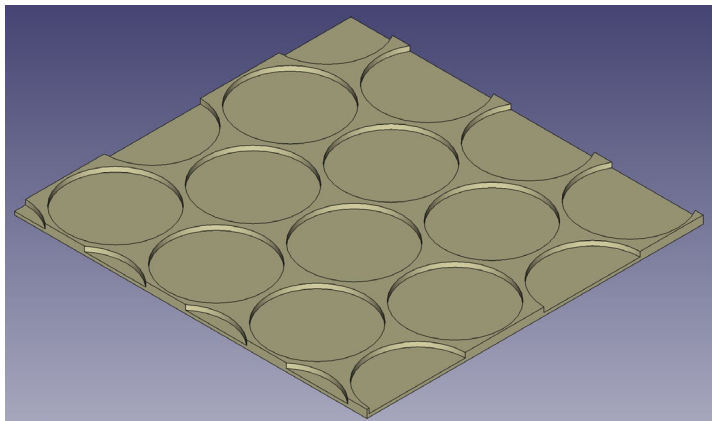


## Bärande hålträisolering

- utvecklandet av en träkomposit som ska nyttjas till homogena ytterväggskonstruktioner, där bärförmågan, isoleringsförmågan och fuktsäkerheten utvärderas



Sigfrid Lindberg



# Bärande hålträisolering

- utvecklandet av en träkomposit som ska nyttjas till homogena ytterväggskonstruktioner, där bärförmågan, isoleringsförmågan och fuktsäkerheten utvärderas

Sigfrid Lindberg

Examensarbete

Avdelningen för Byggnadsfysik  
Institutionen för Bygg- och miljöteknologi  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund

© Sigfrid Lindberg

ISRN LUTVDG/TVBH—22/5117—SE(64)  
Institutionen för bygg- och miljöteknologi  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 LUND

# Sammanfattning

- Titel:** Bärande hålträisolering
- Författare:** Sigfrid Lindberg
- Handledare:** Stephen Burke, Institutionen för bygg- och miljöteknologi, avdelningen för byggnadsfysik, Lunds tekniska högskola
- Examinator:** Petter Wallentén, Institutionen för bygg- och miljöteknologi, avdelningen för byggnadsfysik, Lunds tekniska högskola
- Bakgrund:** För att kunna bygga mer klimatsmart har användandet av trä, både som byggnadsmaterial och som isoleringsmaterial fått ett allt större intresse. Vid byggnation av bärande träytterväggar i flervåningshus används normalt en träregelstomme eller en stomme av KL-trä, vilken måste kompletteras med isolering för att kunna uppnå ställda krav på U-värden. Dessa ytterväggskonstruktioner består vanligen av ett flertal lager av olika byggnadsmaterial, vilket resulterar i ett behov av en ångspärr för att minska risken av mikrobiell påväxt orsakat av varierande fuktillstånd i ytterväggskonstruktionen.
- Vid en önskan att öka användandet av trä som bärande byggnadsmaterial, kan förslagsvis en träkomposit med både god bärande och isolerande förmåga nyttjas till homogena ytterväggskonstruktioner. Dessa ytterväggskonstruktioner avses inte behöva nyttja en ångspärr för att kunna uppnå god fuktsäkerhet, utan ska kunna uppnå god fuktsäkerhet då de endast består av träkompositen.
- Frågeställning:** Hur låg värmeledningsförmåga kan erhållas i kompositmaterialet, givet att bärigheten är god nog för att kunna användas som bärande ytterväggar i flervåningshus, samtidigt som de fuktrelaterade riskerna inte överstiger dagens byggnormer.
- Syfte:** Syftet med arbetet är att utvärdera materialegenskaperna för en optimerad träkomposit som är uppbyggd av horisontellt utborrade slutna hål. Därefter ska träkompositmaterialets bärförmåga, isoleringsförmåga och fuktrelaterade risker sättas i relation till dagens byggstandard för att utröna om träkompositmaterialet har teoretiska förutsättningar för att kunna nyttjas som homogena bärande ytterväggar.

Nyttjande av träkompositmaterialet avses leda till en alternativ ytterväggskonstruktion som både är förnyelsebar och mer

klimateffektivt än dagens standardytterväggar. Arbetet kan likställas med en förstudie som utreder de teoretiska möjligheterna och gränserna för vad som kan förväntas av träkompositmaterialet.

**Metod(er):**

En litteraturstudie har initialt genomförts för att utvärdera det vetenskapliga underlaget som finns tillgängligt för att kunna bedöma förväntad bärförmåga, bedömning av träs materialegenskaper, luftförelser (konvektion) inne i ett slutet utrymme, ledning och strålning i lufthål, samt förutsättningarna för mögelpåväxt i den slutna hålstrukturen och möglets påverkan på inomhusmiljön. Vidare görs en modellerad simulering av värmeledningsförmågan i träkompositmaterialet med hjälp av beräkningsprogrammet HEAT3.

**Slutsatser:**

Värmeledningsförmågan för framtaget teoretiskt träkompositmaterial uppgår till 0,060 W/(m·K) och ska sättas i relation till motsvarande massivt trä med en värmeledningsförmåga på cirka 0,11 W/(m·K). Vid en vägg tjocklek på 400 mm har träkompositen en isoleringsförmåga som motsvarar 250 mm cellplast och en bärförmåga som motsvarar upp emot 240 mm tjock KL-trä, vilka är vanliga tjocklekar på isolermaterial och den bärande delen av konstruktioner. Således bedöms både isolerings- och bärförmågan vara fullgod. Träkompositmaterialet bedöms även ha likande fuktegenskaper och fuktrisker som massivt trä. Slutsatsen var att träkompositmaterialet kan förväntas ha en praktisk tillämpning i byggsektorn och kunna användas som homogena bärande ytterväggar. Vidare praktiska tester av värmeledningsförmågan och noggrannare analys av bärförmågan behöver göras.

**Nyckelord:**

Bärande isolering, träkomposit, värmeledningsförmåga, HEAT3, luftporer, energitransport, bärförmåga, hålstruktur

# Abstract

Many building companies are trying to have a lower impact on the environment and the climate. One way of doing this is by using wood-based materials. The goal of this project is to develop and evaluate a wood composite material which shall be both load bearing and have good insulation properties whilst having good moisture properties (to reduce the risk of growth from fungi). This study looks at a wood composite construction with a closed cell pore structure optimized to have the lowest thermal conductivity possible while having a load bearing capacity for multi-story buildings. To evaluate the potential of the composite material, its load bearing properties and the effectiveness of the insulation, the material will be compared to the standard usage of exterior walls in the building sector. To evaluate the different material properties of wood, heat transport, load bearing capacity and the potential risks of attacking fungi, a literature review was carried out. Furthermore, the thermal conductivity for the composite material was studied in detail by using the computer program HEAT3. The final product of the composite material has a thermal conductivity of  $0,06 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  which can be compared to massive wood which has a thermal conductivity of  $0,11 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . When building 400 mm thick walls, the insulation of the composite material is equivalent to 250 mm insulation material and the load bearing capacity is equivalent with up to 240 mm thick elements of CLT, which is satisfactory since it results in a just as good load bearing- and insulation capacity as walls built today with the same thickness. In conclusion, both the load bearing capacity and the insulation is adequate in comparison to the multi-layer walls used as standard today and the composite material has a promising potential to be used in the building sector. Further studies of the practical thermal conductivity and a more thorough study of the load bearing capacity needs to be done.

**Keywords:** load bearing insulation, wooden composite, thermal conductivity, HEAT3, air pores, heat transfer, load bearing capacity, pore structure





# Förord

Efter att ha funderat och diskuterat med ett flertal föreläsare under tre års tid, fick jag äntligen möjligheten att optimera och utvärdera min egenutvecklade träkomposit i detta examensarbete. Kompositmaterialet avses att användas för att åter kunna bygga homogena ytterväggskonstruktioner men som samtidigt uppfyller dagens ställda krav på bärförmåga, isoleringsförmåga och fuktsäkerhet, samtidigt som materialet både är klimatsmart och förnyelsebar.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Stephen Burke, för all vägledning, hjälp och alla givande samtal under arbetets gång. Tack för att du tog dig an att handleda mig med min idé.

*Lund, februari 2022*

*Sigfrid Lindberg*



# Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	v
Abstract .....	vii
Förord .....	ix
Innehållsförteckning .....	xi
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund .....	1
1.2 Problemställningar.....	2
1.3 Syfte och mål .....	3
1.4 Övergripande metod .....	3
1.5 Avgränsningar .....	3
1.6 Rapportens struktur och uppbyggnad .....	4
2 Teori .....	5
2.1 Allmän uppbyggnad av kompositmaterialet.....	5
2.2 Trä – en översikt och val av träslag.....	5
2.2.1 Uppbyggnad .....	6
2.2.2 Lastbärande egenskaper.....	7
2.2.3 Värmeledande egenskaper .....	8
2.2.4 Fuktrelaterade egenskaper .....	8
2.3 Limmets egenskaper.....	9
2.4 Allmänt om värmetransport.....	10
2.4.1 Porer- och luftspalters värmeöverförande egenskaper.....	11
2.5 Mikrobiell påväxt och fuktrisker kopplade till kompositmaterialet .....	13
2.6 Fukttransport.....	15
2.7 Nödvändig bärförmåga .....	15
2.8 HEAT3 .....	16
2.9 Praktisk tillverkning .....	17
3 Optimering av hålstruktur.....	19
3.1 Uppbyggnad av kompositmaterialet och begränsning av .....	19
hålstrukturens utformning.....	19
3.1.1 Principiell tillverkning av kompositmaterialet .....	19
3.1.2 Jämförelse mellan två olika hålstrukturer.....	20
3.1.3 Minimering av värmeledning genom den sammanhängande .....	22
strukturen av trämaterial.....	22
3.2 Potentiell bärförmåga i den tilltänkta hålstrukturen .....	24
3.2.1 Bärförmåga i hålstrukturen .....	24
3.2.2 Bärförmåga genom de vertikala skivorna.....	26
3.3 Fuktrelaterade risker och fukttransport genom kompositmaterialet.....	27
3.3.1 Ångmotstånd för kompositmaterialet .....	28
3.3.2 Fallstudier av relativ fuktighet vid stationära förhållanden .....	29
3.4 Optimering av värmeledningsförmåga .....	31
3.4.1 Bedömning om konvektionsbidraget är signifikant.....	31
3.4.2 Lägsta möjliga värmeledning per skiva med försänkt hålstruktur.....	33
3.5 Vald utformning av hålstruktur och uppbyggnad.....	35
4 Modellering i HEAT3 med tillhörande resultat.....	39

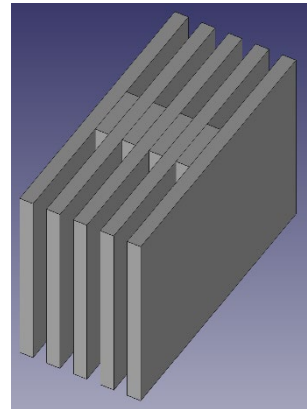
4.1	Värmeledningsförmåga för kompositmaterialet då hålen är placerade i horisontell linje efter varandra .....	40
4.2	Värmeledningsförmåga för kompositmaterialet då hålstrukturen är förskjuten.....	41
4.3	Resultat och diskussion av modellering i HEAT3.....	42
5	Sammanställning av resultat och diskussion .....	45
6	Osäkerheter och vidare studier .....	47
7	Slutsats.....	49
	Referenser.....	51

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

För att bygga mer klimatsmart har användandet av trä, både som byggnadsmaterial och som isoleringsmaterial blivit allt mer intressant och fått ett ökat intresse (IVA, 2020). Vid byggnation av bärande träytterväggar i flervåningshus används normalt en träregelstomme eller en stomme av KL-trä, vilken måste kompletteras med isolering för att kunna uppnå ställda krav på U-värden. Dessa ytterväggskonstruktioner består vanligen av ett flertal lager av olika byggnadsmaterial, vilket resulterar i behovet av en ångspärr för att minska risken för mikrobiell påväxt orsakat av fuktillståndet i ytterväggskonstruktionen.

På den svenska marknaden är företaget Isotimber ensamma om att erbjuda en både bärande och isolerande ytterväggskonstruktion som nästan uteslutande är uppbyggd av trä (ej en ren massivträkonstruktion), en konstruktion som dessutom påstås inte behöva någon ångspärr (Isotimber, u.å.). Ytterväggen är uppbyggd av stående träreglar vilka har försetts med vertikalt urfrästa våningshöga spår där den stillastående luften i spåren skapar den isolerande effekten. Utformningen av en sådan individuell träregel åskådliggörs i figur 1. Den kvarvarande kärnan av en stående träregel resulterar i en genomgående köldbrygga som motsvarar cirka 14% av väggytan. Isotimbers väggkonstruktion utgörs till cirka 99% av trä och resterande andel av lim, vilket behövs för att sammanfoga träreglarna. Den färdiga ytterväggskonstruktionen har en god lufttäthet, samt ett  $\lambda$ -värde på  $0,075 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (Isotimber, u.å.). Som jämförelse har massivt referensträ ett  $\lambda$ -värde på  $0,11\text{-}0,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (Svenskt Trä, 2017).



Figur 1. Principiell utformning av en träregel försedd med urfrästa spår.

Även om Isotimbers väggkonstruktion påstås ha en god lufttäthet, görs bedömning att riskerna för större luft rörelser och en större ansamling av inläckande vatten vid otätheter kan ske, vilket kan resultera i omfattande konsekvenser. Vid en önskan att maximera användandet av trä i bärande ytterväggskonstruktioner, kan förslagsvis istället en träkomposit med god bärande och isolerande förmåga nyttjas till homogena ytterväggskonstruktioner. Väggskonstruktioner av denna träkomposit ska naturligt ha en hög lufttäthet, resultera i små luft rörelser samt att inläckande vatten inte ska kunna ansamlas i en större mängd. Dessa ytterväggskonstruktioner avses inte behöva nyttja en ångspärr för att kunna uppnå god fuktsäkerhet, utan ska kunna uppnå god fuktsäkerhet då det endast består av träkompositen. Detta ska önskvärt leda till en alternativ ytterväggskonstruktion som är fuktsäker, har goda isolerande egenskaper och har en god bärförmåga, samtidigt som ytterväggen består till cirka 99 viktprocent av trä och där den

isolerande förmågan är högre än Isotimers väggkonstruktion. På så sätt tillförs ett nytt alternativ till både bärande och isolerande ytterväggar i byggsektorn som nästan uteslutande består av ett förnyelsebart material och som dessutom har potentialen att vara klimatsmart.

Arbetet bygger på en önskan att åter kunna bygga homogena ytterväggskonstruktioner av massivt trä, likt gamla timmerhus, men som istället består av ett modernt träkompositmaterial som är lämpat för dagens kravställning på bärförmåga, isoleringsförmåga och ett fuktsäkert byggande. Detta ska ske vid en väggjocklek som motsvarar dagens standardjocklek, då en ökad väggjocklek inte bedöms vara ekonomiskt försvarbart då lokal-/boarean därmed skulle minskas.

### 1.2 Problemställningar

Vid framtagande av det efterfrågade träkompositmaterialet utvärderas träkompositmaterialets materialegenskaper utifrån följande övergripande frågeställning/målsättning:

- Hur låg värmeledningsförmåga kan erhållas i kompositmaterialet, givet att bärigheten är god nog för att kunna användas som bärande ytterväggar i flervåningshus, samtidigt som de fuktrelaterade riskerna uppfyller dagens byggnormer.

Vidare kommer den tilltänkta praktiska tillverkningen och de ingående kostnadsdrivande arbetsstegen att beaktas vid val av strukturell uppbyggnad och sammansättning av kompositmaterialet.

De problemställningar som mer i detalj kommer att analyseras sammanställs nedan:

- Teoretisk analys av kompositmaterialets bärförmåga, samt säkerställandet att bärförmågan är tillräckligt hög för att fungera i flervåningshus (översiktligt).
- Utvärdera och jämföra olika håltrukturer utifrån förväntad isolerande effekt.
- Utvärdera och jämföra olika varianter av kompositmaterialets uppbyggnad och sammansättning utifrån antal arbetssteg och olika kostnadsdrivande processer (översiktlig reflektion).
- Bedömning av inverkan på värmeledningsförmågan beroende olika luftporers/lufthålens geometriska utformning.
- Utvärdera fuktegenskaper och fuktdiffusion genom materialet.
- Utvärdera risker kopplade till fukt vid användande av kompositmaterialet och jämföra det med massivt trä och ytterväggskonstruktioner av dagens byggstandard.

### 1.3 Syfte och mål

Syftet med arbetet är att ta fram och utvärdera materialegenskaperna för en optimerad träkomposit som ska vara uppbyggd av horisontellt utborrade slutna hål. Därefter ska träkompositmaterialets bärförmåga och isoleringsförmåga sättas i relation till dagens byggstandard för att utröna om träkompositmaterialet har teoretiska förutsättningar för att kunna nyttjas som homogena bärande ytterväggar, detta vid en önskan att en likvärdig bärförmåga och isoleringsförmåga bibehålls vid motsvarande samma vägg tjocklek.

Arbetet är en förstudie vars målsättning är att utreda de teoretiska möjligheterna och gränserna för vad som kan förväntas av träkompositmaterialet och om det skulle kunna nyttjas som ett alternativt mångsidigt byggnadsmaterial för ytterväggskonstruktioner. Vid tillfredställande resultat bedöms en mer djupgående analys av kompositmaterialet var befogad och nödvändig att göra.

### 1.4 Övergripande metod

En litteraturstudie har initialt genomförts för att utröna det vetenskapliga underlaget som finns tillgängligt för att kunna bedöma förväntad bärförmåga, bedömning av träets materialegenskaper, luftrörelser (konvektion) inne i ett slutet utrymme, ledning och strålning i lufthål, samt förutsättningarna för mögelpåväxt i den slutna hålstrukturen och möglets påverkan på inommiljön. Vidare görs en modellerad simulering av värmeledningsförmågan i träkompositmaterialet med hjälp av beräkningsprogrammet HEAT3.

### 1.5 Avgränsningar

Arbetet avgränsas till att endast studera träkompositmaterialet teoretisk, där bärförmågan studeras utan risk för knäckning och endast vid exponering för vertikal linjelast. Dessutom kommer endast en idealiserad väggdel att analyseras. Därmed tas ingen beaktning till anslutningar runt öppningar, golv/tak eller till i byggnadshörn. Vid val av det lämpligaste träslag för kompositmaterialet, avgränsas alternativen till det svenska beståndet av rent praktiska skäl där träslaget *gran* kommer att nyttjas, vilket motiveras i kapitel 2.1. Beskrivna materialegenskaper för trä avgränsas därmed till att endast omfatta gran.

Tjockleken på vanliga ytterväggskonstruktioner för nyproducerade flervåningshus ansätts till 400 mm efter personlig bedömning. Vid bedömning av fuktsäkerhet studeras bara väderskyddade väggelement. Vidare studeras inte heller brandrisker för konstruktioner av träkompositmaterialet.

## 1.6 Rapportens struktur och uppbyggnad

Arbetet ska både resultera i en utvärdering av förutsättningarna för att kunna nyttja kompositmaterialet till homogena bärande ytterväggar, samt resultera i ett förslag på en optimerad utformning av kompositmaterialet med främst hänsyn till bärförmåga, isoleringsförmåga och fuktsäkerhet. För att kunna presentera detta på bästa sätt, struktureras arbetet med en inledande teoridel (kapitel 2). Detta följs av hur den allmänna utformningen av kompositmaterialet kommer påverka kompositmaterialets bärförmåga, isoleringsförmåga och fuktsäkerheten, vilket avslutas med en optimerad utformning av kompositmaterialet där dessa olika egenskaper beaktas utifrån teoridelen (kapitel 3). Först när denna utformning av kompositmaterialet är bestämd, modelleras värmeledningsförmågan för det kompletta kompositmaterialet i beräkningsprogrammet HEAT3 (kapitel 4). Därefter görs en sammanställning av materialegenskaperna (resultatet) för den valda utformningen av kompositmaterialet, samt effekten av att variera dessa egenskaper (kapitel 5). Slutligen diskuteras och utvärderas resultaten i kapitel 6 och 7.



## 2 Teori

### 2.1 Allmän uppbyggnad av kompositmaterialet

Kompositmaterialet är uppbyggt av en horisontellt utborrad hålstruktur som omsluts av vertikalt stående träskivor vilket medför att de utborrade hålen blir slutna. Den inneslutna luften i hålen ska ge upphov till kompositmaterialets förbättrade isolerande förmåga relativt till massivt trä. Beroende på vald hålstruktur och geometrisk utformning av porerna/hålen, påverkas den isolerande effekten, vilken kommer optimeras i kapitel 3.

Allmänt avses kompositmaterialet bestå viktmissigt till cirka 99% av trä där resterande vikt-andel utgörs av lim. Ytterväggskonstruktioner av kompositmaterialet antas vara väderskyddade och därmed inte utsättas slagregn eller exponeras mot solljus, vilket skulle kunna få den exponerade ytan av materialet att åldras fortare än resterade del av väggkonstruktionen.

### 2.2 Trä – en översikt och val av träslag

Olika träslag delas upp i de två kategorierna barrträd (ex. gran och tall) och lövträd (ex. björk, ek och bok). Barrträd skiljer sig fundamentalt från lövträd genom att de består till 90-95% av 3-4 mm långa, smala celler vid namn *longitudinella trakeider*, medan lövträd endast består av 15-60% kortare trakeider samt bland annat av 20-60% kärnceller (avsedda för vattentransport), vilka vanligtvis inte alls påträffas hos barrträd (Jones and Shmulsky, 2019).

Även om det finns tydliga karaktäristiska skillnader mellan lövträd och barrträd, varierar även egenskaperna tydligt inom respektive trädtyp, där exempelvis balsa är ett lövträd med en densitet på cirka 160 kg/m<sup>3</sup> medan lövträdet pockenholz har en densitet på cirka 1200 kg/m<sup>3</sup> och sjunker således i vatten (Skogskunskap, 2020).

Den svenska skogen utgörs primärt av barrträden gran (41%) och tall (39%). Resterande 12% utgörs av lövträd där björken dominerar (SkogsSverige, 2021). Gran är det träslag som främst används till konstruktionsvirke. Till snickerier används vanligen furu (tall) och till möbler används oftast olika sorter av lövträd (Svenskt Trä, 2021a).

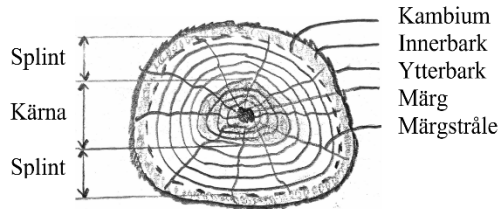
Det tilltänkta kompositmaterialet önskas vara uppbyggt av ett träslag som både är vanligt förekommande på den svenska marknaden, samt naturligt har en låg värmekonduktivitet. Träslaget gran är det träslag i det svenska beståndet som har lägst densitet (440 kg/m<sup>3</sup>) och därmed även har lägst värmekonduktivitet (Svenskt Trä, 2021a), och som dessutom är det vanligaste förekommande träslaget, vilket föreligger valet av träslaget gran vid tillverkning av kompositmaterialet.

Vidare beskrivningar av träets uppbyggnad och olika materialegenskaper avgränsas därmed till att endast omfatta träslaget gran.

## 2.2.1 Uppbyggnad

Gran (barrträd) är som tidigare konstaterat primärt uppbyggt av långa longitudinella, smala celler (trakeider), vilka skapas i ett skikt kallat *kambium* och påträffas mellan barken och splintveden, se figur 2. Den innersta barken består av levande celler som ansvarar för näringstransporten i trädet medan ytterbarken består av döda celler som har en skyddande funktion för trädstammen. Näringstransporten i sidled sker genom märkestrålar som går från den levande innerbarken, riktade radiellt inåt (Burström, 2007).

Veden kan delas upp i kärnved (kärnan) och splintved (yttre delen), vilket även åskådliggörs i figur 2. Kärnan, vilken består av tidigare splintved som har fått sin näringstransport avskuren och därmed har dött, börjar vanligtvis bildas först när trädet uppnått en ålder av cirka 30 år och växer därefter succesivt i takt



Figur 2. Tvärsnitt av en trädstam där trädets olika beståndsdelar framgår.

med att ny splintved bildas för varje år som går (Burström, 2007). Under ett år växer trädet i olika takt vilket ger upphov till den karaktäristiska makrostrukturen som kallas för *årsringar*. Under våren och försommaren bildas *vårved*, vilken typiskt består av stora celler med tunna cellväggar, vilket gör vårveden speciellt lämpad för vätsketransport. Under sommaren bildas *höstveden*, vilken typiskt består av mindre celler med tjocka cellväggar, vilket ger upphov till högre hållfasthetsegenskaper (Burström, 2007).

Trädets uppbyggnad med longitudinellt orienterade fiber (i trädstammens riktning) och märkestrålar i radiell riktning medför att trä som byggnadsmaterial har olika materialegenskaper i tre huvudriktningar (radiell riktning, tangentiell riktning och fiberriktning) och således är ett anisotrop material med olika egenskaper vinkelrätt mot varandra (ortotropi). Dessa tre huvudriktningar påverkas av olika störningar i form av kvistar eller inneslutningar av bark eller kåda (Burström, 2007).

Cellväggarna i träceller är uppbyggda av 4 lager vilka alla består av cellulosa, hemicellulosa och lignin. Cellulosan är samlad i kristallina strängar, kallade *mikrofibriller*, vilka är inneslutna av hemicellulosa och lignin (Svenskt Trä, 2019). Alla tre molekyltyper har förmågan att binda till vatten genom vätebindningar, där vattenbindningen i cellväggarna främst sker till hemicellulosa och amorf cellulosa. Däremot tar de kristallina områdena i cellulosan upp väldigt lite fukt, vilket innebär att trämateriallets hygroskopicitet är en direkt fysikalisk bindning av vattenmolekyler till bindingsställen i strukturen (Burström, 2007).

Det yttre lagret av cellväggarna kallas för *primärväggen*, vilken har strängarna slumpvis orienterade. De tre inre lagren  $S_1$ - $S_3$  utgör den egentliga cellväggen där lagerna  $S_1$  och  $S_3$  har strängarna orienterade runt det mellersta rörformiga cellväggslagret  $S_2$ , där  $S_2$  utgör 85% av den totala cellväggstjockleken, vilken mer eller mindre är orienterad i cellens axiella riktning (fiberriktningen). Vinkeln mellan cellens axiella riktning och mikrofibrillriktningen kallas för *mikrofibrillvinkeln*, vilket kommer påverka trämateriallets olika svällande egenskaper i de tre huvudriktningarna (Svenskt Trä, 2019).

## 2.2.2 Lastbärande egenskaper

En felfri provkropp av barrträ (gran) har en draghållfasthet på cirka 100 MPa parallellt med fiberriktningen och en tryckhållfasthet på cirka 80 MPa parallellt med fiberriktningen. Att tryckhållfastheten är lägre än draghållfastheten kan förklaras av att träfibrerna, vilka byggs upp av de rörformade cellväggarna, till slut knäcks vid påbörjan av plasticering, medan viss plasticering kan ske vid dragspänning (Svenskt Trä, 2019).

Vidare uppgår tryckhållfastheten vinkelrätt fiberriktningen till 3-5 MPa, och går till brott genom att de rörformiga cellväggarna trycks sönder. Trä är som svagast i drag vinkelrätt fiberriktningen och går vanligen till brott genom att fibrerna i cellväggarna dras isär redan vid cirka 0,5 MPa (Svenskt Trä, 2019).

Hållfastheten i både drag och tryck är dessutom beroende av fuktkvoten. Vid upptag av fysikaliskt bundet vatten sväller cellulosa fibrerna och trycks isär, vilket leder till en lägre hållfasthet som succesivt minskar fram tills att fibermättnadsgraden (relativ fuktighet på 100%) uppnås (Burström, 2007).

Hållfastheten varierar även med temperaturen där fibrerna är mer styva vid lägre temperaturer och därmed har en högre hållfasthet, medan hållfastheten blir lägre vid högre temperaturer, vilket orsakas av att fibrerna mjuknar. Vid ett normalt temperaturintervall på -30 °C till +90 °C är denna effekt låg och kan generellt försummas (Svenskt Trä, 2019).

Specifikt för felfria prover av gran vid en fuktkvot på 12% (cirka 70% relativ fuktighet) uppgår tryckhållfastheten till 40 MPa parallellt fiberriktningen och 7,5 MPa vinkelrätt fiberriktningen. Draghållfastheten uppgår till 88 MPa parallellt fiberriktningen och till 4 MPa vinkelrätt fiberriktningen. Elasticitetsmodulen uppgår till 10 700 MPa parallellt fiberriktningen och till 550 MPa vinkelrätt fiberriktningen (Burström, 2007).

Trämateriäl antar i praktiken exempelvis formen av skivor, reglar och balkar, vilka inte tillfullo kan tillverkas så att det sammanfaller med trämateriallets ortotropa riktningar. Effekten på hållfastheten orsakat av trädets naturliga imperfektioner i form av avvikande fiberriktning kring exempelvis kvistar eller sprickor medför att trämaterialiet kan ha signifikant lägre hållfasthetsegenskaper (Svenskt Trä, 2019). På grund av den stokastiska förekomsten av kvistar i trämaterial och naturliga imperfektioner, sorteras trämaterial i olika virkeskvaliteter där den karaktäristiska hållfastheten motsvarar 5%-percentilen i fördelningen av hållfastheten (Svenskt Trä, 2019). Därmed görs ingen skillnad på hållfastheten utifrån val av trädslag vid en given hållfasthetsklass.

I Sverige är hållfasthetsklasserna C14-C30 avsedda för bärande konstruktioner varav C14 och C24 lagerförs av de flesta bygg- och trävaruhandlare (Svenskt Trä, 2021b). Då det tilltänkta kompositmaterialiet avses att vara lastbärande samt användas i sammanhang då element av korslimmat trä (KL-trä) vanligen används, väljs hållfasthetsklass C24 på det trämaterial som ska användas vid tillverkning av kompositmaterialiet. Denna hållfasthetsklass väljs även då en jämförelse med vanligt förekommande KL-träkonstruktioner lättare kan genomföras (Svenskt Trä, 2017).

För hållfasthetsklass C24 gäller bland annat att den karaktäristiska bärförmågan parallellt fiberriktningen i tryck,  $f_{ck}$  uppgår till 21 MPa, karaktäristisk bärförmåga vinkelrätt fiberriktningen i tryck,  $f_{c90k}$  uppgår till 2,5 MPa, samt att karaktäristisk elasticitetsmodul,  $E_{0,05}$  uppgår till 7400 MPa. Medelvärdet av elasticitetsmodulen parallellt fiberriktningen,  $E_{0,mean}$  uppgår till 11000 MPa och medelvärdet av elasticitetsmodulen vinkelrätt fiberriktningen,  $E_{90,mean}$  uppgår till 370 MPa (Isaksson och Mårtensson, 2017).

Då trä belastas i tryck i en vinkel mellan  $0^\circ$ - $90^\circ$  bestäms karaktäristisk bärförmåga enligt följande formel:

$$f_\alpha = \frac{f_{ck} \cdot f_{c90k}}{f_{ck} \cdot \sin^2 \alpha + f_{c90k} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (\text{MPa})$$

$\alpha$  = vinkeln mellan kraftens riktning och fiberriktningen  
(Svenskt Trä, 2019)

### 2.2.3 Värmeledande egenskaper

Då trä är ett anisotropt material, vilket har beskrivits under avsnitt 2.2.1, varierar även värmeledningsförmågan beroende på fiberriktningen. För gran uppgår det praktiska värmeledningsförmågan till  $0,11 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  vinkelrätt fiberriktningen oavsett om det är i radiell eller tangentiell riktning. Parallellt med fiberriktningen uppgår värmeledningsförmågan till  $0,26 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  och har således mer än 2 gånger högre värmeledningsförmåga än vinkelrätt fiberriktningen (Svenskt Trä, 2017).

### 2.2.4 Fuktrelaterade egenskaper

Vid nyavverkat virke ligger fuktkvoten kring 30-35% i kärnan och kring 130-150% i splinten, vilken innehåller fritt vatten. Då virket torkar minskar fuktkvoten utan att träet krymper så länge fuktkvoten överstiger fibermättnadsnivån, vilken uppgår till 30% för gran. Den totala krympningen för gran som uppkommer vid uttorkning till helt uttorkat tillstånd, uppgår tangentiellt till 8,3%, radiellt till 3,9% och till 0,3% i fiberriktningen (Burström, 2007). Det finns ingen ensamt accepterad teori kring varför skillnaden i krympning/svällning varierar som den gör, men en tänkbar förklaring är att fibrerna i sin kristallina form endast binder vatten genom att cellväggarna sväller vid upptag av fukt (vattenmolekyler), utan att fibrerna blir längre. Att mikrofibrillerna inte helt är parallella med fiberriktningen förklarar att viss krympning även sker i fiberriktningen. Skillnaden i krympande/svällande egenskaper i radiell och tangentiell riktning kan förklaras enligt tesen att märkestrålarna håller emot de fuktbetingade rörelserna i radiell riktning, vilket gör att krympningen/svällningen halveras i den radiella riktningen relativt till den tangentiella riktningen (Burström, 2007).

Beroende på var i trädstammen en träprofil sågas ut ifrån, kommer olika deformationer/krökningar av profilen att ske vid uttorkning, då träprofilers symmetri inte sammanfaller med den tangentiella och radiella riktningen på trädstammen (Burström, 2007).

Träets anisotropiska egenskaper påverkar även uttorknings- och uppfuktningsförloppen starkt. Förhållandet mellan upptag/avgivning av vattenånga i fiberriktningen, radiell riktning och tangentiell riktning, är 20:2:1. Förklaringen till den mycket högre diffusionshastigheten av vattenånga i fiberriktningen är att vattenångan kan transporteras genom cellernas hålrum, vilka är fyllda med luft (högre diffusionshastighet), medan vattenångan måste diffundera genom cellväggarna vid ångtransport vinkelrätt fiberriktningen (Burström, 2007).

Barrträ (gran) har en ånggenomsläpplighetskoefficient kring  $0,3-2,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  vinkelrätt fiberriktningen, vilket kan ställas i relation till stillastående luft som har en ånggenomsläpplighetskoefficient på  $25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (Sandin, 2010). Värdet på ånggenomsläpplighetskoefficienten för trä är beroende på den relativa fuktigheten (RF) i trämaterialiet och kan förväntas uppgå till cirka  $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  vid en relativ fuktighet på 80-95% (Arfvidsson, Harderup, Samuelson, 2017). Vid användandet av en KL-trästomme (massivt trä), kan en tjocklek på minst 70 mm betraktas som en ångbroms och innebära att inga ytterligare skikt behövs för att förhindra diffusion ut i konstruktionen (Svenskt Trä, 2020b).

### 2.3 Limmets egenskaper

Lim är en benämning på produkter avsedda för sammanfogning av fasta material, vilket förklaras dels genom mekanisk vidhäftning och dels genom molekylär vidhäftning. Den mekaniska vidhäftningen sker genom att limmet tränger in i porer och fördjupningar i de material som ska limmas samman. Efter limmets stelning erhålls en mekanisk förankring. Detta förutsätter dock att materialet har en porös eller grov ytstruktur, samt att limmet har en konsistens som möjliggör detta. Bidraget från molekylär vidhäftning utgår från den termodynamiska adsorptionsteorin, vilken innebär att om två material kommer tillräckligt nära varandra så kommer de att förenas, samt att föreningen mellan dessa två material blir starkare än det svagaste av materialen (Burström, 2007).

Den viktigaste beståndsdel i lim är bindemedlet, vars uppgift är att uppnå god vidhäftning. Beroende på typ av lim och limmets önskade egenskaper, finns ett flertal olika tillsatser/komponenter vilka ger upphov till olika seghet, sprödhet, elasticitet och vattenmotstånd (Burström, 2007). Vidare finns det olika härdningssätt och appliceringsmetoder som påverkar limfogens hållfasthetsegenskaper. Vid en önskan att noga optimera och utvärdera kompositmaterialiets bärförmåga, förväntas olika lim och olika appliceringstekniker vara relevanta att studeras djupare. Vid utvärdering av kompositmaterialiets värmeledningsförmåga, bedöms val av limtyp ha en försämrbar effekt och klassiskt trälim av typ PVAc-lim ("vitlim") kan nyttjas. Ingen vidare studie av val av limtyp kommer att göras. Allmänt förväntas de typer av trälim som nyttjas vid tillverkning av KL-trä vara fullgoda att nyttja för att erhålla god bärförmåga.

Vid bedömning av mängden lim som behövs vid sammanfogning av träskivor har ett par miljövarudeklarationer för LVL-balkar och LVL-skivor studerats, där miljövarudeklarationen från Stora Enso bedömts vara representativ. Vid tillverkning av LVL-balkar uppgår limbehovet till cirka  $95 \text{ g/m}^2$  (Stora Enso, 2019).

## 2.4 Allmänt om värmetransport

Temperaturskillnader förorsakar energitransport. Denna energitransport sker vanligen genom ledning, strålning och/eller genom konvektion (Sandin, 2010). Energitransport kan också ske i samband med fukttransport, vilket inte kommer studeras i detta arbete.

Värmeledningsförmågan ( $\lambda$ -värdet) varierar mellan olika material. För massiva material (utan inneslutningar) sker energitransporten endast genom ledning (konduktion), medan för porösa material där inneslutningar av exempelvis luft finns, sker också energitransporten genom konvektion och strålning inne i hålrummen. Dessa två komponenter för totalflödet av energitransporten inkluderas normalt i ett materials sammanvägda  $\lambda$ -värde och blir därmed betraktat som ledning vid makroanalys av materialet (Arfvidsson, Harderup, Samuelson, 2017).

Vid stationär endimensionell värmetransport genom ett homogent material, ges värmeflödet enligt:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{W/m}^2)$$

$q$  = värmefflöde (W/m<sup>2</sup>)  
 $\lambda$  = värmekonduktivitet (W/(m·K))  
 $\frac{dT}{dx}$  = temperaturgradient (K/m)  
(Sandin, 2010)

Den utmärkande egenskapen för isolerande material är att dess värmeledningsförmåga är låg. Cellplast och mineralull, vilka betraktas som vanliga isoleringsmaterial, har en värmeledningsförmåga på cirka 0,033-0,040 W/(m·K), medan exempelvis trä har en värmeledningsförmåga kring 0,14 W/(m·K). Värmeledningsförmågan för trä kan ställas i relation till betong som har en värmeledningsförmåga på 1,7 W/(m·K) och stål som har en värmeledningsförmåga på 60 W/(m·K) (Sandin, 2010). Den isolerande effekten i isoleringsmaterial erhålls genom att ha en hög porositet samt en struktur som medför att ingen eller endast liten konvektion uppstår (stillastående luft), samt att avståndet mellan ytorna i hålrummen är små, vilket medför att bidraget från strålning minimeras (Burström, 2007). Därmed får luftens låga konduktiva värmeledningsförmåga på 0,026 W/(m·K) en stor påverkan på materialets sammanvägda  $\lambda$ -värde (Sandin, 2010).

Då ett stort värmefflöde genom en vägg inte är önskvärt och man avser att studera den isolerande effekten i väggen, pratar man vanligtvis om motståndet mot värmetransporten, vilket kallas för *värmemotstånd* och definieras enligt:

$$R = d/\lambda \quad (\text{m}^2\text{K})/\text{W}$$

$\lambda$  = värmekonduktivitet (W/(m·K))  
 $d$  = tjockleken (m)  
(Sandin, 2010)

För exempelvis en flerskiktsvägg som är uppbyggd av ett flertal påföljande intilliggande lager, betraktas väggen som en seriekoppling där värmeflödet måste gå igenom respektive lager. Det totala värmemotståndet kan då adderas för respektive lager. Vid en avvikande värmeledningsförmåga genom exempelvis ett väggparti, som går genom ett eller flera skikt, talar man vanligtvis om en köldbrygga (exempelvis en träregel i ett lager av isolering). Då betraktas materialen leda värmeflödet parallellt med varandra. Visst värmeflöde kommer också ske mellan de parallella materialen vilket medför att vid en förenklad handberäkning, kallad  $\lambda$ -värdemetoden, ger en viss överskattning av det totala värmeflödet genom väggen. Det resulterande  $\lambda$ -värdet för respektive lager inklusive värmetransporten genom köldbryggan viktas samman utifrån respektive areaandel vid ett givet tvärsnitt i väggpartiet (Sandin, 2010).

Vid en U-värdeberäkning av en yttervägg, beaktas inte bara värmemotståndet i väggmaterialen, utan även ett övergångsmotstånd mellan väggen och inneluften, samt mellan väggen och uteluften, vilket utgår från energiöverföring genom strålning och konvektion med väggens omgivande miljö. Vanligen ansätts värmeövergångsmotståndet på utsidan ( $R_{se}$ ) till 0,04 ( $m^2K/W$ ) och värmeövergångsmotståndet på insidan ( $R_{si}$ ) till 0,13 ( $m^2K/W$ ). Att värmeöverföringsmotståndet är lägre på utsidan än på insidan förklaras huvudsakligen av att luft rörelserna orsakade av vinden medför en påtvingad konvektion, vilket resulterar i ett lägre värmeöverföringsmotstånd (Sandin, 2010).

### 2.4.1 Porer- och luftspalters värmeöverförande egenskaper

Ett oventilerat (slutet) utrymme bestående av luft, exempelvis i en luftspalt mellan två glasrutor i ett fönster, alternativt i den slutna hålstrukturen i cellplast, överför värme genom ledning i luften, genom strålning mellan ytorna, samt eventuellt genom konvektion beroende på storleken på hålen eller bredden på luftspalten (Sandin, 2010). För helt stillastående luft där strålningen mellan ytorna och konvektionen försummas, uppgår värmeledningsförmågan till 0,026  $W/(m \cdot K)$  enligt tidigare avsnitt. Värmeöverföringen genom strålning och konvektion är proportionella mot temperaturgradienten och båda effekterna är mer påtagliga desto större porerna/hålen/spalterna är (Burström, 2007). Teorin kring bidraget från strålning och konvektion förklaras separat nedan.

#### 2.4.1.1 Bidrag från konvektion

Konvektionen i en por/hål/luftspalt ökar med storleken eftersom temperaturgradienten ökar samtidigt som friktionens bromsande inverkan på luften blir mindre (Burström, 2007). Vid datasimuleringar av små slutna porer (med relativt sfärisk geometri), undertrycks konvektionen effektivt för en pordiameter mindre än 9 mm för enskilda porer. Vid analys av skalenlig cellplaststruktur förhindrades konvektionen effektivt först vid en pordiameter mindre än 6 mm, vilket förklaras av en förstärkande konvektiv effekt av närliggande porer då omslutande väggar är mycket tunna (Rivera-Salinas, et al. 2021).

Vid beräkningar av värmeflöde genom oventilerade luftspalter sammanvägs bidraget från ledning och konvektion. Konvektionsbidraget relativt till ledningen genom luften är inte signifikant om luftspalten är smalare än 10-12 mm (Sandin, 2010).

Värmeflödet beräknas genom att temperaturdifferensen multipliceras med en värmeöverföringskoefficient vilken approximativt definieras enligt:

$$\alpha_{kl} = \frac{\lambda_{luft}}{d}, d < 10 - 12 \text{ mm} \quad (\text{W}/(\text{m}^2\text{K}))$$

(Sandin, 2010)

Värmetransport orsakat av konvektion i små horisontella långsmala porer där längden är minst 2-3 gånger större än bredden har ej lyckats identifieras vid genomförd litteraturstudie, alternativt finns det ej att tillgå. Bidraget från konvektion antas vara lägre än för motsvarande bredd på luftspalt. Vid önskan att nyttja/studera en långsmal hålstruktur avses egen datasimulering av konvektionen behöva göras i ett lämpligt datorprogram.

#### 2.4.1.2 Bidrag från strålning

Värmeöverföring orsakad av temperaturskillnader sker genom långvågig strålning där absorptansen och emittansen uppgår till 90-95% för de flesta material som inte är metaller. För trä uppgår absorptansen och emittansen till 90% (Sandin, 2010).

Vid beräkning av värmeflöde orsakat av strålning multipliceras temperaturdifferensen med en värmeöverföringskoefficient vilken approximativt definieras enligt:

$$\alpha_s = 4 \cdot \epsilon_{12} \cdot \sigma_s \cdot T_m^3 \quad (\text{W}/(\text{m}^2\text{K}))$$

Där  $\epsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} = 0,818$  för trä

$\epsilon_i$  = absorptans och emittans (-)

$\sigma_s = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Boltzmann`s konstant (W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>))

$T_m$  = medeltemperatur (K)

(Sandin, 2010)

Värmeflödet orsakat av strålning är därmed oberoende av porlängden/spaltbredden för en given medeltemperatur. Ett effektivt sätt att minska strålningen mellan två ytor med ett givet avstånd är att nyttja mellanväggar, vilket minskar värmeflödet till 1/n-del om porlängden/spaltbredden delas in i n segment (Sandin, 2010). Därmed halveras värmeflödet per längdmeter om antalet spalter/porer dubblas per längdmeter.



### 2.4.1.3 Porer och luftspalters sammanvägda värmemotstånd

Det totala värmemotståndet i en vertikal oventilerad luftspalt definieras enligt:

$$R = \frac{1}{\alpha_s + \alpha_{kl}} \quad (\text{m}^2\text{K/W})$$

För en given bredd på en luftspalt alternativt en porlängd erhålls motsvarande  $\lambda$ -värde genom att dividera spaltbredden  $d$ , med det värmemotståndet  $R$ .

## 2.5 Mikrobiell påväxt och fuktrisker kopplade till kompositmaterialet

Träbaserade material kan utsättas för olika former av nedbrytning eller påväxt från bland annat svampar och bakterier, vilka antingen kan påverka träets bärande egenskaper eller endast missfärga träytan. Mögelsvampar är en typ av svamp som växer ytligt på bland annat trämaterial och som inte påverkar träets strukturella integritet, men missfärgar ytan, vilket kan ge upphov till en oangenäm lukt, samt vara allergiframkallande (Burström, 2007). Vidare är mögelpåväxt kopplade till utveckling av astma, luftvägsinfektioner och flera ospecificerade inomhusmiljöbesvär, vilka brukar sammanställas i beskrivningen att brukare drabbas av sjuka hus-symptom (Arfvidsson, Harderup, Samuelson, 2017).

För att mögelsvampar ska kunna växa måste det finnas tillgång till vatten i luften ( $RF > 75\%$ ), syre och rätt temperaurintervall. Svamparna består av hyfer, mycel, fruktkroppar och sporer. Sporerna bildas på fruktkropparna vilka utvecklas från hyferna och som kan liknas vid långsmala trådar. Mögelsvampar växer ytligt men hyferna kan växa in i vedens märkestrålar (Svenskt Trä, 2020a). Hur djupt hyferna kan tränga in i märkestrålarna har inte kunnat identifieras vid genomförd litteraturstudie. Efter samtal med Gunilla Bok<sup>1</sup> från forskningsinstitutet RISE, framgår det att hyferna troligen kan tränga in ett par millimeter i märkestrålarna, givet att den relativa fuktigheten uppgår till cirka 97%. Allmänt antas kompositmaterialet tillverkas och sammanfogas i en fabrik med en ren inomhusmiljö där mögelsporer inte påträffas i tillräckligt stor utsträckning vid tillverkning för att mögelsporer ska stängas inne i kompositmaterialet och kunna utvecklas till mögelpåväxt under bruksskede. Därmed antas exponering av mögelsporer ske först på ytan av materialet, vilket inträffar under bruksskede.

Tillväxthastigheten för mögelsvampar är beroende av den relativa fuktigheten samt temperaturen. Optimal tillväxt sker vid cirka 25 °C och vid en relativ fuktighet på cirka 95%, vilket kan ge upphov till en tillväxttakt på upp till 3 mm/dygn, medan tillväxttakten endast uppgår till 0,1 mm/dygn vid en relativ fuktighet på 75% vid en bibehållen temperatur. För temperaturer under cirka 8 °C är tillväxten mindre än 0,01 mm/dygn, oberoende av den relativa fuktigheten. Om de gynnsamma förhållandena upphör kan tillväxten avbrytas. Vid åter gynnsamma förhållanden sker en tidsfördröjning innan mögelsvamparna kan börja växa igen (Arfvidsson, Harderup, Samuelson, 2017).

<sup>1</sup>Gunilla Bok, forskare vid RISE, privat mailkorrespondens.

I en stabil miljö med relativ fuktighet på exempelvis 90% och en temperatur på 20 °C, tar det minst 4 veckor innan en mögelskada uppstår, medan det tar 12 veckor innan en mögelskada uppstår vid 80% relativ fuktighet. Som referens krävs en relativ fuktighet på 95% vid 5 °C i minst 4 veckor för att en fuktskada ska uppstå (Svenskt Trä, 2020a).

Om den relativa fuktigheten uppgår till 100% (fiber mätnadsgränsen), kan rötsvampar angripa trämaterial. Rötsvamparna bryter ner cellulosa, hemicellulosa och i vissa fall ligninet, vilket medför att träets bärförmåga reduceras (Arfvidsson, Harderup, Samuelson, 2017). En av de farligaste rötsvamparna är den *äkta hussvampen*, vars mycel bildar långa strängar, vilket gör att rötsvampen kan sprida sig djupt in i träet samt växa över exempelvis putsade ytor. Även om träet torkar ut så kan rötsvampen fortsätta att växa då svampen själv skapar det vatten som den behöver vid nedbrytning av vedcellerna. Denna process kan ske ända ned till en relativ fuktighet på 80-85% (Burstrom, 2007).

Kompositmaterialiet avses att användas som yttervägg. Genom ventilationen i en byggnad kommer vanligtvis luft in med en bibehållen ånghalt. Vid nyttjande av byggnader sker en fuktproduktion från både brukare och fuktalstrande aktiviteter. Beroende på fuktproduktionens omfattning och hur ofta luften byts ut inne i en byggnad, resulterar det i ett fukttillskott som adderas till den ånghalt som tilluften har. Efter en undersökning gjord av Boverket, uppgick fukttillskottet i medeltal till 1,77 gram/m<sup>3</sup> för småhus och till 1,22 gram/m<sup>3</sup> för flerbostadshus. Differensen mellan ånghalten i inneluften och uteluften ger upphov till diffusion av vattenånga genom ytterväggen (Arfvidsson, Harderup, Samuelson, 2017). Allmänt ligger fukttillskottet för bostäder normalt inom 2-4 gram/m<sup>3</sup> (Sandin, 2010). Vid utvärdering av en byggnads fuktsäkerhet nyttjas vanligtvis ett fukttillskott på 4 gram/m<sup>3</sup> enligt fuktklass 2 som anges i standard EN-ISO 13788:2012 (Arfvidsson, Harderup, Samuelson, 2017).

För att kunna bedöma om den relativa fuktigheten är för hög i ett givet tvärsnitt i väggen måste temperaturen, ånghalten och mätnadsånghalten för den specifika temperaturen vara känd. Mätnadsånghalten definieras approximativt enligt nedanstående funktion:

För temperatur mellan -50 °C och -0,1 °C:

$$v_s = 330,67796 \cdot \exp\left(-\frac{(108,10749-T)^2}{2,37,230718^2}\right) \quad (\text{g/m}^3)$$

För temperatur mellan 0 °C och 100 °C:

$$\begin{aligned} v_s = & 4,8559296 + 0,33229003 \cdot T + \\ & + 0,010508257 \cdot T^2 + \\ & + 0,00015035817 \cdot T^3 + \\ & + 0,0000021798571 \cdot T^4 + \\ & + 0,000000008613191 \cdot T^5 \end{aligned} \quad (\text{g/m}^3)$$

$$T = \text{temperaturen} \quad (^\circ\text{C})$$

(Arfvidsson, Harderup, Samuelson, 2017)

## 2.6 Fukttransport

Fukttransport i material sker både i vätskefas (oftast genom kapillärsugning, dock allmänt i låg utsträckning om det inte finns tillgång på fritt vatten) och i ångfas, vilket då i huvudsak sker genom diffusion eller konvektion. Vanligen är fukttransport genom diffusion dominerande i ångfas, men vid tryckskillnader och otätheter i materialet kan fukttransport genom konvektion dominera (Sandin, 2010).

Kompositmaterialet antas vara tätt och luften i hålen/porerna vara relativt stillastående. Därmed presenteras den teoretiska modellen för fukttransport genom materialet enbart utifrån fuktdiffusion.

Ångtransporten genom ett poröst material ges enligt:

$$g = -\delta \cdot \frac{dv}{dx} \quad (\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}))$$

$$\delta = \text{ånggenomsläpplighetskoefficienten} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$$\frac{dv}{dx} = \text{ånghaltsgradient} \quad (\text{kg}/\text{m}^4)$$

(Sandin, 2010)

Vid stationära förhållanden genom en homogen ytterväggskonstruktion är ånghaltskurvan rätlinjig. Ångtransporten kan då tecknas enligt följande:

$$g = -\delta \cdot \frac{V_i - V_u}{d} \quad (\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}))$$

$$\delta = \text{ånggenomsläpplighetskoefficienten} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$$v_i = \text{ånghalt inomhus} \quad (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$v_u = \text{ånghalt utomhus} \quad (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$d = \text{lagertjocklek} \quad (\text{m})$$

(Sandin, 2010)

## 2.7 Nödvändig bärförmåga

Den linjelast som verkar på en bärande yttervägg påverkas både av den utbredda lasten per våningsplan, antalet våningsplan, samt ytterväggens influensbredd. Beroende på en given byggnadsutformning och dess totala yta förväntas den verkande linjelasten variera stort. För mer typiska byggnadsformer förväntas en mer likriktning av linjelast existera utifrån antalet våningsplan. Några riktlinjer kring förväntad linjelast på bärande ytterväggar i typiska kontorshus/lägenhetshus beroende på antalet våningsplan eller byggnadshöjd har ej identifierats vid genomförd litteraturstudie. Efter samtal med Zaréh Setragian<sup>2</sup>, konstruktör på NCC, framgick det att en linjelast på 40-50 kN/m per våningsplan kan förväntas anbringas. För byggnader upp till 5 våningsplan medför detta en förväntad linjelast på cirka 200-250 kN/m.

<sup>2</sup>Zaréh Setragian, konstruktör på NCC (tillförlitlig källa enligt handledare), privat mailkorrespondens.

För givna dimensioner på KL-träväggar erhålls istället vid en preliminär överslagsdimensionering, en uppskattad maximalt verkande linjelast beroende på höjden av väggpartiet (Svenskt Trä, 2017).

Ett KL-träelement är alltid uppbyggt av parallellt sammanfogade brädor, där varje lager är lagt korsvis och där det totala antalet lager alltid är udda. Då bärförmågan och E-modulen endast uppgår till cirka 10% vinkelrätt fiberriktningen i jämförelse med bärförmågan och E-modulen parallellt med fiberriktningen (enligt avsnitt 2.2.2), kan bidraget till den totala bärförmågan från lagerna som bär last vinkelrätt fiberriktningen försummas beroende på vald beräkningsmodell (Svenskt Trä, 2017). KL-träelement orienteras därmed i den riktning där bärförmågan är som störst. Typiska KL-träelement har cirka 60-70% av den totala tjockleken orienterad med fibrerna i den bärande riktningen och därmed 30-40% av tjockleken orienterad med fiberriktningen vinkelrät. Detta görs för att både öka formstabiliteten (styvheten) på skivorna samt för att minska de fuktbetingade rörelserna (Svenskt Trä, 2017).

Någon djupare analys av kompositmaterialets bärförmåga och dess praktiska användningsområde kommer ej genomföras. För preliminär bedömning av tillräckligt god bärförmåga för flervåningshus görs bedömningen att bärförmågan bör kunna motsvara en KL-trävägg med en tjocklek på 120 mm, vilken typiskt är uppbyggd av 3 stycken 40 mm tjocka lager, vilket motsvarar en bärförmåga för en cirka 80 mm tjock vägg där fiberriktningen är orienterad vertikalt (i linjelastens riktning). För väggelement med en höjd på cirka 3 meter kan en linjelast på cirka 300 kN/m påföras (Svenskt Trä, 2017), vilket kan förväntas motsvara en byggnad med cirka 5 våningsplan.

## 2.8 HEAT3

HEAT3 är ett beräkningsprogram avsett för beräkning av tredimensionell värmetransport genom en vald geometrisk form, vilken kan sättas samman av ett stort antal olika material. Programmet hanterar både stationära och icke stationära förhållanden, där värmeflödet beräknas med hjälp av framåtdifferensmetoden. Exempelvis är programmet lämpat vid studier av värmeflöde genom köldbryggor och hörn/anslutningar. Initialt ritas en CAD-modell av den tilltänkta geometrin där ett numeriskt nät ansätts. Vid en högre täthet på det numeriska nätet erhålls en högre noggrannhet, vilket samtidigt leder till en mer komplex modell och som därmed tar längre tid att beräkna. Vid beräkning ansätts randvillkor och övergångsmotstånd. Resultatet av värmeflödet presenteras i grafer samt kan ses i den uppbyggda geometrin där även temperaturen och värmeflödet vid en viss tredimensionell punkt kan studeras. Modellen är begränsad till att ha en yttre geometri som är parallell med koordinataxlarna (Blomberg, 2001). Modellen är även begränsad till att endast omfatta värmetransport genom konduktion. Värmetransport genom strålning och konvektion betraktas således ej. Vidare begränsas modellen till att omfatta högst 1000 enskilda element (Buildingphysics, 2021).

## 2.9 Praktisk tillverkning

Kompositmaterialet ska vara uppbyggd av träskivor med en utborrade hålstruktur där den utborrade hålstrukturen ska omslutas av trä (exempelvis tunna massiva träskivor) genom pålimning.

Vid tillverkning av exempelvis plywood och fanerträ nyttjas faner, vanligen 2-4 mm tunna skikt av massivträ som producerats genom avskalning från roterande stockar (Svenskt Trä, 2019). Efter en enklare undersökning av de tjocklekar på fanerträ som tillhandahålls av leverantörer på den svenska marknaden framgår det att tjockleken kan vara så liten som cirka 0,55 mm. Dock förekommer det främst fanerträ av ädelträ i denna tjocklek, vilket motiveras av att det exempelvis främst används som ytskikt vid möbeltillverkning. Träfaner tjockare än cirka 4 mm har ej kunnat identifieras. Om kompositmaterialet byggs upp av skivor tjockare än 4 mm, antas skivorna istället bestå av hyvlat hoplimmat virke.

Vid tillverkning av hålstrukturen kommer hål borrar ut i träskivor/träfaner. Utan djupare kunskap har bedömning gjorts att det praktiska minsta kvarvarande avståndet mellan hålen i den utborrade träskivan bör uppgå till minst 3 mm. Detta väljs både för att skivan inte ska riskera att knäckas och ha för låg styvhet vid hantering, samt för att toleranserna vid måttsättning vid tillverkning, antas uppgå till  $\pm 1$  mm och viss marginal mellan hålen måste kvarstå för att respektive hål ska kunna vara slutet.

De tunna massiva skivorna som kan limmas på för att göra hålstrukturen sluten antas behöva ha en tjocklek på minst 2,0 mm för att kunna hanteras i fabrik utan att riskera att knäckas. Om hålstrukturen inte görs genomgående, vilken då behöver omslutas med en pålimmad skiva, kan hålstrukturen istället erhållas genom att göra försänkta hål i skivor vilka därefter limmas ihopa. Hålen bedöms inte kunna göras djupare i träskivan än att cirka 2,0 mm tjocklek kvarstår utan att risk föreligger att något hål blir genomgående vid tillverkning.

Dessa antaganden är inte verifierade med personer som vanligen hanterar tillverkning av större element i trä, utan utgår helt från godtycklig personlig bedömning. Därmed kan vidare analys vara nödvändig för att fastslå rimligheten i kravställningen.



### 3 Optimering av hålstruktur

I kapitlet föreslås en optimal utformning av kompositmaterialets strukturella utformning, samt hur denna utformning påverkar bärförmågan, isoleringsförmågan och materialets fuktsäkerhet. Denna optimering med dess respektive fördelar och nackdelar presenteras i det avslutande delkapitlet 3.5, vilket resulterar i en föreslagen optimal utformning på kompositmaterialet. Kompositmaterialet modelleras senare i beräkningsprogrammet HEAT3 och jämförs med dagens standard på bärförmåga, isoleringsförmåga och fuktsäkerhet för ytterväggskonstruktioner.

Kompositmaterialet är uppbyggd av en sluten hålstruktur, vilket ger upphov till en materialstruktur som kan idealiseras till två olika växelvisa materiallager. Tjockleken på dessa två olika lager påverkar bland annat bärförmågan och värmeledningsförmågan och bestäms därför först vid optimeringen av kompositmaterialet i kapitel 3.5. Figurerna i detta kapitel är därför inte skalenliga utan endast illustrativa.

#### 3.1 Uppbyggnad av kompositmaterialet och begränsning av hålstrukturens utformning

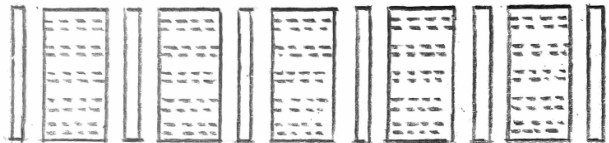
Vid utvärdering av optimal uppbyggnad/sammansättning av kompositmaterialet samt optimalt mönster på hålstrukturen, jämförs olika förslag med varandra, där det mest fördelaktiga förslaget ligger till grund för den slutgiltiga utformningen av kompositmaterialet.

##### 3.1.1 Principiell tillverkning av kompositmaterialet

Vid tillverkning av kompositmaterialet har två olika principiella utformningar på uppbyggnaden identifierats, vilka båda resulterar i samma slutprodukt.

##### Alternativ 1 – separata skikt med genomgående hålstruktur

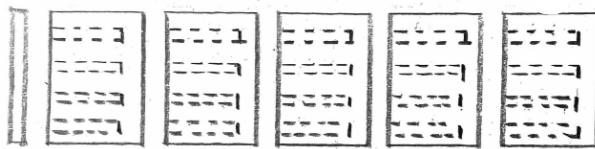
Uppbyggnaden av materialet utgår ifrån att vartannat lager har en genomgående utborrad hålstruktur vilken omsluts av massiva skivor som limmas på hålstrukturen, se figur 3. På så sätt kan ett flertal skikt staplas ovanpå varandra vid tillverkning där alla lager borrar ut genomgående samtidigt. Därefter separeras lagerna (skivorna) och massiva tunna träskivor förs in emellan och limmas på. Vid nyttjandet av exempelvis 5 lager med utborrade hål krävs totalt 11 skikt vilket medför 10 lager med lim, vilket även framgår av figur 3.



Figur 3. Idealiserat förslag på uppbyggnadsmodell av kompositmaterialet där modellen har genomgående hål i vartannat lager vilka omsluts av massiva skivor.

## Alternativ 2 – försänkta hål i skivor

Uppbyggnadsmodellen utgår till skillnad från ovanstående alternativ istället av tjockare skivor där hålen försänks till ett visst djup och därmed inte borras genomgående, se figur 4. Därmed måste utborrning ske ett lager i taget. Respektive skiva med



Figur 4. Föreslag på uppbyggnadsmodell av kompositmaterialet där modellen har försänkta hål och därmed indirekt skapar den mellanliggande skivan.

försänkta hål bedöms vara mer formstabil än föregående alternativ vid tillverkning, detta då ett lager med hålstruktur och den tilltänkta mellanskiljande skivan är integrerade med varandra. Denna uppbyggnadsmodell medför att för motsvarande 5 lager med utborrade hål, behövs det endast 6 skivor och därmed endast 5 lager lim, se åter figur 4. Därmed halveras både mängden lim och antalet skivor som hanteras vid tillverkning. Vid tillverkning kan dessutom en träskiva limmas på den underliggande skivan vilken redan har en utborrad hålstruktur och därefter erhålla sina försänkta hål. Därmed rationaliseras tillverkningsprocessen och vägg tjockleken byggs upp ett lager i taget i fabriken likt materialuppbyggnaden vid CAD/CAM-tillverkning.

Detta uppbyggnadsalternativ med nyttjandet av försänkta hål i skivor, vilka limmas ihopa, bedöms vara mest fördelaktigt både vid hänsyn till tillverkning samt då det medför ett halverat behov av lim. Därmed väljs detta alternativ vid tillverkning.

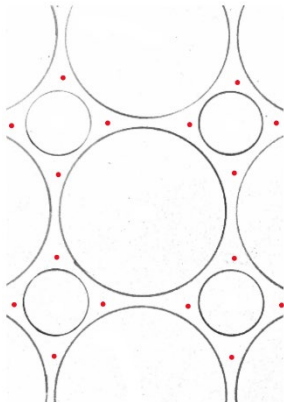
### 3.1.2 Jämförelse mellan två olika hålstrukturer

För utformningen på själva hålstrukturen utvärderas två förslag vilka presenteras sida vid sida för att enklare jämföra utformningen av hålstrukturen samt porositeten vid en viss håldiameter. Hålstrukturen är begränsad enligt avsnitt 2.9 till att minst ha 3,0 mm avstånd mellan de utborrade hålen, vilket är det minsta avstånd som nyttjas för att maximera porositeten i hålstrukturen.

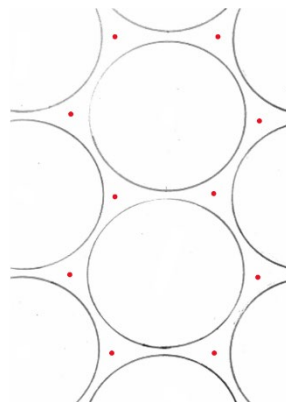
Det ena modellförslaget har större hål utborrade och placerade i linje, både horisontellt och vertikalt, samt utborrade mindre hål för att öka porositeten, se figur 5 på nästa sida. Vid en hålstruktur med största håldiameter över 60 mm, bedöms ytterligare nya hål kunna infogas i hålstrukturen för ökad porositet, se röd markering i figur 5 på nästa sida.

Det andra modellförslaget består av utborrade hål där alla hål har samma storlek och är placerade i linje i ena riktningen, men där raderna är förskjutna för en effektivare hålplacering som ökar porositeten, se figur 6 på nästa sida. Vid en hålstruktur med största håldiameter över 55 mm, kan nya hål infogas i hålstrukturen för ökad porositet, se röd markering i figur 6 på nästa sida.





Figur 5. Hålstruktur med större hål placerade i linje och mindre utborrade hål för att öka porositeten. Röda punkter visar var ytterligare hål kan infogas vid tillräckligt stor hålstruktur.



Figur 6. Hålstruktur med lika stora hål där hålen är placerade med förskjutning för att öka porositeten. Röda punkter visar var ytterligare hål kan infogas vid tillräckligt stor hålstruktur.

Allmänt söks en så hög tvärsnittsporositet som möjligt på hålstrukturen för att erhålla lägre värmeledningsförmåga i kompositmaterialet. I tabell 1 presenteras porositeten för de två förslagen sida vid sida, vid olika diameter på de primära stora hålen. Hålstruktur 1 motsvarar det första alternativet som presenterades i figur 5 och hålstruktur 2 motsvarar det andra alternativet som presenterades i figur 6. Båda alternativens redovisade porositet är exklusive eventuella kompletterande hål i hålstrukturen vid de röda markeringarna i figurerna 5 och 6.

Tabell 1. Porositet vid en viss diameter på hålen för respektive presenterat alternativ på hålstrukturen.

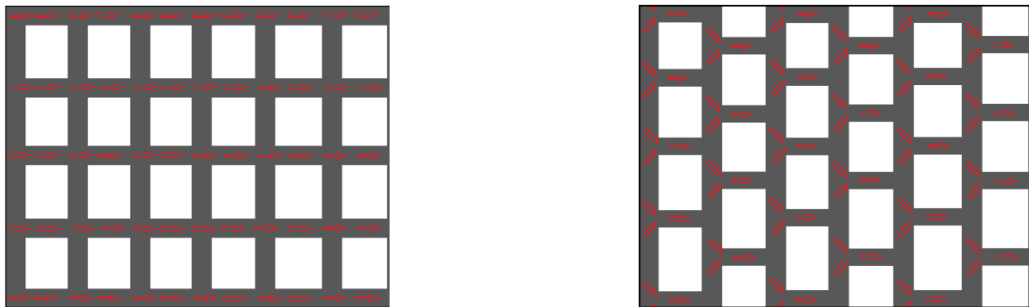
Diameter på stort hål (mm)	Hålstruktur 1 (%)	Hålstruktur 2 (%)
10	49,1	53,7
20	65,7	68,6
40	77,3	78,5
60	81,8	82,3
100	85,7	85,5

Val av största diameter på hålen i hålstrukturen begränsas till 60 mm. Detta görs delvis för att större dimensioner på kvistborrar (borr för att göra platta cirkulära försänkta hål) ej identifierats på den svenska marknaden, samt för att bedömning görs att hålstrukturens förmåga att staga de tunna avskiljande väggarna mot knäckning under belastning av linjelast, ej kommer vara tillräcklig vid en större håldiameter än 60 mm.

Då största håldiameter begränsas till 60 mm i hålstrukturen, väljs därför att nyttja det andra förslaget på val av hålstruktur vilken framgår i figur 6, både för att den hålstrukturen medför en högre porositet, samt för att den är uppbyggd av färre hål, vilket bedöms vara fördelaktigt vid tillverkningsprocessen. Därmed avses inga kompletterande hål införas mellan den primära hålstrukturen vid maximal håldiameter, detta då endast en marginell ökning av porositeten sker samtidigt som antalet borrhål närmast dubblas.

### 3.1.3 Minimering av värmeledning genom den sammanhängande strukturen av trämaterial

Om hålstrukturen byggs upp med de utborrade hålen placerade efter varandra i en horisontell linje, kommer det medföra att det kvarvarande trämaterialiet mellan de utborrade hålen, även kommer ligga i en horisontell linje och agera parallella köldbryggor, se det vänstra exemplet i figur 7. Denna effekt kan delvis reduceras genom att respektive lager av hålstrukturen delvis förskjuts så att det inte kvarstår något sammanhängande trämaterial i en horisontell linje, se det högra exemplet i figur 7. På så sätt kommer värmetransporten ske över en längre sträcka genom kompositmaterialiet, vilket i sin tur leder till en lägre värmetransport.

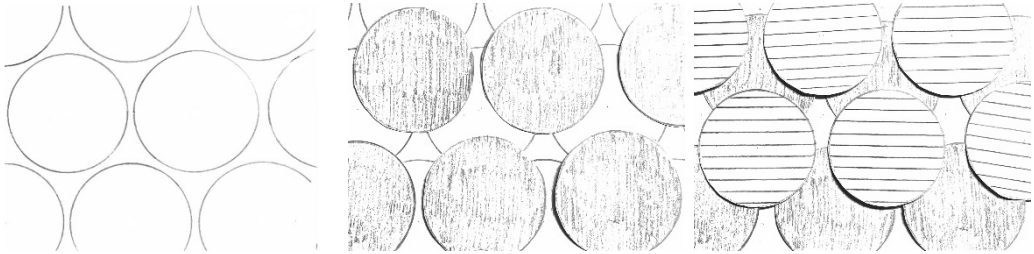


Figur 7. Två alternativa tvärsnitt av kompositmaterialiet beroende på om hålen är placerade horisontellt i linje (vänster figur) eller om hålen är förskjutna för att minska köldbryggorna (höger figur).

För att reducera de horisontella köldbryggorna har två alternativa lösningar tagits fram och jämförs både utifrån tillverkning och förväntad effekt på minskad värmeledningsförmåga genom kompositmaterialiets sammanhängande struktur.

#### Alternativ 1 – tre förskjutningar av lagerföljden

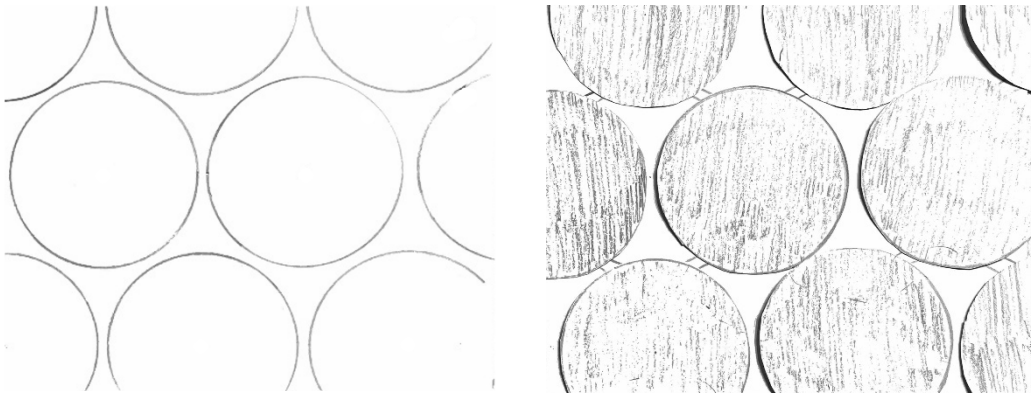
Förslaget på hur de horisontella köldbryggorna ska reduceras presenteras i figur 8 på nästa sida och resulterar i att det inte kvarstår några horisontella genomgående köldbryggor. Detta åstadkoms genom att påföljande lager förskjuts vertikalt, lite mer än en hålradi så att hålen placeras centriskt över föregående lagers ena rad av köldbryggor. Det tredje lagret förskjuts ytterligare vertikalt cirka en hålradi och täcker därmed de kvarvarande köldbryggorna. Lösningen resulterar således i att det krävs 3 lager innan de horisontellt sammanhängande köldbryggorna helt är brutna. Två påföljande lager har dock alltid sammanhängande köldbryggor som motsvarar cirka 40% av köldbryggorna som existerar om alla hålen hade placerats i horisontell linje efter varandra enligt det vänstra fallet i figur 7 ovan.



Figur 8. Alternativ 1 bryter fullständigt de horisontellt sammanhängande köldbryggorna genom att kombinera tre olika påföljande lager. De tre lagerna illustreras genom att det första består av vita hål (vänster figur), det andra lagret är grått och läggs över det första lagret i den mellersta figuren. Det tredje lagret illustreras med randiga hål och läggs överst i den högra figuren.

### Alternativ 2 – två förskjutningar av lagerföljden

En alternativ lösning är att endast två lager ska behövas för att reducera de horisontella köldbryggorna. Detta alternativ åstadkommer inte en fullständig brytning av de horisontellt sammanhängande köldbryggorna, utan cirka 5% av den horisontellt sammanhängande strukturen kvarstår, vilket framgår i figur 9. För att bryta cirka 95% av de horisontella köldbryggorna förskjuts varannat lager horisontellt med en hålradi. Även om lösningen inte tillförlitligt bryter de horisontellt sammanhängande köldbryggorna så bedöms skillnaden mellan alternativen i värmeledning inte avvika signifikant från varandra.



Figur 9. Alternativ 2 bryter de horisontellt sammanhängande köldbryggorna med cirka 95%, vilket åstadkoms med två lager. Det underliggande lagret illustreras med de vita hålen och det andra lagret illustreras med de gråa hålen och placeras överst i den högra figuren.

Detta alternativ bedöms vara det minst komplicerade vid tillverkning då det endast består av två lager. Då den köldbryggebrytande förmågan inte antas ha en signifikant lägre effekt, väljs detta alternativ vid vidare utvärdering av kompositmaterialets värmeledningsförmåga. Hur stor denna effekt är på den totala värmeledningsförmågan för kompositmaterialet och om den ökade komplexiteten vid sammansättning av materialet bedöms vara befogad för att erhålla en lägre värmeledningsförmåga, utvärderas i ett senare skede genom modellering i datorprogrammet HEAT3.

## 3.2 Potentiell bärförmåga i den tilltänkta hålstrukturen

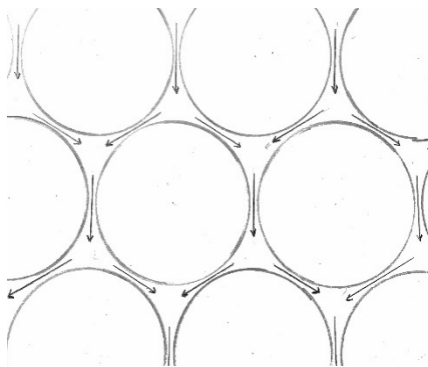
Enligt avsnitt 2.6 ska kompositmateriallets bärförmåga vid den antagna väggjockleken på 400 mm minst motsvara en 80 mm tjock massiv trävägg (120 mm KL-trä) med vertikalt orienterad fiberriktning, detta för att kompositmaterialet ska kunna antas ha tillräcklig hög bärförmåga för att vara bärande i flervåningshus. Kompositmateriallets bärförmåga utgörs både av själva hålstrukturens lastbärande egenskap samt av den indirekt inbyggda vertikala skivan som bildas mellan respektive lager i hålstrukturen, vilken ska vara minst 2,0 mm tjock enligt avsnitt 2.9. Det minsta avståndet mellan de utborrade hålen ska dessutom uppgå till 3,0 mm.

Bärförmågan i själva hålstrukturen utvärderas först utan hänsyn till det lastbärande bidraget som uppkommer från de indirekta skivorna som avskiljer hålen från varandra. Om bärförmågan bedöms vara otillräcklig i hålstrukturen, utvärderas behovet av bärförmåga genom de avskiljande skivorna (den kvarvarande skivtjockleken efter att de försänkta hålen har borrats ut, se figur 4 på sidan 20 vid behov av förtydligande).

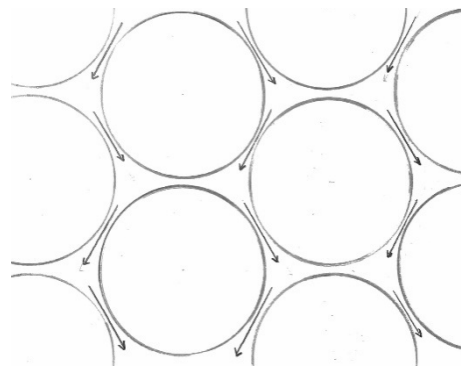
### 3.2.1 Bärförmåga i hålstrukturen

Två alternativa orienteringar på hålstrukturen presenteras sida vid sida för att enklare kunna jämföras.

Hålstrukturen kan orienteras på olika sätt vilket medför två primära huvudriktningar för lastens verkan i kompositmaterialet, där hålen antingen är staplade horisontellt i linje, vilket framgår i figur 10, eller där hålen är staplade vertikalt i linje, vilket framgår i figur 11. Beräkningsfall då diametern uppgår till 60 mm redovisas för båda fallen, där avståndet mellan hålen ansätts till minimivärdet 3,0 mm.



Figur 10. Hålstruktur med horisontellt staplade hål i linje. Lastens verkan genom materialet framgår då materialet utsätts för vertikal linjelast.



Figur 11. Hålstruktur med vertikalt staplade hål i linje. Lastens verkan genom materialet framgår då materialet utsätts för vertikal linjelast.

Då trä är ett anisotrop material med varierande bärförmåga i olika huvudriktningar enligt avsnitt 2.2.2, kommer bärförmågan variera beroende på hur hålstrukturen är orienterad relativt till fiberriktningen. För båda fallen ska fiberriktningen vara vertikalt orienterad (i det plan linjelasten verkar) för högsta möjliga bärförmåga.

För fallet med horisontellt staplade hål i linje enligt figur 10 på föregående sida, begränsas bärförmågan i hålstrukturen där materialet mellan hålen är som smalast vilket inträffar där pilarna är utritade i figuren. Träets lastbärande förmåga mellan hålen i vertikal linje (där pilarna är vertikalt orienterade) uppgår till motsvarande 3 mm per 63 mm (centrumavstånd mellan hålen) i horisontell utbredningsriktning, vilket motsvarar en lastbärande förmåga på 4,8% per breddmeter relativt till en massiv trävägg med vertikal fiberriktning.

Där avståndet mellan hålen även uppgår till 3 mm men där pilarna är vinklade med cirka 60 grader från vertikalplanet, bärs lasten över dubbel influensbredd (6 mm) från respektive vertikala last som endast verkar över 3 mm. På grund av träets olika bärförmåga i olika huvudriktningar uppgår träets bärförmåga vid vinkeln 60° från fiberriktningen till endast 15% av bärförmågan parallellt med fiberriktningen enligt avsnitt 2.2.2. Därmed uppgår bärförmågan där de vinklade pilarna är utritade endast till 31% av bärförmågan relativt tvärsnittet där lasten är parallell med fiberriktningen (där pilarna är vertikala). Den begränsande bärförmågan i hålstrukturen uppgår därmed till endast 1,5% relativt till bärförmågan för massivt trä med en vertikal fiberriktning.

För fallet med motsvarande vertikalt staplade hål i linje enligt figur 11 på föregående sida, uppgår den begränsande lastbärande influensbredden till 3 mm per 54,6 mm i horisontell utbredning, vilket motsvarar 5,5% per meter relativt till en massiv trävägg med vertikal fiberriktning. Lasten verkar i en riktning 30° från fiberriktningen vilket medför att bärförmågan endast uppgår till 35% av bärförmågan parallellt med fiberriktningen enligt avsnitt 2.2.2. Därmed uppgår bärförmågan för hålstrukturen till 1,9% av motsvarande bärförmåga för massivt trä med en vertikal fiberriktning.

Då hålstrukturen med vertikalt staplade hål har en högre bärförmåga, väljs den orienteringen på strukturen att nyttjas vid vidare analys.

För fallet med en hålstorlek på 60 mm i diameter och ett avstånd mellan hålen på 3 mm uppgår bärförmågan enligt tidigare till endast 1,9% relativt till massivt trä. Därmed motsvarar bärförmågan av en 400 mm tjock vägg med vald hålstruktur endast en 7,7 mm tjock massiv träskiva med vertikalt orienterad fiberriktning, vilket vida understiger kravet på en bärförmåga på motsvarande 80 mm enligt avsnitt 2.7. För att villkoret med en motsvarande bärförmåga likt en 80 mm tjock trävägg ska uppfyllas, måste antingen avståndet mellan hålen ökas signifikant, alternativt håldiametern minskas. Vid ökat avstånd mellan hålen medför det ett minsta avstånd på 70 mm för att uppfylla bärförmågan, vilket medför en porositet på 19 %. Vid istället ett bibehållet avstånd på 3 mm mellan hålen, måste håldiametern reduceras till att vara mindre än 3 mm, vilket medför en porositet på 22% på hålstrukturen.

Båda alternativa lösningarna för att erhålla en bärande hålstruktur bedöms reducera porositeten till den grad att den isolerande effekten från hålstrukturen är så liten att alternativen inte utgör en acceptabel lösning för att erhålla tillräckligt hög bärförmåga. Vid en hålstorlek på 60 mm i diameter bedöms bärförmågan i hålstrukturen vara närmast försumbar då den utgör mindre än 10% av minimikravet på bärförmågan.

### 3.2.2 Bärförmåga genom de vertikala skivorna

Då bärförmågan genom hålstrukturen bedöms närmast vara försumbar, undersöks alternativet att kompositmateriallets bärande förmåga endast utgörs av de indirekta massiva skivorna i kompositmateriallet (kvarvarande tjocklek efter de försänkta hålen), vilkas funktion är att göra hålstrukturen sluten och ge stabilitet till träskivorna. Den totala tjockleken på de indirekta skivorna ska därmed uppgå till minst 80 mm. Den utborrade hålstrukturen antas därmed endast vara stabiliserande för skivorna vilka bär lasten.

För att verifiera en tillräckligt hög bärförmåga ansätts en funktion med följande villkor: Vid  $n$  lager med en hålstruktur ( $hs$ ) ska det finnas motsvarande  $n+1$  lager av massiva träskivor ( $m-ts$ ) för att kunna omsluta de utborrade hålen. Den totala vägg tjockleken vid användande av kompositmateriallet ska enligt avsnitt 1.5 motsvara 400 mm. De motsvarande massiva träskivorna måste vara minst 2,0 mm tjocka enligt avsnitt 2.9 och den totala tjockleken på skivorna måste uppgå till minst 80 mm.

$$n \cdot d_{hs} + (n + 1)_{m-ts} \cdot d_{m-ts} = 400 \text{ mm, där:}$$

$$(n + 1)_{m-ts} \cdot d_{m-ts} \geq 80 \text{ mm}$$

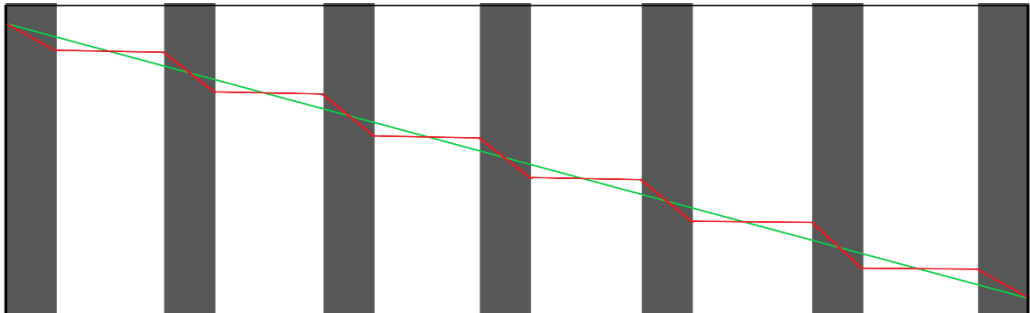
$$d_{m-ts} \geq 2,0 \text{ mm}$$

Villkoren för funktionen ska vara uppfyllda vid optimering av lagertjocklekarna då den lägsta möjliga värmeledningsförmågan ska tas fram, vilket presenteras i kapitel 3.4.

### 3.3 Fuktrelaterade risker och fukttransport genom kompositmaterialet

Kompositmaterialet är uppbyggt av en sluten hålstruktur där hålen avgränsas av mellanliggande inbyggda träskivor. Enligt avsnitt 2.2.4 uppgår fuktdiffusionen genom luft till 12-70 gånger större än för massivt trä vilket medför att om träkompositen har en hög porositet, kommer fuktdiffusionen genom materialet öka avsevärt.

Då kompositmaterialet kommer vara uppbyggt av ett stort antal tunna lager, där massivt trä och stillastående luft i hålstrukturen är placerade växelvis efter varandra, bör inte kompositmaterialet betraktas som homogent vid modellering av ånghaltsfördelningen i ytterväggen för ett givet djup (d.v.s. vid analys av mikrostruktur). Den stora skillnaden i ånggenomsläpplighet mellan trä och luft resulterar i en ånghaltsfördelning som kan liknas vid en trappformad diskret funktion, där ånghaltsförändringen primärt sker över träskivorna och ånghalten närmast är konstant i hålstrukturen (vilken kan betraktas som en luftspalt), oavsett ett hålstrukturslagers specifika djup, se röd funktionslinje i figur 12.



Figur 12. Illustration av ånghaltsfördelning i den förenklade materialuppbyggnaden bestående av vartannat lager massivt trä (mörkgrå skikten) och vartannat lager stillastående luft. Stationära förhållanden råder där ånghalten är högre på den vänstra sidan av väggen än på den högra sidan. Den röda diskreta funktionslinjen visar på den egentliga ånghaltsfördelningen genom materialet, medan den gröna linjen visar hur ånghaltsfördelningen kan förenklat antas variera genom materialet på en makronivå.

För ytterväggar uppbyggda av fler än 10 lager med hålstruktur, bedöms ånghaltsfördelningen kunna approximeras med en linjär fördelning vid en analys på makronivå (likt ånghaltsfördelningen i ett homogent material), vilket framgår av den gröna linjen i figur 12. Denna approximation får en högre noggrannhet desto fler lager kompositmaterialet är uppbyggt av.

För att bedöma de fuktrelaterade riskerna för kompositmaterialet utvärderas både det generella ångmotståndet, där ett högt ångmotstånd antas resultera i att kortvariga höga fuktbelastningar inte hinner påverka fuktillståndet i kompositmaterialet, samt två specifika ”extremfall” vid stationära förhållande, vilket görs för att avgöra om kompositmaterialet förväntas få en för hög relativ fuktighet efter en lång exponeringstid.

### 3.3.1 Ångmotstånd för kompositmaterialiet

För att bedöma ångmotståndet i kompositmaterialiet har en förenkling gjorts ”på säkra sidan” där hålstrukturen antas ha så hög porositet att hela lagret kan antas ha samma ånggenomsläpplighetskoefficient som för enbart luft. Därmed försummas det högre ångmotståndet från trämaterialiet mellan hålen i hålstrukturen. Kompositmaterialiet betraktas därigenom bestå av vartannat lager stillastående luft och vartannat lager av tunna massiva träskivor. Enligt avsnitt 2.2.4 kan 70 mm massivt trä betraktas som en ångbroms och därmed förhindra behovet av en ångspärr i konstruktionen. Vid preliminär bedömning om en ångspärr är nödvändig, görs bedömningen att motsvarande ångmotstånd måste motsvaras redan vid halva djupet (200 mm) av vägg tjockleken. Detta krav väljs för att motsvarande ångmotstånd inte ska motsvara en ångspärr/ångbroms som placeras för långt ut i konstruktionen där temperaturen är lägre och därmed öka risken för att en för hög relativ fuktighet uppstår på insidan av ångspärren/ångbromsen.

Vid bedömning av kompositmaterialiets ångmotsstånd görs ytterligare en förenkling ”på säkra sidan” genom att anta att limskikten inte heller bidrar till ett signifikant ångmotstånd. Därmed kan kompositmaterialiets ångmotstånd indirekt uppskattas utifrån ånggenomsläpplighetskoefficienten för massivt trä, vilken divideras med tjockleksandelen som utgörs av massivt trä i kompositmaterialiet. Kompositmaterialiets ånggenomsläpplighetskoefficient erhålls därmed enligt följande formel:

$$\delta_{komposit} = \delta_{trä} / \mu_{andel\ trä} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$$\mu_{andel\ trä} = \text{tjockleksandel bestående av trä (m)}$$

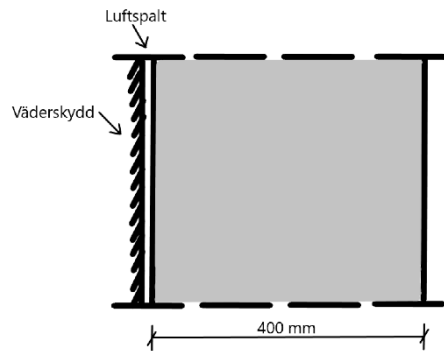
Enligt avsnitt 2.2.4 uppgår ånggenomsläpplighetskoefficienten till  $0,3-2,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  vinkelrätt fiberriktningen för massiv gran. Då ånggenomsläppligheten är cirka 10-20 gånger större i fiberriktningen, ska fiberriktningen på kompositmaterialiet orienteras i den tilltänkta väggens eget plan för att få en så låg ånggenomsläpplighet som möjligt. Om fiberriktningen orienteras vertikalt uppnås maximal bärförmåga mot linjelast enligt föregående avsnitt, utan att det resulterar i en högre ånggenomsläpplighet, varför denna riktning väljs på kompositmaterialiet.

För att undvika ett eventuellt behov av en ångspärr i den tilltänkta ytterväggen bestående enbart av kompositmaterialiet, måste ångmotståndet vid en tjocklek på 200 mm motsvara 70 mm massivt trä. Därmed måste tjockleksandelen trä uppgå till minst 35%. Detta medför att djupet på hålstrukturen exempelvis inte får överstiga 3,7 mm vid en tjocklek på 2,0 mm för den avskiljande träskivan, alternativt ett håldjup på 5,6 mm vid en tjocklek på 3,0 mm för den avskiljande träskivan. Vid en lägre tjockleksandel som utgörs av trä kan en ångspärr/ångbroms behövas för att dämpa amplituderna i förändring av fukthalt i kompositmaterialiet, vilket då gör att kompositmaterialiet inte tillfullo kan betraktas som ett kompositmaterial som kan användas i ytterväggarna utan kompletterande material.



### 3.3.2 Fallstudier av relativ fuktighet vid stationära förhållanden

Vid makroanalys av kompositmaterialet då det används till ytterväggskonstruktion, kan ytterväggen betraktas vara uppbyggt av ett homogent material och därmed ha en linjär ånghaltsfördelning. Ytterväggskonstruktioner av kompositmaterialet ska dock vara väderskyddade med hjälp av en fasadkonstruktion som resulterar i en luftspalt. Detta leder till ett något tjockare väggelement i praktiken, men för analys av väggelement exkluderas denna ovissa ytterligare tjocklek, se figur 13. Enligt avsnitt 2.5 bör fuktillskottet ansättas till 4 gram/m<sup>3</sup> vid utvärdering av hur lämpad ytterväggen är utifrån ett fuktsäkerhetsperspektiv.



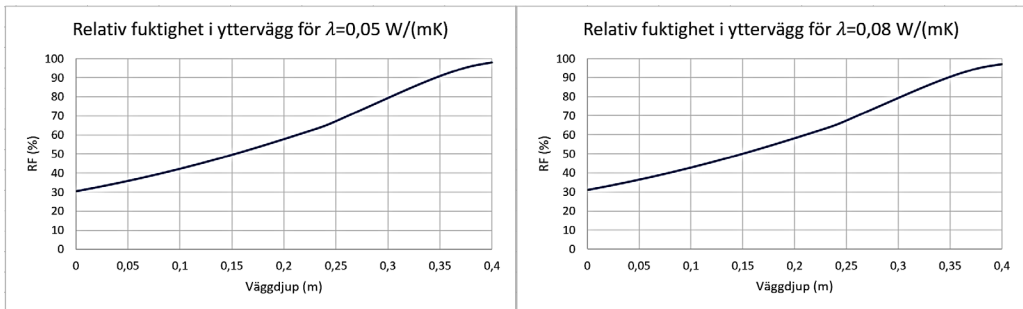
Figur 13. Ytterväggskonstruktion av kompositmaterialet då konstruktionen är väderskyddad.

Följande två ”extremfall” studeras och bedöms påvisa om det föreligger risk för kondens i materialet, alternativt om den relativa fuktigheten blir mycket hög. Väggtjockeken för kompositmaterialet ansätts åter till 400 mm enligt avsnitt 1.5 och antas ha ett invändigt värmeövergångsmotstånd på 0,13 (m<sup>2</sup>K)/W och ett utvändigt värmeövergångsmotstånd på 0,04 (m<sup>2</sup>K)/W enligt avsnitt 2.4. Då värmeledningsförmågan inte är känd för kompositmaterialet analyseras fuktillståndet vid ett  $\lambda$ -värde på 0,05 W/(m·K) respektive 0,08 W/(m·K), vilket antas motsvara ett förväntat intervall på det slutgiltiga  $\lambda$ -värdet för kompositmaterialet.

#### Fall 1

Uteluften antas ha en relativ fuktighet på 100% vid en temperatur på -15 °C och inneluften antas ha en temperatur på +21 °C och ett fuktillskott på 4 g/m<sup>3</sup>, vilket medför en relativ fuktighet på 29% inomhus. Därmed uppgår ånghalten utomhus till 1,39 g/m<sup>3</sup> och 5,39 g/m<sup>3</sup> inomhus enligt avsnitt 2.5. Både ånghalten och temperaturen varierar linjärt i materialet då det betraktas vara homogent vid modellering.

I figur 14 på nästa sida framgår hur den relativa fuktigheten varierar beroende på väggdjupet för de båda studerade fallen med olika  $\lambda$ -värde. Effekten av variation av  $\lambda$ -värdet bedöms vara närmast försumbart. Den yttre delen av ytterväggen når en väldigt hög nivå på värdet av den relativa fuktigheten och uppgår som högst till 98%. Även om den relativa fuktigheten uppgår till nästan 100% bedöms ingen risk för kondensation föreligga, då detta inträffar längst ut i väggen där den relativa fuktigheten i uteluften redan naturligt uppgår till 100%. Som referens inträffar en relativ fuktighet på cirka 100% längst ut i väggkonstruktionen även för välisolerade konstruktioner där ångspärr nyttjas. Vidare uppnås den kritiska nivån på 75% relativ fuktighet vid ett djup av cirka 280 mm. Att den kritiska nivån på relativ fuktighet uppnås i ytterväggen bedöms inte heller utgöra ett problem då detta först sker vid en temperatur på -4 °C. Därmed bedöms temperaturförhållandena omöjliggöra mögelpåväxt enligt avsnitt 2.5 och att kompositmaterialet därmed kan användas utan förväntad risk för fuktskador.



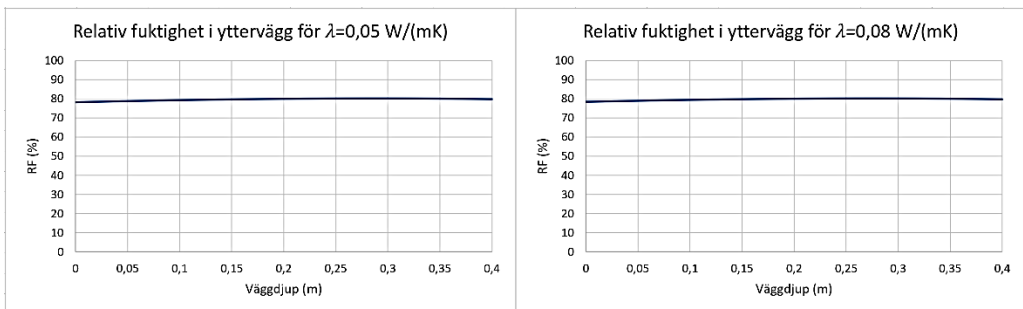
Figur 14. Två grafer över den relativa fuktigheten som en funktion av väggdjupet för fallen 0,05 W/(m·K) och 0,08 W/(m·K) på  $\lambda$ -värdet.

## Fall 2

Uteluften antas ha en relativ fuktighet på 80% vid en temperatur på 15 °C och inneluften antas ha en temperatur på +21 °C och ett fuktillskott på 4 g/m<sup>3</sup>, vilket medför en relativ fuktighet på 78% inomhus.

Därmed uppgår ånghalten utomhus till 10,26 g/m<sup>3</sup> och 14,26 g/m<sup>3</sup> inomhus enligt avsnitt 2.5. Både ånghalten och temperaturen varierar linjärt i materialet då det betraktas vara homogent vid modellering.

I figur 15 framgår det hur den relativa fuktigheten varierar beroende på väggdjupet för de båda studerade fallen med olika  $\lambda$ -värde. Effekten av variation av  $\lambda$ -värdet bedöms vara närmast försumbart. Den relativa fuktigheten är som högst vid cirka 250-300 mm djup och uppgår till 80%. Allmänt kan konstateras att den relativa fuktigheten i väggen uppgår till cirka 80% oavsett djup i väggen och att hela tvärsnittet därmed uppgår till en kritisk nivå för potentiell mögelpåväxt. Vidare är temperaturen gynnsam för mögelpåväxt vilket därmed kan förväntas uppstå under dessa förhållanden. Att det finns risk för mögelpåväxt på både insidan och utsidan av väggen bör ställas i relation till att denna risk är lika stor för alla väggkonstruktioner med exponerat organiskt material, med eller utan ångspärr under de givna klimatförhållandena. Därmed förväntas risken för mögelpåväxt för väggkonstruktionen inte öka relativt till dagens fackmannamässiga konstruktioner med exponerat organiskt material. Vidare föreligger det ingen risk för kondensation i väggen och risk för rötangrepp bedöms således vara försumbar. Därmed förväntas ingen ökad risk för fuktskador relativt till dagens fackmannamässiga konstruktioner föreligga.



Figur 15. Två grafer över den relativa fuktigheten som en funktion av väggdjupet för fallen 0,05 W/(m·K) och 0,08 W/(m·K) på  $\lambda$ -värdet.

### 3.4 Optimering av värmeledningsförmåga

Enligt avsnitt 2.4.1.1 uppstår ingen signifikant konvektion i en enskild sfärisk por med en diameter på upp till 9 mm. För en vertikal luftspalt med en motsvarande bredd bedöms friktionen som motverkar den konvektiva luft rörelsen vara mindre än för motsvarande sfäriska por med en diameter på 9 mm. Därmed dras slutsats att konvektionen ökar med ökande håldiameter i den tilltänkta cylindriska hålstrukturen för ett givet ansatt djup på hålstrukturen. För just vertikala luftspalter framgår det även i avsnitt 2.4.1.1 att bidraget från konvektion inte är signifikant relativt till luftens konduktiva förmåga, givet att spaltbredden understiger cirka 10-12 mm. Därmed dras slutsats att ingen vidare analys av det konvektiva bidraget vid energitransport behöver göras om djupet på hålstrukturen begränsas till cirka 10 mm.

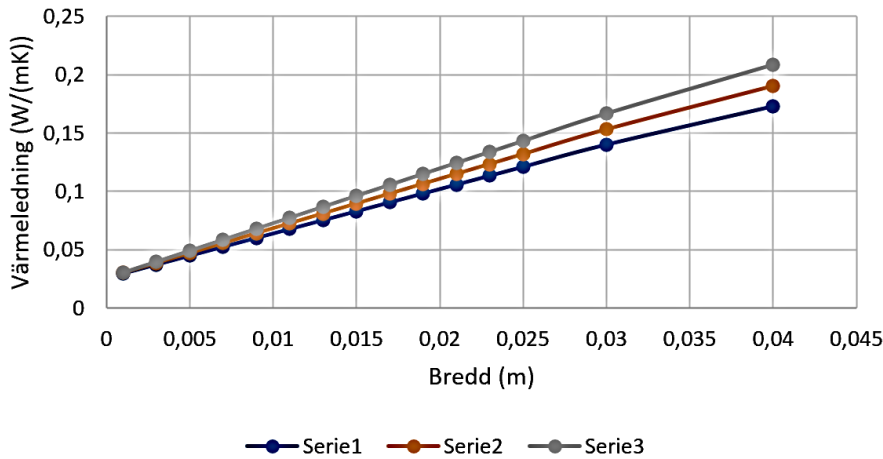
Energitransporten från strålning är temperaturberoende enligt avsnitt 2.4.1.2. För en given por eller vertikal luftspalt är energitransporten oberoende porlängden/spaltbredden givet att medeltemperaturen är densamma. Vid införande av avskiljande väggar eller nyttjande av en tunnare hålstruktur, kommer energitransporten från strålningsbidraget minska och endast uppgå till  $1/n$ , där  $n$  är antalet mellanväggar, enligt avsnitt 2.4.1.2.

Allmänt kan konstateras att värmeledningsförmågan enligt avsnitt 2.2.3 är mer än dubbelt så hög i fiberriktningen än vinkelrätt fiberriktningen, varför träfibrer orienteras i den tilltänkta ytterväggens eget plan. Om fiberriktningen orienteras vertikalt uppnås maximal bärförmåga mot linjelast enligt avsnitt 3.2, utan att det resulterar i ett högre  $\lambda$ - värde, varför denna riktning på fibrerna väljs på kompositmaterialet.

#### 3.4.1 Bedömning om konvektionsbidraget är signifikant

För att avgöra om ett konvektivt bidrag behöver utredas/analyseras, studeras initialt värmetransporten i en vertikal oventilerad luftspalt utan hänsyn till konvektion. Energitransporten studeras endimensionellt och görs vid tre olika medeltemperaturer, +20 °C, +10 °C och 0 °C, vilka alla bedöms vara representativa för medeltemperaturen i olika tvärsnitt i den tänkta ytterväggen under årets kallare månader. Energitransporten utvärderas och jämförs genom att ta fram  $\lambda$ -värdet på luftspalten orsakat både av strålning, vilken ökar med ökad spaltbredd, samt konduktion, vilken är oberoende spaltbredden, detta som en funktion av luftspaltens bredd.  $\lambda$ -värdet beräknas enligt avsnitt 2.4.1 och presenteras i figur 16 på nästa sida där serie 1 gäller vid 0 °C, serie 2 gäller vid +10 °C och serie 3 gäller vid +20 °C.

## Värmetransport i en oventilerad luftspalt



Figur 16.  $\lambda$ -värdet i en oventilerad luftspalt som en funktion av spaltbredden. Serie 1 gäller vid 0 °C, serie 2 gäller vid +10 °C och serie 3 gäller vid +20 °C.

$\lambda$ -värdet för gran vinkelrät fiberriktningen uppgår till 0,11 W/(m·K), vilket motsvarar en spaltbredd på 22 mm vid 0 °C, 20 mm vid +10 °C och 18 mm vid +20 °C enligt figur 16. Vid en ännu större spaltbredd kommer kompositmaterialets värmeledningsförmåga överstiga värmeledningsförmågan för massivt trä (exklusive konvektion) och därmed vara kontraproduktivt. Redan vid en spaltbredd på 10 mm, vilket är gränsen för att det konvektiva värmetransportsbidraget ska bli signifikant, uppgår exempelvis värmeledningsförmågan i den oventilerade luftspalten till 0,068 W/(m·K) vid +10 °C, vilket motsvarar 62% av värmeledningsförmågan av massivt trä.

För att kompositmaterialet, vilket delvis består av trämaterial i hålstrukturen, ska kunna erhålla en signifikant lägre värmeledningsförmåga än för massivt trä, bedöms håldjupet där det konvektiva bidraget är signifikant (>10 mm håldjup), ej vara aktuellt. Därmed bedöms det inte finnas något intresse av att studera värmetransport orsakat av konvektion då konvektionsbidraget endast är relevant vid ett håldjup då värmetransporten i en luftspalt nästan har en likvärdig värmeledningsförmåga som för massivt trä.

Då håldjupet inte bör överstiga 10 mm för att kunna erhålla en signifikant lägre värmeledning i lagret med den utborrade hålstrukturen, kommer hålets form inte behöva utformas med hänsyn till värmetransport genom konvektion. Därmed kommer en ökad porositet direkt leda till en proportionerlig lägre värmeledning genom hålstrukturen. Slutsats dras att desto större håldiameter som nyttjas, desto lägre värmetransport genom kompositmaterialet kommer att ske. Därmed kommer den maximalt tillåtna håldiametern på 60 mm vara mest fördelaktig.

### 3.4.2 Lägsta möjliga värmeledning per skiva med försänkt hålstruktur

För att initialt bedöma optimalt håldjup då den största tillåtna håldiametern på 60 mm nyttjas, görs först en enkel endimensionell modell av energitransporten med hänsyn endast till konduktion och strålning, detta då bidraget från konvektion bedöms vara försumbart vid det önskade intervallet av optimalt håldjup.

Analysen av energitransporten görs vid en medeltemperatur på 10 °C, vilket bedöms vara representativt för medeltemperaturen i ytterväggen under årets kallare månader.

Vid beräkning av  $\lambda$ -värdet för lagret med den utborrade hålstrukturen, viktas  $\lambda$ -värdet för luften och  $\lambda$ -värdet från det mellanliggande träet samman enligt avsnitt 2.4 med  $\lambda$ -värdesmetoden, vilket förväntas ge en värmeledningsförmåga i överkant. Vid nyttjandet av hål med 60 mm i diameter och ett minsta avstånd på 3 mm mellan hålen, uppgår tvärsnittsporositeten till 82% enligt avsnitt 3.1.2 och det sammanvägda  $\lambda$ -värdet kan beräknas enligt nedanstående formel:

$$\lambda_{hs} = 0,823 \cdot \lambda_{luftspalt,d} + 0,177 \cdot \lambda_{trä} \quad (\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$$

Då både håldjupet och tjockleken på den massiva träskivan kan varieras, vilket påverkar det sammanvägda  $\lambda$ -värdet, dras slutsats att optimeringen behöver göras i en flervariabelanalys. Denna analys görs iterativt och presenteras i tabell 2 på nästa sida där  $\lambda$ -värdet presenteras för det kombinerade lagret bestående av en skiva med försänkt hålstruktur, där håldjupen presenteras vertikalt och skivtjockleken presenteras horisontellt i tabellen.

## Bärande hålträisolering

Tabell 2. En iterativ sammanställning av  $\lambda$ -värdet ( $W/(m\cdot K)$ ) för det kombinerade lagret (hålstruktur och bakomliggande massiva skiva), som en funktion av både håldjup och tjocklek på bakomliggande skiva. Lägsta möjliga  $\lambda$ -värde för en viss tjocklek på bakomliggande massiva skiva är markerade fetstilt i tabellen.

	1,0 mm	1,5 mm	2,0 mm	2,5 mm	3,0 mm	3,5 mm	4,0 mm
1,0 mm	0,063216	0,069093	0,073659	0,077307	0,08029	0,082774	0,084875
1,5 mm	0,060049	0,064966	0,069002	0,072373	0,075233	0,077688	0,07982
2,0 mm	0,05894	0,063126	0,066677	0,069729	0,072378	0,074701	0,076754
2,5 mm	<b>0,058808</b>	0,062441	0,065592	0,068351	0,070788	0,072955	0,074895
3,0 mm	0,059219	<b>0,062421</b>	<b>0,065243</b>	0,067749	0,069989	0,072004	0,073825
3,5 mm	0,059961	0,062818	0,065367	<b>0,067655</b>	<b>0,069719</b>	0,071592	0,073298
4,0 mm	0,060919	0,063495	0,065814	0,067912	0,06982	<b>0,071563</b>	<b>0,073161</b>
4,5 mm	0,062028	0,064368	0,066489	0,068423	0,070191	0,071816	0,073313
5,0 mm	0,063246	0,065383	0,067334	0,069121	0,070765	0,072282	0,073685
5,5 mm	0,064543	0,066506	0,068307	0,069964	0,071495	0,072913	0,07423
6,0 mm	0,065902	0,067712	0,069379	0,07092	0,072347	0,073675	0,074912
6,5 mm	0,06731	0,068983	0,07053	0,071964	0,073298	0,074542	0,075704
7,0 mm	0,068755	0,070306	0,071744	0,073082	0,074329	0,075495	0,076587
7,5 mm	0,070231	0,071671	0,07301	0,074258	0,075425	0,076519	0,077545
8,0 mm	0,071733	0,073071	0,074319	0,075485	0,076577	0,077602	0,078566
8,5 mm	0,073256	0,0745	0,075663	0,076752	0,077774	0,078735	0,079641
9,0 mm	0,074797	0,075954	0,077038	0,078055	0,079011	0,079911	0,080761
9,5 mm	0,076352	0,077429	0,078439	0,079388	0,080281	0,081124	0,081921
10 mm	0,077921	0,078921	0,079862	0,080747	0,081581	0,082369	0,083115

Lägsta möjliga  $\lambda$ -värde för en viss tjocklek på bakomliggande massiva skiva är markerat i fetstilt i tabell 2 ovan. Tabellen redogör även för en tjocklek på de mellanliggande träskivorna på under 2,0 mm vilken har antagits vara den minsta möjliga tjocklek som kan erhållas vid en tillförlitlig tillverkning av materialet. Tjocklekarna 1,0 mm och 1,5 mm presenteras för att åskådliggöra en nedre gräns på hur låg värmeledningsförmåga som kan erhållas vid högre precision vid tillverkning. Vid nyttjande av en större tjocklek på de mellanliggande skivorna, kommer värmeledningsförmågan att öka. Optimalt djup på hålstrukturen är även beroende på tjockleken på de mellanliggande skivorna, vilket åter framgår i tabell 2 ovan, där optimalt håldjup är markerat i fetstil beroende på tjockleken på de mellanliggande skivorna.

Ju tjockare skiva som väljs, desto högre kommer det kombinerade minsta  $\lambda$ -värdet att bli.  $\lambda$ -värdet för lagret bestående enbart av den utborrade hålstrukturen blir lägre desto tunnare skiktet är, detta då en massiv skiva på minst 2,0 mm alltid finns i direkt anslutning (hålavskiljande och lastbärande), resulterat det i att det kombinerade lägsta  $\lambda$ -värdet har ett negativt optimum vid ett håldjup på cirka 3-4 mm beroende på tjockleken på de mellanliggande skivorna.

Lägsta möjliga  $\lambda$ -värde för kompositmaterialet uppgår till 0,065  $W/(m\cdot K)$  och uppnås vid ett håldjup på 3,0 mm, vid en tjocklek på 2,0 mm för den indirekta avskiljande skivan. Därmed föreslås att nyttja 5,0 mm tjocka skivor med en försänkt hålstruktur på 3,0 mm.

### 3.5 Vald utformning av hålstruktur och uppbyggnad

Vid bedömning av optimal utformning av hålstrukturen och uppbyggnad av kompositmaterialet ska både bärförmåga, värmeledningsförmåga, fuktsäkerhet och resurseffektiv tillverkning beaktas. Kompositmaterialet avses att användas till homogena ytterväggskonstruktioner. Enligt de ovanstående avsnitten ska fiberriktningen orienteras i den tänkta ytterväggens eget plan för att naturligt erhålla både ett så högt ångmotstånd och så låg värmeledningsförmåga som möjligt. Vid valet att dessutom nyttja en vertikal fiberriktning som är parallell med väggens eget plan, uppnås maximal bärförmåga mot linjelast. Därmed konstateras att kompositmaterialet ska utformas på ett sätt så att en vertikal fiberriktning erhålls vid uppbyggnad av ytterväggar.

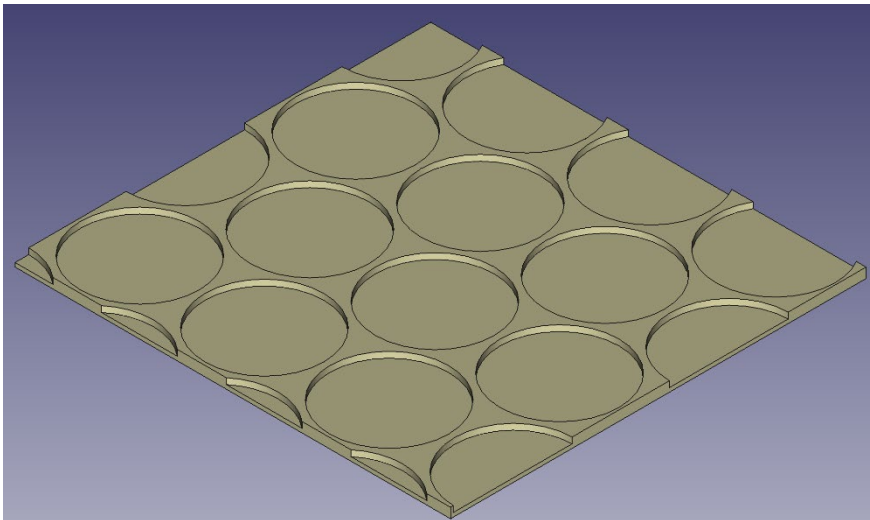
Utifrån antagandet att mellanliggande skivtjocklek ska uppgå till minst 2,0 mm, uppgår den lägsta värmeledningsförmågan till 0,065 W/(m·K) enligt avsnitt 3.4 och åskådliggörs även i tabell 3 nedan, vilken är en sammanställning av värmeledningsförmågan för ett givet håldjup (vertikalt angivet) och en given tjocklek på den mellanliggande skivan (horisontellt angivet). Enligt föregående avsnitt förväntas även den framräknade värmeledningsförmågan överskattas något.

Tabell 3. Sammanställning av värmeledningsförmåga för kompositmaterialet beroende på håldjup (vertikalt angivet i tabell) och tjocklek på mellanliggande skiva (horisontellt angivet i tabell). Skivtjocklek 1,0 mm och 1,5 mm är inte valbara och markeras därför med röd färg. Ljusgrå markering påvisar kombinationer som inte uppfyller kravet på bärförmåga och blå markering påvisar kombinationer som eventuellt kräver en ångspärr vid användning, alternativt bedöms ha för hög ånggenomsläpplighet. Respektive lägsta värmeledningsförmåga för en given skivtjocklek har markerats fetstilt.

	1,0 mm	1,5 mm	2,0 mm	2,5 mm	3,0 mm	3,5 mm	4,0 mm
1,0 mm	0,063216	0,069093	0,073659	0,077307	0,08029	0,082774	0,084875
1,5 mm	0,060049	0,064966	0,069002	0,072373	0,075233	0,077688	0,07982
2,0 mm	0,05894	0,063126	0,066677	0,069729	0,072378	0,074701	0,076754
2,5 mm	0,058808	0,062441	0,065592	0,068351	0,070788	0,072955	0,074895
3,0 mm	0,059219	0,062421	0,065243	0,067749	0,069989	0,072004	0,073825
3,5 mm	0,059961	0,062818	0,065367	0,067655	0,069719	0,071592	0,073298
4,0 mm	0,06092	0,063495	0,065814	0,067912	0,06982	0,071563	0,073161
4,5 mm	0,06203	0,064368	0,066489	0,068423	0,070191	0,071816	0,073313
5,0 mm	0,06325	0,065383	0,067334	0,069121	0,070765	0,072282	0,073685
5,5 mm	0,06454	0,066506	0,068307	0,069964	0,071495	0,072913	0,07423
6,0 mm	0,0659	0,067712	0,069379	0,07092	0,072347	0,073675	0,074912
6,5 mm	0,06731	0,06898	0,07053	0,071964	0,073298	0,074542	0,075704
7,0 mm	0,06875	0,07031	0,071744	0,073082	0,074329	0,075495	0,076587
7,5 mm	0,07023	0,07167	0,07301	0,074258	0,075425	0,076519	0,077545
8,0 mm	0,07173	0,07307	0,074319	0,075485	0,076577	0,077602	0,078566
8,5 mm	0,07326	0,0745	0,07566	0,076752	0,077774	0,078735	0,079641
9,0 mm	0,0748	0,07595	0,07704	0,078055	0,079011	0,079911	0,080761
9,5 mm	0,07635	0,07743	0,07844	0,079388	0,080281	0,081124	0,081921
10 mm	0,07792	0,07892	0,07986	0,080747	0,081581	0,082369	0,083115

Skivtjocklekarna 1,0 mm och 1,5 mm, vilka är markerade med rött i tabell 3 på föregående sida, antas vara för tunna för att kunna tillverkas men redovisas ändå för att åskådliggöra den eventuella lägre värmeledningsförmågan som kan erhållas vid högre tillverkningsprecision. Ett flertal kombinationer med ett högt förhållande mellan håldjupet och skivtjockleken resulterar i att kravet på minsta bärförmåga inte uppnås. Dessa kombinationer har markerats med ljusgrå färg i tabellen ovan för att påvisa att alternativen inte är valbara. De kombinationer som har tillräckligt hög bärförmåga men som bedöms ha för lågt ångmotstånd för att inte behöva nyttja en ångspärr, alternativt har för hög ånggenomsläpplighet, är markerade med blå färg i tabellen ovan.

Enligt tabell 3 på föregående sida framgår att den lägsta möjliga värmeledningsförmågan för kompositmaterialet som kan erhållas med en minsta mellanliggande skivtjocklek på 2,0 mm, ett minsta avstånd mellan hålen på 3,0 mm och en håldiameter på 60 mm, uppgår till 0,065 W/(m·K). Detta uppnås vid nyttjande av 5,0 mm tjocka skivor som har en 3,0 mm försänkts hålstruktur, vilket åskådliggörs i figur 17. Denna kombination uppfyller både kravet på bärförmåga och ångmotstånd. Ett flertal andra kombinationer kan erhålla både ett högre ångmotstånd och en högre bärförmåga men på bekostnad av en ökad värmeledningsförmåga.



*Figur 17. 3D-modell som visar hur respektive skiva kommer vara utformad vid lägsta möjliga värmeledningsförmåga.*

Allmänt kan konstateras att ju tjockare ett kombinerat lager av både hålstruktur och den mellanliggande avgränsande skivan är, desto färre är antalet skivor som behövs vid tillverkning av en yttervägg för en given vägg tjocklek. Om tillverkningen är väldigt kostnadsdrivande kan dessa kombinationer istället väljas men på bekostnad av högre värmeledningsförmåga.

Generellt bedöms kombinationen som ger upphov till det lägsta möjliga  $\lambda$ -värdet på 0,065 W/(m·K), då håldjupet är 3,0 mm och skivtjockleken uppgår till 2,0 mm, vara det mest fördelaktiga alternativet även då bärförmåga och fuktsäkerhet beaktas. Därmed väljs alternativet på utformningen av skivorna som presenterades ovan i figur 17.



En 400 mm tjock yttervägg bestående av kompositmaterialet kommer därmed att byggas upp av 79 skivor i väggens eget plan, vilka är 5,0 mm tjocka med ett håldjup på 3,0 mm, vilket resulterar i cirka 23 000 försänkta hål per kvadratmeter väggyta. Med en omslutande skiva på 2,0 mm medför det en total vägg tjocklek på 397 mm varav 160 mm utgörs av de massiva skivorna. Därmed är kravet på bärförmågan på minst 80 mm uppfyllt med god marginal. Vid en önskan att öka kompositmaterialets styvhet i väggens eget plan, kan upp till vartannat skivlager (50%) orienteras med fiberriktningen horisontellt istället för vertikalt. På så sätt kan materialegenskaper som påminner mer om KL-trä erhållas för kompositmaterialet.

Vid sammanfogning av kompositmaterialet kommer det att limmas ihopa. Enligt avsnitt 2.3 behövs cirka 95 g/m<sup>2</sup> lim vid sammanlimning av två massiva träskivor. Då kompositmaterialet är uppbyggt av en hålstruktur med försänkta hål, vilka ger upphov till en tvärsnitts porositet på 82% medför det att endast 18% av tvärsnittsytan kommer bestrykas med lim vid tillverkning, vilket motsvarar 16,8 g/m<sup>2</sup>. Vid användandet av 5 mm tjocka skivor motsvarar det 3,37 kg/m<sup>3</sup>.

Massivt trämaterial av gran antas ha en medeldensitet på 440 kg/m<sup>3</sup> enligt avsnitt 2.2. Utifrån vald hålstruktur, håldjup och skiv tjocklek motsvarar det en medeldensitet på 223 kg/m<sup>3</sup>. Därmed uppgår viktprocenten lim till 1,5%.



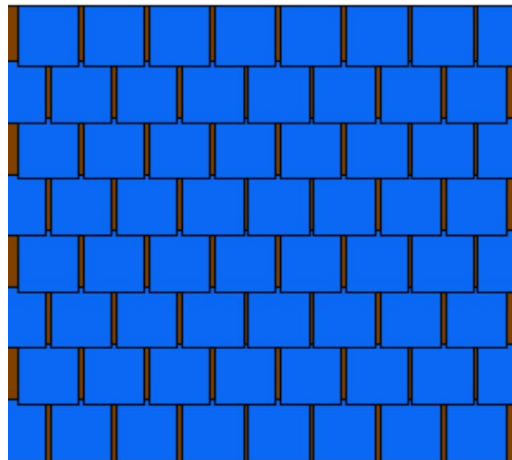
## 4 Modellering i HEAT3 med tillhörande resultat

Den förväntade värmeledningsförmågan för kompositmaterialet uppgår till 0,065 W/(m·K) för en individuell 5,0 mm tjock skiva med den valda hålstrukturen som är försänkt med 3,0 mm enligt avsnitt 3.5. Beräkningen av värmeledningsförmågan utgår från en endimensionell värmetransport och beräknas med hjälp av  $\lambda$ -värdesmetoden, vilken förväntas överskatta den framräknade värmeledningen enligt avsnitt 2.4. För att både bättre kunna bedöma det förväntade  $\lambda$ -värdet för kompositmaterialet, samt kunna utvärdera effekten av att förskjuta hålstrukturen mellan varje skiva enligt 3.1.3, vilket ska minimera de horisontellt sammanhängande köldbryggorna, modelleras kompositmaterialet i modelleringsprogrammet HEAT3.

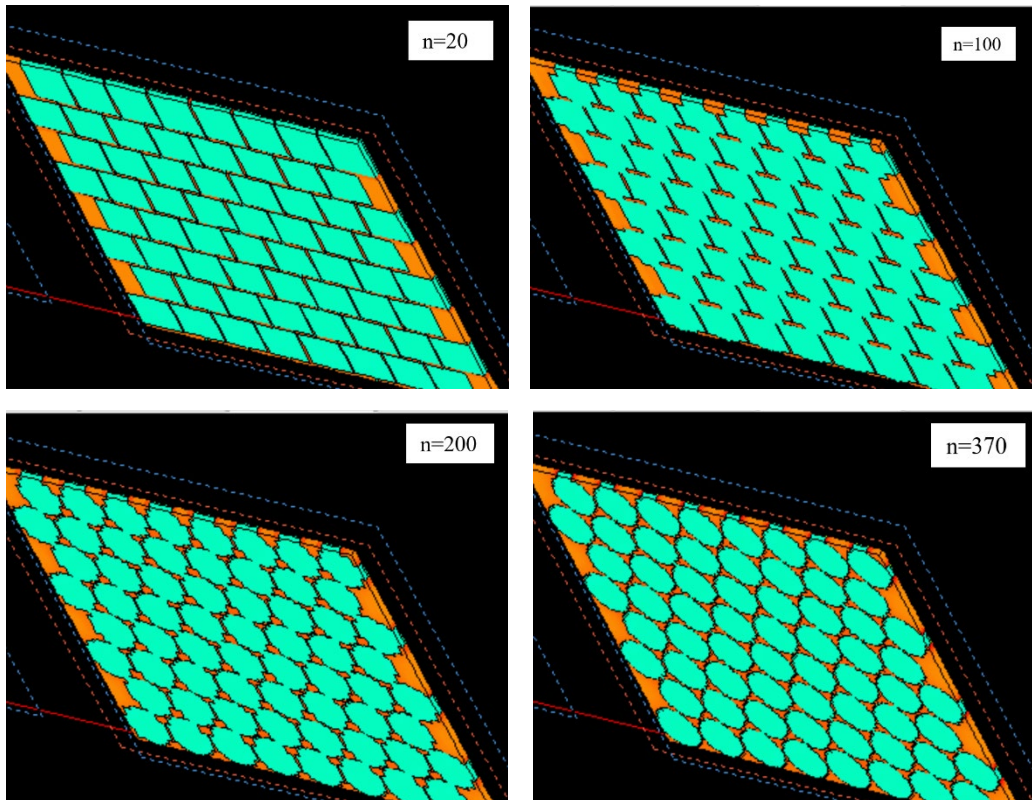
Enligt avsnitt 2.8 som beskriver hur programmet HEAT3 fungerar och dess begränsningar, medför det att ett flertal förenklingar behövt göras vid modellering. Då håldjupet uppgår till 3,0 mm kan värmetransporten från konvektion försummas enligt avsnitt 2.4.1.1. Därmed behöver modellen endast beakta energitransport genom konduktion och strålning.

HEAT3 kan endast beräkna värmetransport genom ledning (konduktion). Därmed har värmetransporten genom lufthålen behövt anpassas genom att det förväntade bidraget från strålning sammanvägts med värmetransporten genom luftens egentliga konduktion. Denna sammanvägning av energitransport för både konduktion och strålning har gjorts enligt avsnitt 3.4.1 och är giltig för +10 °C, vilket bedöms vara en rimlig medeltemperatur i väggen vid årets vintermånader.

Vidare är modellen begränsad av att den maximalt kan vara uppbyggd av 1000 enskilda element, samt vara uppbyggd av maximalt 370 celler i respektive koordinatriktning (i det numeriska nätet). Programmet kan dessutom endast göra beräkningar för rektangulära objekt. Modellen har därför behövt begränsas i storlek och tjocklek till att motsvara en yta på cirka 0,2 m<sup>2</sup> och vara uppbyggd av cirka 10 skivor, vilket motsvarar en vägg tjocklek på cirka 50 mm. I figur 18 framgår det hur respektive lager är uppbyggt och uttritad i programmet, där kvadrater av lagertyp "Test\_Mat\_\*CYLZ" nyttjas, vilket genererar en cylinderlik uppbyggnad i Z-axelns riktning. Upplösningen på de cylindriska objekten är beroende på antalet celler i det numeriska nätet. Effekten av upplösningen av det cylindriska nätet åskådliggörs i figur 19 på nästa sida.



Figur 18. Uppbyggnad av respektive skiva i HEAT3 där blåa kvadrater motsvarar lufthålen och det bruna mellanliggande materialet är omgivande trämaterial.



Figur 19. Illustration av upplösningen av den numerära strukturen vid modellering, där fall  $n=20$ ,  $n=100$ ,  $n=200$  och  $n=370$ =maximalt antal celler, presenteras.

Vid nyttjande av maximal upplösning på det numeriska nätet, vilket åskådliggörs i den understa bilden till höger i figur 19, ges den bästa approximationen av cylindriska hål. Denna upplösning bedöms allmänt vara tillfredställande vid modellering.

#### 4.1 Värmeledningsförmåga för kompositmaterialet då hålen är placerade i horisontell linje efter varandra

Kompositmaterialet studeras genom att 10 lager av skivor med försänkta hål placeras efter varandra där hålen ligger i linje efter varandra både i horisontalled och i vertikalled. Det yttersta lagret försluts med en 2 mm tjock massiv träskiva för att alla hål ska vara slutna. Geometrin är ansatt till 472 x 486 mm, vilken bedöms vara representativt för väggen då provkroppen är beskuren längs de försänkta hålen symmetrilinjer, samt har närmst en kvadratisk form. Värmeflödet undersöks genom att ytemperaturerna (randvillkoren) ansätts till 0 °C respektive +20 °C där värmeövergångstalet är ansatt till 0 för båda sidor.

Då hålen är placerade i linje efter varandra medför det att trä materialet som finns kvar mellan hålen i hålstrukturen, kommer bilda genomgående raka köldbryggor i kompositmaterialet, vilket framgår i figur 20 på nästa sida där värme flödet tydligt är högre genom trä materialet mellan hålen.

### Data från simulering

Följande värden ansätts eller erhålls vid simulering av värmeflödet genom provkroppen:

**Area:** 0,229 m<sup>2</sup>

**Tjocklek:** 52 mm

**Temperaturdifferens:** 20 °C.

**λ-värde för trä:** 0,11 W/(m·K)

**λ-värde för lufthålen:** 0,0387 W/(m·K)

**Totalt värmefflöde:** 5,5367 W

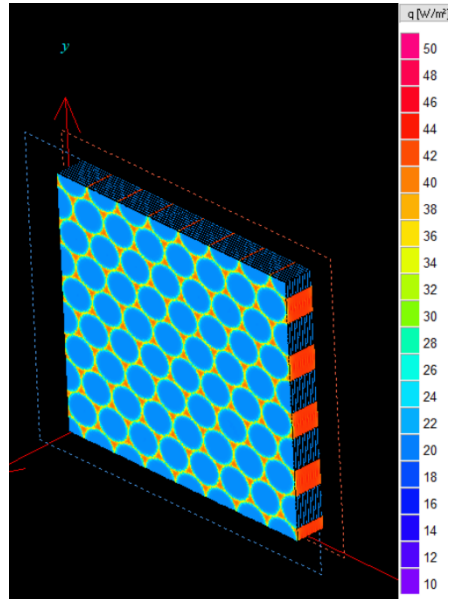
**Värmefflöde/m<sup>2</sup>:** 24,136 W/m<sup>2</sup>

**Värmefflöde genom hålrum:** 20-22 W/m<sup>2</sup>

**Värmefflöde genom köldbryggor**

**(trämaterial):** 42-44 W/m<sup>2</sup>

Resultande λ-värde för kompositmaterialiet uppgår till 0,063 W/(m·K).



Figur 20. Värmefflöde genom provkroppen där flödet W/m<sup>2</sup> visas i färgskala.

## 4.2 Värmeledningsförmåga för kompositmaterialiet då hålstrukturen är förskjutet

Kompositmaterialiet studeras genom att 10 lager av skivor med försänkta hål placeras efter varandra där hålen ligger i linje efter varandra i vertikalled men är förskjutna en håldiameter i horisontalled. Det yttersta lagret försluts med en 2 mm tjock massiv träskiva för att alla hål ska vara slutna. Geometrin är ansatt till 460 x 486 mm, vilken bedöms vara representativt för väggen då provkroppen är beskuren längs de försänkta hålens symmetrilinjer, samt har närmst en kvadratisk form. Värmefflödet undersöks genom att yttemperaturerna (randvillkoren) ansätts till 0 °C respektive +20 °C där värmeövergångstalet är ansatt till 0 för båda sidor.

Hålen förskjutna placering i horisontalled resulterar i att den genomgående raka köldbryggan reduceras med cirka 95% enligt avsnitt 3.1.3. Trämaterialet i hålstrukturen är dock alltid sammanhängande med den avskiljande skivan som gör hålen slutna. Därmed kvarstår köldbryggan men minskas genom att värmetransporten kan betraktas ske över en längre sträcka. Det resulterar i att värmefflödet är mer jämnt fördelat längs tvärsnittet, där köldbryggorna minskas avsevärt relativt till föregående lösning i avsnitt 4.1, men att värmefflödet genom lufthålen samtidigt ökar något. Detta åskådliggörs i figur 21 på nästa sida där förskjutningen av hålstrukturen indirekt går att se genom att värmefflödet genom hålen inte är helt jämnt utan påverkas av bakomliggande köldbrygga.

### Data från simulering

Följande värden ansätts eller erhålls vid simulering av värmeflödet genom provkroppen:

**Area:** 0,224 m<sup>2</sup>

**Tjocklek:** 52 mm

**Temperaturdifferens:** 20 °C.

**λ-värde för trä:** 0,11 W/(m·K)

**λ-värde för lufthålen:** 0,0387 W/(m·K)

**Totalt värmeflöde:** 5,1905 W

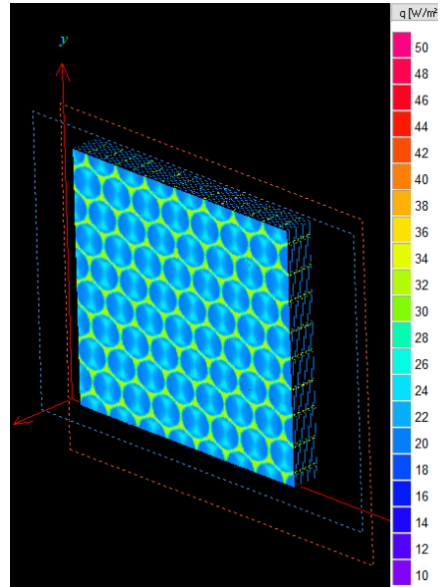
**Värmeflöde/m<sup>2</sup>:** 23,218 W/m<sup>2</sup>

**Värmeflöde genom hålrum:** 21-23 W/m<sup>2</sup>

**Värmeflöde genom köldbryggor**

**(trämaterial):** 30-32 W/m<sup>2</sup>

Resultande λ-värde för kompositmaterialet uppgår till 0,060 W/(m·K)



Figur 21. Värmeflöde genom provkroppen där flödet watt per kvadratmeter visas i färgskala.

## 4.3 Resultat och diskussion av modellering i HEAT3

Vid endimensionell analys av värmeledningsförmågan genom beräkning med λ-värdesmetoden i avsnitt 3.4, erhålls λ-värdet 0,0652 W/(m·K) när hålen är placerade i linje efter varandra enligt uppsättning i avsnitt 4.1. Detta kan jämföras med λ-värdet på 0,063 W/(m·K) vid modellering i HEAT3 utifrån samma antagna värmeledningsförmågor i lufthålen och för trämaterialiet. Då λ-värdesmetoden förväntas ge ett något överskattat λ-värde, bedöms λ-värdet på 0,063 W/(m·K) enligt HEAT3 vara en god uppskattning av det verkliga λ-värdet för det tilltänkta kompositmaterialet.

Effekten av att förskjuta vartannat lager med hålstruktur med motsvarande en håldiameter i horisontalld enligt exempel i avsnitt 4.2, resulterar i en sänkning av λ-värdet på cirka 3,8% relativt till om hålen placeras i linje efter varandra enligt avsnitt 4.1, detta utan att tillverkningsprocessen bedöms vara mer resurskrävande. Vidare bedöms ingen ändring av materialegenskaperna ske för kompositmaterialet då hålstrukturen är förskjuten. Därmed väljs vid tillverkning att nyttja uppbyggnaden av kompositmaterialet med en förskjuten hålstruktur.

Utifrån modellering i HEAT3 förväntas därmed kompositmaterialet ha ett λ-värde på 0,060 W/(m·K) och är således 46% lägre än för massivt trä av gran med ett λ-värde på 0,11 W/(m·K). Modellen utgår dock enbart från konduktion där bidraget från strålning sammanvägs med luftens rena konduktiva förmåga, vilket har gjorts med en handberäkningsmodell för vertikala smala luftspalter. Detta bedöms bidra till en osäkerhet kring tillförlitligheten på indatan vid modellering i HEAT3.

Vidare är det inte känt om värmetransporten genom kompositmaterialet faktiskt kommer ske på precis samma sätt och i samma utsträckning i kompositmaterialets olika utbredningsriktningar som vid modelleringen med den sammanvägda motsvarande konduktiviteten. Värmetransporten genom konduktion och genom strålning antas egentligen inte te sig på precis samma sätt som vid ren konduktion som  $\lambda$ -värdet för kompositmaterialet faktiskt har modellerats utefter. Därmed bedöms det finnas både osäkerheter kring indatan och själva modellen som har en förenklad värmetransportsmodell. Dessa osäkerheter förväntas dock inte resultera i ett signifikant avvikande  $\lambda$ -värde för kompositmaterialet relativt till det presenterade framräknade  $\lambda$ -värdet.





## 5 Sammanställning av resultat och diskussion

I kapitel 3 och kapitel 4 har delresultat och viss diskussion presenterats löpande då det legat till grund för optimeringen av kompositmaterialet i kapitel 3.5. De mer övergripande och relevanta resultaten för den valda utformningen av kompositmaterialet presenteras nedan.

Utifrån handberäknade modeller för bärförmåga, fuktegenskaper och värmeledningsförmågan (vilken har kompletterats med en modellering i HEAT3), bedöms materialegenskaperna preliminärt vara tillfredställande för att materialet ska kunna nyttjas till att bygga homogena ytterväggar under normala förhållanden.

Bärförmågans övre gräns vid en vägg tjocklek på 400 mm bedöms motsvara 240 mm tjocka element av KL-trä utsatta för rent tryck (160 mm tjocklek i fiberriktning), vilket motsvarar en linjelast från en byggnad med 10 våningsplan. Analysen av bärförmågan är översiktligt gjord och utgår från teorin kring KL-trä. Hålstrukturens förmåga att stabilisera de vertikala skivorna har ej studerats, vilket kan resultera i en signifikant minskad bärförmåga för kompositmaterialet vid mer omfattande studier. Vid behov av ökad bärförmåga eller ökad styvhet, kan antingen tjockare lager väljas på de vertikala hålavskiljande skivorna, alternativt bedöms kompositmaterialet kunna kompletteras med element av KL-trä, detta utan att större förändringar av övriga egenskaper i det tilltänkta väggpartiet förväntas uppstå.

Kompositmaterialet förväntas resultera i mer än en halvering av ångmotståndet relativt till massivt trä. Då kompositmaterialet i makroanalys bedöms kunna betraktas som homogent, förväntas ångfördelningskurvan vara linjär genom ytterväggen. Efter analys av två fall med hög fuktbelastning framgår det att ingen risk för kondens förväntas föreligga om väggen är väderskyddad. Vidare förväntas ytterväggar av kompositmaterialet inte medföra ökade fuktrisker vid jämförelse med fackmannamässigt godkända ytterväggskonstruktioner som nyttjar organiskt material. Mögelpåväxt på utsidan av ytterväggen kan därmed förväntas uppstå i samma utsträckning som ytterväggar med träbaserade fasader. Att mögelpåväxt skulle kunna tränga in i kompositmaterialet bedöms bara vara möjligt vid väldigt höga fuktnivåer, vilket inte förväntas förekomma. En djupare spridning av mögelpåväxt in i kompositmaterialet och vidare till innemiljön bedöms dock inte kunna ske över huvud taget via den slutna hålstrukturen som bygger upp kompositmaterialet.

Efter analys av den valda utformningen på kompositmaterialet i datorprogrammet HEAT3, förväntas värmeledningsförmågan uppgå till  $0,060 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , vilket kan jämföras med massiv gran som har en värmeledningsförmåga på  $0,11 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Således förväntas kompositmaterialet resultera i en 45% lägre värmeledningsförmåga relativt till massiv gran. Genom att nyttja en förskjutning av hålstrukturen för vartannat lager, bryts de sammanhängande horisontella köldbryggorna, vilket sänker  $\lambda$ -värdet med cirka 3,8%.

Den framtagna utformningen på kompositmaterialet har således en beräknad lägre värmeledningsförmåga än Isotimbers ytterväggskonstruktion, och fyller därmed potentiellt en funktion i byggsektorn vid en önskan att bygga mer förnyelsebart och med ett eventuellt mer klimatsmart byggnadsmaterial.

Vid sammansättning av kompositmaterialet behövs cirka 1,5 viktprocent lim, vilket bedöms vara en acceptabel mängd utifrån önskan att kompositmaterialet skulle utgöras av 99% trämaterial. Densiteten för kompositmaterialet uppgår till cirka 220 kg/m<sup>3</sup> och är således 50% lägre än för massiv gran.

Vid tillverkning av en 400 mm tjock yttervägg medför det cirka 80 lager av sammanlimmade skivor. Detta resulterar i cirka 23 000 utborrade hål per kvadratmeter yttervägg vilket bedöms medföra ett omfattande behov av resurser vid tillverkning. Vid en storskalig produktion kan ytterväggar av kompositmaterialet byggas upp effektivt genom att hela skräddarsydda väggpartier byggs upp ett lager i taget där alla urfrästa hål borrar ut samtidigt av en maskin som är konfigurerad med exempelvis kvistborrar i det specificerade hålmönstret. Per kvadratmeter motsvarar det att maskinen är utrustad med cirka 300 kvistborrar.

## 6 Osäkerheter och vidare studier

Analysen av bärförmågan är översiktlig och försummar risken för knäckning av de motsvarande vertikala skivorna i kompositmaterialet. Vidare har bara materialet studerats teoretiskt mot linjelast. Bedömning har gjorts att den förväntade övre gränsen på bärförmågan motsvarar 10 våningsplan för en 400 mm tjock vägg, vilket tyder på att bärförmågan är tillfredställande för flerbostadshus. Därmed har kompositmaterialet potential att både vara ett bärande och isolerande byggnadsmaterial. Omfattande studier av kompositmaterialets materialegenskaper kopplade till bärförmåga bedöms behöva göras innan mer säkra slutsatser kan dras om kompositmaterialet lämplighet som bärande material och vilken linjelast som då kan förväntas kunna påföras. Då bärande element av KL-trä har vartannat lager med fiberriktningen vinkelrät (horisontell) för att öka styvheten i skivan, kan även vartannat lager i kompositmaterialet tänkas behövas ha fiberriktningen horisontell. Därmed skulle bärförmågan mot rent tryck från en linjelast närmast halveras. Analys i FEM-program med efterföljande praktiska belastningstester på våningshöga väggelement föreslås som nästa steg för att erhålla säkrare resultat kring bärförmågan och relevanta materialegenskaper kopplade till bärförmågan.

Den utförda analysen av materialets ångmotstånd och risker kopplade till mögel- och rötangrepp är endast utförd med enklare handberäknade modeller. Då kompositmaterialet bedömts kunna betraktas som homogent vid analys på makronivå, anses de erhållna resultaten vara tillförlitliga, givet att ytterväggar av kompositmaterialet är väderskyddade både under byggnationsfasen och under driftsfasen. Om homogena ytterväggskonstruktioner av kompositmaterialet inte är väderskyddade, kan slagregn fukta upp den yttre delen av väggkonstruktionen, vilket kan leda till kondens i hålrummen i kompositmaterialet. Vidare kan den yttersta delen av konstruktionen bli uttorkad vid långvarig exponering av torrt och soligt väder. Därmed riskerar den 2 mm tjocka ytlaget av massivt trä att spricka. För att både skydda kompositmaterialet och underlätta för infästningar av till exempel ett fasadmateriale, kan förslagsvis en tjockare (10-20) mm tjock massiv träskiva nyttjas, vilken då omsluter kompositmaterialet. Allmänt föreslås en mer djupgående datasimulering av fuktillstånden i väggkonstruktionen på helårsbasis för att kunna få mer tillförlitlig information om risken för mögel- och röt påväxt. Vidare föreslås att kompositmaterialet testas praktiskt i olika kontrollerade miljöer med varierande relativ fuktighet, detta för att bättre kunna klarlägga om det finns risk för att hyfer kan tränga in i kompositmaterialet och att mögelpåväxt därmed kan spridas internt i ett väggparti.

För att kunna modellera värmeledningsförmågan med hjälp av datorprogrammet HEAT3, togs ett ekvivalent värde fram på lufthålens konduktivitet, vilket utgörs av en sammanvägning av luftens rena konduktiva egenskaper och energitransporten genom strålning. Denna förenkling och enkla uppskattning av energitransporten genom strålning och konduktion kan förväntas bidra till en högre osäkerhet som gör att modellens tillförlitlighet är lägre än vid vanliga modelleringsfall i HEAT3 då endast ren konduktion existerar. För bedömning av tillförlitligheten på den framräknade värmeledningsförmågan, föreslås att minst 1 kvadratmeter av materialet tillverkas och testas praktiskt för att verifiera och utvärdera modellens tillförlitlighet. Vidare bedöms värmeledningsförmågan vid testning behöva jämföras med testning av en lika stor

massiv träprovkropp av samma träslag, detta för att erhålla ett tillförlitligt relativt värde på hur mycket lägre värmeledningsförmågan faktiskt är för kompositmaterialet.

Vidare har inte kompositmaterialets fuktbetingade rörelser studerats, samt effekten av krypning. Detta bedöms behöva undersökas innan kompositmaterialet kan bedömas tillfullo vara lämpligt som byggnadsmaterial. Dock används element av KL-trä (likande byggnadsmaterial som kompositmaterialet) som väggpartier utan att svällning/krympning och krypning utgör ett problem av den grad att det kunnat identifieras vid genomförd litteraturstudie. Därmed förväntas vidare studier av dessa materialegenskaper inte resultera i att det signifikant ändrar kompositmaterialets förutsättning att kunna nyttjas till ytterväggskonstruktioner på de sätt och i den utsträckning som har presenterats i arbetet.

Större osäkerheter råder kring bedömningen att det som minst ska vara ett avstånd på 3,0 mm mellan de utborrade hålen i hålstrukturen, samt att motsvarande skivtjocklek på de mellanliggande skivorna måste vara minst 2,0 mm. Om avståndet mellan hålen i hålstrukturen kan minskas, alternativt att en större håldiameter kan nyttjas, kommer kompositmaterialets  $\lambda$ -värde att minska, vilket är eftersträvänsvärt. Ett minsta avstånd på 3,0 mm mellan hålen är dock godtyckligt bestämt och kan i praktiken behöva ökas något, vilket skulle leda till ett högre  $\lambda$ -värde. Denna förändring förväntas dock inte ge upphov till en större skillnad på kompositmaterialets  $\lambda$ -värde. Ännu större osäkerhet råder kring bedömningen att en tjocklek på 2,0 mm måste kvarstå av träskivorna under den försänkta hålstrukturen, vilket resulterar i de indirekta mellanliggande skivorna som både gör hålstrukturen sluten och som ger kompositmaterialet dess bärande egenskaper. Om denna tjocklek kan minskas, kommer  $\lambda$ -värdet även att bli lägre. Detta sker dock på bekostnad av en lägre bärförmåga. Om tjockleken istället måste ökas, kommer  $\lambda$ -värdet även att bli högre, detta samtidigt som bärförmågan oavsiktligt ökas för kompositmaterialet, vilken redan har en bedömd fullgod bärförmåga. För att kunna utreda om dessa ansatta minimiavstånd och minimitjocklekar är lämpligt valda, behövs ett flertal prototyper av kompositmaterialet tillverkas och utvärderas praktiskt där dessa parametrar varierar.

Avslutande konstateras att ingen utvärdering av miljöaspekter eller potentiell fördel för klimatet genom minskade utsläpp av koldioxid vid nyttjande av kompositmaterialet har studerats. Arbetet har avgränsats till att enbart studera kompositmaterialets bärande och isolerande förmåga då fuktrelaterade risker beaktas. Detta som ett första skede för att utvärdera om vidare och mer noggrannare analyser av kompositmaterialet är resursmässigt rättfärdigade att genomföra eller om utvecklandet av kompositmaterialet skulle visa sig vara en återvändsgränd då isoleringsförmågan eller bärförmågan skulle visa sig vara otillfredsställande för att kunna ersätta dagens ytterväggskonstruktioner. Vid vidare analyser av kompositmaterialet måste resursåtgången kopplad till kompositmaterialet också studeras. Energiåtgången vid tillverkning kan förväntas bli hög då cirka 23 000 hål per kvadratmeter måste borraras ut, samt då cirka 50% av materialet i träskivorna blir till spillmaterial. Miljöeffekten av den mängden lim som går åt måste även beaktas. På grund av det tänkbara stora energibehovet kan klimatnyttan helt gå om intet om produktionen inte sker med förnyelsebara tillgångsslag.

## 7 Slutsats

Optimeringen och utvärderingen av kompositmaterialets utformning med hänsyn till bärförmåga, fuktrelaterade risker och värmeledningsförmåga, bedöms ha genomförts på ett tillfredställande sätt inom ramen för arbetets avgränsning, där arbetet kan betraktas som en förstudie som utreder kompositmaterialets teoretiska möjligheter. Preliminärt bedöms kompositmaterialets utformning ge en tillfredställande bärförmåga, isoleringsförmåga och goda egenskaper utifrån ett fuktsäkerhetsperspektiv. Vidare studier inom respektive område bedöms behöva göras innan en säker bedömning av kompositmaterialets lämplighet som byggnadsmaterial kan genomföras. Vidare analyser av fuktrelaterade risker samt kompositmaterialets värmeledningsförmåga förväntas inte resultera i större avvikelser från de resultat som presenterats i rapporten. Osäkerheten kring bärförmågan bedöms vara större och en kraftig sänkning av kompositmaterialets bärförmåga kan vara ett möjligt utfall efter en mer omfattande analys. Dock förväntas det åtminstone finns en bärförmåga för motsvarande ett par våningsplan. Kompositmaterialets bärförmåga kan ökas vid behov genom att göra de vertikala mellanliggande skivorna tjockare, vilket dock sker på bekostnad av kompositmaterialets isolerande förmåga.

För en ytterväggskonstruktion bestående enbart av den föreslagna utformningen på kompositmaterialet med en väggjocklek på 400 mm, motsvarar det en isoleringsförmåga på 250 mm cellplast med  $\lambda$ -värdet 0,038 W/(m·K). En isoleringstjocklek kring 200-270 mm bedöms vara vanligt förekommande vid nyproduktion. Därmed bedöms användandet av kompositmaterialet som ytterväggskonstruktion inte resultera i en lägre isoleringsförmåga relativt till dagens standardkonstruktioner vid en likvärdig väggjocklek. Vidare motsvarar 400 mm av kompositmaterialet bärförmågan på upp till 240 mm tjocka element av KL-trä och förväntas därmed kunna nyttjas till flervåningshus, vilka vanligen bedöms utformas med en 150-200 mm tjock bärande stomme i exempelvis KL-trä eller i betong. En praktisk bärförmåga likt motsvarande 120-160 mm KL-trä bedöms dock vara mer trolig vid en väggjocklek på 400 mm bestående av kompositmaterialet.

Slutsats dras att träkompositmaterialet kan förväntas ha en praktisk tillämpning och kunna nyttjas i byggsektorn utan att det görs avkall på bärförmåga, isoleringsförmåga eller fuktsäkerhet vid en bibehållen väggjocklek. Vidare förväntas ytterväggskonstruktioner av kompositmaterialet potentiellt vara både mer klimatsmarta och mer förnyelsebara än de alternativ som idag nyttjas vid nyproduktion. Då tillverkningen av kompositmaterialet bedöms vara väldigt resurskrävande måste klimatnyttan studeras i detalj innan någon säker slutsats kan dras om ytterväggskonstruktioner av kompositmaterialet leder till ett mer klimatsmart byggande. Därmed bedöms vidare praktiska tester av värmeledningsförmågan, en noggrannare analys av bärförmågan, samt en utvärdering av klimatpåverkan vid användandet av kompositmaterialet vara rättfärdigade och relevanta att genomföra för att klarlägga kompositmaterialets verkliga potential och påverkan.



## Referenser

Arfvidsson, J; Harderup, L.E, Samuelson, I. (2017). *Fukthandbok*. Halmstad: Bulls graphics.

Blomberg, T. (2001). *HEAT3. A PC-program for heat transfer in three dimensions. Manual with brief theory and examples.*

[http://www.buildingphysics.com/manuals/HEAT3\\_4.pdf](http://www.buildingphysics.com/manuals/HEAT3_4.pdf)

Buildingphysics (2021). *HEAT3 – Heat transfer in three dimensions.*

[HEAT3 – Heat transfer in three dimensions – Buildingphysics.com](https://www.buildingphysics.com/HEAT3-Heat-transfer-in-three-dimensions) [2021-12-21]

Burström, PG. (2007). *Byggnadsmaterial, kapitel 4, 18, 22 och 24*. Lund: Studentlitteratur.

Isaksson, T; Mårtensson, A. (2017). *Byggkonstruktion: Regel och formelsamling*. Lund: Studentlitteratur.

Isotimber (u.å.). *Prefabricerade väggar av trä*. [Prefabricerade väggar av trä - IsoTimber Byggsystem](#) [2021-12-02]

IVA (2020). *Trä – hur kan det bidra till ett hållbart samhälle?*. [Trä – hur kan det bidra till ett hållbart samhälle? - IVA](#) [22-05-10]

Jones, R; Shmulsky, DJ. (2019). *Forest Products and Wood Science: An Introduction, Seventh Edition, Chapter 2-5*.

Rivera-Salinas, J-E; Gregorio-Jáuregui, K-M; Fonseca-Florido, H-A; Ávila-Orta, C-A; Ramírez-Vargas, E; Romero-Serrano, J-A; Cruz-Ramírez, A; Gutierrez-Pérez, V-H; Olvera-Vazquez, S-L; Rosales-Marineet, L. (2021). *Numerical Study Using Microstructure Based Finite Element Modeling of the Onset of Convective Heat Transfer in Closed-Cell Polymeric Foam*.

Sandin, K. (2010). *Praktisk byggnadsfysik*, Lund: Studentlitteratur.

Skogskunskap (2020). *Virkesegenskaper och tillredning*. [Virkesegenskaper och tillredning - Skogskunskap](#) [2021-12-06]

Stora Enso (2019). *LVL (Laminated Veneer Lumber)*. [stora-enso-epd-lvl.pdf \(storaenso.com\)](#) [2022-01-28]

SkogsSverige (2021). *Fakta om skog*. [Fakta om skog | SkogsSverige](#) [2021-12-03]

Svenskt Trä (2017). *KL-trähandbok, kapitel 1-3*.

Svenskt Trä (2019). *Dimensionering av träkonstruktioner, del 1, kapitel 2*.

Svenskt Trä (2020a). *Mikroorganismer*. [Mikroorganismer - TräGuiden \(traguiden.se\)](https://traguiden.se) [2022-01-05]

Svenskt Trä (2020b). *Värmeegenskaper*. [Värmeegenskaper - TräGuiden \(traguiden.se\)](https://traguiden.se) [2021-12-03]

Svenskt Trä (2021a). *Egenskaper hos barrträ*. [Egenskaper hos barrträ - Svenskt Trä \(svenskttra.se\)](https://svenskttra.se) [2021-12-03]

Svenskt Trä (2021b). *Konstruktionsvirke*. [Konstruktionsvirke - TräGuiden \(traguiden.se\)](https://traguiden.se) [2021-12-08]