

Mellanlagring av prefabricerade byggnadsdelar i trä – klimat och fukttillstånd

Teknisk rapport avseende teoretiskt moment



Ordernummer: 1148516

Dokumenttyp	Ordernummer	Rapportdatum	Antal sidor	Antal bilagor
Bilaga till slutrapport	1148516	2024-06-12	42	-
Uppdragsnamn		Revisionsdatum	Upprättad av	
Optimal lagring trämoduler, simuleringar		-	Johan Öberg	
Beställare		Referens	Granskad av	
Träcentrum Norr, TCN		Cristoffer Schutze	Kent Bergström S. Olof Mundt-Petersen (extern) Göran Berggren (extern)	
Beställarens ordernummer			Undersökningsperiod	
2442310			september 2023-april 2024	

Sammanfattning

Projektets delrapport avser fukt- och värmeberäkningar för volymmoduler som förses med väderskydd på alla sex sidor och lagras utomhus. Inledningsvis skapas en tvådimensionell beräkningsmodell som delvis verifieras genom att jämföra beräknade fuktkvoter, relativ fuktighet och temperatur med tidigare uppmätta fukttillstånd i moduler över lång tid.

Genom efterföljande simuleringsstudie i WUFI 2D utvärderas inverkan av klimat, väderstreck, lagringstid, inbyggnadsfukthalt, betydelsen av skillnader i fukttinnehåll mellan material m.m. Resultaten visar att mellanlagring i utomhusklimat i första hand helt bör undvikas och i andra hand ske i kontrollerad miljö. Då mellanlagring utomhus ändå måste ske bör tiden för sådan lagring minimeras till högst någon månad. I de fall längre mellanlagring är oundvikligt ökar risken för följdskador.

Vid emballering ska en fuktkvot på högst 14 % (medelfuktkvot) eftersträvas och fuktkvoten bör inte överskrida 16 % i någon inbyggd regel. Emballering ska i ett klimat med så låg ånghalt i luften som möjligt. Det går inte att kompensera för fuktigare material med ett mer fuktgenomsläppligt emballage eller med torrare omgivande material.

Innehållsförteckning

1	Uppdragsbeskrivning.....	5
1.1	Bakgrund	5
1.2	Mål.....	5
1.3	Övergripande metod	5
1.4	Kort om fuktteori.....	5
1.4.1	Allmänt om beskrivningarna	5
1.4.2	Fukt i luft	5
1.4.3	Fukt i material.....	6
1.4.4	Mikrobiell tillväxt.....	6
1.4.5	Fritt vatten.....	8
1.5	Avgränsningar och antaganden	8
2	Metod.....	9
2.1	Modellering	9
2.1.1	Översikt	9
2.1.2	Golvbjälklag	10
2.1.3	Innertak/mellanbjälklag	10
2.1.4	Väggar.....	10
2.1.5	Klimat	10
2.1.6	Initiala randvillkor.....	10
2.1.7	Fuktbelastning och utvärdering.....	11
2.1.8	Material	11
3	Beräkningsmodell, indata och principiell utvärdering	11
3.1	Beräkningsmetod och modellutveckling	11
3.2	Känslighetsanalys	14
3.3	Material och materialdata	15
3.4	Genomförda beräkningar	16
3.5	Klimatdata	16
3.6	Utvärdering av resultat.....	18
3.6.1	Verifiering av modell	18
3.6.2	Test av modell och parameterstudie	19
4	Resultat initiala beräkningar	22
4.1	Inbyggnadsfuktkvot.....	22
5	Resultat verifierade beräkningar.....	24
5.1	Urval till blind evaluering.....	24

5.2	Beräknade och uppmätt fuktkvot i modul 322B	26
5.3	Resultat modul 214A	26
5.4	Resultat modul 521A/522B	27
5.5	Slutsatser av verifieringen	28
6	Resultat parameterstudie	29
6.1	Översikt beräkningsfall	29
6.2	Resultat för basfall och kompletteringar	29
6.3	Särskild jämförelse av värmestrålningseffekter	31
6.4	Klimat inne i modulerna	32
6.5	Olika hänsyn till emballage runt moduler	34
6.6	Risker med kondensering inuti moduler	35
6.7	Luftens fukttransportegenskaper	36
6.8	Alternativa isoleringsmaterial i klimatskärmen	37
7	Slutsatser/Orsaksdiskussion	38
7.1	Slutsatser av initiala beräkningar	38
7.2	Slutsatser av parameterstudien	38
8	Rekommendationer	41
	Fortsatta studier	42
	Referenser	43

1 Uppdragsbeskrivning

1.1 Bakgrund

Trähusindustrin och andra leverantörer av prefabricerade planelement i trä tvingas ibland till mellanlagring av sina moduler och planelement. Att mellanlagra dessa inomhus i ett kontrollerat klimat är i regel mycket kostsamt. Samtidigt indikerar praktisk erfarenhet att mellanlagring kan ske utomhus om modulerna och planelementen emballeras omsorgsfullt och att innehållande byggnadsmaterial har tillräckligt låga fukttillstånd vid emballering. Vilka omgivande förutsättningar som krävs för att undvika fuktrelaterade skador är dock inte helt fastställt.

1.2 Mål

Projektets mål är att ta fram en vägledning/ guide för hur moduler av trä bör mellanlagras för att undvika fuktrelaterade skador. I detta moment utvärderas hur omgivande klimat och fukttillstånd påverkar risken för fuktrelaterade skador med hjälp av teoretiska modeller.

1.3 Övergripande metod

Rapporten redovisar bakgrund, utförande och analys av de beräkningar som ligger till grund för bedömningarna av fuktbelastningar och fukttillstånd i trämoduler. Samtliga beräkningar är utförda i det tvådimensionella beräkningsverktyget för kopplad fukt- och värmetransport WUFI 2D (IBP, 2024) Denna teoretiska del av projektet är huvudsakligen utförd i tre faser:

1. Bygga beräkningsmodell
2. Verifiera beräkningsmodellen mot mätningar i trämoduler
3. Parameterstudie där den verifierade beräkningsmodellen utsätts för olika förutsättningar
 - a) Olika omgivande klimat
 - b) Olika initiala fukttillstånd vid emballering
 - c) Delvis olika lagringstider, solstrålning mm

Se vidare slutrapport från TCN.

1.4 Kort om fuktteori

1.4.1 Allmänt om beskrivningarna

I nedanstående avsnitt beskrivs grundläggande och återkommande begrepp som används i denna rapport. Teorin är väsentligt förenklad och förkortad och syftar till att ge en kort bakgrund till viktiga begrepp/samband. För en mer detaljerad teoretisk bakgrund och definitioner hänvisas i första hand till fackmässig fuktlitteratur.

1.4.2 Fukt i luft

Relativa fuktigheten (% RF) i luft talar om hur mycket vattenånga luften innehåller i förhållande till vad den maximalt kan innehålla vid den aktuella temperaturen. Mättnadsånghalten ökar med ökande temperatur. Detta innebär att luftens relativa fuktighet minskar om temperaturen höjs och ökar om temperaturen minskar. Med andra ord förmår en varmare luft innehålla mer vattenånga än en kallare luft.

RF inomhus styrs av vatteninnehållet utomhus plus fuktproduktionen inomhus. Då vatteninnehållet utomhus i stort följer temperaturen utomhus innebär det att relativa fuktigheten inomhus är låg under vintern. Att luftens RF är låg inomhus vintertid beror på att utomhusluften då är kall och innehåller lite vattenånga och dessutom värms upp inomhus vilket leder till ytterligare lägre RF. Under sommaren då utomhusluften innehåller mer vattenånga och inte värms upp inomhus kommer RF därför att bli högre.

Om temperaturen sänks tillräckligt mycket nås en temperatur där dimma uppstår i luften, som då håller 100 % RF. Denna temperatur kallas dagpunkten, d.v.s. all vattenånga kan ej bäras av luften. Kyla luften till en temperatur under dagpunkten kommer kondens, vattendroppar, att bildas. I byggnader är ofta det praktiska problemet att luften kommer i kontakt med en yta vilken har en temperatur lägre än luftens dagpunkt varvid kondens uppstår.

Luft kan bära mycket lite fukt i förhållande till dess volym, i storleksordningen gram vatten per kubikmeter. Detta medför att små fukttillskott snabbt kan leda till att luften mättas, vilket ställer särskilda krav på fuktberäkningar där luft och isoleringsmaterial (som nästan är luft) ingår.

1.4.3 Fukt i material

Många material (t.ex. trä) är hygroskopiskt vilket innebär att det kan ta upp och avge vatten till omgivningen beroende på omgivande klimat. Vid jämvikt blir RF i luften i materialets porer densamma som i den omgivande luften. Många material har stor fuktkapacitet (t.ex. trä) och kan binda upp 100-tals kg vatten, vilket betyder att det finns vatten i vätskefas i materialet.

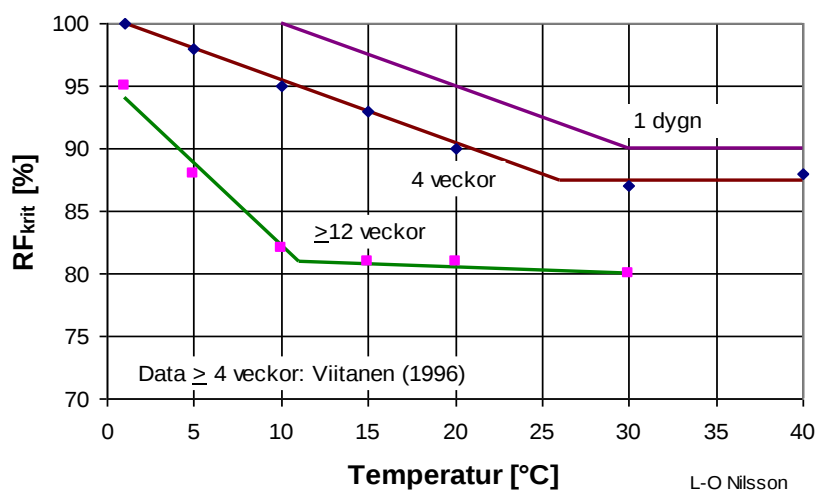
I ett material anges förhållandet mellan fukt/vatten i materialet och materialets torra vikt som fuktkvot.

Med medelfukthalt avses det genomsnittliga fukttinnehållet i respektive material (kg vatten) som använts i beräkningsmodellen. Medelfukthalten motsvarar en medelfuktkvot baserat på materialets torra vikt. Detta är inte samma sak som målfuktkvot. En viss målfuktkvot för t.ex. trä tillåter en spridning av medelfuktkvoten. I praktiken innebär det att samtliga enskilda inbyggda regler, balkar etc. var för sig måste ha en individuell medelfuktkvot som underskrider angett värde.

1.4.4 Mikrobiell tillväxt

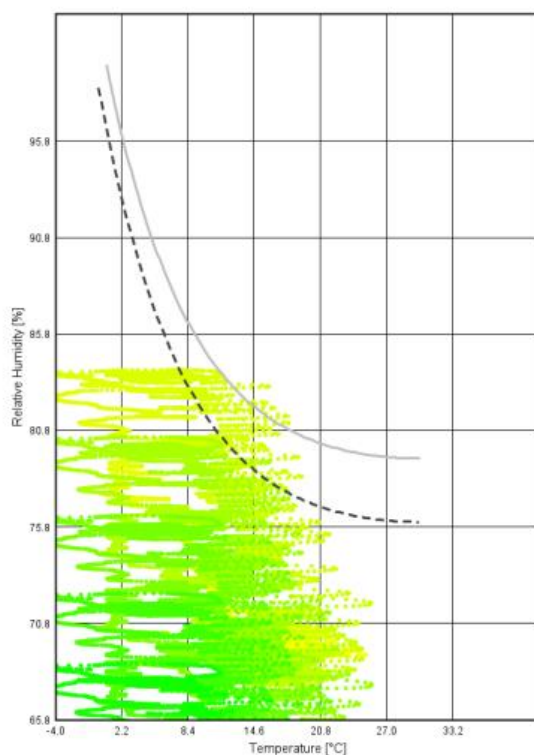
Kritisk fuktnivå för mikrobiologisk växt i organiskt material eller oorganiskt material som förorenats med organiskt material (träspån, damm, jord etc.) är en relativ fuktighet (RF) överstigande 70-75 % vid 20°C. Detta motsvarar en fuktkvot uppmätt i trämaterial på 16-17 %. Att sänka fuktnivån under kritisk RF i en redan mikrobiellt skadad miljö innebär att tillväxten hindras, den biomassa som redan växt till finns emellertid kvar. Mögel under uttorkning har dessutom en högre sekundär metabolism än mögel under tillväxt.

Utöver fuktnivån är även temperatur och varaktighet, samt en kombination av de båda, avgörande för utvecklingen av mikrobiell växt. Detta samband förtydligas schematiskt i figur 1.1 nedan (se sambandet mellan RF och fuktkvot i trä ovan).



Figur 1.1 Illustration av risk för mögelpåväxt med påverkning av RF, temp och varaktighet.
Källa: Hukka, Viitanen diagram från 1999, kompletterad med en teoretisk kurva för 1 dygn (LO Nilsson).

Kurvorna i figur 1.1 beror på bl.a. på materialet och motsvarar en likvärdig risk för olika kombinationer av RF och temperatur, så kallade isopleter eller gränskurvor. Genom att illustrera rådande temperaturer och RF för någon del i konstruktionen vid varje givet tillfälle tillsammans med olika kritiska gränskurvor för materialet kan eventuell risk för mögeltillväxt utvärderas, se figur 1.2.



Figur 1.2 Exempel på utvärdering av beräknad RF och temperatur på ytan av en träregel i en yttervägg. De två kurvorna visar över vilka det kan finnas risk för mögeltillväxt på olika material.

Det finns flera olika sätt att teoretiskt utvärdera risken för mögeltillväxt och förutom att gränskurvor ska överskridas så krävs också ett visst tidsförlopp (jämför figur 1.1). I denna utredning används huvudsakligen isopletdiagram likt den i figur 1.2 för att snabbt utvärdera risker och för en mer utförlig hänsyn till tidsaspekter, material etc. används beräkningsprogrammet WUFI Bio som innehåller Sedlbauers mögelmodell (Sedlbauers 2002).

1.4.5 Fritt vatten

Vid mellanlagring kan omställningar i omgivande klimat och stark solstrålning skapa en hög temperatur inuti den emballerade modulen och orsaka kondensutfällning och fritt vatten när fuktigt byggnadsmaterial torkar. Sådant kondensvatten rinner förhoppningsvis nedåt varvid en så kallad "hängbuk" kan uppstå i bottenemballaget. Erfarenhetsmässigt är detta fenomen förhållandevis ovanligt i moduler och planelement.

Det är beräkningsmässigt mycket komplext att hantera fritt vatten och rötskador/bakterier/svampar kan inte värderas med t.ex. en mögelmodell. Kondensutfällning kan ske mycket lokalt och är svårprognosticerat. Luftens innehåll av fukt och risk för kondensering är starkt temperaturberoende och kräver särskilda beräkningsprogram.

I aktuell utredning hanteras fritt vatten vidare under avsnitt 6.6.

1.5 Avgränsningar och antaganden

Studien utgår från den konstruktionen som redovisas i modell och bilagor, placerad i ett svenskt klimat. Konstruktionen utgörs av en trämodul och baseras på ritningsunderlag från Lindbäcks Bygg. Kopplingen till verkliga förutsättningar medför flera principiella förhållanden för mellanlagring och emballering av trämoduler och planelement oavsett precis geometri och fabrikat.

Komplexiteten i beräkningsmodellen medför att samtliga avväganden, initiala testfall och försök till optimering inte redovisas i detalj. Indata till beräkningsfallen redovisas i bilagor. Förbättringar av beräkningsmodellen redovisas i avsnittet om beräkning.

Materialdata utgår från de materialtyper och produkter som finns tillgängliga i beräkningsprogrammets databas, varav merparten baseras på mätningar i laboratorium (WUFI:s Materialdatabas). Enstaka parametrar i materialdatan har justerats för att bättre motsvara verkliga förhållanden för de faktiskt använda materialen. Jämförelser mellan använda materialegenskaper i beräkningar och materialtillverkarens tekniska uppgifter har också utförts, vilket redovisas i anslutning till beräkningar och beräkningsmodeller.

Beräkningsmodellerna utgår från att inga "fel" eller avvikelser i material och konstruktionen förekommer. T.ex. kan hål, skarvar, andra materialval och byggfukt ändra resultat och slutsatser som redovisas i studie. Likaså antas emballeringen förhindra fritt vatten att komma i kontakt med känsliga material.

Klimatfiler för parameterstudien har tagits från klimatfiler i programvaran. Dessa bygger på ett *medelvärdesbildat klimat utan extremvärden* vilka i sin tur baseras på historisk klimatdata från SMHI (Mundt-Petersen 2015). För verifierande beräkningar har ett specifikt klimat tagits fram vilket redovisas i anslutning till verifieringen av beräkningsmodellen. Eftersom något dimensionerande klimat för fuktrelaterade beräkningar inte finns så har någon sådan känslighetsanalys inte kunnat utföras.

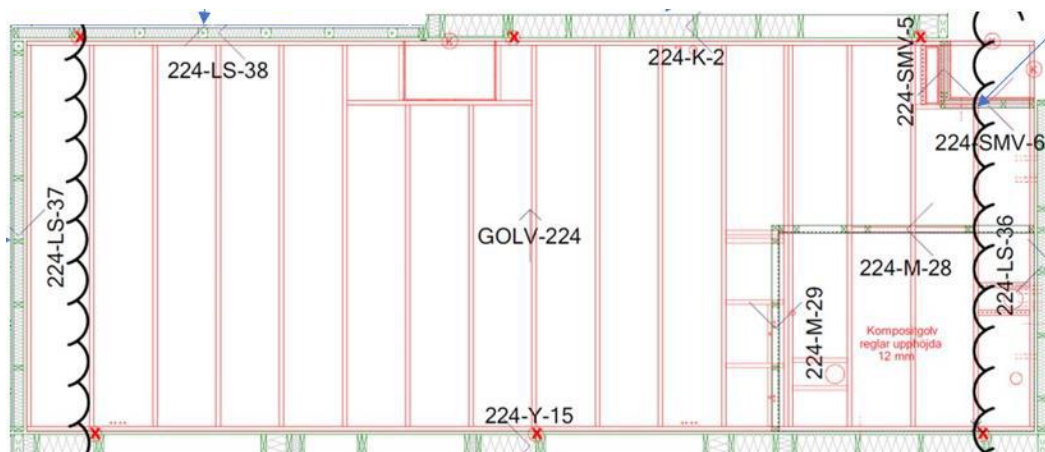
I aktuell studie har inte statistiskt spridda fuktkvoter inom modulen beaktats och inte heller skillnader (gradienter) av fuktkvot inom t.ex. samma träregel. Konsekvenser av detta diskuteras vidare i slutsatserna.

2 Metod

2.1 Modellering

2.1.1 Översikt

Figur 2.1 redovisar en översiktlig ritning i ett horisontellt snitt på den trämodul som använts som utgångspunkt vid upprättande av beräkningsmodellen.



Figur 2.1 Planvy över golvbjälklag i en typmodul. Yttre mått ca. 10x4 m.

Av figur 1 framgår att det är olika tjocklek och konstruktion på de olika ytterväggarna:

- Till höger en gavel som är mellanvägg till annan modul (lägenhetsskiljande).
- Till vänster en gavel som är lägenhetsskiljande vägg.
- Överst i figur 2.1 förekommer två väggtyper, en lägenhetsskiljande till vänster och en vägg mot korridor/ trapphus med dörröppning till höger.
- Nederst är en yttervägg, med fönsteröppningar.

Golvbjälklag, tak/mellanbjälklag och de olika väggtyperna definieras i separata ritningar (Lindbäcks Bygg) och i nedanstående sammanställning.

Det kan förväntas att fukt- och värmebelastningen över modulens olika byggnadsdelar varierar beroende på var snittet i modulen tas. Därför är det relevant att undersöka ett snitt där utomhusklimat samt olika väggtyper, tak och golv ingår. Vidare kommer temperatur- och fuktbelastningen i olika riktningar påverka varandra och vara beroende av kopplingar mellan de olika konstruktionsdelarna. Ett endimensionellt fall av flera frikopplade konstruktionsdelar bedöms därför bli en för stor förenkling av problemet.

Generellt behöver en beräkningsmodell kunna hantera:

- Tidsvariabla fukt- och värmeberäkningar.
- Tvådimensionella beräkningar/simuleringar av ett tvärsnitt genom konstruktionen som inkluderar mötet mellan olika konstruktionsdelar.
- Diffusion och omfördelning av fukt i materialen.
- Det "okända" klimatet som uppstår i modulens inneslutna luftvolym.

Olika aspekter och förutsättningar för de olika konstruktionsdelarna i beräkningsmodellen redovisas nedan.

2.1.2 Golvbjälklag

Golvbjälklagets ovansida utgörs överst av golvgips som ligger ovanpå golvspånskiva. Golvbeläggning, t.ex. parkett ingår inte i modellen eftersom golvet monteras först på byggarbetsplatsen. Övergolvet ger mycket litet värmemotstånd mellan inomhusklimat och den temperatur som uppnås på golvbjälklagets översida. Ett ytskikt ovanpå golvspånskivan, t.ex. stegljudsisolering av plast, kan ge ett mer eller mindre betydande fuktmotstånd, som kan behöva bedömas kvalitativt. Golvreglar måste modelleras med realistiska dimensioner och ta hänsyn till varierande fiberriktning hos träet (longitudinellt/radiellt årsringarna). Luftutrymmet mellan reglarna som inte fylls av isolering måste hanteras i beräkningsmodellen.

2.1.3 Innertak/mellanbjälklag

Innertak/mellanbjälklaget har i princip samma förutsättningar som golvbjälklaget. I innertaket/mellanbjälklaget finns inga luftvolymmer utan reglar och isolering ger den tvådimensionella materialkombinationen.

2.1.4 Väggar

Väggtyperna hanteras på ett förenklat sätt i beräkningsmodellen då det förekommer flera olika konstruktioner, fönster- och dörröppningar etc. I beräkningsmodellen används volymen material per längdenhet vägg i genomsnitt oavsett vilket snitt i modellen som beaktas.

Ytterväggen är inte försedd med fasadmaterial vid emballeringen och därför behöver inga luftspalter mellan ytterpanel och klimatskiva beaktas i beräkningsmodellen.

Även gavelväggar, innerväggar mm. vägs in i beräkningsmodellen med avseende på volymen material per andel lägenhetsvolym.

2.1.5 Klimat

Omgivande klimat runt om modulen behöver definieras. Detta kan vara ett uppmätt eller ett historiskt/predikerat klimat. Även om ett initialt klimat sätts inne i modulen är klimatet inne i modulen under beräkningsgången inte känt. Minst relativ fuktighet (RF) och temperatur måste definieras. Därtill har vind och solstrålning betydelse för ytors uppvärmning och avkylning.

Regnbelastning försummas då tak/vägg inte ska utvärderas för läckage.

Luftvolymen (och material) i modulen påverkas av det klimat som råder då modulen emballeras. Därför är omgivande klimat i fabrik eller utrymme där emballering sker av betydelse att definiera.

2.1.6 Initiala randvillkor

I parameterstudien varierar inbyggnadsfuktkvoten i trämaterial generellt mellan 12 % och 18 % (medelvärden). I praktiken kan stor spridning förekomma i målfuktkvoten i det specifika virkespaketet.

Ytterlighetsfallen undersöks separat. Övriga material bedöms vara i jämvikt med det klimat de förvaras i då de byggs in i modulerna.

Initialt i beräkningen sker ett "insvängningsförlopp" i början av varje beräkningsperiod. De exakta startvillkoren för t.ex. luftens temperatur är inte avgörande så länge de är inom rimliga gränser. Principen är att startvillkoren ligger nära vad som är förväntad jämvikt vid beräkningens start. För en beräkningsperiod om flera år kommer inte fuktvandringen mellan material under den initiala fasen att vara avgörande, men för kortare beräkningsperioder kan det – beroende av en rad andra omgivande faktorer – bli mer relevant.

2.1.7 Fuktbelastning och utvärdering

De kritiska områdena i konstruktionen identifieras. Det kan förväntas att yttervägg och tak har olika kritiska delar och utsätts för olika omgivande förutsättningar, t.ex. solstrålning.

Beräkningsmodellen behöver därför kunna separera på olika konstruktionsdelar samt olika material i respektive konstruktionsdel. I nästa steg utvärderas beräknade fukttillstånd med vad som är en acceptabel fuktbelastning. Fuktkvot, mögelmodell och RF jämförs med högsta tillåtna fukttillstånd för materialen. Höga RF i luft och isoleringsmaterial kan tolkas som en risk för kondens och behöver utvärderas separat.

2.1.8 Material

Luftvolymen inne i modulen modelleras med realistiska egenskaper och särskild hänsyn till rörelser p.g.a. konvektion. En förenkling i beräkningsmodellen har utförts genom att betrakta hela luftvolymen med genomsnittliga fukt- och värmeegenskaper.

Trä, gips och isolering modelleras med egenskaper enligt beräkningsverktygets materialdatabas (WUFI Materialdatabas). Fuktkapaciteten vid mycket höga RF i porösa material såsom isolering och luft ökas för att kunna räkna med rimliga tidssteg och för att kunna värdera eventuella kondensrisker mot ytor/andra material.

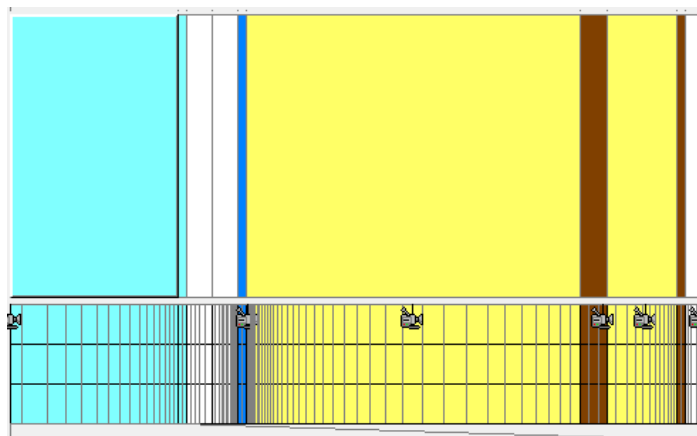
3 Beräkningsmodell, indata och principiell utvärdering

3.1 Beräkningsmetod och modellutveckling

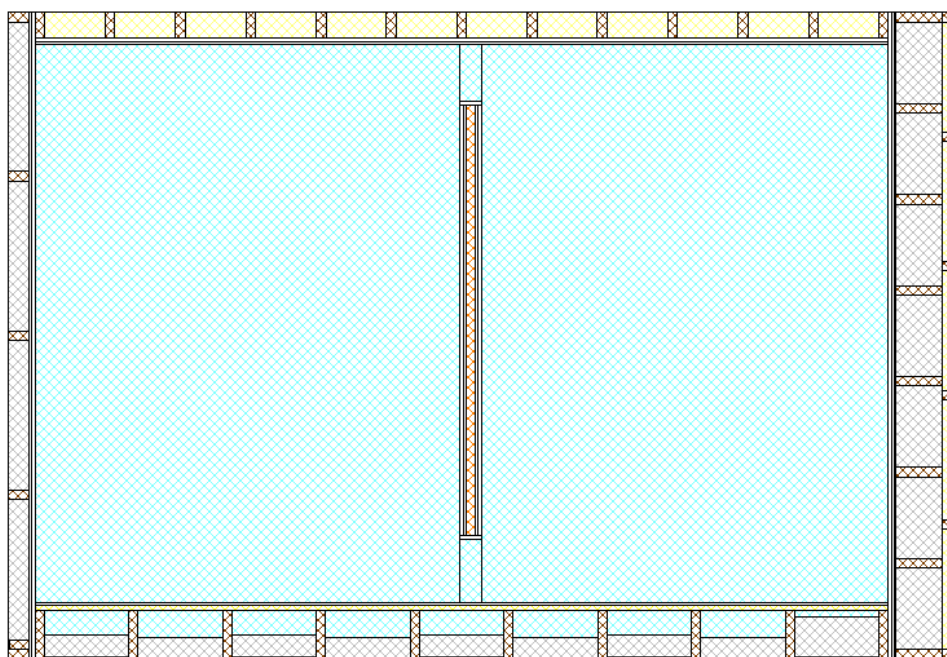
Beräkningar och modell utförs i WUFI2D, versioner 4.3 och 4.5 (IBP 2024). Programvaran är specialiserad för kopplad värme- och fuktberäkning i två dimensioner och har stor spridning och användning både i akademien och hos specialiserade aktörer i industrin.

För kontrollberäkning av fuktflöden, värmefördelning och variation av olika ingångsparametrar har WUFI Pro 6.7 (IBP 2024) använts som komplement, se figur 3.1. WUFI Pro räknar i en dimension (en horisontell eller vertikal riktning genom konstruktionen). Resultaten från dessa beräkningar är arbetsmaterial och har använts i syfte att kontrollera resultat och antaganden för de tvådimensionella beräkningarna varför de inte redovisas vidare i aktuell rapport.

Ett horisontellt tvärsnitt vinkelrätt genom modulen som inkluderar yttervägg, golv och tak samt lägenhetsskiljande vägg för en tvådimensionell beräkning redovisas i figur 3.2. Övergripande dimensioner för hela tvärsnittet är ca. 4x3 m.



Figur 3.1 Vy över endimensionell modell som skapats i WUFI Pro. Modellen avser ytterväggen med ungefärligt förhållande mellan ingående mängder material. Notera att det är en förenkling av geometrin till en dimension och att det därför inte blir en korrekt återgivning av olika tjocklekar etc.



Figur 3.2 Vy över modell som skapats i WUFI2D. Modellen, som är ett tvärsnitt, har korrekt yttre dimensioner och ungefärligt förhållande mellan ingående mängder material.

Den tvådimensionella beräkningsmodellen som används i studien har byggts med ett tvärsnitt där volymen av material per längdmeter modul ska motsvara de verkliga förhållanden. Förenklat har följande arbetsgång tillämpats:

1. Volymen av olika material bestäms för respektive vägg/golv etc. Antalet regler/fack summeras från ritningar.
2. Den totala volymen av material summeras.

3. Reglar i golv, väggar och tak orienteras likadant (tvärsnitt i modellen).
4. Avståndet mellan golv- och takreglar i roterat tvärsnitt beräknas (volymen trä bibehålls).
5. Mängden material fördelas så att tvärsnittet motsvarar ett genomsnitt per längdenhet.
6. Övrigt material från gavelväggar, andra väggtyper och innerväggar adderas som extra fuktkapacitet.

I det tänkta tvärsnittet mellan lägenhetsskiljande vägg och yttervägg orienteras alltså alla reglar likadant för att kunna utföra beräkningar på samtliga ingående material. Eftersom tjockleken (isoleringsförmågan) bibehålls på golv och tak måste avståndet mellan reglarna räknas om så att det motsvarar lika mycket material trä per längdmeter modul som för respektive väggtyp.

Snittet genom modulen passerar lägenhetsskiljande vägg och yttervägg, men gavelväggar, korridorsvägg, badrumsvägg och diverse schaktväggar m.m. hanteras förenklat som en extra materialvolym bestående av gips och trä. I praktiken ingår därmed inte den isolering som finns i dessa innerväggar och gavelväggar i den extra materialmängd som läggs till i rumsvolymen i modellen. Anledningen är dels att isoleringen bedöms ha närmast försumbar inverkan på fuktkapaciteten/fuktlagringen i tvärsnittet av modulen, samt att det genom modelleringen av träreglar inneburit att mängden isolering redan överskattats något i modellen (se tabell 1).

Den totala mängden material för badrumsväggar och gavelytterväggar som inte finns med i snittet summeras och en tiondel av detta tas med som en extra fuktkapacitet. Detta svarar emot att ca. 1/10 av luftvolymen finns med i tvärsnittet. För att inte övervärdera betydelsen av denna extra fuktkapacitet har den reducerats ytterligare till 85 % vilket är en godtyckligt vald reduktionsfaktor.

Fönster- och dörröppningar ignoreras i modellen, men finns indirekt med eftersom materialet kopplat till dessa öppningar räknats bort när den totala materialvolymen summerats.

Den förenklade modellen över tvärsnittet innebär att det blir skillnader mot den verkliga volymmängden material, inte minst då antalet reglar avrundas till ett helt antal och det inte finns öppningar för fönster och dörrar i tvärsnittet som modelleras. Tabell 1 redovisar den totala materialmängden av olika material per längdenhet i modellen och verkligheten. Notera att material med väsentlig fuktkapacitet ligger inom 5 % från verklig mängd i modellen.

Tabell 1 Summerade materialmängder per modul (kolumn 1 och 2) och per meter i modellens tvärsnitt (kolumn 3). ¹ Här ingår luft i golvfack och inget avdrag för mellanväggar mm. ² I modellen finns inga dörr/fönsteröppningar i tvärsnittet som modelleras.

Material	Konstruktion	Ritning och verklighet		Modell
		Volym (m ³)	Volym per m (m ²)	
Luft	Rumsvolym	93,7	8,9	10,2 ¹
Gipsskiva	Totalt	4,0	0,38	0,38
	Varav väggar/ golv och tak	3,9/1,6	-	-
Isolering	Totalt	17,3	1,65	1,77 ²
	Varav väggar/ golv och tak	9,3/8	-	-
Reglar/trä	Totalt	3,9	0,37	0,39
	Varav väggar/ golv och tak	2,4/1,5	-	-
Spånskiva	Golv	0,8	0,08	0,08

3.2 Känslighetsanalys

Modellen har förfinats genom upprepade beräkningar och analys av resultat och konvergensfel. Konvergensfel innebär att beräkningsförloppet inte lyckats hitta en tillräckligt liten skillnad mellan flera beräkningssteg i syfte att numeriskt lösa värme- och fukttransportekvationerna i varje tidssteg. Ett konvergensfel behöver inte betyda att modellen eller resultatet är felaktigt, utan det kan vara resultatet av en större skillnad mellan två beräkningsceller. Det finns många parametrar i beräkningsprogrammet som kan justeras för att försöka reducera antalet konvergensfel.

Utan att redovisa alla detaljer så analyseras tidsvariationen av flera parametrar för att se om det uppstår "hopp"/transienta förändringar på kort tid. Likaså analyseras residualerna, dvs skillnaderna mellan flera beräkningssteg. Det kan vara så att ett konvergensfel innebär att efter flera försök skiljer lösningens beräknade RF någon tiondels procent, vilket anses acceptabelt då andra osäkerheter är betydligt mycket större.

Genom successiva iterationer med modellen gjordes flera större och mindre modifieringar, bl.a.:

- Färgskikt läggs till på insida gipsskivor (litet fuktmotstånd).
- Ytskikt på golv ingår inte i modellen (litet fuktmotstånd).
- Startvillkor för RF och temperatur hämtas från geografisk ort och ett inomhusklimat för emballering.
- Solstrålning för verifierande beräkningar hämtas från särskild databas (se särskilt avsnitt).
- Väderstreck med ytterväggen mot nordost eller sydväst (dominerande solinstrålning)
- Värmeövergångstal på externa ytor har gjorts beroende av vindhastighet.
- Strålningsutbyte med omgivningen har inkluderats/exkluderats och jämförts.
- Emballaget modelleras som ett eget material, eller som ett fuktmotstånd. Ett yttre skikt av 5 mm luftspalt längs till alla exteriöra sidor då emballaget är ett eget material (se analys).

- Emballageplastens täthet varieras och får ett fukttransportmotstånd som är lika eller lägre än ångspärren i ytterväggen.
- Orientering av luftskikt modifieras så att de får olika egenskaper lateralt/vertikalt i modellen (konvektionseffekter inkluderas).
- Ändrade fuktparametrar på luftskikten för att hantera kondensrisker.
- Variationer av cellindelningen från 76 760 celler till 94 500 celler (85 500 celler valdes i parameterstudien).
- Justerade numeriska parametrar för beräkningsmotorn.

Grundinställningen är att konvergens inträffar om skillnaden mellan flera beräkningssteg är mindre än 0,006 % RF.

Det ligger utanför omfattningen av denna rapport att i detalj beskriva alla förändringar och revisioner av olika parametrar i modellen. Det är oftast minst 2-4 parametrar som ändras i varje ny version av beräkningsmodellen allt eftersom olika förändringar genomförs. Varje ny modelluppsättning kallas en "generation" av modellen och skillnaderna mellan olika generationer kan få stor betydelse för resultatet (och då räknas inte ändrade startvillkor och liknande). Sammantaget har 8 generationer av modellen genomförts för att få det basfall som ligger till grund för parameterstudien.

Slutsatser av känslighetsanalysen redovisas i kapitel 6.

Startvillkoren har störst betydelse för resulterande fuktnivåer över tid. Solstrålning och väderstreck har framför allt betydelse för ytterväggens fukttillstånd, medan en värmestrålningsbalans kan ge helt orimliga temperaturer inne i modulen om inte alla ytor får realistiska strålningsegenskaper (därför kontrolleras beräknade temperaturer inne i modulen).

Emballaget kan med fördel modelleras som ett fuktmotstånd med samma resultat som om det modelleras som ett material omgivet av luftskikt. Ett mer "ångöppet" emballage är inte nödvändigtvis bättre eller sämre utan beror på en mängd andra förhållanden, se vidare kapitel 6.

3.3 Material och materialdata

Modellen är utformad från konstruktioner enligt nedanstående förteckning.

Golv:

- 13 golvgips.
- 22 spånskiva.
- Golvåsar, 42x225 s600 – omräknat till s435 längsgående reglar i modell.
- 95 stnull (tjockare vid yttervägg) – omräknat till 97 mm respektive 180 mm tjock (resten luft).
- 12 plywood bredd 300 s600 – omräknat till 393 mm bredd i vartannat golvfack.

Yttervägg:

- 2x15 gipsskiva.
- Ångspärr.
- 45x220 stående stomreglar s600 – omräknat till liggande reglar s422.
- 220 stnull.
- Liggande 45x45 s600.
- 45 glasull.
- 9 vindskiva.
- (fasad är exkluderat i beräkningsmodellen)

Lägenhetsskiljande vägg:

- 2x15 gipsskiva.
- 45x95 stående regler s600 – omräknat till liggande regler s739.
- 95 stenull.

Konstruktionen utgör en ”halv” lägenhetsvägg, då dessa ställs mot varandra med luftspalt emellan.

Tak

- 2x15 gipsskiva
- 45x120 tvärgående regler s400 – omräknat till längsgående regler s326
- 120 glasull

Materialdata hämtas huvudsakligen från materialdatabasen i WUFI samt kompletteras med information från tekniska datablad samt annan litteratur. För fullständig förteckning av data, se modellfiler.

Övrigt

Inre volym om en höjd av 2m för att ungefär motsvara ytterligare material i gavlar, inredning mm.:

- 2x15 gips
- 40 mm trä
- 2x15 gips

Emballageplast och ångspärr har samma egenskaper. Fukttransportmotståndet är 2,5 Ms/m.

3.4 Genomförda beräkningar

Efter känslighetsanalys och utvärdering av flera modellversioner (se tidigare avsnitt) har olika basmodeller använts för fortsatta beräkningar. För verifiering av modellen mot mätningar har basmodell ”TCN_rev3” använts. För parameterstudien har basmodeller ”TCN_rev4” till ”TCN_rev9”

Beräkningar har utförts i tre steg:

1. Inledande utvärdering av modell, framtagande av basmodeller
2. Verifierande beräkning av fuktkvot som jämförs med mätdata
3. Parameterstudie av olika lagringsklimat

För verifieringen har modulen räknats både med och utan emballage i Piteå, se respektive resultatavsnitt.

För parameterstudien har lagring med emballage i Lund, Luleå och Växjö undersökts för olika inbyggnadsfuktkvot i virket.

3.5 Klimatdata

För moduler som lagras under väderskydd i Öjebyn har Lindbäcks Bygg loggat temperatur och RF i lagret för varje timme under olika tidsperioder (Lindbäcks Bygg 2024).

För inledande beräkningar och verifiering har klimatdata för Piteå använts. Piteå har en väderstation där historisk data kan hämtas via SMHI (Pite-Rönnskär, SMHI). Väderstationen ger information om bl.a. följande storheter:

- Temperatur (momentanvärde per hel timme)
- Relativ fuktighet (momentanvärde per hel timme)

- Vindstyrka/riktning (medelvärde över 10 min varje timme)

Mätning av långvågsstrålning sker dock närmast i Umeå (Umeå Sol, SMHI):

- Värmestrålning från atmosfären mot horisontell yta (medelvärde per timme)

Dessutom behövs solstrålning (kortvågig strålning) och den mäts av SMHI i bl.a. Umeå och Luleå som s.k. global strålning. Global strålning mäts direkt men består av en direkt och en diffus komponent. För verifierande beräkningar har i stället databasen STRÅNG (Piteå) använts där dessa bidrag kan separeras:

- STRÅNG – global och diffus strålning från solen mot horisontell yta (medelvärde per timme) för Piteå/Haraholmen.

I parameterstudien används ”färdiga” klimatfiler i WUFI för Växjö, Lund och Luleå. Dessa baseras på historiska data från SMHI för flera års väderobservationer på dessa orter.

Den klimatdata som tagits från SMHI har efterbehandlats för att kunna användas i WUFI:s klimatfiler:

- Timme 24 har gjorts om till timme 0.
- Saknade mätdata har interpolerats mot omgivande kända data (t.ex. en avtagande eller ökande temperatur över flera saknade timmar).
- Kontroll och justering så att skillnaden mellan datapunkter är exakt en timme.
- Medelvärden bildas av momentanvärdena per start och slut av närliggande timvärden.
- Klimatdata för timme h definieras som att de gäller perioden $h-1$ till h .

Data har senare jämförts med klimatfiler i WUFI för närmast tillgängliga orter för att en rimlighetsbedömning av resultaten. Analys av data för åren 2021 och 2022 visar att strålningsdata är förhållandevis lika år till år.

Klimatdata är komplicerat att sammanställa och i tabell 2 ges en sammanfattning hur detta gjorts i aktuellt uppdrag.

Då modulerna emballeras i fabriksmiljö eller inomhusmiljö har initial RF på materialen antagits stå i jämvikt med inomhusklimatet. För respektive startmånad som beräkningsperioderna avser, har RF bestämts som det högsta månadsvärdet baserat på rådande uteklimat enligt EN15026 och ”medelstor” fuktbelastning inomhus.

Tabell 2 Storheter i klimatfiler. ¹ Se kommentar till utvärderad långvågsstrålning nedan.

Storhet	För test och verifiering av modell	För parameterstudie
Temperatur	Medelvärde för timme h och $h-1$ för SMHI:s observationsdata för Piteå 2021-01-01 till 2023-01-31	Klimatfiler i WUFI, timvärden baserat på historiska tidsserier
Relativ fuktighet	Enligt ovan	Klimatfiler i WUFI, timvärden baserat på historiska tidsserier
Vindhastighet och vindriktning	Observationsdata per timme från SMHI för Piteå 2021-01-01 till 2023-01-31	Klimatfiler i WUFI, timvärden baserat på historiska tidsserier
Global solstrålning	STRÅNG databas för position Piteå (65.245;21.623). Medelvärden för timme h och $h-1$ 2021-01-01 till 2023-01-31	Klimatfiler i WUFI, timvärden baserat på historiska tidsserier
Diffus solstrålning	Enligt ovan	Klimatfiler i WUFI, timvärden baserat på historiska tidsserier
Långvågsstrålning atmosfär	Medelvärde för timme h och $h-1$ för SMHI:s observationsdata för Umeå 2021-01-01 till 2023-01-31 ¹	Beräknas i WUFI från temperatur, RF och molnindex
Långvågsstrålning omgivning	Beräknas i WUFI från temperatur och emissivitet	Beräknas i WUFI från temperatur och emissivitet

Långvågsstrålningen som används i verifieringen av modellen baseras på data som redan är angivna som ett medelvärde per timme av SMHI. Av misstag upptäcktes detta först efter verifiering och test. Det innebär att ett flytande medelvärde över två timmar använts i beräkningarna. Felets storlek har utvärderats till +/- 10 % av strålningseffekten över hela perioden och bedöms försumbar, inte minst med hänsyn till att observationerna sker i Umeå och verifieringen i Piteå. För parameterstudien används inte dessa uppmätta klimatdata.

3.6 Utvärdering av resultat

3.6.1 Verifiering av modell

För att utvärdera om beräkningsmodellen är relevant som förenklad representation av verkliga förhållanden har hygrotermiska beräkningar utförts blint och jämförts med verkliga mätningar. Blind jämförelse innebär att resultaten/mätningarna inte är tillgängliga för den som utför beräkningarna givet vissa kända förutsättningar. En blind jämförelse gör verifieringen oberoende och mer trovärdig än om data som jämförs är känd innan jämförelser sker (Mundt-Petersen 2015, Mundt-Petersen 2014).

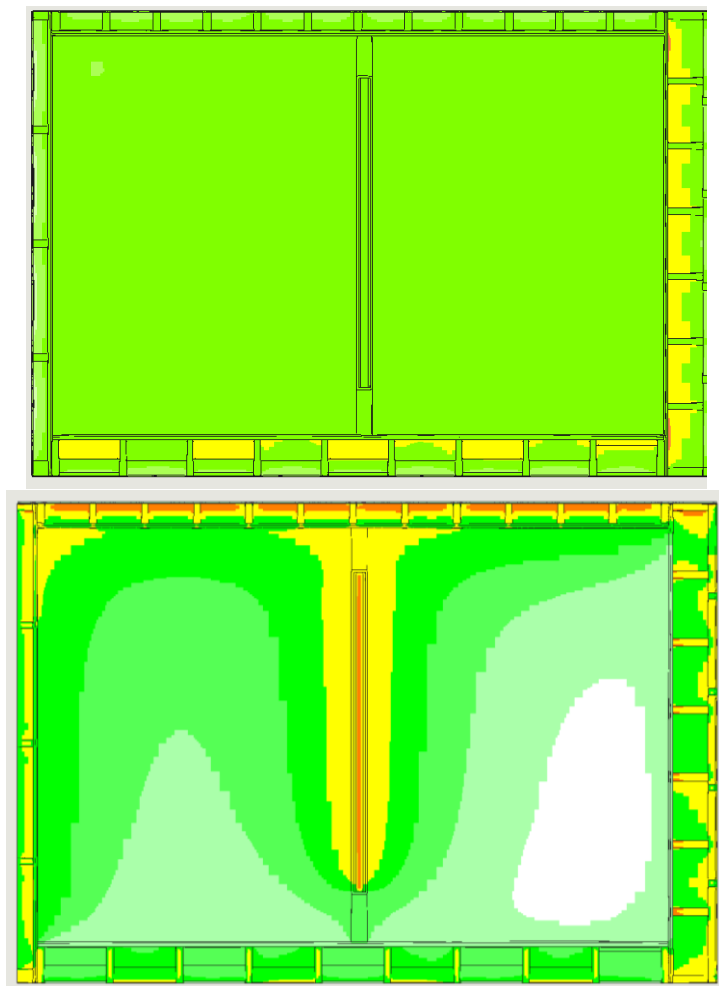
Den blinda verifieringen baseras på loggning av fuktkvoter i syllar varje timme över lång tid i olika moduler under olika klimatförhållanden med och utan emballage.

Efter jämförelsen analyseras skillnader och förbättringar av modellen sker för att få ännu bättre överensstämmelse varvid studien inte längre är blind.

Jämförelserna visar att det är avgörande hur stor utbredning (djup och bredd) som en lokal uppfuktning av syllen har om genomsnittlig fuktkvotsförändring ska kunna återskapas i modellen. Vidare har ytfuktkvoten stor inverkan på den genomsnittliga amplituden som mäts upp i trä, speciellt om denna träyta är exponerad för utomhusmiljön. Det betyder att mätutrustningen i stor utsträckning påverkar förväntade fuktnivåer och prognostiseringen av dessa i modellen.

3.6.2 Test av modell och parameterstudie

De kritiska delarna av konstruktionen identifieras i första hand visuellt via den inbyggda grafiska analysen i WUFI, se figur 3.6.



Figur 3.6 Exempel på grafisk analys av relativ fuktighet i olika delar av modellen. Kulörerna svarar mot olika fördefinierade nivåer av RF. Mer än tillfälligt återkommande "röda" och "gula" områden kan kräva detaljerad analys enligt nedan.

Förenklat beskrivet sker utvärderingen av resultat i två eller tre steg för respektive beräkningsfall. Det första steget är en allmän kontroll följt av en grafisk analys av RF i steg 2. I de fall det krävs sker en utökad detaljerad analys i steg 3, där tidsvariationen av 20-talet parametrar granskas. På detta sätt utvärderas väggar, golv och tak separat enligt nedan.

Steg 1 - Beräkningskontroll

- Beräkningens konvergens och residualer analyseras (avvikelser upp till en procent RF kan accepteras, men oftast är det som högst tiondels procent)
- Grafisk kontroll att inga transienta förändringar av totalt vatteninnehåll sker (numeriska fel, fuktmättnad m.m.)

Steg 2 - Visuell granskning av RF i tvärsnittet med hjälp av animering i WUFI

- Utvärdera RF i luftvolymen inne i modulen. Om luftvolymen inne i model överstiger 97 % RF kan det innebära risk för kondens mot invändiga ytor, särskilt om temperaturen är lägre än 5 grader.
- Utvärdera RF i isoleringsmaterial. Isoleringsmaterialen beter sig som luft, men har lite större fuktkapacitet och RF bör inte överstiga 97 % under en längre tid oavsett temperatur.
- Utvärdera RF i organiska material. Om RF överstiger 75 % RF mer än tillfälligt kan det innebära risk för mögelpåväxt. Detta beror inte minst av temperaturen så att risken ökar med ökad temperatur. Vid osäkerhet sker en utökad analys, se nedan.
- Eventuella höga fuktbelastningar som kan medföra risker för konstruktionen noteras.

Steg 3 – detaljerad analys (för ett urval av fall):

- RF och isopletdiagram innehållande både RF och temperatur i yttre delen av isolering i lägenhetsskiljande vägg (LS-vägg).
- RF utsida gipsskiva i LS-vägg samt insida regler mot gips i LS-vägg.
- Isopleter för isolering 3 fack i tak.
- RF utsida gips i tak.
- RF och isopleter för isolering, spånskiva och trä i golv.
- Isopleter för material 10 mm närmast ångspärr i yttervägg respektive mot emballage.
- Fuktinnehåll i isolering i tak, väggar och golv (detta är separata isoleringsmaterial).
- Isopleter för isolering respektive material närmast emballage i golv.

Resultat från utvärderingen av parameterstudien redovisas med färgkodning enligt tabell 3 nedan:

Tabell 3 *Utvärderingskriterier som används i parameterstudien. Vid hög RF kan kondens och eventuellt mögelrisker uppstå vilket anses kritiskt.*

Markering	Kriterie 1 eller ...	Kriterie 2 eller ...	Kriterie 3
Röd	RF > 97 % i luft eller isolering minst 10 h (kondensrisk)	Risk för mögel i organiska material (RF, temperatur)	Ackumulation av fukt i konstruktionsdel
Gul	Hög RF i både luft och isolering vid låga temperaturer, tex i golvfack eller i rumsluft.	Förhöjd risk för mögel i organiska material (RF, temperatur)	Kraftig omfördelning av fukt Tillfälligt höga fukttillskott, RF
Grön	Kortvarigt RF > 75% i isolering	Ingen risk för mögel enligt ovan	RF <74 % oavsett material

4 Resultat initiala beräkningar

4.1 Inbyggnadsfuktkvot

Virkets fuktkvot får variera med olika medelfuktkvot och övre/nedre "extremvärden" i olika målfuktkvotklasser enligt tabell 4 nedan.

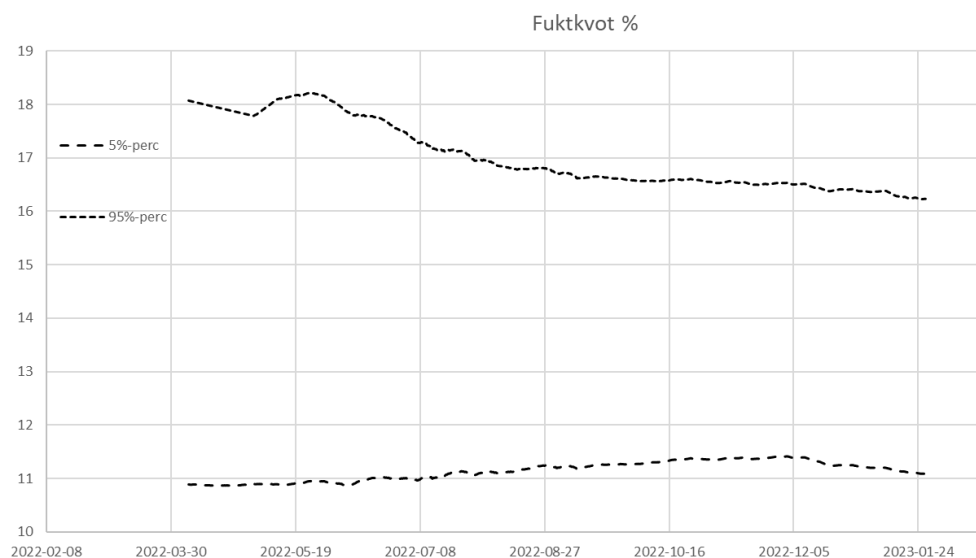
Tabell 4 Målfuktkvoter enligt SS-EN 14298:2017.

Beställd fuktkvot (målfuktkvot)	Tillåten variation av virkespartiets medelfuktkvot		Tillåtet spridningsområde av fuktkvoten i 93,5 procent av virkesstyckena inom virkespartiet	
	Undre gräns (%)	Övre gräns (%)	Undre gräns (%)	Övre gräns (%)
8	7	9	5,6	10,4
12	10,5	13,5	8,4	15,6
16	13,5	18	11,2	20,8

Då virket till exempel levereras med målfuktkvot 16 % till fabrik kan enstaka virke få ha 20,8 % fuktkvot. Efter en tids lagring i klimatstyrd fabriksmiljö kommer virket att torka. Beroende på var i "bunten" en regel ligger kommer den torka olika mycket.

Efter ca. 1,5 vecka inomhus kommer det virkesstycke som hade ca. 21 % fuktkvot vid leverans att ha torkat till ca. 18 % fuktkvot med de antaganden som gjorts om klimatet och olika placering i virkesbunten. Medelfuktkvoten sjunker från 16 % till strax under 15 % och den "torraste" regeln blir inte så mycket torrare än 11 %.

I ett utvärderingsförsök med dessa teoretiska förutsättningar byggs virket in i en modul och emballeras. Ett fall där syllen initialt har 18 % fuktkvot och ett där den är 11 %. Modulen placeras utomhus i maj och 9 månader framåt i Piteå och fuktkvotens variation i virket närmast emballaget redovisas i figur 4.1.

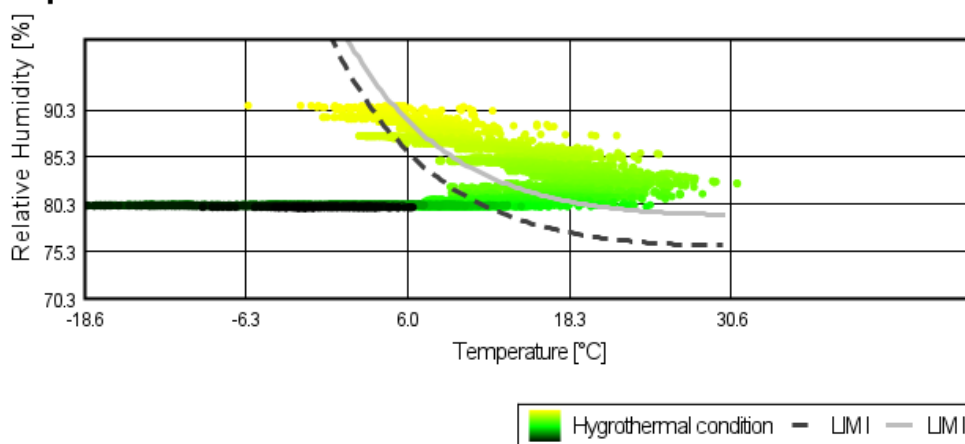


Figur 4.1 Högsta och lägsta förväntade fuktkvoter i en syll som emballeras i en modul efter viss tids lufttorkning från ursprunglig tillåten spridning inom målfuktkvot 16 %.

Resultaten visar att det generellt inte händer så mycket i syllen innanför emballaget. Den fuktigare syllen kommer torka något och den torrare förblir torr. Notera att det inte tillförs någon fukt från andra material, fukt utifrån etc. utan det är omfördelning av fukt som gör att fuktkvoten varierar något under de 9 månader beräkningen avser.

Risken för skador och mögelpåväxt på syllen är hög om denna har en initial fuktkvot på ca 18 %, se figur 4.2. Resultaten visar att det är viktigt att kontrollera och begränsa fuktkvoten innan inbyggnad.

Isopleths



Figur 4.2 Isopletdiagram – utvärdering av risken för mögel genom att kombinera temperatur och RF för en syll med initial fuktkvot på 18 %. Över gränskurvorna kan det finnas risk för mögeltillväxt, men förhållanden behöver även vara kritiska över tid.

5 Resultat verifierade beräkningar

5.1 Urval till blind evaluering

Verifiering av beräkningar har möjliggjorts av tillgång till mätdata från loggning av fuktkvot i flera olika moduler. Lindbäcks Bygg har monterat OmniSensegivare i syllen på ett flertal moduler där lokal uppfuktning uppstått i syllen. Givarna mäter fuktkvoten till ett djup av ca. 7 mm med oisolerade stift. Av de moduler som loggats har vissa stått utomhus och andra utan täckning/emballage under väderskyddande tak och väggar på lagret i Öjebyn.

Fyra moduler har valts ut för blind verifiering av uppmätt fuktkvot i syllen för lägenhetsskiljande vägg (LS-vägg). Beräkningar har gjorts för fyra olika förutsättningar och med olika startfuktkvoter enligt tabell 5. Beräkningarna har jämförts blint, dvs. utan att i förväg känna till uppmätt fuktkvot utöver initial fuktkvot.

Tabell 5 Utvalda moduler. Under inledande beräkning var modulens egentliga ID inte känd för utvärderaren.

Beteckning i evaluering	Modul, ID	Startfuktkvot	Startdatum och total tid	Lagring
"Blå" modul	322B	25 %	2022-05-10 + 10 månader	Utomhus emballerad
"Grön" modul	214A	20 %	2022-04-10 + 11 månader	Lagermiljö utan emballage
"Röd" modul	522B	17 %	2022-04-10 + 9 månader	Lagermiljö utan emballage
"Röd" modul	521A	17 %	2022-04-10 + 9 månader	Lagermiljö utan emballage

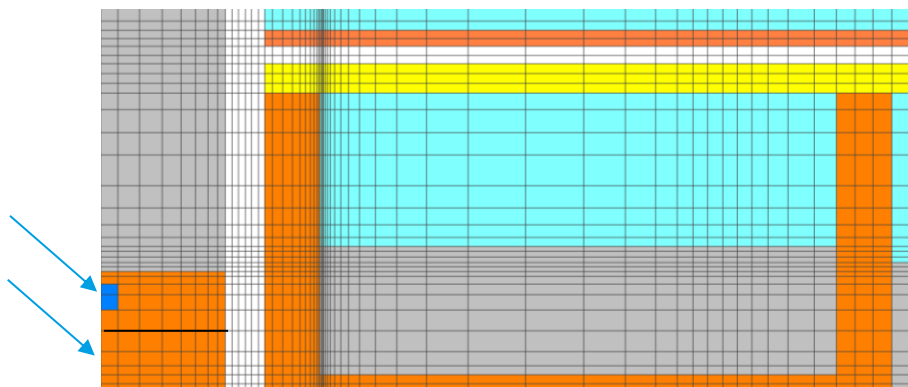
Figur 5.1 visar en modul som avtäcks för torkning under väderskydd.



Figur 5.1 Modul som avtäckts, instrumenteras och ställs upp för torkning under väderskydd i Öjebyn.

De initiala blinda beräkningarna har jämförts med uppmätt fuktkvot timme för timme. Avvikelser analyseras för att kunna göra motiverade förändringar i indata och utvärdering av beräkningarna. Samtliga utvärderingar redovisas för respektive modul som valts ut.

I beräkningsmodellen utvärderas fuktkvoten för syllen närmast utsidan av modulen och ca. 5-10 mm in i träregeln, se figur 5.2. För att skydda modulerna har de försetts med en extra syll i underkant, vilken också lagts till i modellen, figur 5.2.

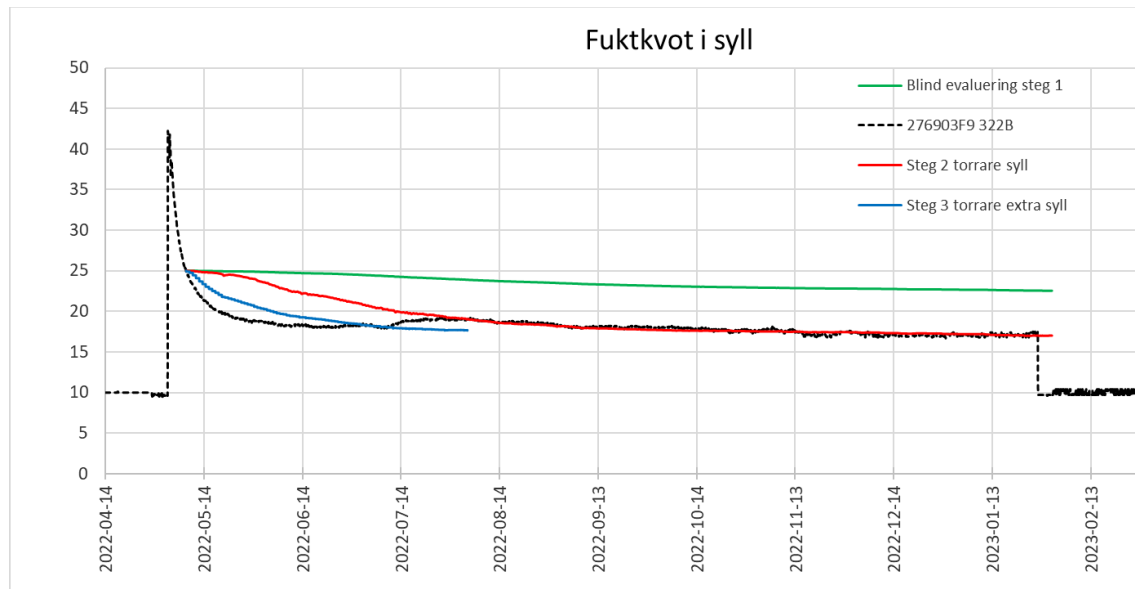


Figur 5.2 Övre pilen visar syllen som utvärderas. Undre pilen är en "extra" syll som utgör transportskydd och egentligen är lokaliserad under modulen (men med kontakt till syllen). Till höger syns det första golvfacket närmast lägenhetsskiljande vägg. Det gråfärgade materialet är isolering och det turkosa är luft.

5.2 Beräknade och uppmätt fuktkvot i modul 322B

Modulen har lagrats utomhus (Haraholmen) med emballage runt om i 10 månader. Då beräkningen startar är fuktkvoten i syllen 25 % och i den extra syllen är fuktkvoten antagen till 20 %.

I figur 5.3 nedan redovisas uppmätt blind fuktkvot (Svart 276903F9) som jämförs med resultatet av den första beräkningen (Grön - Blind evaluering steg 1) och påföljande två revisioner (Röd - Steg 2 torrare syll samt Steg 3 torrare extra syll).



Figur 5.3 Streckad kurva är uppmätt fuktkvot i syllens ytterkant (svart 276903F9). Första beräkningen (grön - Blind evaluering steg 1) och påföljande två revisioner (röd - Steg 2 torrare syll och blå - Steg 3 torrare extra syll).

Det första resultatet ger en överskattning av den initiala fuktkvoten med ca. 5 %-enheter över hela tidsperioden (översta gröna kurvan, blind evaluering steg 1). Detta bedömdes vara orsakat av en för högt antagen initial fuktkvot i den extra syllen som är monterad under syllen och tas bort på byggarbetsplatsen.

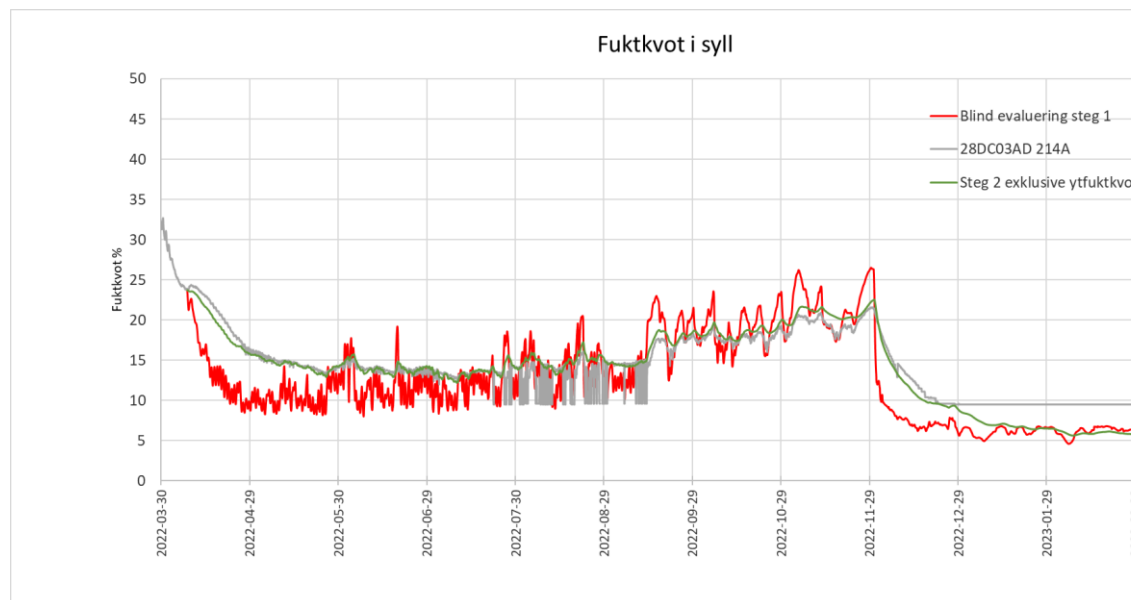
I beräkningen Steg 2 (röd) sänktes den initiala fuktkvoten i den extra syllen till 15 %. Vidare ändrades materialet från "Spruce radial" till "gran tangentiellt" och densiteten från 455 till 430 kg/m³. Överensstämmelsen mellan mätning och beräkning blev därmed förbättrad, men den inledande uttorkningen går långsammare i beräkningen än verkligheten.

I det tredje försöket gjordes därför syllen om så att de yttersta 10 mm har fuktkvot 25 %, medan resterande håller 15 %, precis som den extra syllen. Därmed stämmer förloppen mycket bra överens och det är påvisat att det är viktigt att bedöma hur stor uppfuktningen är, både i omfattning och i djup i trät för att kunna göra en korrekt numerisk beräkning. I aktuellt fall var uppfuktningen orsakad av hål i emballaget och endast lokal samt begränsad till den syllen.

5.3 Resultat modul 214A

Modulen har lagrats i lagermiljö (Öjebyn) utan emballage i 11 månader. Då beräkningen startar är fuktkvoten i syllen 24 %. I den extra syllen sätts fuktkvoten till 19 % (denna syll demonteras vid montaget på byggarbetsplatsen).

I figur 5.3 nedan syns resultatet av den första beräkningen och påföljande två revisioner.



Figur 5.3 Streckad kurva är uppmätt fuktqvot i syllens ytterkant (grå 28DC03AD). Första beräkningen (röd - Blind evaluering steg 1) och påföljande revision (grön - Steg 2 exklusive ytfuktqvot).

Den första blinda beräkningen ger en överskattning av amplituden på fuktqvoten över hela tidsperioden (Röd – Blind evaluering steg 1). Detta bedömdes bero av en stark koppling till inomhusklimatet.

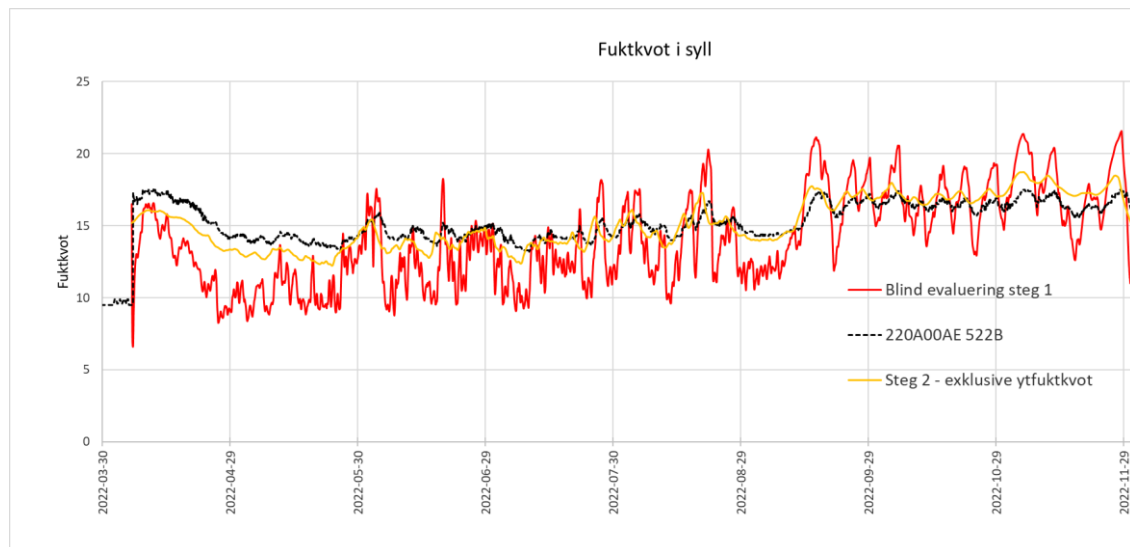
I Steg två exkluderades ytfuktqvoten och fuktqvoten utvärderades för ett djup av ca. 2-6 mm i syllens ytterkant.

Överensstämmelsen mellan mätning och beräkning blev därmed mycket god. En fritt torkande syll i inomhusklimat har en stark koppling till klimatet och ytfuktqvoten kommer variera mer än den dämpade fuktqvoten på någon millimeters djup. Bedömningen är att fuktgivarna mäter ett medelvärde som inte påverkas så mycket av ytfuktqvoten.

5.4 Resultat modul 521A/522B

Modulerna har lagrats i lagermiljö (Öjebyn) utan emballage i 9 månader. Då beräkningen startar är fuktqvoten i syll 16,5 % och i den extra syll 15 %.

I figur 5.4 nedan syns resultatet av den första beräkningen och påföljande revision.



Figur 5.4 Streckad kurva är uppmätt fuktkvot i syllens ytterkant (svart 220A00AE). Första beräkningen (röd - Blind evaluering steg 1) och påföljande revision (gul - Steg 2 exklusive yfuktkvot).

Det första resultatet ger en överskattning av amplituden på fuktkvoten över hela tidsperioden (Röd – Blind evaluering steg 1). Avvikelsen bedömds orsakat av en stark koppling till inomhusklimatet.

I steg 2 exkluderades yfuktkvoten och fuktkvoten utvärderades för ett djup av 2-6 mm i syllens ytterkant.

Överensstämmelsen mellan mätning och beräkning blev därmed mycket god. En fritt torkande syll i inomhusklimat har en stark koppling till klimatet och yfuktkvoten kommer variera mer än den dämpade fuktkvoten på någon millimeters djup. Bedömningen är att fuktgivarna mäter ett medelvärde som inte påverkas så mycket av yfuktkvoten (se ovan figur 5.3).

5.5 Slutsatser av veriferingen

Genom jämförelser mellan långtidsmätning av fuktkvot i flera moduler som lagrats i olika miljöer med beräkningar har god överensstämmelse mellan mätning och beräkning konstaterats. Genom att använda blinda beräkningar har faktorer som är av betydelse för att erhålla god korrelation noterats. Endast initial fuktkvot och lagringsklimat var känt i den första beräkningen och jämförelsen. Efter att beräkningarna exkluderat yfuktkvoten från medelvärdet av fuktkvoten i de yttersta 6-7 mm av syllen erhöles nästintill fullständig överensstämmelse mellan beräkning och mätning timme för timme över 9 månaders tid.

Den verifering som gjorts i denna utredning ska tolkas som att materialen i beräkningsmodellen beter sig som i verkligheten. Det är trä som har den högsta fuktkapaciteten och störst påverkan på fukttinnehållet i modulen, även om andra material också inverkar. Dessa andra material har visserligen inte specifikt verifierats inom ramen för denna studie, men dels har WUFI verifierats i många andra sammanhang (IBP, 2015) och de material som använts från databasen är inmätta från verkliga försök.

6 Resultat parameterstudie

6.1 Översikt beräkningsfall

Basfallen som utvärderats är Luleå, Växjö och Lund med inbyggnadsfuktkvoter på 12-18 % och med lagring utomhus mellan januari-maj, juni-november och september-februari. Därtill har Piteå utvärderats för 18 % fuktkvot. För samtliga dessa kombinationer har modulens tvärsnitt bedömts i helhet, tillika separat golv, väggar, tak och rumsvolym.

I grundutförandet utgör basfallen samma modell men med varierat klimat och initiala fuktkvoter. Däremot finns det vissa skillnader mellan basfallen beroende på successiva modifieringar, som inte redovisas i detalj och som inte bedöms förändra de huvudsakliga slutsatserna.

Utvärderingen har gjorts med fokus på höga RF-nivåer, kondensrisker, mögelrisker och fukttinnehåll i luft och material. Ett par fall har utvärderats avseende luftens temperatur och RF inne i modulerna.

Därtill har ytterligare fall utvärderats, t.ex. mer ångöppet emballage, solstrålningseffekter, väderstreck, modelltekniska parametrar (beräkningsceller, materialegenskaper, m.m) och andra geografiska orter. Dessa kompletterande fall innebär ibland att flera parametrar varierats samtidigt och de utgör därför inte en lika konsekvent variation för olika parametrar som basfallen gör.

Nedan redovisas basfallen följt av ett urval av "specialfall": solstrålning, emballage och kondens. Notera att resultaten generellt inte utgör tillräckligt stort underlag för att kunna dra definitiva slutsatser, men att flera viktiga iakttagelser har gjorts.

6.2 Resultat för basfall och kompletteringar

Resultaten redovisas i förenklad form som överskådliga tabeller (tabell 6a-c).

Tabeller ska tolkas så här:

- Tre tabeller redovisas för lagring av moduler utomhus med start i januari, juni och september. Perioden som anges ovanför tabellen inkluderar samtliga nämnda månader.
 - Raderna i varje tabell motsvarar olika orter.
 - Fyra kolumner i varje tabell anger fuktkvoten i allt trävirke vid emballering. Detta kan ses som medelfuktkvot i respektive regel etc.
 - En "ruta" är markerad:
 - Röd (r) om resultatet bedöms som oacceptabelt
 - Gult (g) om det med vissa förbehåll kan accepteras
 - Grönt (gr) om riskerna bedöms små.
- Bedömningen avser RF, mögelrisk, uttorkning, fukttinnehåll m.m. enligt avsnittet om utvärdering.
- En vit "ruta" anger att fallet inte är beräknat och följaktligen saknar bedömning.

Det finns en färgmarkering för vardera av följande:

- Σ - är den samlade bedömningen för aktuellt fall.
- T – takkonstruktionen/mellanbjälklaget.
- G – golvet.
- Y – ytterväggen.
- L – Lägenhetsskiljande vägg.

- Till höger i tabellen redovisas medeltemperatur för utomhusklimatet under aktuell beräkningsperiod samt ort.

Med medelfuktkvot avses genomsnittlig fuktkvot i virkets tvär- och längdutbredning. I beräkningarna har inte olika fuktkvotsgradients genom virkets tvärsnitt undersökts, men bedömningen är att det till viss del är acceptabelt med en fuktigare kärna och en torrare yttre del. Detta så länge som medelfuktkvoten svarar mot de fuktkvoter som anges i tabeller nedan. Notera att kravet är strängare jämfört med målfuktkvoter enligt SS-EN 14298:2017.

Det är inte en helt stringent gräns mellan färgmarkeringen och trots att fallen bedömts enhetligt och med samma utvärderingsmall och kriterier, så kan det finna fall där "gult" skulle kunna vara "grönt" och vice versa. Denna brist påverkar inte slutbedömningen då både grön och gul markering är acceptabel. Röd markering är inte acceptabel.

Tabell 6a-c Resultat basfall. Den genomsnittliga fuktkvoten i allt virke anges i kolumnerna. För tolkning av resultaten se beskrivande text och slutsatser.



januari-maj

	MC 12%					MC 14%					MC 16%					MC 18%				
	Σ	T	G	Y	L	Σ	T	G	Y	L	Σ	T	G	Y	L	Σ	T	G	Y	L
Luleå	gr					g	gr	g	g	gr	g	g	g	g	gr	r	r	gr	g	g
Piteå	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	g					r	g	gr	r	gr
Växjö	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	g	g	gr	g	gr	r	r	gr	r	r
Lund	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	g	g	gr	g	gr	r	r	gr	r	g



juni-november

	MC 12%					MC 14%					MC 16%					MC 18%				
	Σ	T	G	Y	L	Σ	T	G	Y	L	Σ	T	G	Y	L	Σ	T	G	Y	L
Luleå	gr					gr	gr	gr	gr	gr	r	g	gr	r	g					
Piteå	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr					
Växjö	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	g	g	gr	g	g	r	g	gr	r	r
Lund	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	g	g	gr	g	g	r	r	g	r	r



september-februari

	MC 12%					MC 14%					MC 16%					MC 18%				
	Σ	T	G	Y	L	Σ	T	G	Y	L	Σ	T	G	Y	L	Σ	T	G	Y	L
Luleå	gr						gr	g		gr	r	g	g	r	gr					
Piteå	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	r	g	g	r	gr
Växjö	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	g	gr	g	gr	gr	r	gr	g	r	g
Lund	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	g	g	gr	g	gr	r	r	gr	r	r

6.3 Särskild jämförelse av värmestrålningseffekter

Det är flera olika parametrar och komplexa beroenden som påverkar utbytet av värmestrålning mellan material och omgivning, t.ex. vindhastighet, väderstreck, geografisk plats, skugga, kulör materialen (emballaget), terrängen och markens ytskikt samt reflektion från detta m.m.

Alla dessa aspekter beskrivs inte i detalj i rapporten, men har på olika sätt hanterats i beräkningsmodellerna. För specifika fall hänvisas till modellfilerna, men övervägande följande uppsättning parametrar har använts:

- Värmeöverföringskoefficienten på utvändiga ytor är vindberoende och som högst $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ (litet värmemotstånd).
- För tak: kortvågig strålningsabsorption är 0,2 (vit yta).
- För tak: långvågig emissivitet är 0,9 (vit yta).
- För väggar: kortvågig strålningsabsorption är 0,14 (beräknad från 70 % skuggning av en ljus yta).
- För väggar: långvågig emissivitet är 0,63 (beräknad från 70 % skuggning av en ljus yta).
- Kortvågig reflexivitet är 0,25 (torr gräsmark) – varierar typiskt mellan 0,2 och 0,25 för mörkare ytor.
- Tak och ibland väggar: långvågig reflexivitet är 0,09 för mark och emissiviteten är 0,91 (endast vid explicit heat strålningsbalans).
- Golvbjälklaget i modulen har inget strålningsutbyte med omgivningen, endast värmeledning (antar viss luftomsättning under modulen, men ingen solstrålning antas komma åt golvbjälklaget).
- Molnindex 60 %.

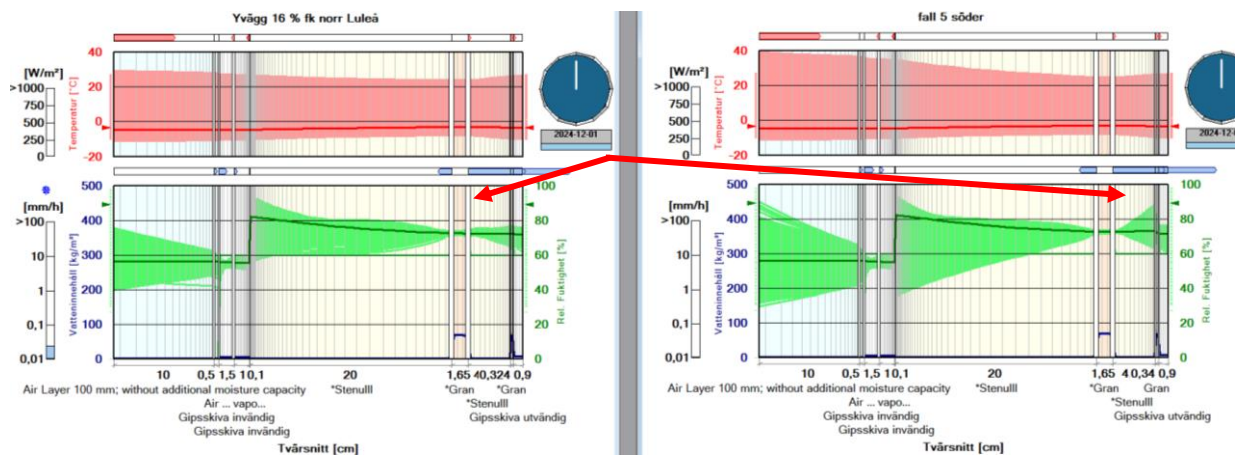
I den inledande analysen har s.k. explicit strålningsbalans använts. Det innebär att konvektion och strålning separeras i värmeberäkningen för att bl.a. ta hänsyn till långvågig kylning då ytor kan bli kallare än omgivande luft och orsaka kondens mm. Detta ställer krav på indata om solstrålning på olika platser och är beräkningsmässigt resurskrävande.

I parameterstudien har både fall med och utan strålning jämförts. Det kan inte dras några generella eller enkla slutsatser av detta, men i vissa beräkningar leder strålningsbalansberäkningen till att ytorna kan få mycket låga temperaturer, vilket inte nödvändigtvis är sant. Generellt är strålningsutbyte viktig att beakta så att material tar emot solstrålning och avger värmestrålning till omgivningen i balans.

Fallet där en yta fortsätter att förlora värme genom strålning till himlen – och inte bara till mark och omgivande byggnader är mest relevant att beakta för (platta) tak som har en stor yta mot den fria himlen. För att spara beräkningstid och minska osäkerheter har strålningsbalans mellan yta och mark/himmel endast beaktats för taket, medan väggar har ett strålningsutbyte med mark och bebyggelse.

För att kvantifiera mer precisa effekter av strålningsutbyte behöver utökade studier genomföras. Av de begränsade antal jämförelser som ändå gjorts i aktuell utredning kan sägas att:

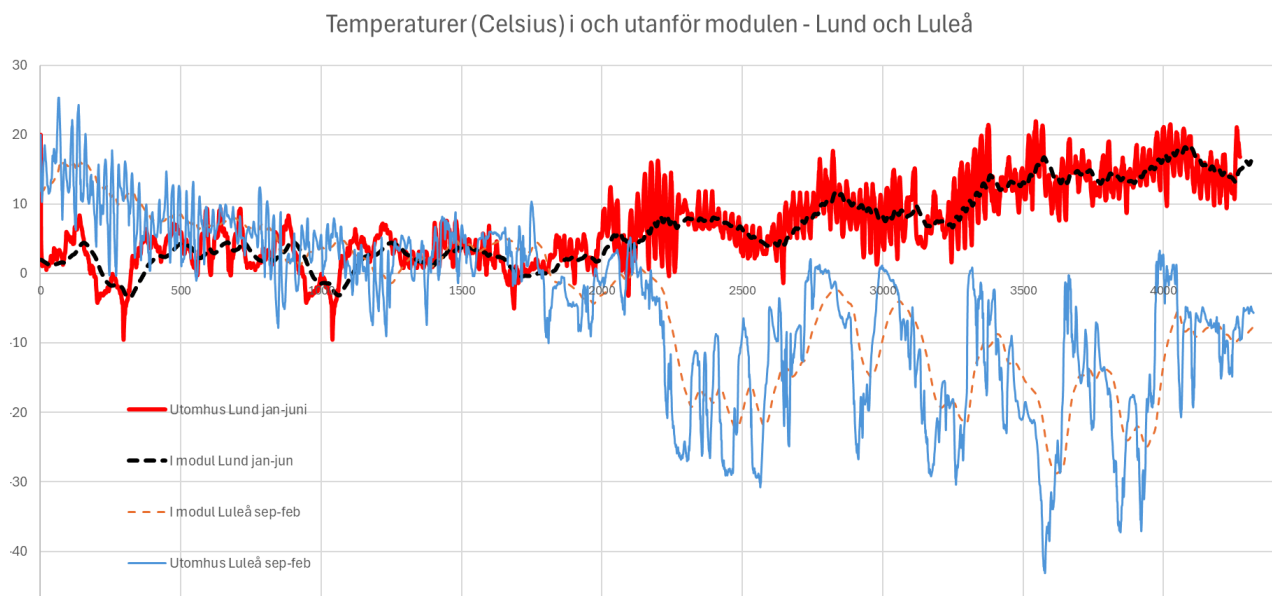
- Även om den mest kritiska positionen, i t.ex. tak eller vägg varierar mellan insida och utsida beroende på hur stor uppvärmning/nedkylning som sker av konstruktionens utsida genom strålningseffekter, så kommer båda fallen att fångas upp i analysen som en risk. Se exempel i figur 6.1.



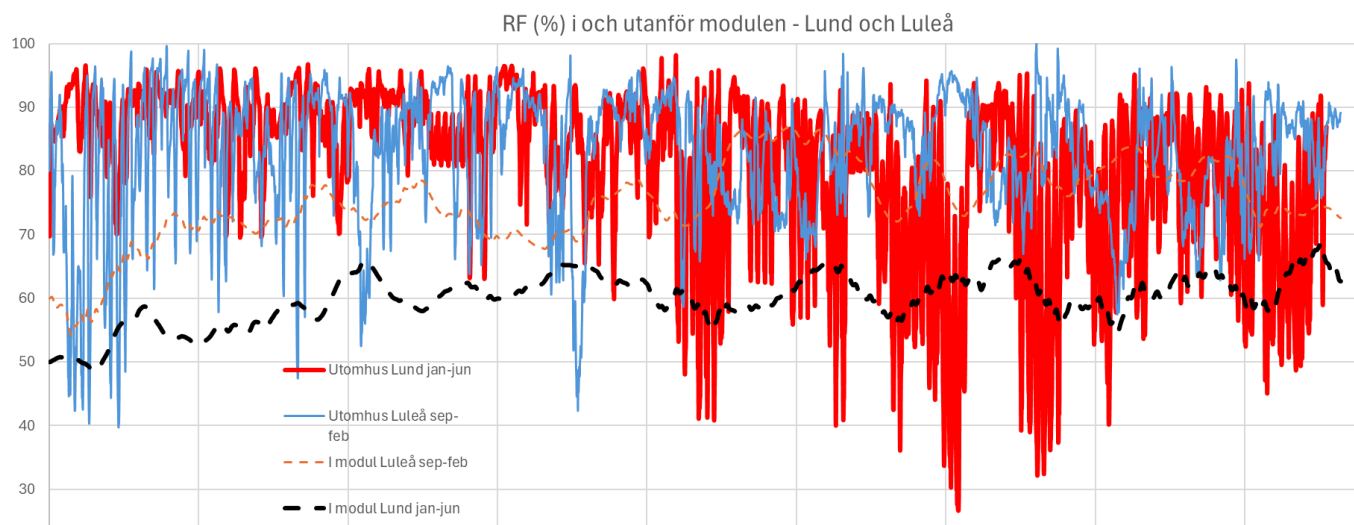
Figur 6.1 Jämförelse mellan norr- och söderläge. Fuktnivån ökar närmare emballaget då solen värmer ytterväggen. Endimensionell beräkning.

6.4 Klimat inne i modulerna

Några jämförelser av klimatet inne och utanför modulerna redovisas i figur 6.2 och 6.3. Temperaturen jämnas ut, medan RF "konserveras" till stor del. Detta är utvärderat nära mitten av modulen över cirka 2 m² av tvärsnittet. Närmast ytor är förhållanden annorlunda och eventuell risk för kondens har utvärderats separat. Temperatur och RF i luften utanför modulen är hämtad från klimatfilen för orten och baseras på historiska uppmätta väderdata.



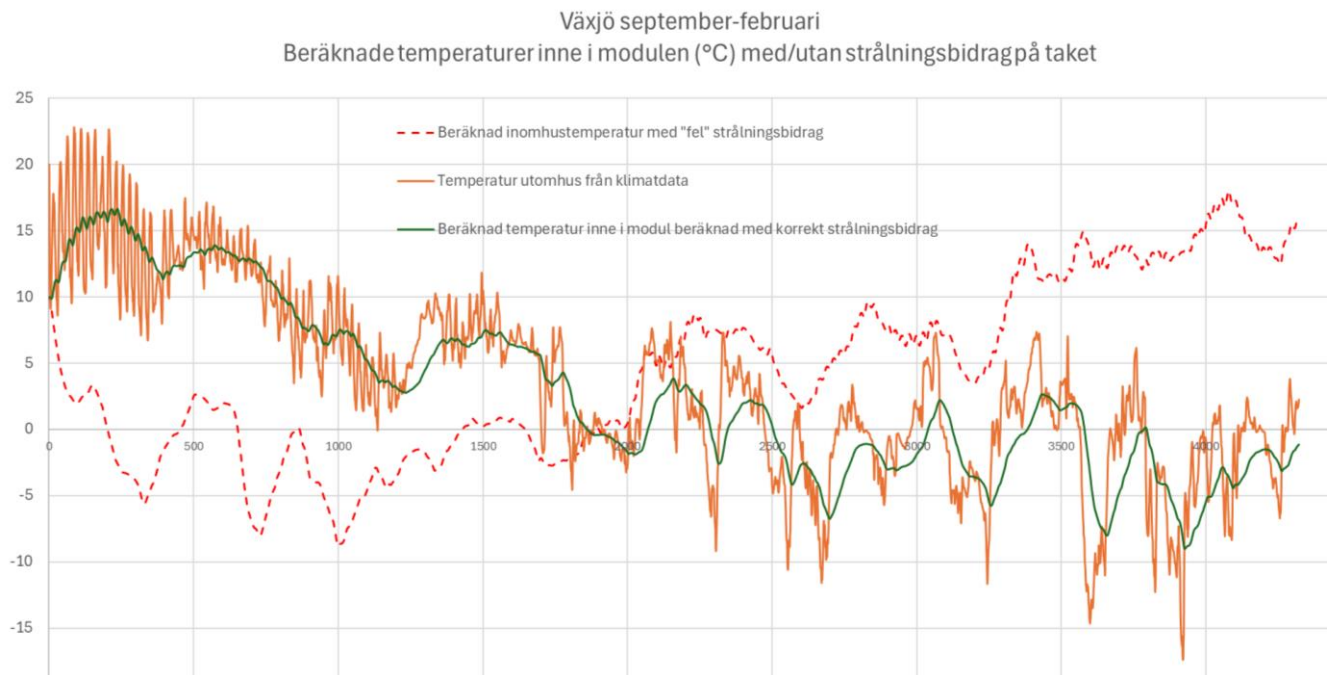
Figur 6.2 Exempel på beräknade temperaturer inuti luftvolymen i modulen respektive för klimatet på orten utanför modulen. Utomhus i Lund (jan-juni, röd kurva) respektive utomhus Luleå (sep-feb, blå kurva). Temperaturen inne i modulerna visas som streckade för Lund (svart) och för Luleå (orange). Startvärdet (emballeringsförhållandet) kan avläsas längst till vänster.



Figur 6.3 Exempel på beräknade RF inuti luftvolymen i modulen respektive för klimatet på orten utanför modulen. Utomhus i Lund (jan-juni, röd kurva) respektive utomhus Luleå (sep-feb, blå kurva). RF inne i modulerna visas som streckade för Lund (svart) och för Luleå (orange). Startvärdet (emballeringsförhållandet) kan avläsas längst till vänster.

Beteendet är förväntat, med en dämpad temperatur inuti som följer uteklimatet.

Med "fel" indata på strålningsparametrar, såsom orimliga värden på emission och reflexivitet då strålningskällan utvärderas på t.ex. väggyta, kan mycket felaktiga temperaturer erhållas i beräkningsresultaten. Framför allt för taket är det viktigt att beakta alla bidrag från värmestrålning. Det är inte säkert att detta blir tydligt på andra förhållanden i modulen under utvärdering. Exempel ges i figur 6.4.



Figur 6.4 Exempel på beräknad temperatur hos luftvolymen inuti modulen i Växjö mellan september och februari med a) avstängd solstrålning på takyta (röd streckad kurva), b) alla strålningsbidrag (grön kurva). Temperaturen utomhus från uppmätt klimatfil finns med för jämförelse (orange kurva).

Trots de orimligt låga temperaturerna i modulen (figur 6.4 med streckad kurva) under juni månad blir fuktkvoter och RF i konstruktionen inte orimliga och felet är svårt att upptäcka utan att kontrollera den beräknade temperaturen. Exemplet tas med då det av misstag gjordes ett beräkningsfel för Växjö med "avstängd" solstrålning och temperaturen inne i modulen sjönk långt under utomhusklimatets temperatur.

6.5 Olika hänsyn till emballage runt moduler

I den inledande analysen, verifieringen och parameterstudien modellerades emballaget som ett eget materialskikt med ett fukttransportmotstånd om ca 2,5 Ms/m på samtliga fyra sidor av modulen. I en senare revidering introducerades ett tunt lager luft på utsidan av ovannämnda emballage runt modulen för att minska antalet konvergensfel och påskynda beräkningstiderna. Detta gjordes enbart av beräkningstekniska skäl och utan att förvränga resultaten jämfört med att inte ta med ett sådant luftskikt.

I senare delen av parameterstudien utvärderades konsekvenserna av att beakta emballaget som ett fukttransportmotstånd och inte som ett eget material (med värme- och fuktegenskaper). Tre beräkningsfall för Luleå jämfördes under olika delar av året och med olika inbyggnadsfukthalt med olika sätt att modellera emballaget. Det blev inga skillnader av betydelse vid jämförelse av resultaten (fukt- och värmefördelning, ytemperaturer etc.) mellan de olika sätten att beakta emballaget.

Beräkningstiden i datorn minskar avsevärt om det yttre emballaget modelleras som ett explicit fuktmotstånd istället för ett material, som ska ställas i jämvikt med övriga konstruktion. Därför har större delen av parameterstudien utförts med det yttre emballaget som ett fuktmotstånd. Ångspärren

eller andra tunna materialskikt inne i konstruktionen kan inte modelleras på annat sätt än som ett eget material.

Två enstaka fall har undersökts där det yttre emballaget ersätts med en ånggenomsläpplig "vindduk" ($s_d = 0,5 \text{ m}$) på alla tre sidor förutom taket, som fortsatt haft den tätare plasten som emballage. Utvärderingen är gjord för 16 % initial fuktkvot i Luleå under perioden september-februari. Av jämförelsen kan konstateras att:

- Den samlade bedömningen av riskerna förändras inte med en mer ångöppen emballering. Det är fortfarande en för hög genomsnittlig fuktkvot trots mer diffusionsöppen emballering.
- Uteklimatet kommer i större utsträckning påverka fukttillståndet i olika byggdelar.
- Golvet ser ut att få en lägre risk för mögelskador med en ångöppen emballering.
- Ytterväggen får en mindre fuktbelastning mot ångspärr och även mot de yttre delarna av emballaget om emballaget är mer ånggenomsläppligt.

Det är för få undersökta fall för att dra större slutsatser, men det är tydligt att "tätheten" på emballaget har viss betydelse för fuktbelastningen och att denna kan bli både (marginellt) bättre och sämre beroende av valet av emballage. Det går således inte att tillåta ännu fuktigare material vid emballering genom att byta till en mer ångöppen emballering.

6.6 Risker med kondensering inuti moduler

En möjlig risk som identifierats i parameterstudien är hög RF i omsluten luftvolym inne i modulen, samt även i luftvolymerna mellan golvåsar ovanför isoleringen. Detta sker framför allt under kalla delar av året då "varm" luft emballeras in i modulen och sedan kyls ned vid lagring. Snabb nedkylning kan vara extra riskabelt då materialen inte "hinner" ta upp fukt från luften.

WUFI kan inte hantera temperaturberoende sorptionskurvor för material eller luft, varför en låg fuktkapacitet på luft har satts till cirka $6,8 \text{ g/m}^3$ i normalfallet. Det svarar mot mättnadsånghalt vid cirka 5°C och kommer underskatta luftens fuktupptagande förmåga vid högre temperaturer samt underskatta den vid lägre. I utvärderingen har 97 % RF valts som riskindikator för höga fukttillstånd i luften, men det är egentligen inte sant vid låga temperaturer. Då skulle kanske RF i stället behöva underskrida 20 % RF för att motsvara samma fuktmättnad vid låga temperaturer.

Luft har oavsett temperatur en mycket liten fuktupptagande förmåga och kommer därför inte att påverka omfördelningen av fukt mellan material i konstruktionen i väsentlig omfattning varför förenklingen är acceptabel. Däremot kan det finnas risk för kondens mot invändiga ytor om luften kyls ner. Detta har undersökts genom dels en handberäkning och dels genom ett beräkningsfall där luftens egenskaper ändrats så att den maximalt kan bära $1,5 \text{ g/m}^3$. Närmast inre ytor har ett skikt om 1 mm luft med hög fuktkapacitet lagts till där kondenserad mängd fukt kan utvärderas.

Handberäkningen, som utgår från att den inre volymen luft kyls från 40 % RF 20 grader till att bara kunna innehålla 1 g fukt per m^3 , kommer ge ett fuktöverskott på cirka 3 g i ett golvack och cirka 580 g i hela rumsvolymen. Notera att detta inte tar hänsyn till att fukt tas upp i materialen. Om denna fuktmängd fördelas på alla ytor blir det mindre än 10 g/m^2 .

I datorberäkningen med flera tunnare luftskikt där fuktbuffring närmast inre ytor kan ske, blir fukttillståndet i luften något enstaka gram per kvadratmeter på kort tid att jämföra med handberäkningen. Risken för kondensering bedöms vara liten och att fuktmängderna är små, men det skulle kunna uppstå kondens på kalla ytor såsom monterade fönster. Sammanfattningsvis bör

inbyggnadsklimatet beaktas särskilt under vintertid så att materialen hålls torra men också luften i modulen har ett RF som högst är 30-35 % i samband med emballering.

Kondensering vid varmt klimat kan också vara ett problem, men då värms materialet upp så att ånghalten blir mycket hög och materialet torkar (jämför figur 6.1). Då finns risk för kondensering på insidan av emballaget eller ångspärr i väggen. Detta är vad som händer i flera av fallen med "röd" markering för ytterväggen i tabell 6a-c. Dessa kondensmängder kan teoretiskt vara betydande och ge decilitervis med utfälld kondens. Lagring i direkt och stark solstrålning bör undvikas, särskild om inbyggnadsfukthalten är hög.

6.7 Luftens fukttransportegenskaper

Inom parameterstudien har flera egenskaper hos luft som "material" studerats. Nedan information kring detta är hämtad från (Öberg, 2024).

I luftskikt kan ånga överföras genom diffusion och genom konvektion. WUFI-mjukvaran är i första hand avsedd för fasta material och tillåter därför endast värmeledning och vattenångdiffusion. För ett oventilerat luftutrymme kan det extra konvektionsfenomenen inkluderas genom att justera värmeledningsförmågan och diffusionsmotståndet. De relativa bidragen från värmeledning, konvektion och strålning är beroende av tjocklek, orientering och temperaturskillnader över luftskiktet. Av denna anledning kan luftskikt inte bara läggas till eller delas för att uppnå en viss tjocklek i en sammansättning.

Relationen mellan värmeöverföring genom ledning och konvektion uttrycks som Nusselt-talet inom flödesdynamik. Ångtransporten kan ökas med Nusselt-talet som kommer från värmetransportberäkningen. Diffusionsmotståndet, μ -värdet, är 1 för helt stationära luftskikt. På grund av konvektionseffekterna orsakar en ökning av Nusselt-talet en proportionell ökning av värme- och ångtransporten. Eftersom konvektion av luft är ett komplicerat fenomen som inte bara kan härledas eller implementeras som en variabel genom WUFI-beräkningar, användes ett förenklat tillvägagångssätt i denna studie. För luftskikt ovanför isoleringen i golvet används antingen fördefinierade luftskikt av lämplig storlek, eller så har dessa extrapolerats till de vertikala/laterala måtten utifrån WUFI-databasen. Stora luftlager kan inte extrapoleras på detta sätt, eftersom det skulle orsaka orealistiskt stort ångmotstånd. Istället har μ -värdet varierats mellan icke fysiskt stora värden (50) och mycket låga värden (0,003) för de stora luftvolymerna.

Detta har haft två syften:

- Naturlig konvektion som uppstår när luften "rör på sig" inuti modulen på grund av temperaturskillnader, även om det exakta beteendet inte är förutsägbart. Detta sänker luftens ångmotstånd.
- Ett stort ångmotstånd medför begränsad ångtransport genom den inre luftvolymen, vilket kommer att resultera i mindre fuktfördelning genom tvärsnittet och luften. Detta bör spegla en mer konservativ beräkning när det gäller fuktbelastningar på byggmaterial i modulen (vilket också senare bekräftades i beräkningar).

Eftersom temperaturfördelningen (värmeväxlingen) kommer att vara oförändrad kommer ovanstående tillvägagångssätt antingen att underskatta fuktfördelningen och eventuellt kondens i luft, eller överskatta fuktbelastningen på närliggande fasta material genom hygrotermiska beräkningar. Denna förenkling motiveras av de mycket okända förhållandena i inre luftvolymen. Effekten av ett lågt eller

høgt ångmotstånd i luft utvärderas också separat som en grov uppskattning av möjliga konvektionseffekter i luft, fuktflöde mellan ytor och modellens numeriska stabilitet.

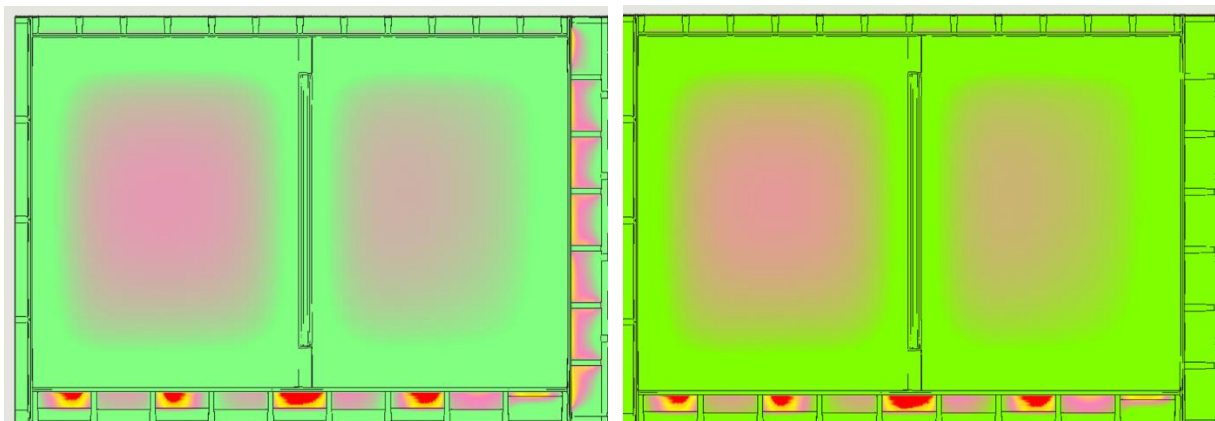
Värmeledningsförmågan ökar i proportion till skiktjockleken.

Beräkningsresultaten visar att framför allt taket och ytterväggen kan dra fördel av ett lågt fuktmotstånd i luften inuti modulen, till följd av t.ex. konvektion. Däremot ändrades inte en bedömning från "rött" till "grönt" pga. detta, eftersom den invändiga luftvolymen ändå inte står i direktkontakt med materialen inuti tak eller yttervägg.

Då initial fuktkvot är över 16 % är skillnaderna mellan mycket höga och mycket låga diffusionsmotstånd i luft mycket begränsade. Det är framför allt "höstfallen" som drar fördel av ett lågt diffusionsmotstånd och särskild yttervägg.

6.8 Alternativa isoleringsmaterial i klimatskärmen

Ett fall i med nordligt klimat under hösten som bedömdes som kritiskt med stenull blir acceptabelt med ändrad isolering (initial fuktkvot är 16 % i trä). Se figurer 6.5 från samma tidpunkt i simuleringen där den vänstra har stenull i ytterväggen och den högra cellulosa. Den är "grön" i stället för röd och gul i ytterväggen. Observera att golvet upplever (korta) toppar av mycket hög RF i båda fallen med stenull.



Figur 6.4 Exempel på skillnaden mellan mineralullsisolering och bioisolering i ytterväggen. Från simulering av 16 % fuktkvot i Luleå från september.

Efter att ha studerat tidshistoriken för olika material mer i detalj konstateras att bioisoleringen buffrar så mycket fukt att RF sjunker 5-10 %-enheter i närliggande material, så som träreglar och yttre gipsskiva/vindskydd närmast förpackningsmaterialet.

Detta är bara ett undersökt fall, men det finns förstås stora fördelar med ett isoleringsmaterial som skulle kunna ta hand om fukt/"avfukta" andra material som har ett lägre kritiskt fuktgränsvärde. Stöd för att vissa isoleringsmaterial kan ta hand om avsevärt mycket mer fukt än luft och mineralull finns t.ex. i (Ranefjärd, 2024).

Det finns alltså anledning att överväga andra val av isoleringsmaterial som en mycket enkel riskreducerande åtgärd.

7 Slutsatser/Orsaksdiskussion

7.1 Slutsatser av initiala beräkningar

- Målfuktkvoter på virke enligt SS-EN 14298:2017 kan för t.ex. 16 % målfuktkvot innebära upp till 18 % fuktkvot i medeltal och ännu högre för vissa enskilda regler. Det kan medföra skador om dessa högre nivåer tillåts vid inbyggnad/emballering.
- Fukt som byggs in och emballeras kommer att bli kvar i konstruktionen under lång tid. Högre fukttinnehåll kommer orsaka omfördelning och ackumulering av fukt hos material, med risk för följdskador. Låga fuktkvoter (<14 %) kommer inte omfördelas eller ackumuleras nämnvärt över tid och därför är det särskilt viktigt att minska spridningen mellan fuktkvoter hos ingående material
- En torr luftvolym i modulen är inte tillräckligt för att kompensera fuktigt material (reglar torkar inte ut). Inte ens avfuktning inne i modulen är tillräckligt om inte denna luft kan komma i kontakt med materialen som är fuktiga.
- Beräknad skillnad mellan fuktkvoten i olika träreglar i modulen (golv, tak, vägg) är liten över tid trots att det kan ske omfördelning av fukt mellan närliggande material. Med samma startvillkor kommer fuktkvoten utvecklas ganska lika i både golv, väggar och tak efter emballering. Material "långt" (>1 m) ifrån varandra påverkar varandra mycket lite.
- Med en stokastiskt fördelad fuktkvot mellan enskilda regler i modulens hela tvärsnitt (motsvarande spridningen i målfuktkvot och högsta/lägsta tillåtna i varje fuktkvotklass) sker liten påverkan på andra material. Det betyder att trots att det finns en stor fuktkapacitet i allt trä, så kommer omfördelningen av fukt att ta lång tid och försvåras av avståndet mellan material. I praktiken innebär det att enskilda fuktiga regler riskerar att skadas och att dessa inte kompenseras av andra torra regler i modulen.
- Ovanstående kan också tolkas som att en fuktig regel i taket inte kompenseras av en torr regel i golvet – och inte ens av en närliggande torr regel i taket. Det räcker alltså inte att kontrollera enskilda stickprov av fuktkvot för att vara säker.
- Från september ökar fuktkvoten i regler i klimat utan emballage.

7.2 Slutsatser av parameterstudien

Fukttinnehåll vid emballering

- I princip bibehålls fukttinnehållet i materialet över lång tid och någon egentlig uttorkning sker inte i modulerna. Eventuell omfördelning av fukt tar olika lång tid på olika ställen.
- 14 % fuktkvot (medelfuktkvot) ska eftersträvas och högst 16 % fuktkvot (medelfuktkvot) kan tillåtas för att undvika potentiella skador i modulerna vid mellanlagring utomhus i emballerade moduler. Spridningen av medelvärden och extremvärden ska hållas nere, t.ex. genom att låta virke torka i kontrollerad inomhusmiljö minst två-tre veckor före/under montage.
- Ytfuktkvot bör inte vara högre än 14 % vid emballering/inbyggnad.
- Material (isolering, plywood, gips etc.) behöver acklimatiseras till inomhusmiljö och får inte byggas in/emballeras med förhöjd fuktkvot. Riktvärde bör vara kontrollerat inomhusklimat och lagring/acklimatisering i detsamma.
- 12-14 % fuktkvot i virket är acceptabelt i hela modulen oavsett ort och tid på året.
- Inbyggnadsfuktkvot i materialet är viktigare jämfört initialt relativ fuktighet och temperatur vid emballeringen.

Klimat då emballering sker

- Emballering bör ske i ett kontrollerat klimat med ett anpassat fuktinnehåll i luften enligt nedan:
 - Vid lagring i kallt klimat med förväntade temperaturer på -15 °C eller lägre ska klimatet vid emballeringen inte överstiga ett fuktinnehåll motsvarande 35 % RF och 20 °C (ca. 6 g/m^3).
 - Vid lagring i klimat med förväntade temperaturer på 10 °C eller högre ska klimatet vid emballeringen inte överstiga ett fuktinnehåll motsvarande 50 % RF och 20 °C (ca. $8,7\text{ g/m}^3$).
 - Vid lagring i klimat med förväntade temperaturer på 15 °C eller högre ska klimatet vid emballeringen inte överstiga ett fuktinnehåll motsvarande 65 % RF och 20 °C (ca. 11 g/m^3).
 - Vid emballering i lägre temperaturer än 20 °C ska klimatet vid emballeringen inte överstiga ett fuktinnehåll motsvarande 65 % RF och 10 °C (ca. 6 g/m^3).
- Vid lagring direkt i kallt klimat (vintertid) finns risk för hög RF i luft och isolering på grund av nedkylning och då är det ännu viktigare att hålla nere ånghalten i luften (riktvärde högst $5\text{--}6\text{ g/m}^3$).
- RF bör aldrig överstiga 65 % i luften vid emballering oavsett temperaturer.
- Se diagram under rekommendationer.

Ort, årstid och lagringstid

- Den mest fördelaktiga perioden att lagra emballage utomhus är mellan juni och november om fuktkvoten vid emballering är högst 14 %. Detta är den i genomsnitt varmaste och torraste perioden.
- Med 16 % fuktkvot är det sämre att lagra under en period med högre temperaturer och solstrålning, då det också generellt är fuktigare vid emballering. Detta betyder att sommar och höst blir mer kritiska än våren.
- Konsekvensen att lagring på hösten är sämre än lagring på våren är mer tydlig för ytterväggen och för ett kallare klimat.
- 18 % fuktkvot innebär alltid en stor risk för skador, även där det i resultattabellerna ser ut som att det ibland är acceptabelt i golvbjälklaget. Viktigt att komma ihåg är att golvbjälklaget inte innehåller några "täta" ytskikt eller stegljudsdämpare och liknande vilket i praktiken skulle stänga in fukten mellan täta skikt. Slutsatsen är att 18 % fuktkvot inte ska accepteras någonstans i modulen.
- Skillnaderna är små mellan geografisk plats och resultaten kan inte förklaras bara av temperaturen eller solstrålningen.
- Långa lagringstider (mer än en-två månader) får inte tillämpas om virket har 16 % fuktkvot eller högre).
- Korta lagringstider (mindre än en-två månader) kan teoretiskt ske med högre fuktkvoter än 16 %, men risken är stor för skador eftersom materialen kan ta lång tid att torka ut även efter det att emballaget tagits bort. Rekommendationen är att inte tillåta fuktkvoter över 16 % oavsett lagringstid.

Emballaget och känsliga byggdelar

- Ytterväggen är den mest fuktkänsliga delen av modulen och golvet den minst känsliga, sett till omfördelning av fukt och effekter av värmestrålning, emballage etc. givet samma initiala fuktkvoter som de andra byggdelarna. Detta beror på de dubbla tätskikt som uppstår genom emballeringen på utsidan och väggens ångspärr på insidan.
- Ett mer fuktgenomsläppligt emballage kan vara fördelaktigt i vissa fall, men generellt finns det inte några vinster med mer diffusionsöppet emballaget och det kan tvärtom också innebära en ökad fuktbelastning.
- Det går inte att kompensera för fuktigare material med ett mer fuktgenomsläppligt emballage.
- Väderstrecket i vilket modulen lagras får större betydelse då fuktkvoten är över 14 %. Generellt är det sämre att vända den tjockare ytterväggen mot den mest dominerande solstrålningsriktningen, men det är mer komplext eftersom skuggning av andra moduler, byggnader etc. också inverkar.
- Lagring av emballage i direkt solljus och under bar himmel är sämre än lagring under ett skyddande tak.

Skillnader mellan olika orter

Generellt är skillnaderna små och antalet beräkningsfall för begränsat för att dra slutsatser om lokala klimatskillnader mellan orter. Det är tydligt att då fuktigt material utsätts för höga eller låga temperaturer ökar RF till följd av sänkt temperatur eller till följd av ackumulering i konstruktionen vid solstrålning. Det är inte alla skillnader mellan orter som kan tolkas utifrån enbart temperaturer och solstrålning, utan det handlar också om när i tid under en viss period som kritiska tillstånd uppstår, vilka i sin tur beror på solstrålning, väderstreck, vindar, temperaturer, nattutstrålning och mycket mer.

En viktig slutsats är att 16 % fuktkvot är en kritisk gräns oavsett ort och att främst tak och yttervägg kan nå kritiska fuktnivåer vid mellanlagring i kallare klimat.

Av resultaten kan dock sägas att vid medelfuktkvot om högst 16 % i virket gäller att:

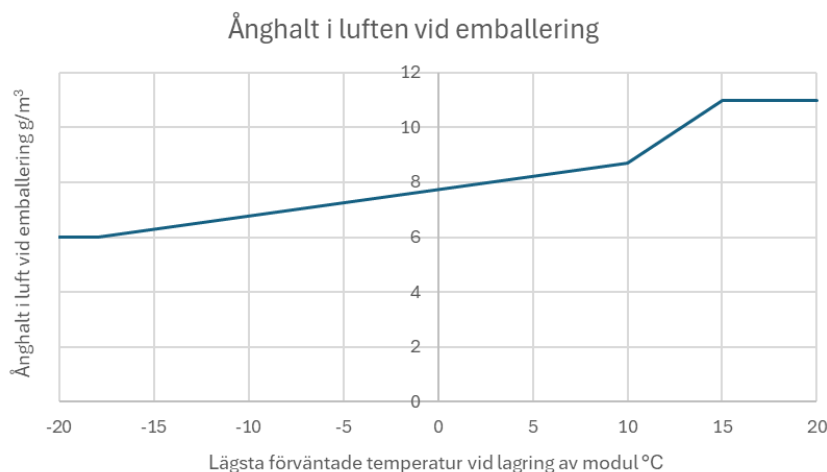
- I Luleå är det bäst att mellanlagra mellan januari och juni (ytterväggen är kritisk). Här är höst/vinter och sommar mer kritiska.
- I Växjö är det något bättre att mellanlagra på höst/vinter, vilket egentligen går emot de allmänna slutsatserna.
- I Lund är skillnaderna små mellan olika tider på året, men liknar mycket resultaten för Växjö.
- Vissa små skillnader mellan orter för särskilt yttervägg och tak följer inte strikt den övergripande trenden mellan orter då fuktkvoten är 16 % eller högre. Detta tolkas som att det finns en lokal betydelse för mellanlagring som ökar då fuktkvoten är högre, men att detta inte enkelt kan kvantifieras utan en större mängd resultat.
- De generella slutsatserna och att det är små skillnader mellan orter gäller framför eventuella lokala avvikelser.

8 Rekommendationer

Mellanlagring i utomhusklimat bör i första hand helt undvikas och i andra hand ske i kontrollerad miljö. Då mellanlagring utomhus ändå måste ske bör tiden för sådan lagring minimeras till högst någon månad. I de fall längre mellanlagring är oundvikligt ökar risken för följdskador.

Oavsett tid för mellanlagring och om den sker utomhus eller i kontrollerad miljö gäller dessutom nedanstående rekommendationer som är tänkta att tillämpas additivt:

- En fuktkvot på högst 14 % (medelfuktkvot) ska eftersträvas och fuktkvoten bör inte överskrida 16 % i någon inbyggd regel
- Spridningen av medelvärden och extremvärden ska hållas nere, t.ex. genom att låta virke torka i kontrollerad inomhusmiljö minst ett par veckor före montage. Verifierande fuktkvotsmätning bör ske stickprovsmässigt.
- Fuktkvotsgradienten inom enskilda träreglar ska hållas så låg som möjligt, t.ex. genom att låta virket torka i kontrollerad inomhusmiljö. En skillnad mellan fuktkvoten i kärnan och närmare ytan på högst 5 %-enheter bör eftersträvas samtidigt som medelfuktkvoten bör högst vara 14 % för att risken för skador ska vara låg.
- Material (isolering, plywood, gips etc.) behöver acklimatiseras till inomhusmiljö och inte byggas in/emballeras med förhöjd fuktkvot – de ska lagras i samma klimatförutsättningar som gäller för emballeringen (se nedan).
- Emballering ska i ett klimat med så låg ånghalt i luften som möjligt. Vid lagring i kallt klimat under vintern ska ånghalten i luften då emballering sker vara högst 6 g/m³ eller högst 65 % RF beroende på vad som är begränsande. Vid lagring i varmare klimat (> 15 °C) kan ånghalten tillåtas vara 11 g/m³ vid emballering, se figur 8.1.
- Ovanstående innebär att omgivningen vid emballering t.ex. får vara ca. 35 % RF vid 20 °C eller ca. 65 % RF vid 10 °C eller kallare om lagring sker i minusgrader (vintertid). För lagring i temperaturer över 10 °C gäller också högst 65 % RF vid emballeringen. Detta baseras på att det över tid inte ska uppnås över 75 % RF i de emballerade modulerna. Dessa rekommendationer kan även utgöra riktlinjer för miljön i produktionsanläggningen och inlagringen av material, så länge temperaturen är minst över 10 °C (under denna temperatur bedöms torktider öka väsentligt och krav på ytbehandlingen mm kräver också en minsta temperatur).
- Långa lagringstider (mer än 2 månader) bör inte tillämpas om virket har 16 % fuktkvot eller högre och det innebär generellt stor risk för följdskador att bygga in virke med 16 % fuktkvot eller högre.
- Ytterväggen är den mest fuktkänsliga delen av modulen och golvet den minst känsliga.
- Det går inte att kompensera för fuktigare material med ett mer fuktgenomsläppligt emballage eller torrare omgivande regler.



Figur 8.1. Rekommenderad högsta ånghalt i omgivande luft vid emballering (och produktionsmiljön då temperaturen är minst 10 °C). Då lagring sker i kallt klimat finns risk för kondens och i varmare klimat ökar risken för mögeltillväxt. Högsta begränsande ånghalt i luften är satt till 11 g/m³ eller 65 % RF i 20 °C (14 % fuktkvot i trä).

Fortsatta studier

Fortsatta studier berör dels ytterligare verifierande mätningar och utökade parameterstudier med befintlig beräkningsmodell:

- Extremväder och framtida varmare/fuktigare klimat bör inkluderas i klimatfiler och utvärdering.
- Simulera andra (längre) lagringstider och fler starttider under året.
- Större variation av väderstreck, skuggning och strålningseffekter.
- Utöka detaljer i beräkningsmodellen, t.ex. fler variationer i fukttillstånd.
- Undersöka andra isoleringsmaterial som möjlig fuktbuffert.
- Loggning av klimatet inne i moduler (på flera ställen) för att jämföra med beräkning
- Detaljerad uppföljning av fuktkvot i material som byggs in och emballeras.

Referenser

Fraunhofer Institute for building physics (IBP)

TCN projekt 2442310 (2024). *Slutrapport Vägledning för optimal mellanlagring*.

Hukka, A. & Viitanen, H. (1999). *A mathematical model of mould growth on wooden material*. Wood Science and Technology, Volym 33, pp. 475-485

Sedlbauer K (2002). *Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation*. Journal of Thermal Envelope and Building Science. 25 (4): 321-336.

WUFI materialdatabas, v 6.7.

Mundt Petersen, Solof (2015). *Moisture Safety in Wood Frame Buildings - Blind evaluation of the hygrothermal calculation tool WUFI using field measurements and determination of factors affecting the moisture safety*. In Report TVBH 1021.

Lindbäcks Bygg. Ritningar LT-25-6-001 (2023), LT-25-6-061 (2023), LT-25-6-151 (2023), LT-25-6-201 (2023), LT-25-6-050 (2023), LT-25-6-150 (2023)

Lindbäcks Bygg 2024. *Mätdata komplett 9 givare 2018-2023*.

SMHI (2024). Observationsdata per timme för Piteå 2021-01-01 till 2023-01-31. [www] <https://www.smhi.se/data/meteorologi/>

- *Vindhastighet*
- *Temperatur*
- *Relativ fuktighet*

SMHI (2024). Observationsdata per timme för Umeå 2021-01-01 till 2023-01-31. [www] <https://www.smhi.se/data/meteorologi/>

- *Långvågsstrålning atmosfär*

SMHI STRÅNG (2024) databas för position Piteå (65.245;21.623). 2021-01-01 till 2023-01-31 [www] <https://strang.smhi.se/>

- *Diffus solstrålning*
- *Global solstrålning*

Mundt Petersen, Solof & Harderup, Lars-Erik (2014). *A method for blind validation of hygrothermal calculation tools*. XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components, 2014 p.624-631

IBP (2015). WUFI Passes Benchmark Test of EN 15026. [www] <https://wufi.de/en/literature/>

Öberg (2024). *Moisture Risks when Storing Wooden House Modules – Model Development and Verification based on Field Measurements*. Under bearbetning.

Ranefjärd, O. et al. *Hygrothermal Properties and Performance of Bio-Based Insulation Materials Locally Sourced in Sweden*. Materials 2024, 17(9), 2021; <https://doi.org/10.3390/ma17092021>. Submission received: 28 March 2024 / Revised: 15 April 2024 / Accepted: 18 April 2024 / Published: 26 April 2024