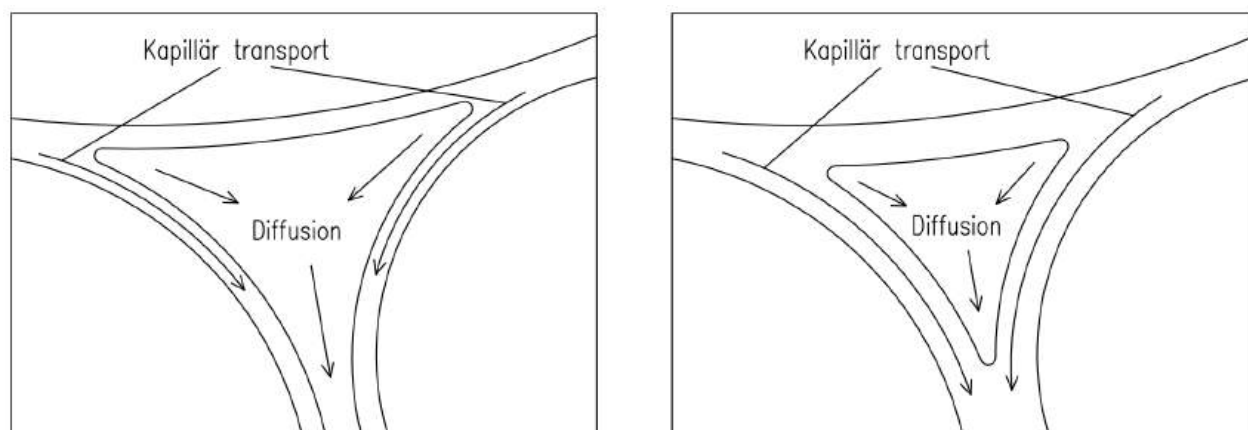
RF i material syftar till luften i materialets porsystem. Enligt det tidigare antagandet förblir denna oförändrad vid temperaturändringar eftersom den endast beror på fukthalten som kommer att vara densamma kort tid efter ändringen. För att upprätthålla ovanstående samband sker istället ett, för fukthalten försumbart, fuktutbyte mellan bunden fukt och luft i materialets porer som påverkar ånghalten i porerna enligt ekvation 2.2 (Nilsson 2013).

$$v = RF(w) \cdot v_s(T) \quad (2.2)$$

Skillnaden i ånghalt hos materialet gentemot den av luften runt omkring skapar i sin tur en drivkraft för fukt, med en strävan att uppnå jämvikt. Materialet kommer då att antingen dra åt sig eller avge hygroskopisk fukt till omgivningen beroende på ånghaltsgradientens riktning. Denna process pågår till dess att fukthalten ger en RF i materialet som är densamma som omgivande RF och jämsätter de två ånghalterna. RF i sorptionskurvan syftar således alltid till jämvikts-RF (Arfvidsson et al 2017).

2.1.3 Hygroskopisk jämvikt

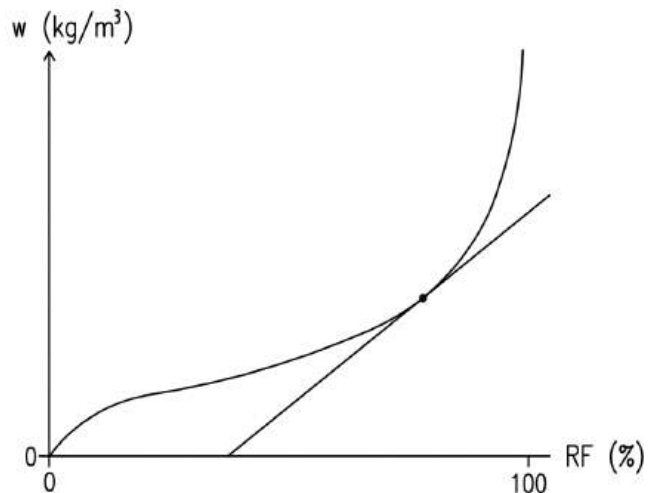
Hur lång tid det tar innan jämvikt uppnås beror till stor del på materialets tjocklek och *fuktttransportkoefficient*. Fukt tas upp och avges av materialytan, medan inre transporter fördelar fukten i materialets porer för att uppnå jämvikt (Arfvidsson et al 2017). Tjocklekens tidspåverkan kan på så vis förklaras genom att den avgör det avstånd från materialytan som fukten behöver färdas. Fuktttransportkoefficienten redogör för permeabiliteten hos materialets porer, det vill säga deras genomsläpplighet avseende fukt, och är betydligt mer komplex. Vid låg RF sker transporten genom diffusion som innebär en luftburen förflyttning av vattenmolekyler med en skillnad i ånghalt som drivkraft. I takt med att RF ökar begränsas diffusionen eftersom större vätskeskikt och vattensamlingar följaktligen minskar luftutrymmet i porerna. Fukten börjar då istället förflyttas i vätskefas genom kapillär transport i allt högre grad (se figur 2.3). Detta innebär en förhöjning av permeabiliteten då betydligt större kvantiteter kan transporteras i vätskefas än i ångfas (Arfvidsson et al 2017).



Figur 2.3 Fuktttransport genom en por vid två olika fukthalter. Inspirerat av Arfvidsson et al (2017).

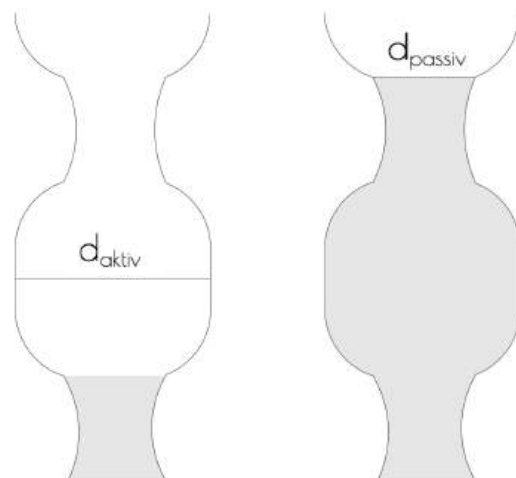
En annan viktig faktor för jämvikten framgår ur sorptionskurvan, där tydliga skillnader kan noteras i hur mycket fukthalten behöver ändras för att åstadkomma en viss ändring i RF. Ett material har olika stor förmåga att binda fukt i samband med att RF ändras beroende på vilken punkt i sorptionskurvan som utgås från (Nilsson 2013). Detta benämns materialets *fuktkapacitet* och beräknas som lutningen hos tangenten för varje enskild punkt (se figur 2.4). Bortsett från väldigt låga relativa fuktigheter är fuktkapaciteten som högst inom det överhygroskopiska området. Hygroskopiska material kännetecknas dock av en hög fuktkapacitet även vid en lägre RF.

Figur 2.4 Fuktkapacitet för en given punkt på sorptionskurvan. *Inspirerat av Nilsson (2013).*



2.1.4 Hysteres

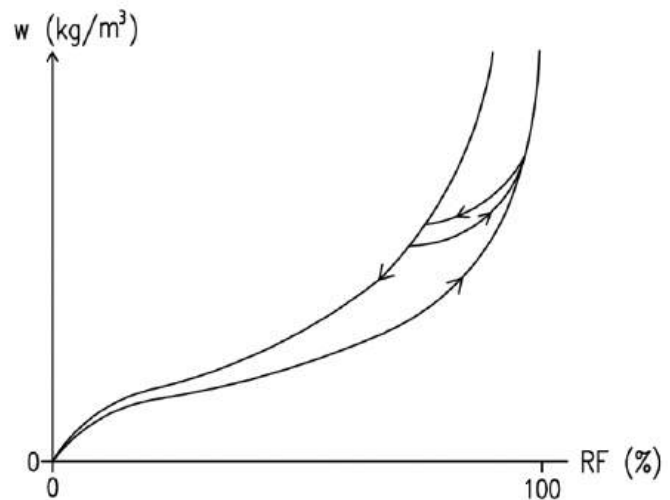
Som tidigare nämnt fås olika jämviktskurvor när materialet befinner sig i ett uppfuktnings- och uttorkningsstadie, vilka benämns absorptions- och desorptionsisoterm. Hur dessa förhåller sig till varandra skiljer sig från material till material, men gemensamt för samtliga material är att större fukthalter uppmäts hos desorptionsisotermen än hos absorptionsisotermen vid jämvikt. Vad exakt som orsakar denna hysteres är inte helt klarlagt då det hittills inte kunnat upprättas någon enskild fysikalisk teori som förklarar hela fenomenet. Det finns en generell teori som grundar sig i materialets porstruktur och dess effekt avseende aktiv och passiv kapillaritet (Arfvidsson et al 2017). Ju mindre pordiametern är, desto större blir den kapillära sugkraften och stighöjden. För torrt material under uppfuktning innebär det att den aktiva kapillariteten begränsas av porenns största diameter (d_{aktiv}). Hos ett vattenmättat material som inleder en uttorkningsprocess finns däremot en passiv kapillaritet där vattnet i den fyllda poren kan hållas uppe av krafter som verkar vid en mindre diameter (d_{passiv}), vilket fördröjer tömningen (se figur 2.5). Att mängden kapillärt bundet vatten hos trä som tidigare nämnt är försumbar inom det hygroskopiska området innebär att den observerade hysteresen hos dessa material behöver förklaras på annat vis.



Figur 2.5 Aktiv och passiv kapillaritet. *Inspirerat av Arfvidsson et al (2017).*

2.1.5 Scanningkurvor

Absorptions- och desorptionsisotermerna skildrar endast de jämviktstillstånd som uppmäts när ett material fuktas upp eller torkas ut från ett helt torrt respektive vattenmättat stadie. Detta är sällan fallet i verkliga sammanhang, där stora variationer i temperatur såväl som ånghalt i omgivande miljö gör att material ofta pendlar mellan uppfuktning och uttorkning inom ett RF-spann mellan de två extremerna (Arfvidsson et al 2017). För att uppskatta jämviktsfukthalten i dessa fall behöver övergångskurvor mellan de två isotermerna etableras. Dessa kallas scanningkurvor och har generellt en mycket lägre fuktkapacitet. För organiska material med annars höga fuktkapaciteter, kan detta innebära att effekterna av hysteresen blir speciellt stora avseende hygroskopisk jämvikt.



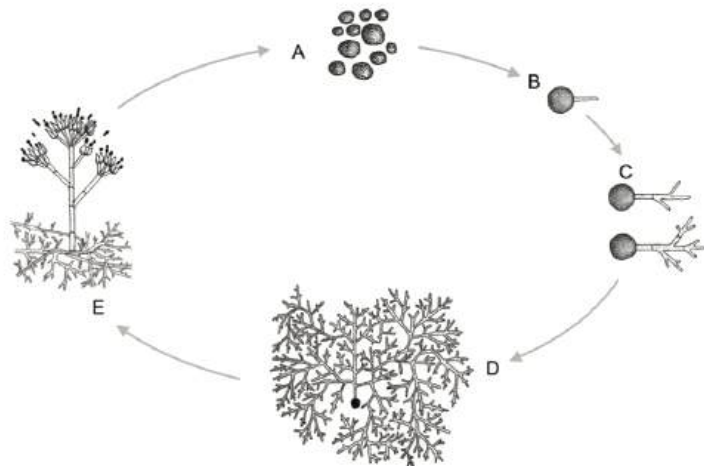
Figur 2.6 Illustration av scanningkurvor.
Inspirerat av Burström & Nilvér (2019).

2.2 Grundläggande mikrobiologi

2.2.1 Mikrobiell påväxt och tillväxt

Mikrobiell påväxt på byggnadsmaterial domineras inom det hygroskopiska området av en bred samling arter av mögelsvamp (Flannigan et al 2001). Dessa existerar i form av inaktiva sporer både i luft och på materialytor i alla naturliga miljöer, men utgör inte en påväxt förrän de aktiverats och etablerat sig på materialet (Johansson et al 2022). Sporens aktivering kräver förhållanden som erbjuder gynnsamma förutsättningar för tillväxt. Exakt vad som utgör gynnsamma förutsättningar varierar från art till art, men de karaktäriseras generellt av en simultan tillgång till näringsämnen, vatten och värme. Mögelsvampars tillväxt är dock inte en omedelbar företeelse, utan följer ett förlopp med flera faser. Alla ingående processer i detta förlopp är inte helt kartlagda än och varierar dessutom mellan arter, men utifrån befintliga kunskaper kan det väldigt förenklat beskrivas enligt följande stycke.

När rätt förhållanden råder indikeras detta för sporen via olika signalämnen. Sporen aktiveras då genom att öppna för fukttransport över cellmembranet och drar åt sig vatten från materialet i en rent osmotisk process. I samband med denna uppfuktning möjliggörs en syntetisering av viktiga enzymer som driver på sporens metabolism. Intaget av vatten ökar trycket i sporen som då går in i ett stadie där den börjar svälla i takt med en samtidigt omstrukturering av cellväggarna som ökar elasticiteten (A). När sporen nått ett visst kritiskt fukttinnehåll bildas en groddslang som tillåter upptag av näringsämnen från materialet (B). Först då kan tillväxtfasen inledas genom att det från groddslangen bildas tunna celltrådar, så kallade *hyfer* (C). Dessa förgrenar sig i takt med att de växer och formar tillsammans ett mycel (D). Vidare utvecklas en sporbärande struktur som med tiden producerar och sprider nya sporer (E). (Osharov & May 2001; van Laarhoven 2016; Johansson et al 2022)



Figur 2.7 Mögelsvampars tillväxtprocess.
Från Johansson et al (2022). CC BY 4.0

Det framgår här en viss tidsfördröjning från att nödvändiga förutsättningar uppfyllts tills dess att det sker en tillväxt. Utöver denna initiala latensperiod är den fortsatta tillväxten starkt beroende av hur de rådande förhållandena samspelar och varierar. Om tillgångarna avtar eller förutsättningarna blir rent av ogynnsamma kan tillväxten bromsas eller upphöra helt. Det bör här poängteras att detta inte innebär att befintlig påväxt försvinner (Johansson et al 2022).

2.2.2 Vattenaktivitet

Mögelsvampar grupperas vanligen baserat på deras krav på tillgänglighet av vatten. Klassificeringen innefattar vattenälskande *hydrofila* svampar och olika nivåer av *xerofila* svampar som kan växa i torrare miljöer (Flannigan et al 2001). Att det talas om en tillgänglighet av vatten kan misstas för att det är själva fukttinnehållet i materialet som är avgörande, vilket inte riktigt är fallet. Som beskrivet ovan i mögelsvampens tillväxtförlopp, är upptaget av vatten en osmotisk process. Detta innebär att vattnet rör sig enligt den kemiska potential som uppstår mellan material och spor, vanligen uttryckt som en *vattenaktivitet* (a_w) i mikrobiologiska sammanhang (van Laarhoven 2016). Vattenaktiviteten anger förhållandet mellan ångtrycket hos ett material och ångtrycket hos rent vatten vid samma temperatur och tryck. Detta mått är i själva verket detsamma som luftens RF vid jämvikt fast uttryckt för vätskor och blir därmed en hundradel så stor ($RF\%/100$). För byggnadsmaterial kan således en ekvivalent a_w avläsas direkt ur sorptionskurvan genom att ersätta RF på x-axeln.

Mögelsvampar har en egen form av intracellulär vattenaktivitet (van Laarhoven 2016). Först när materialets vattenaktivitet överstiger svampens uppstår den potential som skapar de osmotiska drivkrafterna. Genom upptag eller egen syntetisering av molekyler med låg molekylvikt, så kallade *osmolyter*, kan svamparna till viss del reglera sin egen vattenaktivitet. Vad som utmärker xerofila arter är en förmåga att producera vissa kompatibla osmolyter som kan sänka cellernas vattenaktivitet och därmed tillåta dem att växa i torrare miljöer. Förutom en lägsta nivå förekommer även en optimal a_w för tillväxt, men när det kommer till denna är skillnaderna mellan arter i regel mindre (Flannigan et al 2001).

2.2.3 Kritiskt fukttillstånd

Som referens vid riskbedömningar används vanligen kritisk RF, det vill säga den relativa fuktighetens (eller vattenaktivitetens) undre gränsvärde vid vilket mikrobiell påväxt kan förväntas uppstå på ett material (Johansson et al 2022). Som tidigare nämnt är tillväxten ett resultat av flera samverkande faktorer, vilket gör denna kritiska RF till ett rörligt gränsvärde som hänger ihop med ett bredare kritiskt fukttillstånd. Varje art har temperaturmässiga preferenser och växer som bäst inom ett visst intervall (Flannigan et al 2001). En lägre temperatur innebär generellt mindre aktivitet, men det finns även ett övre tak där alltför höga temperaturer hindrar tillväxten. Ju närmare optimal temperatur, desto mer toleranta blir många svampar av en lägre vattenaktivitet. Kravet på tillgängligt vatten får på så vis ett temperaturberoende. En annan viktig faktor för tillväxten är näringsunderlaget hos materialet. Mögelsvampar livnär sig på olika organiska föreningar, vilket ger trä och övriga organiska material en naturligt förhöjd känslighet i detta avseende. Mottagligheten för mikrobiell påväxt hos oorganiska material ökar dock vid nedsmutsning. En variation i vattenaktivitet, temperatur och näringstillgång har alla en direkt inverkan på tillväxthastigheten. De omständigheter där dessa huvudfaktorer tillsammans skapar tillräckligt gynnsamma förhållanden för att uppnå den varaktighet som i sammanhanget krävs för att en påväxt ska uppkomma, är vad som utgör det kritiska fukttillståndet.

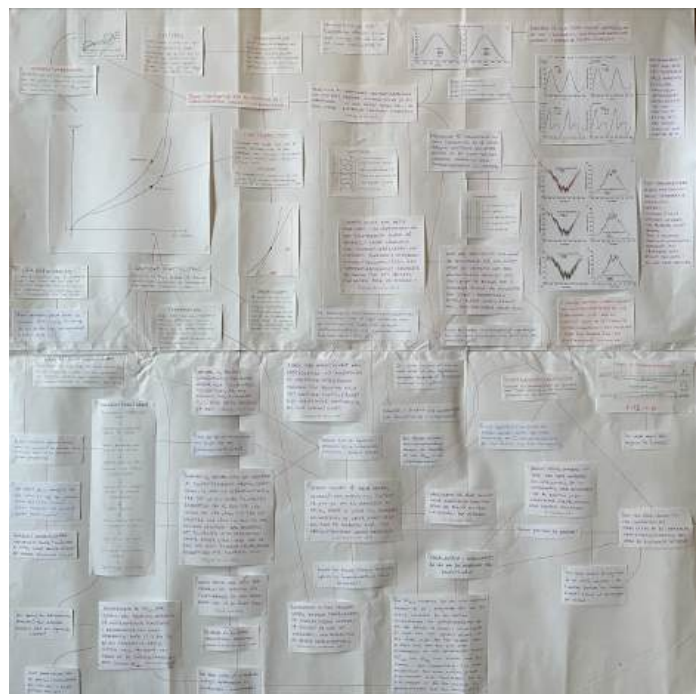
3 Metod

Arbetet är utfört som en ren litteraturstudie med en undersökningsmetod som tagit formen av en tvärvetenskaplig utredning. Inledningsvis krävdes en fördjupning i den teoretiska bakgrunden inom de undersökta ämnesområdena för att utvidga de baskunskaper som byggts upp under denna högskoleingenjörsutbildning inom byggt teknik och design. När ramarna för studien blivit tydligare kunde större fokus riktas mot att parallellt utvärdera den forskning som utförts rörande hygroskopisk fukt i material respektive mikrobiell tillväxt. Detta var en process som innebar ett sållande bland en mängd olika studier för att hitta de med relevans för frågeställningen.

Databaserna DiVA och ScienceDirect användes till en stor del av sökandet, men att hitta sökord som var tillräckligt avgränsande utan att exkludera något som var av potentiellt intresse visade sig i flera fall vara svårt. En effektivare strategi var då att spåra studier med önskade undersökningsområden genom referenslistorna hos relaterat material. En eventuell risk med det senare tillvägagångssättet är att slutsatserna faller i linje med de som kunnat dras tidigare och att utvecklingsmöjligheterna därmed begränsas. Detta bedömdes inte utgöra något större problem för denna undersökning eftersom just sammankopplingen av två discipliner varit fundamental för frågeställningen. I urvalsprocessen ansågs ett fokus på dynamiska processer vara ett viktigt kriterium, men även innehållet av element som öppnade för en vidare diskussion ur ett tvärvetenskapligt perspektiv. Valet baserades även på datum för publicering för att säkerställa att de senaste kunskaperna representerats i den mån möjligt. För att dokumentera insamlat material och skapa en överskådlighet, organiserades det ihop med viktig bakgrundsteori i en tankekartan.

Detta gjorde det enklare att dra paralleller mellan resultat hämtade från olika studier och samtidigt kartlägga de oklarheter som uppstått. Genom att bearbeta materialet på detta vis kunde fyra centrala studier väljas ut som ett speciellt fokus sedan lades på. En närmare beskrivning av dessa är vad som utgjort resultatdelen av undersökningen. En viss utsvävning var emellertid nödvändig för att kunna sätta studierna i perspektiv till varandra och frågeställningen, samt skapa en bättre helhetsbild av forskningsläget. Detta lade grunden för den gemensamma analysen och diskussionen som utgjort den mer betydelsefulla delen av arbetet.

Figur 3.1 Bild av den skapade tankekartan.



4 Resultat

4.1 Dynamisk fuktmekanik

Efter en fördjupning i hur olika materials inre jämviktsprocesser påverkas av dynamiska klimtförhållanden har förändringar i fuktkapacitet framgått som en avgörande faktor. Vanligtvis kringgås hysteres genom användning av enbart absorptionsisotermen, alternativt medelfukthalter av absorption- och desorptionsisoterm, som utgångspunkt vid hygrotermisk modellering. Vid en fluktuerande RF i verkliga sammanhang kommer fukthalten varken följa huvudisotermerna eller någon medelkurva, utan variera enligt mellanliggande scanningkurvor med betydligt lägre fuktkapaciteter. Med ett samtida försummande av sorptionens temperaturberoende kan fuktinnehållet bli svårare att korrekt bedöma, och följaktligen även den inre fuktttransporten. Huruvida effekterna av dessa förenklingar har någon större betydelse i beräkningssammanhang är omdiskuterat. Hos just organiska material framgår dock ett speciellt intresse att utreda saken, då både sorptionens hysteres och temperaturberoende visat sig vara som mest omfattande hos dessa. I den här resultatsdelen sammanfattas ett par av de få studier som har utförts i sådant syfte.

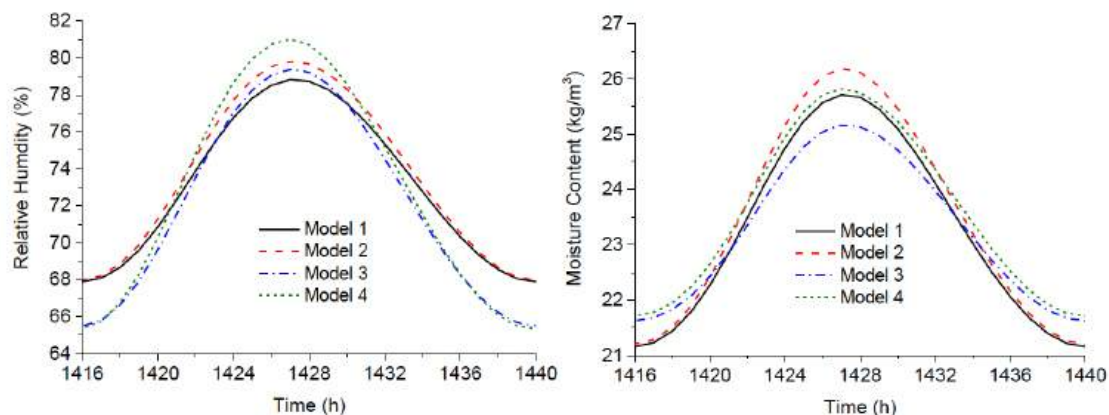
4.1.1 Zhang et al

I ett tysk-kinesiskt forskningssamarbete från 2016 gjordes en samling studier rörande effekterna av kombinerad beaktning av sorptionens hysteres och temperaturberoende i trämaterial (Zhang et al 2016). I en första del formulerades en hygrotermisk beräkningsmodell som inkorporerar både hysteres och temperaturberoende (Zhang et al 2016: I). I syfte att bekräfta denna modell utfördes sorptionsmätningar i materialprover bestående av granflis, där de primära absorptions- och desorptionsisoterna såväl som mellanliggande scanningkurvor bestämdes vid en konstant temperatur på 23°C. En provbit av gran som ställts i jämvikt med 80% RF vid 23°C och sedan tätats på alla sidor utom en av diffusionstät aluminium, placerades sedan på en våg i en klimatkammare. Samtidigt som provet här utsattes för genererade dynamiska förhållanden, mättes dess massa minutvis och räknades om till medelfukthalter i ett 10-minuters perspektiv. Erhållen data kunde avslutningsvis användas för att validera den nyformulerade modellen, som efter en anpassning av diffusionsmotståndet återskapade materialets fuktförhållanden med hög noggrannhet. Ytterligare tre beräkningsmodeller testades, där den första beaktade varken sorptionens hysteres eller temperaturberoende, den andra enbart temperaturberoendet och den tredje enbart hysteresen. Av dessa modeller avvek däremot samtliga från de dokumenterade mätvärdena i olika grad, vilket indikerade att dessa sorptionsegenskaper inte bara har en inverkan på fuktförhållandena i materialet, utan att det även kan vara nödvändigt att studera deras samverkan för att få pålitliga modelleringsresultat.



Figur 4.1 Översikt av modeller.
Inspirerat av Zhang et al (2016).

I en andra del jämfördes och analyserades de fyra modellerna för olika dynamiska randvillkor och applicerades även vid en hygrotermisk simulering av en takkonstruktion utsatt för naturliga fluktuationer enligt tysk klimatdata (Zhang et al 2016: II). Bland annat undersöktes fuktförhållandena i en isolerskiva av träfiber, omsluten av ett diffusionstätt skikt på samtliga sidor. Denna skiva utsattes för en förenklad simulering med en dygnsrytmisk, sinusformad temperaturvariation på ena sidan och en konstant temperatur på den andra. Detta skulle representera ett utomhus- respektive inomhusklimat. Eftersom materialet ansågs helt diffusionstätt förväntades inget nytt upptag eller avgång av fukt, utan enbart inre omfördelningar som funktion av den varierande ytttemperaturen. Fukttransportkoefficienten valdes som en konstant och var därför oberoende av RF. En punkt precis innanför sidan som gränsar mot inomhusklimatet övervakades, där tydliga skillnader mellan modellerna kunde noteras när det kom till både maxvärden och variationsamplituder avseende relativ fuktighet och fukthalt under ett dygn.

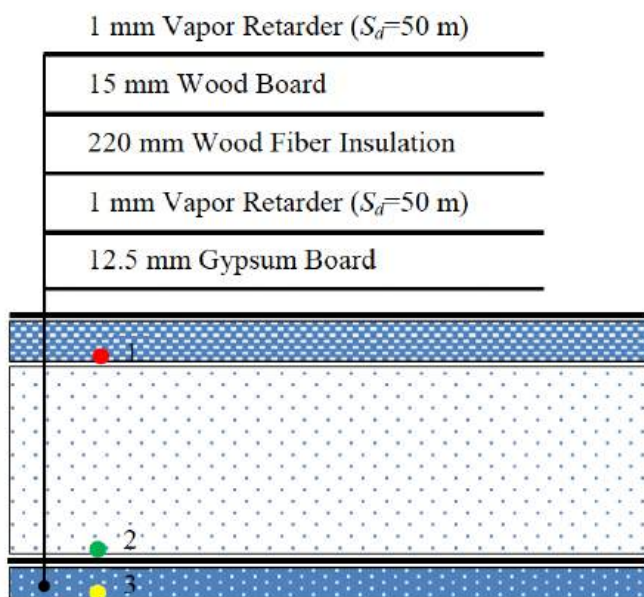


Figur 4.2 RF-kurvor (vänster) och fukthaltskurvor (höger) under ett dygn för de olika modellerna.
Från Zhang et al (2016): II. Copyright (2016), återgiven med tillåtelse från Elsevier.

Jämfört med modell 1 ger modell 2 högre maxvärden och amplituder för både RF och fukthalt. Detta kan förklaras genom att sorptionens temperaturberoende orsakar en förhöjd fukttransport till mätpuken under den temperaturtopp som uppstår mitt på dagen som medför en betydligt högre

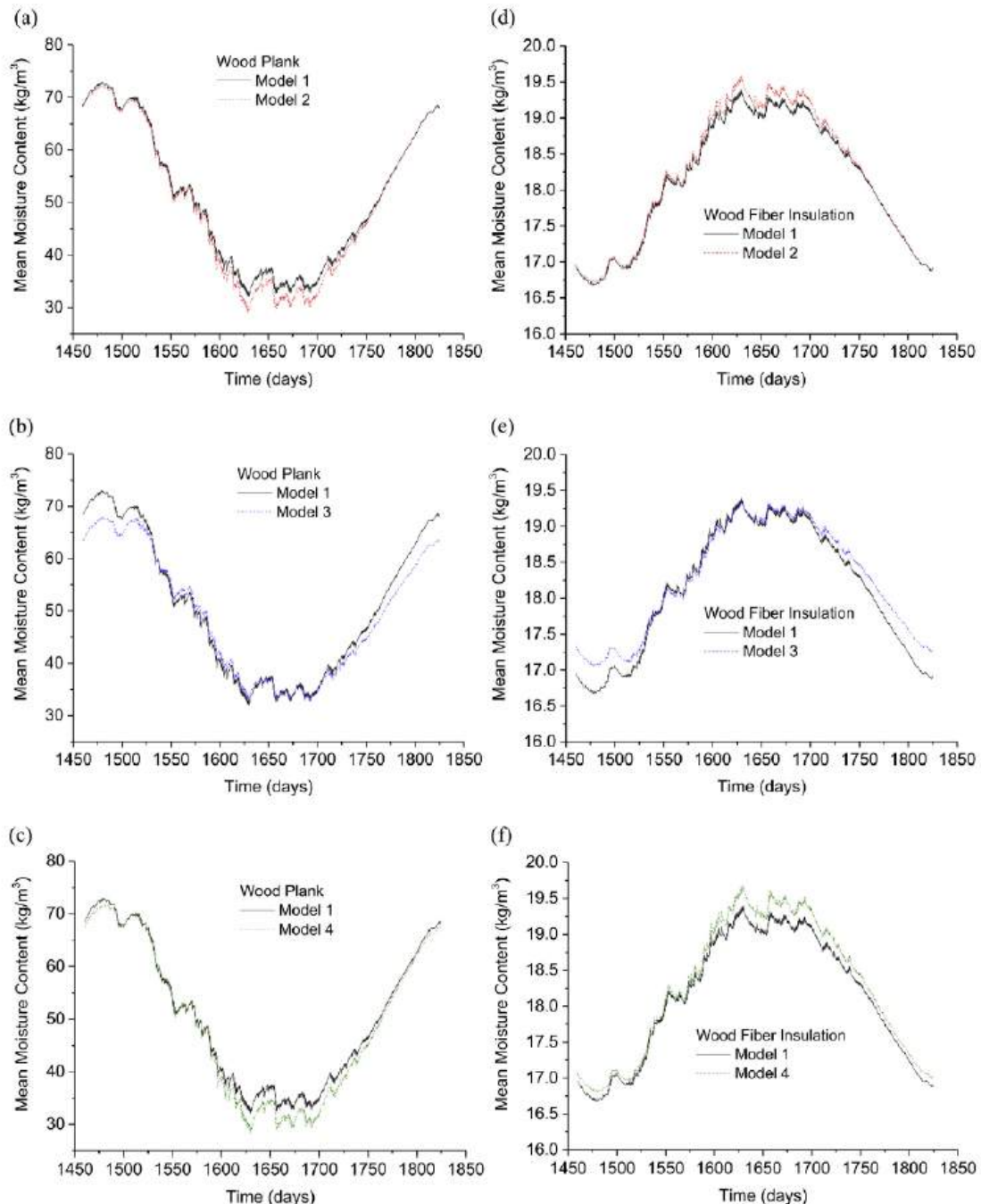
temperatur på utsida träskiva än insida. Den förhöjda fukthalten i punkten orsakas alltså av att den svalare insidan får en förhållandevis högre fuktkapacitet. Modell 3 ger gentemot modell 1 högre maxvärde och amplitud hos RF-kurvan, men lägre hos fukthaltsskurvan. Eftersom enbart hysteres beaktas i denna modell kan detta kopplas direkt till scanningkurvornas låga fuktkapacitet som gör att endast små förändringar i fukthalt krävs för att påverka RF. Variationen i fukthalt planas därmed ut något, samtidigt som RF får en större fluktuation då inre jämvikt snabbare kan uppnås i materialet. När dessa sorptionsegenskaper kombineras i modell 4 ses en förstärkt effekt avseende RF medan de tar ut varandra något när det kommer till fukthalt.

Samma isolermaterial användes sedan tillsammans med ett yttre lager av träplankor vid en hygrotermisk modellering av en typisk takkonstruktion (Zhang et al 2016: II). En diffusionstät polyetenfolie placerades på utsida och insida av de två trämaterialen så att det återigen i huvudsak endast skedde en omfördelning av befintlig fukt, men denna gång mellan materialen. Insida tak avslutades med en gipsskiva.



Figur 4.3 Uppbyggnad av takkonstruktion.
Från Zhang et al (2016): II. Copyright (2016), återgiven med tillåtelse från Elsevier.

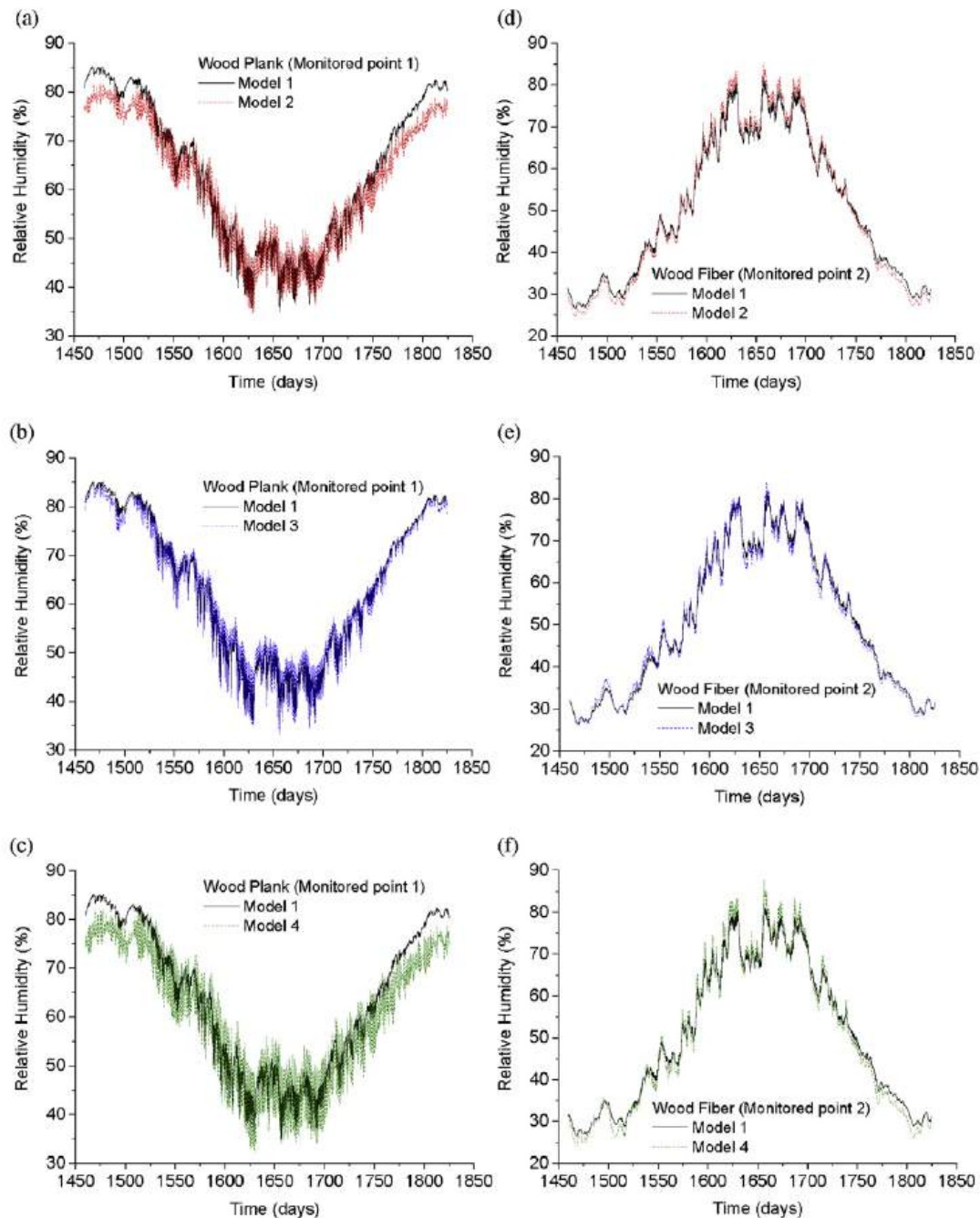
Simuleringen kördes under fem års tid, med ett utomhusklimat baserat på timvis meteorologisk data för ett typiskt år i Mannheim, Tyskland. Ett konstant inomhusklimat sattes till 23°C och 60% RF. Fukttransportkoefficienten valdes som konstanter för träplank och gipsskiva medan den hos isoleringen varierade med fukthalten enligt en framtagen ekvation. Medelfukttinnehållet i plankorna respektive isoleringen under det femte året presenteras i figur 4.4 på nästa sida, där modell 2-4 jämförs med modell 1 i separata grafer.



Figur 4.4 Medelfukthalter i materialen under det femte året av simuleringen, baserat på de olika modellerna. Från Zhang et al (2016): II. Copyright (2016), återgiven med tillåtelse från Elsevier.

Fuktfördelningen mellan de två materialen följer tydligt temperaturgradienten. Ur ett säsongsperspektiv fås vintertid förhållandevis högre temperaturer i träfiberisoleringen och fukttransporten går då mot träplanket i en jämviktssträvan mellan de två materialens olika ånghalter. Sommartid rör sig fukten i motsatt riktning enligt samma resonemang. Mellan de olika modellerna kan skillnader i transporterad fukt noteras som i stora drag följer observationerna från den mer enkla undersökningen av isoleringen (Zhang et al 2016: II).

Den relativa fuktigheten mättes i två punkter vid insida skiktgränser i vardera av trämaterialen (punkt 1 och 2 i figur 4.3) och redogörs för nedan i figur 4.5 enligt samma principer.



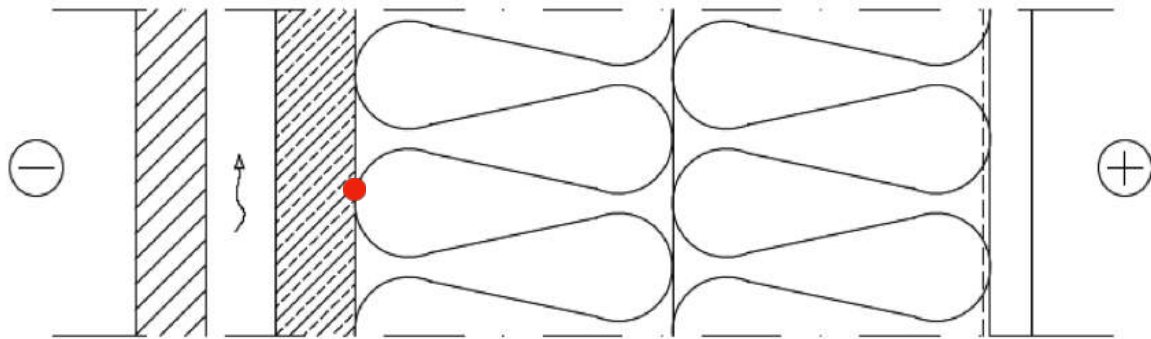
Figur 4.5 RF i mätpunterna under det femte året av simuleringen, baserat på de olika modellerna.

Från Zhang et al (2016): II. Copyright (2016), återgiven med tillåtelse från Elsevier.

Resultatet visade att uteslutning av sorptionens temperaturberoende och hysteres för den här konstruktionen kan leda till en underskattad RF-nivå sommartid, men även en överskattning vintertid (Zhang et al 2016: II).

4.1.2 Huttunen & Vinha

En liknande studie har utförts av finska forskare som undersökte effekterna av samma två sorptionsegenskaper, men i en analys av mögelrisk hos en träfiberbaserad fasadskiva i en väggkonstruktion (Huttunen & Vinha 2024). För totalt över 300 hygrotermiska simuleringar med en variation av ingående parametrar och scenarier, användes den finska mögelväxtmodellen (FMGM) för att i de olika fallen beräkna mögelindex (MI) på insida fasadskiva. Detta mögelindex är en dimensionslös variabel (0-6) som uppskattar mögelpåväxten på en yta utifrån det aktuella skiktets temperatur- och RF-förhållanden, loggade i tidsserier. Samtliga simuleringar gjordes för en femårsperiod, men startåret varierade genom anpassningar av klimatdatan. Dagens klimat representerades av finsk meteorologisk data från 2011, medan uppskattad framtida klimatdata hämtades från finska meteorologiska institutet för åren 2050 och 2080. Den fullständiga väggkonstruktionen bestod från utsidan av: en träfasad följt av en ventilerad luftspalt, den övervakade fasadskivan, isolering av glasull, en diffusionstät PE-folie och avslutningsvis en gipsskiva mot insida klimat som gavs en konstant temperatur på 21°C och en RF som varierade med ett normalt fukttilskott på 2-5 g/m³.



Figur 4.6 Uppbyggnad av väggkonstruktion. Röd prick har lagts till för att visa ungefärlig övervakningspunkt.
Från Huttunen & Vinha (2024). CC BY 4.0

Förutom startår var de övriga varierande parametrarna: luftflödet i luftspalten, tjocklekarna på fasadskiva och isolerskikt (L_{LDF} & L_{GW}), fasadens orientering (norr/söder) samt huruvida fasadskivan utsattes för slagregnsläckage. För vardera av alla kombinationer gjordes en simulering enligt en konventionell beräkningsmodell, samt enligt en av forskarna tidigare framtagen modell som tar hänsyn till både sorptionens temperaturberoende och hysteres (TDH). Denna modell hade precis som i studien innan först verifierats genom laboratoriemätningar med materialprover (Huttunen & Vinha 2023). Maximalt mögelindex (MMI) uppmätt under de femåriga simuleringssperioderna för respektive modell jämfördes sedan. Mögelindex 1, definierat som små mängder mögel i en inledande lokal mögeltillväxt som enbart är synlig under mikroskop, valdes då som ett vägledande gränsvärde.

Resultatet visade att skillnaderna mellan de två modellerna framförallt berodde på luftflödet i luftspalten. Vid en hög luftomsättning på 100 oms/h klarade sig konstruktionen bra enligt båda modellerna med dagens klimat, även vid ett inräknat slagregnsläckage. Åren 2050 och 2080 gick mot mer kritiska värden, men skillnaderna mellan modellerna var för samtliga fall små.

L _{LDF}	L _{GW}	Year	Orientation	No rain leak		1 % rain leak	
				MMI _{conv}	MMI _{TDH}	MMI _{conv}	MMI _{TDH}
12	200	2011	North	0.66	0.67	0.68	0.66
12	200	2050	North	0.95	0.90	0.97	0.97
12	200	2080	North	1.23	1.16	1.22	1.17
12	200	2011	South	0.41	0.40	0.50	0.48
12	200	2050	South	0.66	0.64	0.84	0.78
12	200	2080	South	1.11	0.97	1.18	1.12
25	200	2011	North	0.33	0.27	0.33	0.25
25	200	2050	North	0.52	0.45	0.54	0.45
25	200	2080	North	0.79	0.69	0.92	0.69
25	200	2011	South	0.17	0.14	0.25	0.18
25	200	2050	South	0.34	0.27	0.39	0.33
25	200	2080	South	0.58	0.48	0.70	0.60
12	300	2011	North	0.90	0.86	0.94	0.96
12	300	2050	North	1.17	1.14	1.18	1.15
12	300	2080	North	1.45	1.37	1.49	1.38
12	300	2011	South	0.60	0.66	0.73	0.68
12	300	2050	South	1.00	0.91	1.10	1.04
12	300	2080	South	1.23	1.19	1.40	1.30
25	300	2011	North	0.52	0.43	0.56	0.43
25	300	2050	North	0.78	0.67	0.78	0.68
25	300	2080	North	1.10	0.97	1.09	0.99
25	300	2011	South	0.32	0.25	0.39	0.31
25	300	2050	South	0.52	0.46	0.62	0.53
25	300	2080	South	0.89	0.74	0.98	0.86

Figur 4.7 Simuleringsresultat för de olika fallen vid en luftomsättning på 100 oms/h. Det största av de två modellernas värden är fetmarkerade. Gul överstrykning innebär ett MMI(maximalt mögelindex)>1.

Från Huttunen & Vinha (2024). CC BY 4.0

Allt eftersom luftomsättningen i spalten sänktes blev skillnaderna mellan modellerna större. Ett ökande mögelindex dokumenterades då för den konventionella modellen, medan förbättrade värden i många fall framgick av TDH-modellen. Glappet mellan modellerna blev som störst vid 25 oms/h, där TDH-modellen endast indikerade mögelrisk i två av fallen år 2080 medan den konventionella modellen inte klarade kravet i något av fallen. Vid låga 10 oms/h sticker mögelindexet dock iväg ordentligt för båda modellerna.

L _{LDF}	L _{GW}	Year	Orientation	50 1/h		25 1/h		10 1/h	
				MMI _{conv.}	MMI _{TDH}	MMI _{conv.}	MMI _{TDH}	MMI _{conv.}	MMI _{TDH}
12	200	2011	North	0.86	0.47	1.31	0.51	4.48	4.71
12	200	2050	North	1.06	0.77	2.13	0.64	4.03	4.07
12	200	2080	North	1.36	0.98	1.85	0.89	4.56	4.12
12	200	2011	South	0.73	0.31	1.66	0.33	4.41	4.52
12	200	2050	South	0.98	0.57	1.77	0.54	4.37	4.73
12	200	2080	South	1.31	0.93	1.95	0.89	4.53	4.34
25	200	2011	North	0.49	0.15	1.35	0.13	3.97	4.03
25	200	2050	North	0.64	0.29	1.00	0.25	3.64	3.49
25	200	2080	North	1.01	0.47	1.34	0.46	4.26	4.02
25	200	2011	South	0.32	0.10	1.00	0.06	3.98	3.97
25	200	2050	South	0.43	0.20	1.14	0.15	3.72	4.25
25	200	2080	South	0.79	0.42	1.51	0.33	4.26	3.59
12	300	2011	North	1.07	0.73	2.00	0.75	4.96	4.94
12	300	2050	North	1.29	0.96	1.95	0.96	5.09	4.53
12	300	2080	North	1.68	1.22	2.47	1.16	4.77	4.45
12	300	2011	South	1.08	0.49	1.88	0.62	4.91	4.86
12	300	2050	South	1.20	0.85	2.16	0.89	4.99	4.33
12	300	2080	South	1.71	1.13	2.43	1.12	5.26	4.66
25	300	2011	North	0.76	0.29	2.13	0.33	4.74	4.57
25	300	2050	North	0.94	0.49	1.69	0.44	4.72	4.42
25	300	2080	North	1.21	0.76	1.69	0.68	4.98	4.51
25	300	2011	South	0.50	0.20	1.63	0.17	4.65	4.34
25	300	2050	South	0.79	0.36	1.63	0.28	4.79	4.09
25	300	2080	South	1.04	0.66	1.86	0.59	4.98	4.66

Figur 4.8 Simuleringsresultat för de olika fallen vid luftomsättningar på 50, 25 och 10 oms/h med slagregn inräknat. Det största av de två modellernas värden är fetmarkerade. Gul överstrykning innebär ett MMI(maximalt mögelindex)>1. Från Huttunen & Vinha (2024). CC BY 4.0

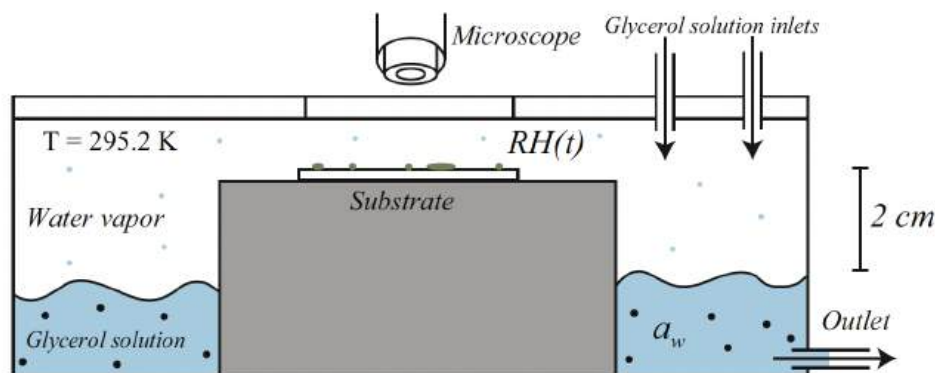
Generellt visar TDH-modellen mer optimistiska resultat (Huttunen & Vinha 2024).

4.2 Dynamisk mögeltillväxt

För att närmare förstå hur dessa beteenden kan bidra till en minskad eller ökad risk för mögelskador, har en fördjupning i de samtida processerna från mikrobiologiskt håll varit nödvändiga. Majoriteten av forskningsstudier relaterade till mögelsvampars tillväxt har utförts med ett fokus på stabila klimatförhållanden (Adan & Samson 2011). I takt med utvecklandet av nya metoder för att dokumentera tillväxtbeteenden i olika stadier har allt fler upptäckter kunnat göras avseende effekterna av dynamiska förhållanden. Detta möjliggör en vidare kartläggning av hur sorptionen kan påverka förutsättningarna för mögeltillväxt. I denna resultatdel sammanfattas först en studie som undersöker hur tillväxten påverkas av variationer av RF, följt av en studie som utforskar fukttinnehållets betydelse för tillväxten.

4.2.1 Ruijten et al

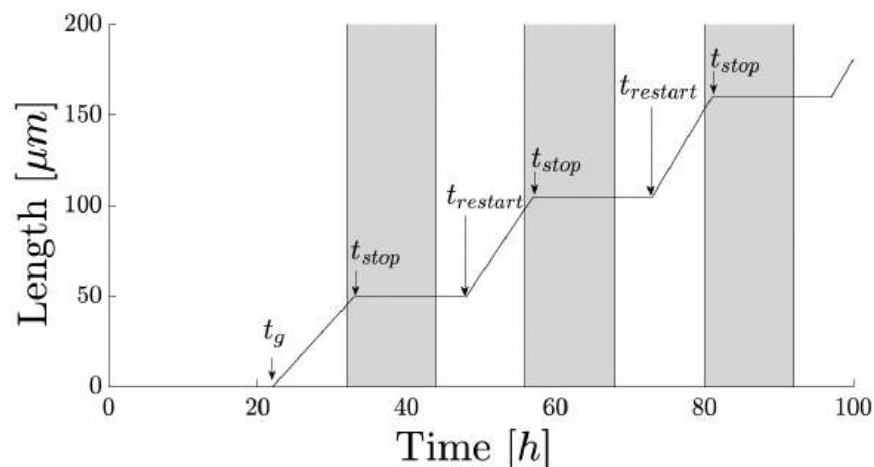
I syfte att bättre förstå mögeltillväxt på porösa byggnadsmaterial utfördes 2021 en studie i Nederländerna som avsedde att dokumentera hur hyfer reagerar på en varierande relativ fuktighet, där perioder med hög vattentillgänglighet varvades med perioder av uttorkande förhållanden av olika grad (Ruijten et al 2021). Testerna utfördes med sporer från den någorlunda xerofila arten *Penicillium rubens*, inokulerade på gipsprover och placerade i en inkubationskammare i ett klimatrums med en konstant temperatur på 23°C. I kammaren reglerades den relativa fuktigheten under det som kallades fuktiga perioder (RH_{wet}) med ångan från vanligt kranvatten, vilket gav en konstant jämvikts-RF strax under 100%. Glycerol, vars lägre specifika gravitation sänker den relativa fuktigheten vid jämvikt, användes i kontrollerade koncentrationer för att generera de förhållanden som betecknade torrperioderna (RH_{dry}) bestående av RF 75, 55 och 35%.



Figur 4.9 Illustration av uppsättningen vid utförandet. Från Ruijten et al (2021). CC BY 4.0

Samtliga experiment inleddes med en fuktig period med en duration på 30-32 h (t_{inoc}) för att säkerställa att sporena skulle hinna etablera sig på gipsproverna. Efter det utsattes de olika proverna för växelvis repetitiva mönster med något av de torra klimaten för en viss tidsperiod (t_{dry}), följt av fuktigt klimat för en viss tidsperiod (t_{wet}). Hyfernas linjära tillväxthastighet (μ) mättes genom videomikroskopi, som i korthet innebär att tillväxtprocesserna filmas med ett mikroskop genom en transparent ruta i inkubationskammaren, för att sedan låta ett speciellt utvecklat Matlab

skript följa och mäta förändringarna. Utöver tillväxthastighet dokumenterades även tidsfördröjningen innan tillväxten initierades (t_g) under den inledande perioden, tiden tills att tillväxten upphörde (t_{stop}) och återupptogs ($t_{restart}$) vid minskad respektive ökad RF, samt antalet hyfer som överlevt torrperioderna.



Figur 4.10 Generell graf som illustrerar tillväxtförloppet vid skifte mellan olika perioder.

Från Ruijten et al (2021). CC BY 4.0

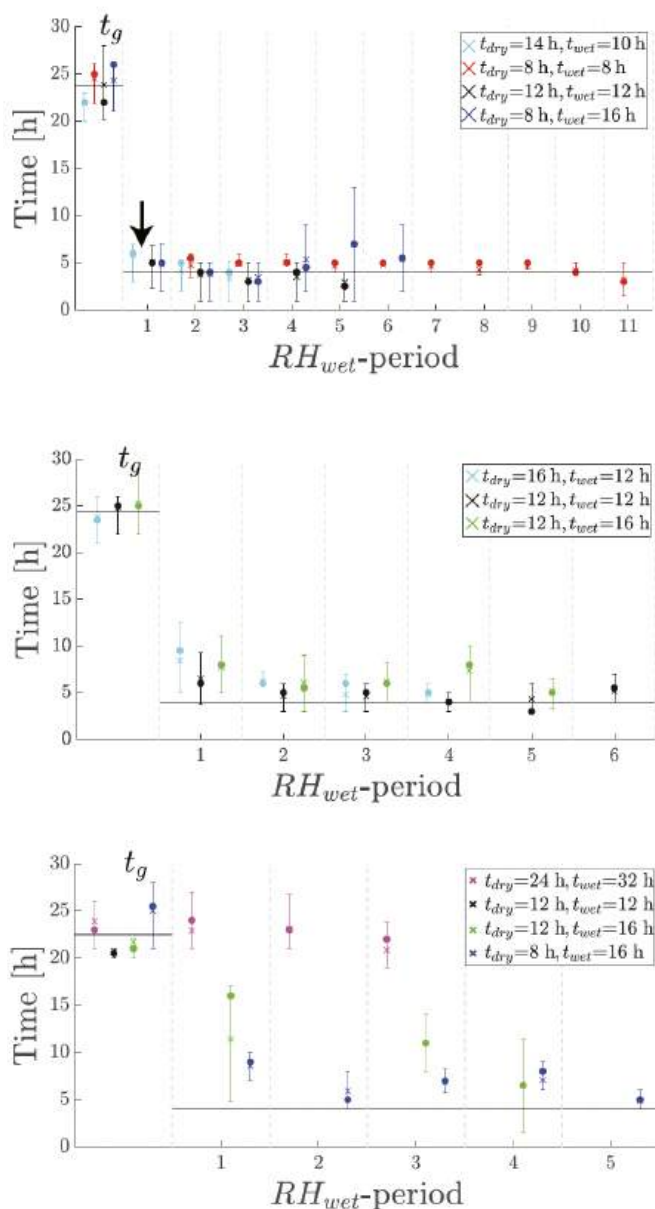
Varje experiment upprepades minst fem gånger och pågick tills dess att hyferna vuxit så pass mycket att deras ändar inte längre gick att spåra inom mikroskopets synfält, eller tills dess att aktiviteten upphört. Tidsspannen för perioderna som testades för de olika nivåerna av uttorkning och resulterande tillväxthastigheter presenteras i tabellen nedan.

Experiment	RH _{dry} (%)	t_{wet} (h)	t_{dry} (h)	$\mu \pm \sigma$ [$\mu\text{m}/\text{h}$]
Mild desiccation	75	14	10	9.5 ± 4
	75	8	8	6.9 ± 3
	75	12	12	10.8 ± 4
	75	8	16	11.5 ± 5
Modest desiccation	55	16	12	12.9 ± 7
	55	12	12	11.0 ± 4
	55	12	16	18.6 ± 8
Severe desiccation	35	24	32	15.5 ± 6
	35	12	12	8.2 ± 6
	35	12	16	8.8 ± 5
	35	8	16	14.8 ± 6
Variable fluctuation	75	3	3	No substantial growth
	75	12	12	13.2 ± 5
	75	3	3	No substantial growth

Figur 4.11 Tillväxthastigheter för de olika kombinationerna av RH_{dry}, t_{wet} och t_{dry} .

Från Ruijten et al (2021). CC BY 4.0

En bättre representation av den faktiska tillväxt som dokumenterades visas i följande figur, där t_g och t_{restart} för de fuktiga perioderna kan avläsas. Tiderna redogörs här för hela spridningen av de hyfer som kunde följas under respektive experiment, med mediantiden utmarkerad med en punkt och medelvärdet med ett kryss. På grund av de olika tillväxthastigheterna kunde inte samma antal cykler genomföras för alla experiment.



Figur 4.12 t_g och t_{restart} under fuktiga perioder för de olika experimenten. Översta grafen visar mild uttorkning ($RH_{\text{dry}} = 75\%$), följt av måttlig uttorkning (55%) och längst ner kraftig uttorkning (35%).

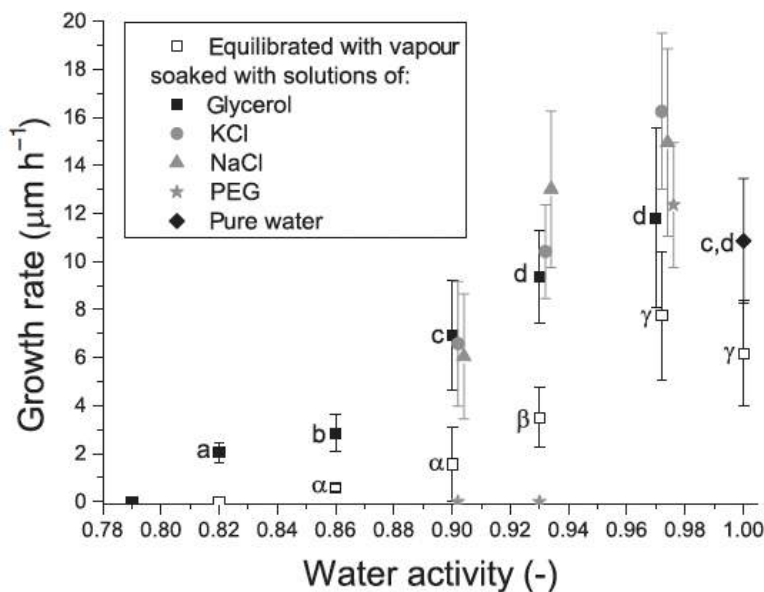
Från Ruijten et al (2021). CC BY 4.0

I fallen för mild och måttlig uttorkning (översta respektive mellersta grafen i figur 4.12) var antalet hyfer som återupptog tillväxten i samtliga fall minst 25 st, med undantag för ett av fallen där inget återupptag kunde dokumenteras under den första perioden (markerat med en pil). I fallen för kraftig uttorkning (understa grafen i figur 4.12) var dessa generellt betydligt färre i antal. Under den inledande perioden låg den genomsnittliga tiden till initierandet av tillväxt (indikerat av det övre horisontella strecket) på strax under 25 h för alla experimenten. Ett återkommande mönster av tid till återväxt kunde noteras, där det i många fall handlade om ca 4 h (indikerat av det undre horisontella strecket). Denna tid ökade i takt med en ökad uttorkningsgrad. Vid kraftig uttorkning till RF 35% med en duration på 12 h följt av lika långa fuktiga perioder, kunde inte någon fortsatt tillväxt dokumenteras under resten av experimentet. Med t_{dry} satt till 24 h och t_{wet} till 32 h, noterades en tillväxt upprepade gånger efter en tid som är inom samma ram som den av ursprungliga t_g . Detta tros innebära att det istället handlade om groning av nya sporer. Sammanfattningsvis kunde vad som i detta fall tros vara en karakteristisk tid för återaktivering av hyfterna estimeras till omkring 4 h, samtidigt som det framgick av de mer extrema fallen av uttorkning att det finns gränser för var hyfernas tillväxt inte längre kan återhämta sig. T_{stop} framgår inte av dessa figurer, men var mindre än 1 h för samtliga fall.

4.2.2 van Laarhoven et al

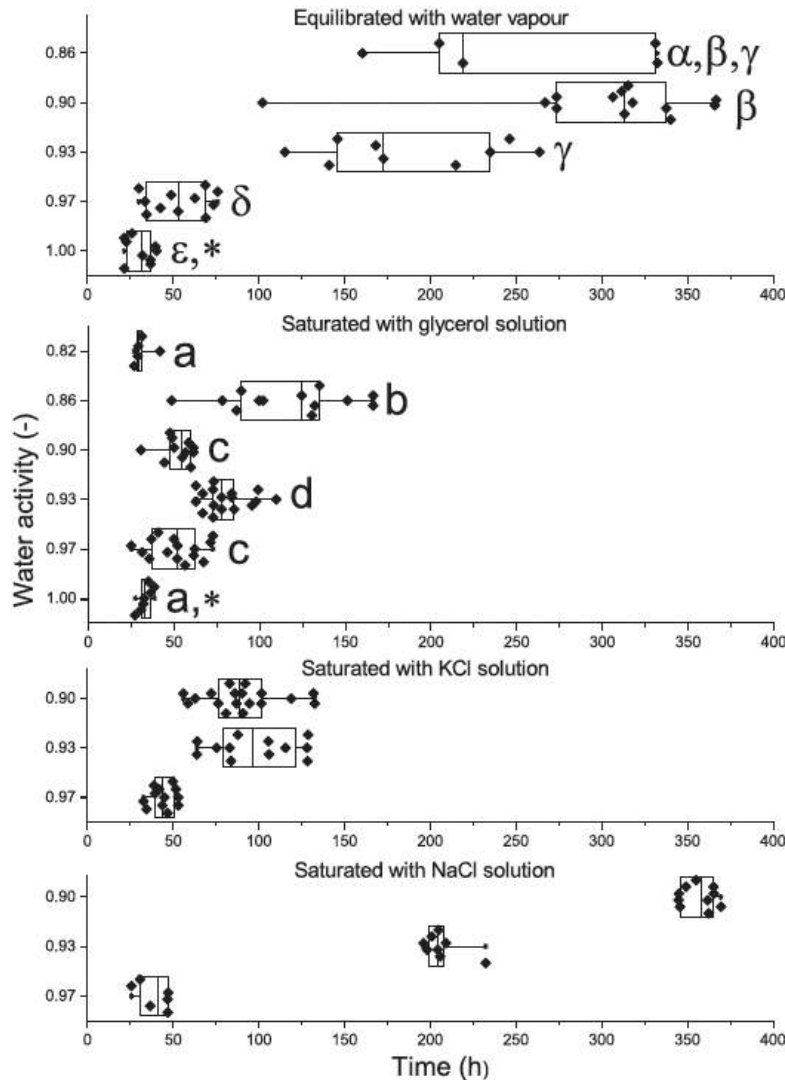
2015 utfördes en forskningsstudie i Nederländerna som avsedde att bland annat undersöka om fukthalten i ett material kan influera mikrobiell tillväxthastighet på porösa material på ett sätt som är oberoende av den relativa fuktigheten (van Laarhoven et al 2015). Genom videomikroskopi utfördes experiment på gipsprover inokulerade med återigen den vanligt förekommande mögelsvamen *Penicillium rubens*. Proverna ställdes i jämvikt med ett antal olika RF-nivåer som på ett liknande vis reglerades genom glycerollösningar i en inkubationskammare med konstant temperatur på 23°C. Uttryckt som vattenaktiviteter (a_w) var dessa: 0.79, 0.82, 0.86, 0.90, 0.93, 0.97 och 1. Först mättes tillväxten hos från början torkade prover, vars fuktinnehåll vid jämvikt förhöll sig till de olika vattenaktiviteterna enligt materialets sorptionskurva. Tillväxten mättes sedan hos prover som blöttagts i vattenlösningar innehållande en viss koncentration av lösningsämnen, och som vid jämvikt med vardera av dessa vattenaktiviteter därför genererade den högsta möjliga fuktkvoten på 35% i materialet. Trots samma variation i vattenaktivitet som de första proverna, fick dessa prover alltså ett konstant högt fuktinnehåll. På så vis kunde tillväxten som funktion av fuktinnehåll mätas och jämföras med motsvarande tillväxt hos proverna vars fuktinnehåll varierade sorptionsmässigt. Fyra olika lösningar bestående av glycerol, KCl, NaCl respektive PEG användes till experimenten i syfte att, vid jämförelse av resultaten mellan dessa, kunna utesluta andra möjliga effekter på tillväxten. För fallet med $a_w = 1$ gjordes av samma anledning även tester med prover blöttagda i rent vatten.

Resultaten visade att tillväxten hos proverna med förhöjt fuktinnehåll generellt följde samma mönster som det man noterade hos proverna som berodde på sorptionskurvans jämviktsfukthalter. Vad som däremot skiljde dem åt var tydligt högre tillväxthastigheter hos proverna med lösningsämnen, såväl som en lägre kritisk vattenaktivitet för fallet med glycerol.



Figur 4.13 Dokumenterade tillväxthastigheter vid de olika vattenaktiviteterna.
Från van Laarhoven et al (2015).
CC BY-NC-ND 4.0

Dessutom visade resultaten att ett högre fuktinnehåll ledde till en mindre spridning i starttider för den dokumenterade tillväxten, samt för fallen med glycerol och KCl att denna tid var fortsatt kort även vid lägre vattenaktiviteter.



Figur 4.14 Tiderna tills att tillväxt kunde dokumenteras i de olika experimenten.

Från van Laarhoven et al (2015).

CC BY-NC-ND 4.0

Detta motsätter sig alltså den generella teorin genom att indikera att fuktinnehållet kan ha en egen inverkan på tillväxten, skild från den av vattenaktiviteten. Lösningensämnenas möjligt gynnsamma påverkan på tillväxten kunde inte uteslutas helt, men bedömdes inte vara avgörande för resultatet.

5 Diskussion och slutsatser

5.1 Diskussion

5.1.1 Analys av resultat

Av resultatet framgår det att sorptionsmässiga beteenden under dynamiska klimatförhållanden påverkar både fuktinnehållet och materialets relativa fuktighet i samband med de inre jämviktsprocesserna. Det framgår även att mögeltillväxten får en annan karaktär vid fluktuerande vattentillgänglighet och potentiellt även till följd av själva fuktinnehållet. Att uppkomsten av mögelskador åtminstone till viss del kan kopplas till hur materialet reagerar på variationer i temperatur och omgivande RF är därmed troligt. Vid denna jämförelse är det dock viktigt att belysa att det finns skillnader mellan de undersökta studierna samt andra hinder som gör att hela bilden av dessa samband inte går att ta del av utan vidare forskning.

Till att börja med visar de två studierna från avsnitt 4.1 på något olika utfall vid beaktning av sorptionens temperaturberoende och hysteres. Zhang et al (2016) noterade en minskad risk för mögeltillväxt vintertid och en ökad risk sommartid, medan det i studien av Huttunen & Vinha (2024) framgick en generellt minskad risk året om. Skillnaderna skulle bland annat kunna bero på att det inte är exakt samma beräkningsmodeller eller material som används, men troligtvis handlar det också om att effekterna blir olika stora beroende på konstruktionstyp och utformning. Inverkan av temperaturberoendet kan till exempel förväntas bli större över en takkonstruktion än en väggkonstruktion på grund av en mer direkt utsatthet för solstrålning. Eftersom den förhöjda relativa fuktigheten sommartid enligt figur 4.5 framgår bero på just temperaturberoendet, skulle detta kunna vara en betydande faktor för de olika utfallen. En annan viktig skillnad är sannolikt randvillkoren, då det bland annat används klimatdata från två olika platser. Vidare är de undersökta materialen i den första studien helt diffusionstätade, medan ena sidan är diffusionsöppen och dessutom gränsar mot en ventilerad luftspalt i den senare av studierna. Luftomsättningen i denna spalt visade sig dessutom vara avgörande för inverkan av de undersökta sorptionsbeteendena. Forskarna är i båda fallen återhållsamma med förklaringar till varför de dokumenterade resultaten ser ut som de gör. Detta kan tänkas bero att kunskapen kring dessa sorptionsfenomenen i sig är otillräcklig, samtidigt som betydligt fler material och konstruktioner behöver undersökas för att kunna dra slutsatser om deras effekter.

Även när det kommer till tillväxtbeteendet hos mögelsvampar under dynamiska förhållanden behövs mer data. Ruijten et al (2021) nämner i deras studie om hyfers tillväxt vid en dynamisk RF, att de erhållna resultaten högst troligt har ett artberoende. Detta stärks av bland annat en studie från 2016, som vid en jämförelse av hyfers tillväxt under dynamiska förhållanden hos tre olika arter av mögelsvamp (bl.a. *Penicillium rubens*) visade att dessa hade olika bra förmågor att överleva fluktuationerna (Segers et al 2016). Studien indikerade även att denna förmåga inte härstammar

från hur väl arten klarar av att växa i torrare miljöer. Sådana förmågor har däremot genom flera andra studier (t.ex. van Laarhoven et al 2016; Ruijten et al 2020) kunnat kopplats till egenskaper och beteenden hos svampen som utvecklats redan under sporulering, som ett resultat av de då rådande fuktförhållandena. Att även svamparna påverkas av sin egna fukthistoria visar på ytterligare komplexitet i frågan. Den dynamiska fuktresponsen hos materialet är inget som diskuteras i studien av Ruijten et al (2021), men det är inte helt osannolikt att tillväxten hade kunnat se annorlunda ut på ett annat substrat i det avseendet.

Huruvida fukttinnehållet har en inverkan på tillväxten som är skild från vattenaktiviteten är svårt att bedöma baserat på den ytterst begränsade forskning som utforskat den möjligheten. En liknande slutsats har dragits vid en tidigare forskningsstudie från Lunds universitet där en annan metod med isotermisk kalorimetri användes (Li & Wadsö 2013). I denna studie mättes aktiviteten hos tre olika arter av mögelsvamp baserat på värmeproduktion under deras metabolism. Sporer från svamparna inokulerades på granprover som sedan kontrollerat fuktades upp och torkades ut. Resultatet visade på högre aktiviteter under uttorkningen för samtliga arter, vilket antogs bero på ett högre fukttinnehåll till följd av sorptionens hysteres. En viss osäkerhet framgick gällande om denna värmeproduktion kom från den metabolism som pågår under tillväxt, eller ifall den var ett resultat av stressreaktioner hos cellerna i samband med en minskande vattenaktivitet. Att två helt olika metoder givit samma indikation visar dock på att ämnet kan vara intressant att fortsatt utforska. Laarhoven et al (2015) ger förklaringen att den snabbare koloniseringen de dokumenterade kan bero på en ökad resurstillgång i samband med ett ökat fukttinnehåll, bland annat genom att fukttransport genom materialet i högre grad kan ske i vätskefas vilket bör medföra mer näringsämnen till ytan. Även sorptionens temperaturberoende kan tänkas vara betydande i sådant fall, men dess inverkan bortfaller då båda studierna är utförda under isoterma förhållanden. Detta är en förenkling som vanligen görs, då temperaturens samtida inverkan både på svampars krav på tillgängligt vatten och vidare tillväxthastighet har varit svår att framgångsrikt modellera. Detta kan tänkas förändras i framtida forskning då ett nytt förslag på beräkningsmodell nyligen tagits fram och har visat sig göra mer tillförlitliga estimeringar (Boonruang & Lerkkasemsan 2023).

Vad som avslutningsvis är viktigt att ha i åtanke är att mögeltillväxt alltid utgår från materialets yta, vilket innebär att det är just tillståndet här - i det så kallade *mikroklimatet* - som är avgörande (Adan & Samson 2011). Ytligt förväntas ett klimat som är skilt både från omgivande luft och det av materialet som helhet. I en numerisk simulering av mikroklimatet hos gipsprover, kunde van Laarhoven (2016) bland annat visa att jämvikt snabbare uppnås vid materialets yta, men att detta vid mindre skillnader i RF sker mycket snabbare vid uppfuktning än uttorkning vilket vidare kan innebära en fördröjning av gynnsamma förhållanden. Ett ökat luftflöde i klimatkammaren visade sig dock påskynda jämviktsprocessen. Det framgick även att det tar betydligt längre tid för fukttinnehållet att stabilisera sig än RF, och att materialets transportegenskaper där kan vara avgörande. I studien av Ruijten et al (2021) förutsattes omedelbar jämvikt vid provets yta när den relativa fuktigheten justerades. Samma antagande görs vid bestämning av kritiska fuktnivåer

(Johansson et al 2022) och i andra forskningsexperiment med denna typ av kontrollerade utföranden i klimatkammare. Vid applicering i verkliga sammanhang däremot, kan sådana förenklingar tänkas ge betydande mätavvikelser (Adan & Samson 2011). En ytterligare osäkerhet blir i vilken grad detta kan tillämpas för material som befinner sig i en konstruktion, där fuktutbytet inte nödvändigtvis sker med luft eller utgår från den sida där mögeltillväxten förväntas uppstå. I studierna från avsnitt 4.1 utfördes hygrotermiska modelleringar för punkter i material invid skiktövergångar. Något som framgår av båda dessa studier är dock att den inre fukttransporten varit svår att beräkningsmässigt förutse, och att anpassningar och förenklingar därför behövt göras (Zhang et al 2016; Huttunen & Vinha 2024). Även om fuktens rörelser nog bättre representeras av dessa beräkningar, avviker troligtvis värdena något från det faktiska mikroklimatet.

5.1.2 Kritiska fuktnivåer

Så här långt har detta arbete ställt betydligt fler frågor än vad som faktiskt kunnat besvaras. Det är en trend som kommer att fortsätta in i den vidare diskussionen om kritiska fuktnivåer. Metoden framtagen av RISE för att bestämma kritisk RF hos material i klimatkammare har verifierats genom fältundersökningar (Johansson et al 2013; 2018). I dessa dokumenteras påväxten på materialprover placerade i olika vindsutrymmen och krypgrunder över en längre tid, samtidigt som RF och temperatur mäts i omgivande luft intill materialen. I korthet förklarar, användes kritiska värden bestämda under kontrollerade förhållanden för att uppskatta påväxten baserat på den dynamiska klimatdatan och jämfördes sedan med den faktiska påväxten hos proverna som analyserades vid ett antal tillfällen under experimentens gång. Bortsett från några uppmärksammade felkällor gällande bland annat mätosäkerheter av RF och bedömningen av påväxten, kunde överensstämmelser tydas. När exakt dokumenterad påväxt uppstod, hur tillväxten varierade samt i vilken grad den loggade klimatdatan faktiskt var representativ av de förhållanden som rådde i materialens mikroklimat, utgör däremot vidare osäkerheter som är av speciellt intresse för denna frågeställning.

I framtidens både varmare och fuktigare klimat kommer förutsättningarna för mögeltillväxt förbättras. Detta framgår tydligt i studien av Huttunen & Vinha (2024) där det uppskattade mögelindexet förväntas öka stadigt mellan åren 2011, 2050 och 2080 för de flesta av de undersökta scenarierna. Beaktning av sorptionens temperaturberoende och hysteres visade då generellt mer optimistiska värden. Den valda gränsen på $MI < 1$ är lägre än vad som vanligtvis klassas som en etablerad påväxt vilket kan ses som en extra säkerhetsmarginal, men hur väl prognosen faktiskt stämmer går inte att med säkerhet säga eftersom mögelmodeller inte kan ge helt tillförlitliga resultat. På RISE har en utvärdering gjorts av hur väl några olika mögelmodeller kunde förutspå den påväxt som dokumenterades vid de tidigare nämnda valideringarna, där ett fokus låg på användarperspektivet (Johansson et al 2021). Detta utfördes som en round-robin studie, där delaktiga parter fick tillgång till klimatdatan och grundläggande information om de testade materialen för att sedan använda detta till prediktioner med hjälp av föredragen mögelmodell. Sammanlagt 6 olika modeller testades, fyra av vilka använde en dynamisk beräkningsmetod som

tog hänsyn till varaktighet av gynnsamma förhållanden. De övriga två utförde statistiska bedömningar, enbart baserade på ifall RF överskred av modellen bestämda gränsvärden. I majoriteten av fallen underskattade de dynamiska modellerna riskerna och gav falsk-negativa indikationer för mögelväxt. Vad detta berodde på gick inte helt att precisera, men valen av parametrar i de olika programmen visade sig influera resultaten. Genom att i efterhand justera dessa parametrar för att få ett resultat som överensstämde med verkligheten framgick det dock att val som inte var rimliga i vissa fall hade behövt göras för att uppnå detta, vilket tyder på att det finns fler osäkerheter. De två statistiska modellerna gjorde betydligt bättre ifrån sig, men tenderade istället att överskatta riskerna. Bäst ifrån sig gjorde den av dem som krävde en testad RF_{krit} införd som parametervärde. För att säkerställa en god användbarhet av modelleringsprogram lär flertalet förenklingar vara nödvändiga, men det krävs då en speciellt stor förståelse för deras olika begränsningar (Johansson et al 2021).

Att det uppstår komplikationer i att uppskatta dynamiska effekter är inte svårt att förstå när den ofullständiga kartläggningen av både mikrobiologiska processer såväl som mer detaljerade sorptionsbeteenden och deras ursprung vägs in i ekvationen. Syftet med en implementering av varaktighet i det kritiska fuktillståndet är att ta hänsyn till hur mikrobiella tillväxtprocesser påverkas av ett dynamiskt klimat. Dessa är processer som visat sig vara väldigt invecklade, även på vis som legat utanför ramarna för detta arbete. Hur förhållandena i det faktiska mikroklimatet varierar beroende på materialegenskaper har samtidigt hamnat något i skymundan, kanske för att sådana mätningar är betydligt svårare att utföra (Adan & Samson 2011). Här finns icke desto mindre ett glapp i kunskapen som potentiellt innebär feluppskattningar av både varaktigheten och intensiteten av gynnsamma förhållanden. Detta är kunskap som är av speciellt stor betydelse vid undersökningar av just tillväxtbeteenden, där man dessutom kan tänka sig att ett kortare tidsperspektiv kommer bli allt mer intressant på grund av sannolikt ökade tillväxthastigheter i samband med de klimatförändringar som förväntas inom en snar framtid. Vidare förekommer ett ökat intresse för användning av organiska byggnadsmaterial. För att med säkerhet kunna bedöma hur dessa lämpligast används, erfordras återigen ett parallellt breddande av kunskaperna kring materialens sorptionsmässiga beteende med koppling till mikrobiell tillväxt. Eftersom vi bygger med livslängder i storleksordningen av 80-100 år, utgör det här ett underlag som behövs redan nu för att kunna fatta hållbara beslut som säkerställer långsiktigt hälsosamma inomhusmiljöer.

5.1.3 Forskningens begränsningar

Boverket gjorde 2018 en kartläggning av fel, brister och skador inom byggsektorn, genom vilken det framgick att den stora majoriteten av dessa utgörs av fukt- och vattenrelaterade skador (Boverket 2018). Rapporten bygger i huvudsak på enkätundersökningar och en mängd intervjuer med branschaktörer verksamma inom byggprocessens olika skeden. Vid tillfrågan om vad som upplevdes förorsaka dessa skador kunde en relativt enad bild tydas, där tidsbrist och bristande kompetens frekvent uppgavs som primära faktorer. Detta visar att det i första hand finns en problematik i att de kunskaper som finns inte utnyttjas i tillräcklig grad. Intressant nog nämns även

en problematik i att stora delar av byggforskningen som sker inom akademien är beroende av en viss finansiering från aktörer i branschen, vilket kan medföra att olika särintressen dikterar forskningsområdena. Att bedriva forskning med ett fokus på hållbarhetsfrågor försvåras därmed om ett sådant driv saknas i branschen. Detta kan tänkas utgöra en del av bakgrunden till att forskning relaterad till bland annat de frågeställningar som presenteras i detta arbete haft en tämligen långsam utveckling.

Ämnesområdets komplexitet har sannolikt också utgjort ett hinder för forskningens progression. En förutsättning för vetenskapliga metoder är att utförandet är av sådan art att resultaten faktiskt kan kopplas till det som undersöks. Detta innebär vanligen att experiment behöver ske under kontrollerade förhållanden som tillåter ett uteslutande av andra inverkanse faktorer. Även om detta arbete egentligen inte har haft något större fokus på själva metoderna, är den generella bilden att många av dessa har komplicerade utföranden med begränsningar som gör att resultaten kan bli svåra att tolka och jämföra med andra studier. Lägges man dessutom på det tvärvetenskapliga elementet innebär det följaktligen att möjligheten till ett bredare perspektiv till viss del begränsas. Genom sammanställningar av den kunskap som erhållits från kontrollerade undersökningar kan paralleller enklare dras mellan olika observationer och på så vis ge en bättre överblick av sambanden. Det här examensarbetet har varit ett försök till en sådan sammanställning, men i en mycket kortfattad och förenklad form. Med ett dessutom avgränsat fokus har detta i slutändan inneburit att frågeställningarna fortsatt inte är möjliga att ge något definitivt svar på. Vad denna sammanställning avser att förmedla är istället att de strödda kunskaper som finns på området motiverar ett behov av vidare forskning kring mekanismerna bakom möglets uppkomst på byggnadsmaterial i relation till materialens fuktegenskaper.

5.2 Slutsatser

De övergripande slutsatser som avslutningsvis kan dras med hänsyn till de tre undersökta frågeställningarna är följande:

- *Hur ser sorptionens jämviktsprocesser ut under dynamiska klimatförhållanden?*

Under dynamiska förhållanden har sorptionens temperaturberoende och hysteres en betydande inverkan på jämviktsprocesser, åtminstone hos trämaterial och troligtvis även andra organiska material. Att bortse från dessa vid hygrotermiska beräkningar kan därmed ge konsekvenser vid bedömningar av materialens fukttillstånd. Jämvikt uppnås snabbast vid ytan, men under fluktuerande klimatförhållanden kan mikroklimatets fukttillstånd förväntas vara skilt från både det av omgivande luft och materialet som helhet.

- *Vad innebär dessa processer för den mikrobiella tillväxten?*

Den relativa fuktigheten i mikroklimatet är avgörande för mögelsporers såväl som hyfers aktivering. Hur denna varierar framgår även styra hyfers tillväxthastighet och överlevnad. Materialets fukttinnehåll kan potentiellt ha en egen inverkan på tillväxten. För att bättre förstå tillväxtbeteenden i verkliga sammanhang och de tidsspann det faktiskt handlar om, är det därför nödvändigt att närmare studera materials sorptionsbeteenden och deras inverkan på jämviktsprocesser.

- *Finns det särskilda egenskaper avseende sorption som gör ett material mer eller mindre känsligt för mögelskador?*

Eftersom de undersökta sorptionsbeteendena kan kopplas till materialegenskaper som rör porositet och porstorleksfördelning samt innehållet av organiska molekyler, är det möjligt att paralleller kan dras mellan dessa och materialets känslighet för mögel. Mer forskning krävs för att kunna dra slutsatser kring exakt vilken effekt dessa beteenden har och hur de påverkar olika mikroklimat.

5.3 Fortsatta studier

Hela detta examensarbete kan betraktas som ett förslag till fortsatta studier. De undersökta frågeställningarna saknar fortfarande konkreta svar, vilket bedöms bero på en avsaknad av tillräcklig forskning med direkt relevans. Eftersom arbetet utförts på kandidatnivå, är den sammanställning som gjorts långt ifrån representativ av all den kunskap som finns på ämnet inom båda av de undersökta forskningsområdena. En sådan sammanställning skulle troligtvis kräva ett omfång som är mer i linje med vad som kan förväntas av en doktorsavhandling. Detta innebär att det definitivt kan finnas fler pusselbitar bland redan utförda studier som kan bygga vidare på och tillföra nya perspektiv till denna tvärvetenskapliga utredning. Vad gäller ny forskning finns det inga gränser i sikte för hur mycket mer kunskap som finns att hämta, men som vägledning kan förslagsvis tre generella riktningar pekas ut:

1. **Upprepning av tidigare undersökningar i syfte att generera mer data** - Bristen på data att tillgå har utgjort ett centralt hinder för möjligheten att kunna dra ordentliga slutsatser. På fuktsidan kan detta innebära undersökningar av fler material och i olika konstruktionssammanhang, medan mikrobiologiska studier kan tänkas repeteras för fler arter, med en variation av substrat om möjligt, samt med utforskning av fler dynamiska konstellationer. Ett fokus bör då ligga vid jämförbarhet, men inte utan en samtidig utvärdering och vidareutveckling av metoder för att kunna eliminera osäkerheter och föra forskningen framåt. Med en större mängd data kommer mönster troligtvis enklare kunna detekteras för att vidare kopplas till mer specifika egenskaper.
2. **Undersökning av jämviktsprocesser i mikroklimatet** - Genom utveckling av metoder för att uppskatta de förhållanden som råder i mikroklimatet till följd av en fluktuerande RF och temperatur, kan en tydligare länk skapas mellan fuktmekanik och mikrobiologi. Det är möjligt att det redan finns visst underlag för en sådan metod, men den typen av forskning har legat på en alldeles för avancerad nivå för att undersökas i detta arbete. Av vad som kunnat tolkas finns det åtminstone inte någon metod tillgänglig för allmänt bruk. En särskild fördjupning i fukttransport kan i och med detta tänkas utgöra ett huvudfokus för framtida studier på området. Något som skulle vara speciellt intressant är även undersökningar av jämvikt i mikroklimat hos material som befinner sig i konstruktioner och inte står i direkt kontakt med luft, utan enbart med andra material.
3. **Undersökning av fukttinnehållets betydelse** - Eftersom vattenaktivitet ansetts vara den styrande faktorn har inget större fokus ägnats åt en potentiell inverkan av fukttinnehållet. Detta går lite hand i hand med att sorptionens hysteres och temperaturberoende, som båda är avgörande för variationen i jämviktsfukthalter, vanligen försummas. Studier och utveckling av metoder riktade mot att undersöka just detta kan eventuellt öppna upp för nya perspektiv.

Litteratur

Adan, O. C. G., & Samson, R. A. (2011). *Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living*. Wageningen Academic Publishers.

<https://doi.org/10.3920/978-90-8686-722-6>

Arfvidsson, J., Harderup, L.-E., & Samuelson, I. (2017). *Fukthandboken* (4 uppl.). AB Svensk Byggtjänst.

Boonruang, P., & Lerkkasemsan, N. (2023). Study of kinetic model for fungal spore germination under dynamic conditions: Case study on germination of *Penicillium expansum* spores. *Heliyon*, 9(12):e21928.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21928>

Boverket (2018). *Kartläggning av fel, brister och skador inom byggsektorn* (Rapport 2018:36). Boverket.

<https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2018/kartlaggning-av-fel-brister-och-skador-inom-byggsektorn.pdf>

Burström, P. G., & Nilvér, L. (2019). *Byggnadsmaterial* (3 uppl.) Studentlitteratur AB.

Flannigan, B., Samson, R. A., & Miller, J. D. (2001). *Microorganisms In Home and Indoor Work Environments* (1 uppl.). CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/9780203302934>

Huttunen, P., & Vinha, J. (2023). Temperature-dependency of hysteretic sorption in hygrothermal modelling of wood fibreboard sheathing: analysis of exterior wall laboratory experiments. *Journal of Building Performance Simulation*, 17(4), 395–405.

<https://doi.org/10.1080/19401493.2023.2293847>

Huttunen, P., & Vinha, J. (2024). Effect of temperaturedependent and hysteretic sorption in computational mould risk analyses of wood fibreboard sheathing, *Journal of Building Performance Simulation*, 17:5, 585-597.

<https://doi.org/10.1080/19401493.2024.2370558>

Johansson, P., Svensson, T., & Ekstrand-Tobin, A. (2013). Validation of critical moisture conditions for mould growth on building materials. *Building and Environment*, 62, 201-209.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.012>

Johansson, P., Wadsö, L., Johansson, S., Svensson, T., & Bengtsson, B. (2018). *Utveckling och validering av modeller för att prediktera mögelväxt i byggnader* (Rapport 2018:167). RISE Research Institutes of Sweden.

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1507818/FULLTEXT01.pdf>

Johansson, P., Lång, L., & Capener, C.-M. (2021). How well do mould models predict mould growth in buildings, considering the end-user perspective? *Journal of Building Engineering*, 2021;40.

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102301>

Johansson, P., Bok, G., Lång, L., & Mjörnell, K. (2022). *Kritiskt fukttillstånd för mögelpåväxt på byggnadsmaterial* (Rapport 2022:69). RISE Research Institutes of Sweden, Avdelningarna för Samhällsbyggnad & Bygg och Fastighet.

<https://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1663454/FULLTEXT02.pdf>

Li, Y., & Wadsö, L. (2013). Fungal activities of indoor moulds on wood as a function of relative humidity during desorption and adsorption processes. *Engineering in Life Sciences*, 13(6), 528-535.

<https://doi.org/10.1002/elsc.201200100>

Nilsson, L.-O. (2013) *Att räkna med fukt* (Rapport 1312). Moistenginst AB.

Osharov, N., & May, G. S. (2001). molecular mechanisms of conidial germination. *FEMS Microbiology Letters*, 199(2), 153–160.

<https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2001.tb10667.x>

Ruijten, Philip & Huinink, Henk & Adan, Olaf. (2020). *Penicillium rubens* germination on desiccated and nutrient-depleted conditions depends on the water activity during sporogenesis. *Fungal Biol* 124(12):1058–1067.

<https://doi.org/10.1016/j.funbio.2020.10.006>

Ruijten, P., Huinink, H. P., & Adan, O. C. G. (2021). Hyphal growth of *Penicillium rubens* in changing relative humidity. *Appl Microbiol Biotechnol* 105, 5159–5171.

<https://doi.org/10.1007/s00253-021-11343-6>

Segers, F. J. J., van Laarhoven, K.A., Huinink, H.P., Adan, O. C. G., Wösten, H. A. B., & Dijksterhuis, J. (2016). The Indoor Fungus *Cladosporium halotolerans* Survives Humidity Dynamics Markedly Better than *Aspergillus niger* and *Penicillium rubens* despite Less Growth at Lowered Steady-State Water Activity. *Appl Environ Microbiol* 82(17):5089-98.

<https://doi.org/10.1128/AEM.00510-16>

van Laarhoven, K. A., Huinink, H. P., Segers, F. J. J., Dijksterhuis, J., & Adan, O. C. G. (2015). Separate effects of moisture content and water activity on the hyphal extension of *Penicillium rubens* on porous media. *Environ Microbiol* 17(12):5089–5099.

<https://doi.org/10.1111/1462-2920.13012>

van Laarhoven, K. A. (2016). *Water relations of Penicillium rubens on porous substrates*. [Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Applied Physics and Science Education]. Eindhoven University of Technology.

https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/20451714/20160420_Laarhoven.pdf

World Health Organization. Regional Office for Europe. (2009). WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould. World Health Organization. Regional Office for Europe.

<https://iris.who.int/handle/10665/164348>

Zhang, X., Zillig, W., Künzle, H. M., Mitterer, C., & Zhang, X. (2016). Combined effects of sorption hysteresis and its temperature dependency on wood materials and building enclosures- Part I: Measurements for model validation. *Building and Environment*, 106, 143–154.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.025>

Zhang, X., Zillig, W., Künzle, H. M., Mitterer, C., & Zhang, X. (2016). Combined effects of sorption hysteresis and its temperature dependency on wood materials and building enclosures- Part II: Hygrothermal Modeling. *Building and Environment*, 106, 181–195.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.033>