CHALMERS

Hantering av säsongsvarierande lufttäthet i korslimmade trähus

En undersökning av tätningslösningar
och deras beständighet mot fuktpåverkan

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

JENNY ANDERSSON
DANIEL ARVIDSSON
GUNNAR BERGSTRÖM
EMIL HULTBERG
ELIN NILSSON

Institutionen för arkitektur & samhällsbyggnadsteknik, avdelningen för byggnadsteknologi
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2019
Kandidatarbete ACEX10-19-13

KANDIDATARBETE ACEX10-19-13

Hantering av säsongsvarierande lufttäthet i korslimmade trähus

En undersökning av tätningslösningar och deras beständighet mot fuktpåverkan

JENNY ANDERSSON
DANIEL ARVIDSSON
GUNNAR BERGSTRÖM
EMIL HULTBERG
ELIN NILSSON

CHALMERS

Institutionen för arkitektur & samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2019

Hantering av säsongsvarierande lufttäthet i korslimmade trähus
En undersökning av tätningslösningar och deras beständighet mot fuktpåverkan

JENNY ANDERSSON
DANIEL ARVIDSSON
GUNNAR BERGSTRÖM
EMIL HULTBERG
ELIN NILSSON

© JENNY ANDERSSON, DANIEL ARVIDSSON, GUNNAR BERGSTRÖM, EMIL HULTBERG, ELIN NILSSON, 2019.

Handledare: Paula Wahlgren, Chalmers
Handledare: Fredrik Domhagen, Chalmers
Examinator: Mihail Serkitjis, Chalmers

Kandidatarbete ACEX10-19-13
Institutionen för arkitektur & samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Sammanfattning

Att bygga i trä har länge varit vanligt i så väl Sverige som i resten av världen. Trä är ett material som har mindre miljöpåverkan än till exempel betong och stål vilket gör att ökad användning av trä som byggnadsmaterial kan ge ett viktigt bidrag till arbetet för hållbar utveckling av samhället. Utvecklingen av det relativt nya byggnadsmaterialet korslimmat trä (KL-trä) har på senare år lett till ett ökat intresse för att bygga i trä då materialet möjliggör att nya byggnader utförs i trä, som till exempel höghus. En utmaning med att bygga i trä är dock de dimensionsförändringar som sker till följd av varierande fuktförhållanden hos omgivningen.

I detta kandidatarbete undersöks hur korslimmat trä påverkas av varierande fuktförhållanden, hur detta påverkar materialets dimensioner och vilka effekter det har på lufttätheten i de konstruktioner som materialet ingår i. Arbetet undersöker även de metoder som idag används för att täta springor i konstruktioner av KL-trä.

Genom analys av typiska situationer där KL-plattor möts, i kombination med metoder för beräkning av fuktberoende dimensionsförändringar i trä och luftflöden genom springor, görs uppskattningar av vilka luftflöden som kan uppstå till följd av att KL-plattor krymper när de torkas ut. Resultatet beror på vilken specifik konstruktion det handlar om samt vilka specifika fuktförhållanden som råder men analysen visar att krympning av KL-trä kan ge upphov till ansenliga luftflöden genom springor i en byggnad under vanliga svenska klimatförhållanden. Den största delen av krympningen bedöms dock inträffa i uttorkningsfasen, med ytterligare mindre variationer över året. Förekomsten av kraftiga krympningar motiverar att fokus bör läggas på att täta springor.

För att undersöka beständighet hos de tejper som används för att täta springor utförs experiment där bitar av KL-trä tejpas i olika konfigurationer och sedan placeras i en klimatkammare där fuktförhållanden varieras periodiskt. Testerna visar att tejperna, trots deras påstådda beständighet, är känsliga för att fuktas och torkas växelvis. Så länge tejpen sitter plant mot ett rent underlag påverkas den inte nämnvärt men så fort tejpens lim exponeras för luften, i till exempel veck eller springor, blir den känslig för fukt. Det framkommer också att appliceringen av tejpen är komplicerad och att det är många faktorer som måste stämma för att konstruktionen med tejp ska vara beständig.

Nyckelord: Trä, KL-trä, CLT, dimensionsvariationer, fukt, luft, lufttäthet, tejp

Managing seasonal variations in airtightness in CLT structures
An examination of air-proofing solutions and their moisture resistance
JENNY ANDERSSON, DANIEL ARVIDSSON, GUNNAR BERGSTRÖM, EMIL HULTBERG, ELIN NILSSON
Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Building Technology
Chalmers University of Technology

Abstract

For a long time, wood has been used as a construction material in both Sweden and the rest of the world. As wood has less environmental impact than concrete and steel, increasing its use in construction can play a part in achieving a sustainable society. In recent years, interest in wood construction has risen due to the development of a new material called Cross-laminated timber, or CLT for short. The properties of CLT allow it to be used in structures that could previously not be built using wood, like high-rise buildings or bridges. A complicating factor is the fact that wooden constructions are always greatly affected by varying moisture conditions in the surrounding environment.

This report examines how CLT is affected by varying moisture conditions, how this changes the dimensions of the material and what effect this has on the airtightness of CLT structures. The report also examines what methods are used today to seal resulting spaces between CLT plates.

By analyzing which specific connections between CLT plates are prone to develop air leaks, combined with methods for calculating moisture-dependent dimensional variations in wood as well as air flow through slots, estimates are made on how large the resulting air flows might be when CLT plates shrink as they dry out. The results depend on the specifics of the structure as well as the indoor moisture conditions. For a typical structure exposed to a typical Swedish climate, the shrinking of CLT plates can lead to significant increases in air leakage through the resulting gaps between the plates. However, the majority of shrinkage is likely to occur in the drying-out phase following construction, with smaller seasonal variations. The presence of significant gaps in the structure warrants a focus on efficient and stable sealing techniques.

To examine the long-term stability and function of the adhesive tapes that are commonly utilized to air seal structures, samples of the tapes were applied to a set of CLT assemblies which were then placed in an environmental chamber where they were exposed to varying moisture conditions. The tests show that despite their stated 50 year service life, the tapes are susceptible to damage from being moistened and dried repeatedly. As long as the tapes are applied evenly on a clean surface they are not noticable harmed but as soon as the glue is exposed to air in places like folds or cracks, it's vulnerable to damage from moisture. The tests also show that succesful application of adhesive tape is complicated and reliant on many different factors.

Keywords: Wood, CLT, moisture, air, airtightness, tape, adhesive tape

Innehåll

Sida

1 Inledning **1**
- 1.1 Bakgrund . . . 1
- 1.2 Syfte och mål . . . 1
- 1.3 Avgränsningar . . . 2
- 1.4 Metod . . . 2
- 1.5 Arbetets disposition . . . 2

2 Trä som byggnadsmaterial **4**
- 2.1 Materialegenskaper . . . 4
- 2.2 Trä ur ett hållbarhetsperspektiv . . . 5

3 Korslimmat trä **7**
- 3.1 Tillverkning . . . 7
- 3.2 Materialegenskaper . . . 8
- 3.3 Användningsområden . . . 9

4 Fukt i trä **10**
- 4.1 Klimatets påverkan på trä . . . 10
- 4.2 Väderskydd . . . 11

5 Luftströmning och lufttäthet **13**
- 5.1 Drivkrafter och luftflöden . . . 13
- 5.2 Utvärdering av läckage . . . 14
- 5.3 Krav och riktlinjer på lufttäthet . . . 14
- 5.4 Förutsättningar för god lufttäthet . . . 14

6 Konsekvenser av bristande lufttähet **15**
- 6.1 Ökad energianvändning . . . 15
- 6.2 Bristande termisk komfort . . . 15
- 6.3 Fuktskador . . . 15
- 6.4 Försämrad luftkvalité . . . 15
- 6.5 Höga radonhalter . . . 16
- 6.6 Brand- och ljudspridning . . . 16

7 Klimatrespons i KL-trä **17**
- 7.1 Dimensionsvariationer i KL-trä . . . 17
- 7.2 Anslutningar . . . 19
- 7.3 Uppskattning av lufttäthetsvariationer . . . 20
- 7.4 Tätning . . . 24

8 Undersökning av tejpers fuktkänslighet **27**
8.1 Bakgrund och antaganden 27
8.2 Experimentuppställning 30
8.3 Resultat och diskussion 35

9 Diskussion **41**
9.1 Allmänt 41
9.2 Samhälleliga och etiska aspekter 42
9.3 Behov av ytterligare kunskap och förslag på framtida problemställningar 43

10 Slutsatser **44**

11 Referensförteckning **46**

1 Inledning

På senare år har användandet av korslimmat trä, förkortat KL-trä, ökat i stort sett hela världen. Denna utveckling medför möjligheten att bygga fler konstruktioner i trä än tidigare har varit möjligt, då materialet har goda hållfasthetsegenskaper och är lätthanterligt. En begränsande faktor vid bygge av träkonstruktioner är träets fuktkänslighet som kan leda till försämrade egenskaper hos materialet.

Nedan följer en bakgrundsbeskrivning till byggmaterialet trä och KL-trä. Därefter följer en beskrivning av hur studien ska genomföras samt dess mål.

1.1 Bakgrund

Trä har historiskt sett varit en viktig del av svensk byggnadsindustri och har i många århundraden använts som byggnadsmaterial (Burström, 2007). Materialet är en förnyelsebar råvara då det ingår som en naturlig del av det ekologiska kretsloppet och binder koldioxid under hela sin livslängd (Svenskt trä, u.å b). Trä är ett lätt material med hög hållfasthet i förhållande till sin vikt och är enkelt att bearbeta i jämförelse med andra byggmaterial (Burström, 2007). En faktor som försvårar användandet av trä är dess förmåga att genomgå dimensionsförändringar som följd av varierande fuktförhållanden hos omgivningen. Detta kan påverka byggnadens lufttäthet vilket i sin tur kan leda till ökade värmeförluster, minskad termisk komfort och fuktskador. Frågan om lufttäthet är viktig då förekomsten av passivhus, lågenergihus och plushus ökar. Andra utmaningar med att bygga hus i trä är röta, brandrisk och förmågan att uppfylla gällande ljudkrav (Svenskt trä, 2017a).

Under de senaste åren har användningen av byggmaterialet KL-trä ökat i Europa (Svenskt trä, 2017a). Denna träteknik kom till Sverige på 1990-talet men först 2006 färdigställdes ett större projekt byggt med KL-trä. Sedan dess har utvecklingen gått framåt och allt fler objekt byggs med materialet. Generellt kan KL-trä beskrivas som korsvis lagda skivor av massivträ som limmats samman. Konstruktionen ger ökad formstabilitet och är lämpligt för en mängd användningsområden, exempelvis som bärande delar i stommar och som planelement.

1.2 Syfte och mål

Syftet och målet med projektet är att i största möjliga mån utreda och beskriva hur KL-trä påverkas av varierande fuktförhållanden som kan leda till luftläckage. Vidare skall arbetet beskriva hur god lufttäthet uppnås generellt samt utforska och utreda hur stora variationer som kan förväntas uppträda över året i specifika konstruktionsdetaljer där KL-trä ingår. Målet är även att undersöka, med utgångspunkt i insamlad kunskap om befintliga lösningar, vilka strategier och metoder som finns för att täta dessa otätheter.

1.3 Avgränsningar

Utredningen kommer behandla korslimmade träelement och konstruktionsdetaljer där de ingår. De klimatförhållanden som betraktas är de som gäller i Sverige. För specifika värden kommer platsen att väljas till Göteborg.

Projektets syfte är inte att göra en fullständig fysikalisk analys av dimensionsförändringar i KL-trä, då ämnet är mycket komplext. Förenklingar och approximationer kommer att användas. Endast stationära förhållanden kommer att betraktas vid analys av fuktförhållanden. Ojämn svällning och krympning med medföljande inre spänningar kommer endast att betraktas översiktligt.

1.4 Metod

Arbetet baseras främst på en **sammanställning av befintlig kunskap**. Genom inläsning på området läggs en grund för en omfattande bakgrund- och problembeskrivning. Med hjälp av databassökningar där lämpliga sökord används erhålls relevanta vetenskapliga publikationer. Dessa publikationer bearbetas och analyseras. Som komplement till vetenskapliga publikationer används även läroböcker i litteraturstudien.

För att förutsäga storleksordningen på deformationer i träet samt för att få en bild av vilka fuktbelastningar det kan utsättas för när det sätts in i en vägg görs **beräkningar**. För att bestämma temperatur, ånghalt och relativ fuktighet för KL-element används fukt- och värmesimuleringsprogrammet WUFI som visar hur dessa parametrar varierar till följd av skiftande klimat.

Mätningar utförs för att utforska eller verifiera intressanta ideér som är relevanta för projektets ändamål. Utformningen av dessa experiment styrs av praktiska faktorer som tidsutrymme och plats- och materialtillgång. Målet är att göra experiment på KL-trä under varierande klimatförhållanden för att studera dimensionsförändringar eller för att undersöka och utvärdera specifika lufttäthetslösningar. Vilka experiment som är praktiskt tillämpliga avgörs av vilka byggnadsfysikaliska analyser som författarna har förmåga att genomföra, då ämnet lätt kan bli komplext.

För få ökad förståelse för hur KL-trä tillverkas och används görs **platsbesök** hos Lindbäcks Byggs fabrik i Piteå och Martinsons Träs fabrik i Bygdsiljum. Ytterligare ett platsbesök hos RISE görs för att få en uppfattning om hur ett *blower door*-test går till. Testet syftar till att mäta lufttätheten i en byggnad.

1.5 Arbetets disposition

Arbetets efterföljande innehåll delas in i två huvuddelar, en teoridel (kapitel 2-7) och en del som beskriver utförda experiment och beräkningar (kapitel 8-9).

- Kapitel 2 beskriver trä som byggnadsmaterial.

- Kapitel 3 beskriver KL-trä i allmänhet och som byggnadsmaterial.
- Kapitel 4 beskriver hur trä i allmänhet påverkas av fukt och vilka dimensionsförändringar det leder till.
- Kapitel 5 handlar om luftflöden, vilka krav som ställs på lufttäthet och hur dessa kan uppnås.
- Kapitel 6 beskriver konsekvenserna av bristande lufttäthet.
- Kapitel 7 beskriver hur KL-trä specifikt påverkas av fukt och vilka dimensionsförändringar det leder till. Kapitlet utforskar också vilka konstruktionsdetaljer som är mest känsliga för dimensionsförändringar samt bedömmer hur stora skillnader i luftflöde som kan orsakas av dessa förändringar. Vidare undersöker kapitlet vilka metoder som finns för att täta springor i skarvar och anslutningar, och hur beständiga dessa lösningar är.
- Kapitel 8 beskriver experiment utförda av författarna för att undersöka beständigheten hos tejp som används för tätning av springor i huskonstruktioner.
- Kapitel 9 diskuterar arbetets innehåll.
- Kapitel 10 presenterar utredningens slutsatser.

2 Trä som byggnadsmaterial

Som tidigare nämnts är trä troligen det byggnadsmaterial som har de äldsta traditionerna i Sverige (Burström, 2007). Idag innefattar materialet ett brett användningsområde inom bland annat stomkonstruktioner, ytter- och innerväggsbeklädnad, golvbeläggningar och inredning. På grund av träets skiftande ändamål sorteras och klassas materialet i olika kvaliteter med hänsyn till hållfasthet och utseende.

Nedan följer en beskrivning av byggmaterialet trä, dess materialegenskaper samt en jämförelse med byggmaterialen stål och betong ur ett hållbarhetsperspektiv.

2.1 Materialegenskaper

Träets materialegenskaper bestäms till stor del av det växande trädets omgivande miljö och därför finns inga standardiserade värden på exempelvis densitet och hållfasthet (Al-Emrani, Engström, Johansson & Johansson, 2013). Det kan förekomma egenskapsvariationer inom samma träslag och på samma växtplats.

Träets uppbyggnad består av en central märg som omsluts av cellulosa, lignin och hemicellulosa (Al-Emrani et al., 2013). Ligninet och hemicellulosan bildar fibrer som tillsammans med cellulosakedjor utgör rörliknande strukturer vilket med andra ord är veden.

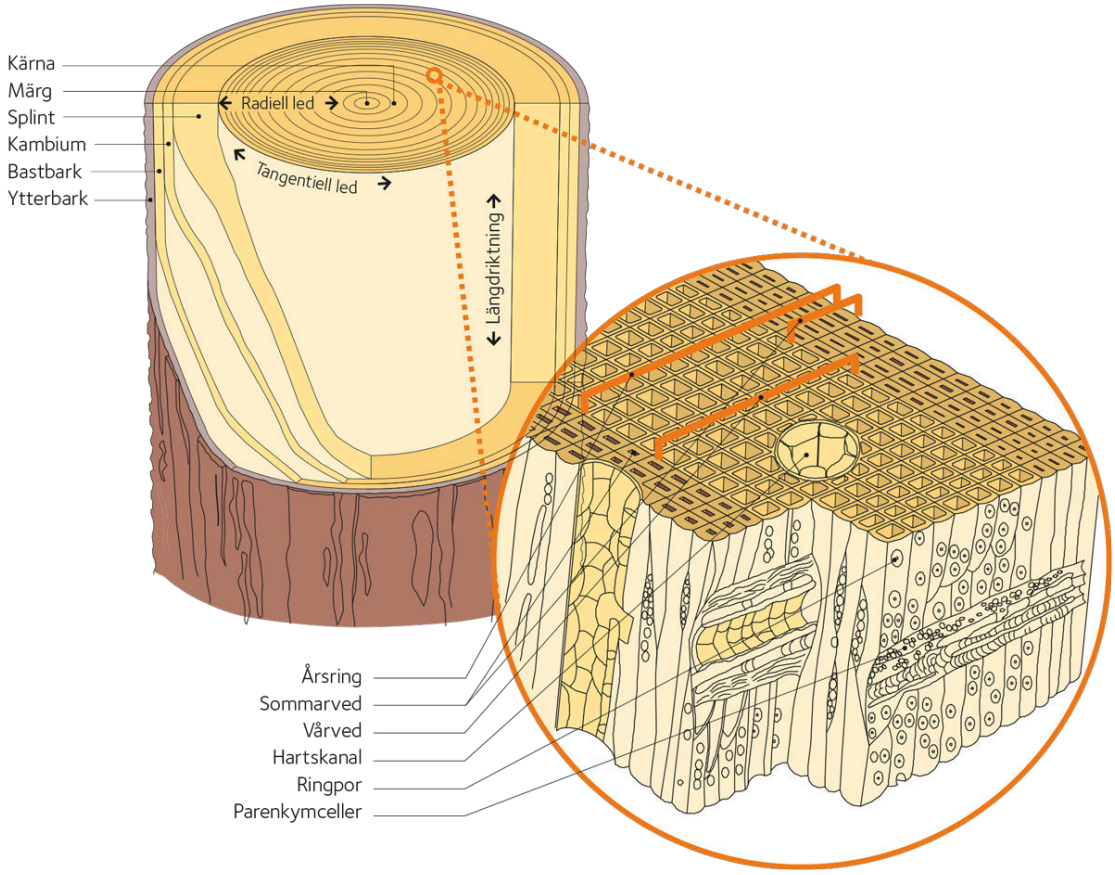
Träets uppbyggnad delas in i tre huvudled (Al-Emrani et al., 2013), se figur 1.

- Längdriktning - Även kallad fiberriktning, stammen och märgens längdriktning.
- Radiell led - Vinkelrätt mot längdriktningen och årsringarna.
- Tangentiell led - Vinkelrätt mot längdriktningen och parallellt med årsringarna.

Sammansättningen gör att trä har olika egenskaper i olika riktningar, materialet är med andra ord anisotropt (Al-Emrani et al., 2013). Det kan demonstreras genom att jämföra träets tryckhållfasthet i längdriktning mot tryckhållfastheten vinkelrätt mot längdriktningen. Tryckhållfastheten i längdriktning för rent trä varierar mellan 70 till 90 MPa, jämfört med den maximala tryckhållfastheten vinkelrätt fibrerna som ligger runt 0,5 MPa.

I stammens tvärsnitt syns ljusa och mörka ringar som utgör trädets årsringar, (Svenskt trä, 2013). Ringarnas variation beror av det växlande klimatet under året. Under våren behöver trädet en struktur som underlättar vattentransporten. Det bildas då celler med tunna cellrum och stora cellhålrum i mitten vilket är optimalt för ändamålet. Detta kallas vårved och visas som de ljusa ringarna i tvärsnittet. På sommaren är behovet av vattentransport i trädet mindre och behovet av skydd mot yttre belastningar såsom vind och snö är större. Det bildas då celler med tjockare

cellväggar och mindre hålrum. Uppbyggnad kallas sommarved och visas som de mörka ringarna i tvärsnittet, se figur 1. Andelen sommarved i ett träd är betydande för virkets egenskaper, speciellt hållfastheten då tjockare cellväggar ger högre hållfasthet.



Figur 1: Stammens uppbyggnad och fiberriktningar (Svenskt trä, 2003). Återgiven med tillstånd.

2.2 Trä ur ett hållbarhetsperspektiv

Trä är förnybart och därmed finns miljöfördelar i jämförelse med andra byggnadsmaterial som produceras av ändliga råmaterial, såsom stål och betong (Svenskt trä, u.å c).

Byggsektorn står inför utmaningar när det gäller att minska koldioxidutsläppen varför materialvalet kan vara betydande vid energieffektiva och ekologiskt hållbara konstruktioner (Svenskt trä, u.å c). I tillverkningsprocessen för byggnadsmaterial är det bearbetning av materialet som kräver mest energi och bidrar till ökade koldioxidutsläpp (Rodrigues, Martins, Nunes, Quintas Caetano, 2018). För att tillverka byggmaterialen metall och betong krävs mer bearbetning än vad det gör vid tillverkning av trä.

Vid produktion används biprodukter från trätillverkning till att producera energi (Svenskt trä, u.å c). Det bidrar till att tillverkningsprocessen av trä kräver lite tillförd energi då den mesta energin kommer från tillverkningens egna biprodukter. Energianvändningen på Sveriges sågverk utgörs till 80 procent av biobränsle som omvandlats från de egna biprodukterna, såsom spån och bark.

3 Korslimmat trä

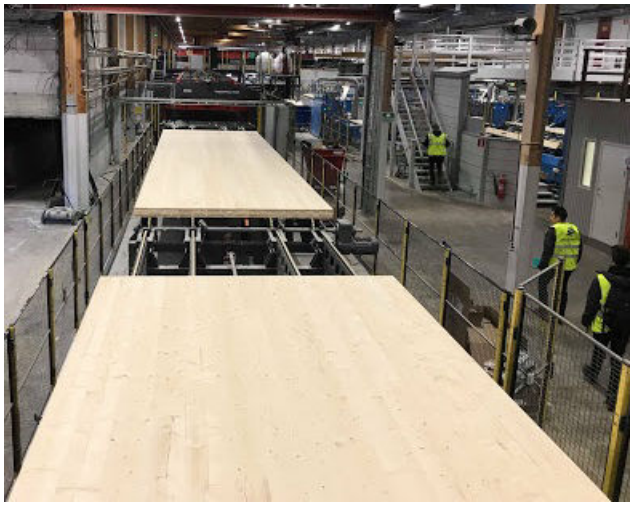
KL-trä kan beskrivas som massiva träelement uppbyggda av korsvis limmade brädor (Svenskt Trä, 2017a). Som tidigare nämnts är KL-trä ett relativt nytt byggmaterial, men har under senaste årtiondet börjat användas i allt större utsträckning.

Vidare i kapitlet följer en beskrivning av tillverkningsprocessen, materialegenskaper samt användningsområden.

3.1 Tillverkning

Eftersom trä produceras av naturen ser produktionen och tillverkningen av trä annorlunda ut i jämförelse med andra byggnadsmaterial (Svenskt trä, u.å a). Efter att trädet fällts kapas stammen oftast in i rotstock, mellanstock och toppstock och transporteras till ett av Sveriges 140 sågverk. Där används olika sönderdelningsmetoder för att dela upp stammen i plank och brädor.

Brädorna kan i sin tur användas för att tillverka KL-trä och i Sverige används normalt sett virke av gran eller furu (Svenskt Trä, 2017b). Hyvlade brädor läggs sida vid sida och limmas ihop i lager, under tryck, där vartannat lager korsläggs i 90 graders vinkel och därmed bildar ett massivt träelement. Dessutom ordnas plankorna så att varannan planka läggs med kärnan uppåt och varannan med kärnan nedåt, se figur 3. Dessa moment görs för att få en ökad stabilitet och en ökad bärförmåga hos träet, samt för att egenskaperna ska vara likvärdiga genom hela elementet (Brandner, Flatscher, Ringhofer, Schickhofer Thiel, 2016). Antalet lager kan skifta från 3-11 st, där det vanligaste är tre lager för innerväggar och fem lager för bärande väggar eller bjälklag.



Figur 2: Tillverkningsband i Martinsons KL-träfabrik. Författarnas egen bild.

Figur 3: KL-element i fabrik. Författarnas egen bild.

Utvecklingen av KL-trä tog ordentlig fart i slutet av 1990-talet då Österrike hade en betydande roll för framställning och användande, men idag finns ett växande intresse för materialet även i Sverige (Brandt, 2015). I dagsläget finns endast en tillverkare av KL-trä i Sverige, Martinsons, som under ett år tillverkar cirka 7500 kubikmeter (Brandt, 2015).

Det finns vissa moment som kan variera vid tillverkningen av KL-trä, exempelvis antalet träskikt samt hur plankorna limmas (Svenskt Trä, 2017a). Vissa tillverkare väljer att endast limma mellan skikten medan andra väljer att även limma mellan brädorna inom skikten. KL-trä består av minst tre skikt, men beroende på tillverkare och användningsområde kan det bestå av många fler skikt.

3.2 Materialegenskaper

KL-trä har flera egenskaper som gör det till ett mångsidigt byggmaterial (Svenskt Trä, 2017b). Vid korslimningen läggs träets fibrer i olika riktningar på ett ordnat sätt vilket leder till hög hållfasthet i förhållande till dess låga vikt (Brandner et al., 2016). Materialet har även flera andra positiva egenskaper som god formstabilitet, god bärförmåga vid brand samt god isoleringsförmåga (Svenskt Trä, 2017b). Dock finns i KL-trä precis som i andra trämaterial en risk för egenskapsvariationer, samt en risk för svällning och krympning, men detta kan i viss mån begränsas tack vare KL-träets korslagda uppbyggnad. Risker som röta eller mögelpåväxt kvarstår.

Vid produktion av KL-trä kan elementen anpassas på många olika sätt som till och med gör det möjligt att tillverka krökta ytor (Svenskt Trä, 2017b). Vidare beskrivs att KL-träets låga egenvikt leder till sänkta kostnader för transport, samt en enkel och snabb monteringsprocess.

3.3 Användningsområden

KL-trä har ett brett användningsområde inom byggande och materialet kan i många fall med fördel ersätta betong. KL-trä kan exempelvis användas till stommar i form av bärande väggar och bjälklag, men det fungerar även till innerväggar (Svenskt Trä, 2017b). KL-trä har med goda framgångar använts till trapphus, hisschakt och balkonger. Ett annat exempel på användningsområde är parkeringshus, där KL-trä kan användas till bjälklag samt till ramper. Numera byggs även höga byggnader i trä tack vare KL-träets goda bärförmåga.

Figur 4: KL-träelement i café SMAK på Chalmers tekniska högskola. Författarnas egen bild.

4 Fukt i trä

Träets fuktinnehåll har en betydande inverkan på materialets övriga egenskaper (Al-Emrani et al., 2013). Uttorkning leder till krympning hos träet och ett ökat fuktinnehåll leder till svällning samt sjunkande hållfasthet och elasticitetsmodul. Fuktkvoten är ett mått på hur mycket fukt ett material innehåller och beräknas genom att dividera det förångningsbara vattnets vikt med materialets torrvikt (Burström, 2007). Fuktkvoten hos nysågat virke ligger mellan 30 och 160 procent. För att undvika att virket tappar i kvalité vid lagring och angrips av mikrobiell påväxt torkas det till målfuktkvot 16 procent (Svenskt trä, u.å a). Denna målfuktkvot kan dock variera bland sågverken beroende på den kommande slutanvändningen hos virket. Nedan följer en beskrivning gällande klimatets påverkan på trä samt hur fukt kan undvikas vid montering.

4.1 Klimatets påverkan på trä

Luft innehåller alltid fukt i form av vattenånga. Mängden fukt i luften betecknas vanligtvis som ånghalt, v [g/m^3] (Petersson, 2018). Mängden fukt som luften kan bära kallas mättnadsånghalt v_s [g/m^3] och beror på luftens temperatur. Ju högre temperatur luften har, desto mer fukt kan den innehålla. När ånghalten når mättnadsånghalten har luften uppnått sin maximala fuktlagringskapacitet och eventuella fukttillskott kommer att kondensera.

Den relativa fuktigheten, RF, definieras som förhållandet mellan den rådande ånghalten och mättnadsånghalten enligt RF=$v/v_s \cdot 100$ [%] . Vid en viss konstant ånghalt är den relativa fuktigheten och temperaturen omvänt proportionerliga, alltså ger högre temperatur ett lägre RF och vice versa (Burström, 2007).

Ånghalten i uteluften varierar med årstiderna i Sverige (Burström, 2007). På sommaren är ånghalten högre än på vintern. När uteluften förs in i en byggnad kommer ånghalten i luften att vara avsevärt mycket lägre på vintern än på sommaren. Eftersom inomhustemperaturen hålls konstant under året kommer uteluften behöva värmas upp kraftigt på vintern, vilket enligt tidigare beskrivna samband kommer leda till en kraftig sänkning av dess relativa fuktighet. Detta är anledningen till att människor ofta upplever att luften är torr inomhus under vintern.

För att ange mängden fukt i ett material används antingen fuktkvot u [kg/kg],[%] eller fukthalt w [kg/m^3] (Petersson, 2018). Mängden fukt i ett material är direkt kopplat till den relativa fuktigheten i den miljö materialet befinner sig i. Detta beror på att fukt kondenseras och fäster på ytor i materialet i en process som kallas sorption (Burström, 2007). När materialet sätts i kontakt med en miljö med högre relativ fuktighet vill materialet ställa sig i jämvikt med denna genom att vattenmolekyler absorberas på ytor inne i materialet. Ju högre relativ fuktighet desto tjockare blir detta lager av vattenmolekyler. Den fukt som på detta vis tas upp från luften kallas för hygroskopisk fukt. När lagret av vattenmolekyler blir tillräckligt tjockt börjar det att bete sig som en vattenyta vilket möjliggör kapillärkondensation.

Trä som står i jämvikt med 100 % RF har en fuktkvot på ungefär 25-30 % (Burström, 2007).

Vid denna fuktkvot har allt fritt vatten i träets hålrum torkat bort, men cellväggarna är fortfarande helt vattenmättade. Detta kallas fibermättnadspunkten och är av stor betydelse. Över denna punkt leder ökad fukttillförsel inte till några förändringar av materialets storlek. Om fuktkvoten däremot minskar under denna nivå kommer även vattnet inne i cellväggarna att försvinna vilket kommer att leda till att materialet krymper.

Som nämnts tidigare är trä ett anisotropt material och har olika egenskaper i olika riktningar. Detta gäller även hur mycket materialet krymper eller sväller. Burström (2007) anger träets dimensionsändringar α_f [%] i olika riktningar vid en ändring av fuktkvot från helt uttorkat till fibermättnad:

- 0.2 - 0.6 % i fiberriktning
- 3.8 - 5.3 % i radiell riktning
- 6.9 - 10.9 % i tangentiell riktning
- 11.1 - 17.5 % i volym

För att beräkna krympningens storlek på grund av fuktkvotsändring kan följande formel användas

$$\Delta\alpha = \frac{u_2 - u_1}{u_f} \cdot \alpha_f \tag{1}$$

där u_2 och u_1 är de aktuella fuktkvoterna, u_f är fibermättnadspunkten och α_f är krympningen i en viss riktning från fuktmättat till helt uttorkat tillstånd.

4.2 Väderskydd

För att kunna kontrollera träets fuktinnehåll vid konstruktion av byggnader kan det vara bra att använda någon typ av väderskydd.

En åtgärd för att undvika fukt vid montering av prefabricerad KL-stomme på större byggarbetsplatser är att använda väderskydd i form av tält. Tälten är temporära konstruktioner som används för att skydda både arbetare och träelement från nederbörd. Det finns inga regelverk eller riktlinjer när det gäller att arbeta med väderskydd vid arbetsplatser, det är upp till beställaren och byggnadsentreprenören att bestämma hur de ska uppnå en fuktsäker byggprocess. I Svenska Boverkets Byggregler BBR står det i avsnitt 6:51 att “Byggnader ska utformas så att fukt inte orsakar skador, lukt eller mikrobiell tillväxt som kan påverka hygien eller hälsa.” (Boverket, 2011). Vidare definieras att “Byggnader, byggprodukter och byggmaterial bör under byggtiden skyddas mot fukt och mot smuts”. Här är montagetiden, produktionsmetoden samt prefabrikationsgraden faktorer som spelar in i val av väderskydd.

Åsikterna mellan olika aktörer går isär om väderskydd behövs vid montering av KL-element. Studier har visat att genom att använda väderskydd förbättras arbetsmiljön, genomförandetiden förkortas, uttorkningen går snabbare och materialspillet minskar (Soderlind, Axelson, Larsson, Rylander, 2006). Den stora nackdelen med väderskydd är kostnaden.

5 Luftströmning och lufttäthet

Luftomsättningen, det vill säga den mängd luft som byts ut i en byggnad över en viss tid, kan generellt sett delas in i två kategorier (Hagentoft, 2013). Den ena är avsiktliga luftflöden vilka huvudsakligen är ventilationsflöden. Dessa kan regleras efter behov. Den andra är oavsiktliga luftflöden som uppstår på grund av otätheter i byggnaden och som drivs på av olika fysikaliska fenomen. De oavsiktliga luftflödena kan inte regleras efter behov och det kan inte heller deras fukthalt eller temperatur. På grund av detta är målsättningen ofta att minimera det oavsiktliga luftflödet i så hög grad som möjligt. Trots detta är ingen byggnad helt tät utan de utsätts alltid för oavsiktlig luftgenomströmning i någon omfattning. Nedan redogörs för drivkrafter för luftströmning, hur läckage utvärderas samt förutsättningar för god lufttäthet.

5.1 Drivkrafter och luftflöden

Det finns två huvudsakliga drivkrafter för luftströmning genom en byggnads fasad (Hagentoft, 2013). Den ena är de tryckskillnader som kan uppkomma på grund av bland annat temperaturskillnader, ventilation eller den så kallade skorstenseffekten. Dessa är oftast inte större än ett par Pascal. Den andra drivkraften är mekanisk pådrivning av luftflöden som ger upphov till ett tryck mot fasaden. Den vanligaste orsaken till detta fenomen är vind.

När en fasad utsätts för vind uppstår ett övertryck mot den träffade fasaden och ett undertryck eller ett "sug" på sidorna och baksidan (Hagentoft, 2013). Det statiska trycket [Pa] mot en fasad till följd av vind kan beräknas med följande ekvation:

$$P_w = C_p \cdot \frac{\rho_a \cdot v^2}{2} \tag{2}$$

Där ρ_a [kg/m^3] är luftens densitet, v [m/s] är vindens hastighet och C_p [-] är en tabellerad korrektionsfaktor framtagen genom empiriska undersökningar i bland annat vindtunnlar. Denna faktor tar hänsyn till vilken fasad vinden träffar och med vilken infallsvinkel.

Oavsiktliga tryckskillnader i en byggnad kan uppstå på grund av skillnader mellan inne- och utetemperaturen. Detta leder till den så kallade skorstenseffekten (Hagentoft, 2013). När temperaturskillnader uppkommer i en byggnad leder det till flöden i vertikal led eftersom varm luft stiger. Effekten blir mer påtaglig ju högre byggnaden är och om det finns öppna schakt för luften att flöda igenom. Övertryck blir som störst längst upp i byggnaden och undertrycket störst längst ner. Det neutrala planet är den punkt där tryckskillnaden mellan inne- och uteklimatet är noll. Utifrån det neutrala planet kan tryckskillnaden [Pa] över fasaden till följd av skorstenseffekten beräknas vid olika höjder om skillnaden mellan ute- och innetemperaturen är känd. Följande formel används:

$$\Delta P_s = z \cdot 3456 \cdot \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) \tag{3}$$

där z [m] är avståndet till neutrala planet, T_e [K] är utetemperaturen och T_i [K] är innetemperaturen.

5.2 Utvärdering av läckage

En vanlig metod för att bestämma tätheten hos en existerande byggnad är ett så kallat *blower door*-test. Inför ett sådant test tätas först alla ingångsvägar för luft som inte skall vara med i undersökningen, som till exempel köksfläktar, vattenlås och ventilationsventiler. Sedan kopplas en fläkt till en av byggnadens dörrar för att skapa en känd tryckskillnad mellan inne- och uteklimatet (Southface Energy Institute, 2013). Genom att mäta flödet genom fläkten går det att avgöra den mängd genomströmmande luft som går genom byggnaden vid en viss tryckskillnad. Normalt brukar ett blower door-test göras med en tryckskillnad på 50 Pa, antingen över- eller undertryck. Detta är ett mycket stort värde då det är vanligare med en tryckskillnad på 4 Pa vid under driften av en byggnad. Det går att med relativt god noggrannhet förutsäga luftflödet vid lägre tryckskillnader när luftflödet vid 50 Pa är känt. Mätning vid 50 Pa ger dock större noggrannhet.

5.3 Krav och riktlinjer på lufttäthet

Det finns inga nationella regler för lufttäthet i byggnader utan det är upp till de enskilda kommunerna eller företagen att sätta upp vilka läckage som anses acceptabla. Generellt sätt så anses dock att vid en tryckskillnad på 50 Pa bör inte läckagen överskrida 0.8 l/s·m^2 för bostadshus, 0.6 l/s·m^2 för mindre bostadshus och 1.6 l/s·m^2 för andra utrymmen (Petersson, 2018).

5.4 Förutsättningar för god lufttäthet

För att uppnå god lufttäthet och för att uppfylla de krav som ställs gäller det att bygga ett lufttätt klimatskal. Eliasson (2010) har gjort en genomgång av existerande konstruktioner för att identifiera vilka faktorer som är avgörande för en byggnads lufttäthet.

Det tekniska utförandet är viktig för att åstadkomma god lufttäthet, men det är också essentiellt att fokus på lufttäthet finns med redan i planeringen, projekteringen och vidare i hela kedjan. De undersökta husprojekt där lufttätheten varit i fokus under hela projektets gång har överlag bättre värden för lufttäthet än de där frågan försummats. På samma sätt visar Eliasson (2010) att motivationen och erfarenheten hos dem som bygger har stor inverkan på hur god lufttäthet de lyckas uppnå. Kunskapen kanske saknas eller så är den som tätar inte motiverad att anstränga sig för att få till krångliga tätningar.

Vilka krav som ställs på konstruktionen är också avgörande. Som nämnts tidigare finns det inga specificerade krav på lufttäthet enligt Boverkets Byggregler, BBR (2011). Detta innebär att beställaren får ställa egna krav på luftläckage och se till att dessa uppfylls. Vid till exempel byggen av passivhus (krav på luftläckage lägre än 0,3 l/s·m^2, krävs att alla parter har fått utbildning och besitter den kunskap som krävs för att kunna utföra arbetet på rätt sätt.

6 Konsekvenser av bristande lufttähet

Enligt Sikander och Wahlgren (2008) kan problem som uppstår från bristande lufttäthet delas in i sex kategorier; ökad energianvändning, bristande termisk komfort, fuktskador, försämrad luftkvalité, höga radonhalter samt brand- och ljudspridning. Nedan följer en beskrivning av de nämnda problemen.

6.1 Ökad energianvändning

Ökad ventilation, minskad effektivitet hos värmeväxlaren och försämrad värmeisolering är exempel på hur energianvändningen kan öka till följd av otillräcklig lufttäthet (Sandberg, Sikander, Wahlgren och Larsson, 2007).

En ökad ofrivillig ventilation kräver i de flesta fall att en byggnad måste värmas upp extra för att behålla ett behagligt inomhusklimat, detta kräver energi och minskar således energieffektiviteten hos byggnaden (Sandberg et al., 2007).

Dålig lufttäthet och höga luftflöden kan leda till att värmeåtervinning av ventilationsluft inte fungerar effektivt vilket kan leda till förhöjd energianvändning (Sandberg et al., 2007). Energianvändningen i en byggnad kan även öka när värmemotståndet i isoleringen försämras, detta kan ske när en byggnadsdel innehållande isolering utsätts för blåst.

6.2 Bristande termisk komfort

Lufthastigheter och kalla ytor är faktorer som påverkar den termiska komforten och kan relateras till otätheter (Sandberg et al., 2007). Höga lufthastigheter i en byggnad på grund av luftläckage kan uppfattas som drag, det vill säga en lokal avkylning av kroppen som kan besvära. Luftläckage genom klimatskalet kan även leda till kalla ytor vilket kan uppfattas som obehagligt.

6.3 Fuktskador

Fuktskador kan uppstå i en byggnadskonstruktion till följd av fuktkonvektion (Sandberg et al., 2007). Fuktkonvektion innebär att varm fuktig luft transporteras via otätheter eller springor till kalla delar av konstruktionen och när temperaturen sjunker till daggpunkten kan fukten kondensera och orsaka allvarliga skador (Burström, 2007). Samma fenomen kan uppstå när varm uteluft tränger in i en kallare del av en konstruktion (Sandberg et al., 2007). För att fuktkonvektion ska uppstå krävs tre förutsättningar: lufttrycksskillnad, fukt i luft samt otätheter i konstruktionen. Lufttrycksskillnader finns alltid i någon del av en konstruktion, samma sak gäller fukt i luft. Att säkerställa lufttätheten i en byggnad är därför nödvändigt för att undvika fuktskador.

6.4 Försämrad luftkvalité

Uteluft som tränger in i en byggnad genom otätheter eller springor filtreras inte, till skillnad från luft som färdats in genom ett ventilationssystem med filter (Sandberg et al., 2007). Detta innebär

att tilluften för med sig sitt innehåll av partiklar och gaser in i en byggnad. Dessa föroreningar kan leda till att inomhusluftens kvalité försämras.

6.5 Höga radonhalter

Bristande lufttäthet kan även sprida markradon in i byggnader (Sandberg et al., 2007). Radon är en radioaktiv ädelgas som finns i stora delar av Sveriges mark och bildas efter radium sönderfaller. Markradon transporteras vanligtvis in i byggnader genom otätheter i grundkonstruktionen och kan i värsta fall kan leda till lungcancer. För att undvika förekomsten av radon i inomhusluften är det viktigt att bygga tätt mot mark.

6.6 Brand- och ljudspridning

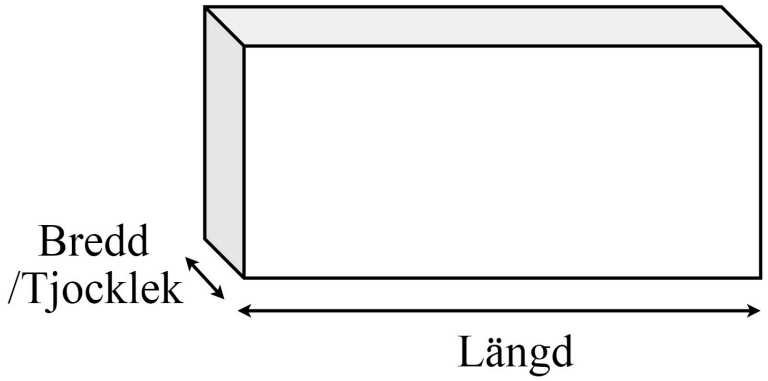
I ett flerbostadshus räknas normalt sett varje lägenhet som en brandcell (Sandberg et al., 2007). Otätheter i lägenhetsskiljande väggar medför risk för brand- och ljudspridning mellan lägenheterna. Som nämnts tidigare finns det inga nationellt bestämda regler för lufttäthet gällande byggnader utan varje kommun har sina egna riktlinjer. Dessa riktlinjer gäller dock endast byggnadens ytterskal och inte de lägenhetsskiljande väggarna. Däremot finns det krav på både ljudisolering och brandspridning vilket innebär att väggarna måste vara täta.

7 Klimatrespons i KL-trä

Eftersom KL-trä är ett material som består av flera stycken av trä med olika orientering och inbördes fästningsförhållanden, är dess dimensionsförändringar avsevärt svårare att bedöma än dimensionsförändringarna hos de enskilda träbitarna. I detta kapitel görs ett försök att uppskatta dimensionsvariationer i KL-trä, vilka konsekvenser dessa kan få och hur de kan hanteras.

7.1 Dimensionsvariationer i KL-trä

I den kommande framställningen definieras ett KL-element som en "KL-platta", vars riktningar definieras enligt figur 5.



Figur 5: Benämningar på riktningar som används.

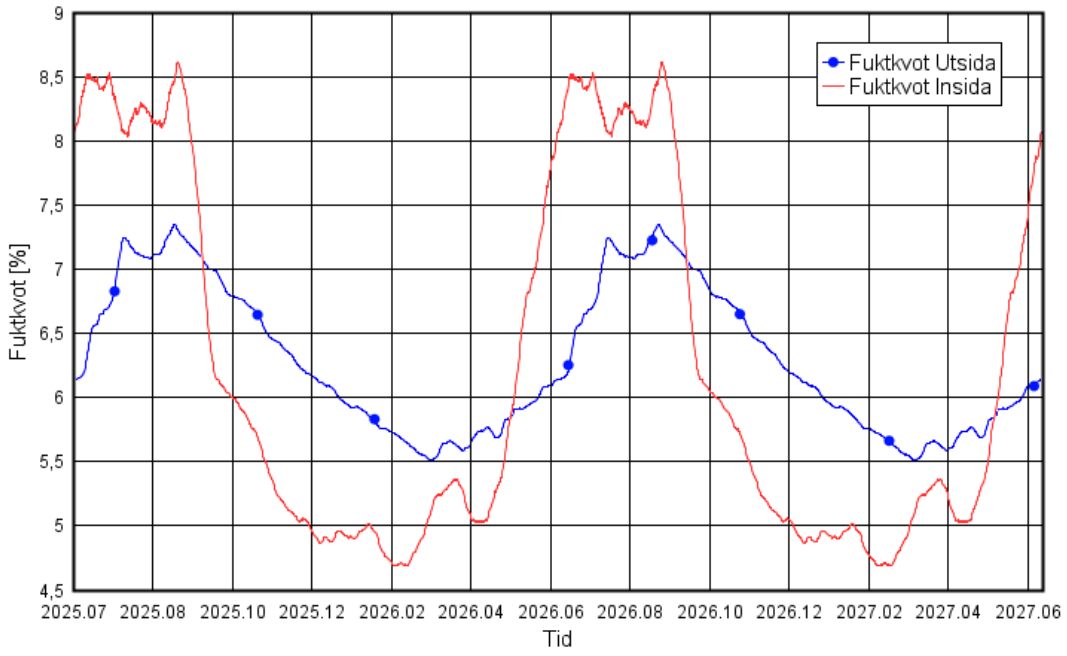
KL-trä är ett nytt material och information om dess dimensionsförändringar är svår att få tag på. Enligt Svenskt Trä (2017b) uppvisar KL-trä någonstans mellan 0.1 och 0.23 % krympning i plattans plan vid en sänkning av fuktkvoten med 10 procentenheter. I plattans breddled är motsvarande siffra 1.4 %. För längdriktningen väljs här medelvärdet 0.15 % = 1.5 ‰. För en procentenhets skillnad i fuktkvot blir dimensionsändringen 1.4 ‰ i tjocklek och 0.15 ‰ i längd.

Svensk trä (2017b) anger att KL-trä i Sverige huvudsakligen tillverkas av gran eller furu. Burström (2007) anger krympning i fiberriktning för dessa träslag som 0.3 % respektive 0.4 % vid en sänkning av fuktkvoten med 30 procentenheter. Detta motsvarar alltså ungefär 0.1-0.13 % vid en sänkning av fuktkvoten med 10 procentenheter. Enligt dessa uppgifter skulle alltså en KL-platta i sitt plan ha en krympning som är ungefär i linje med eller något större än krympningen i längdled för en vanlig planka i rent trä. Krympningen i KL-plattans tjocklek ligger i sin tur på ungefär samma nivå som krympningen radiellt i furu eller gran.

De värden som finns gällande KL-träets dimensionsförändringar gäller för hela stycken av KL-trä som befinner sig i jämvikt med omgivande fuktförhållanden. Om en KL-platta står i kontakt

med olika fuktförhållanden på olika sidor blir det avsevärt svårare att modellera dess beteende. Detta byggnadsfysikaliska problem ligger huvudsakligen utanför det här projektets ramar. Eftersom KL-plattorna som regel ingår i olika typer av väggkonstruktioner som innehåller t.ex. isolering och väggbeklädnader, kommer dessa material att göra att fukt- och värmetransporten genom konstruktionen blir långsammare. Detta bör leda till att variationerna i träets fuktkvot till följd av varierande omgivande relativ fuktighet blir mindre än om plattan är exponerad direkt mot luft.

För att testa detta används fukt- och värmesimuleringsprogrammet WUFI för en väggkonstruktion där en KL-platta är exponerad för inneluft på ena sidan ("insidan") men inbyggd innanför isolering och fasadbeklädnad på den andra ("utsidan"). Konstruktionen utsätts under två år för ett uteklimat som är typiskt för Göteborg och där inneklimatet beror på uteklimatet och fukttillskotten inomhus. Ett genomsnitt för fuktkvot tas på den yttersta respektive innersta centimetern och resultatet redovisas i figur 6. Det är tydligt att den sida av väggen som är exponerad direkt mot inneluften har större variationer i fuktkvot än den som är isolerad och inbyggd.



Figur 6: Variationen för de genomsnittliga fuktkvoterna för yttersta och innersta centimetern av en KL-platta där insidan är exponerad för inneluft och utsidan är inbyggd innanför isolering och fasadbeklädnad.

Den naturliga följden av de varierande fuktkvoterna på plattans olika sidor är att plattan kommer att krympa och svälla olika mycket på de olika sidorna. En konsekvens av detta är att storleken

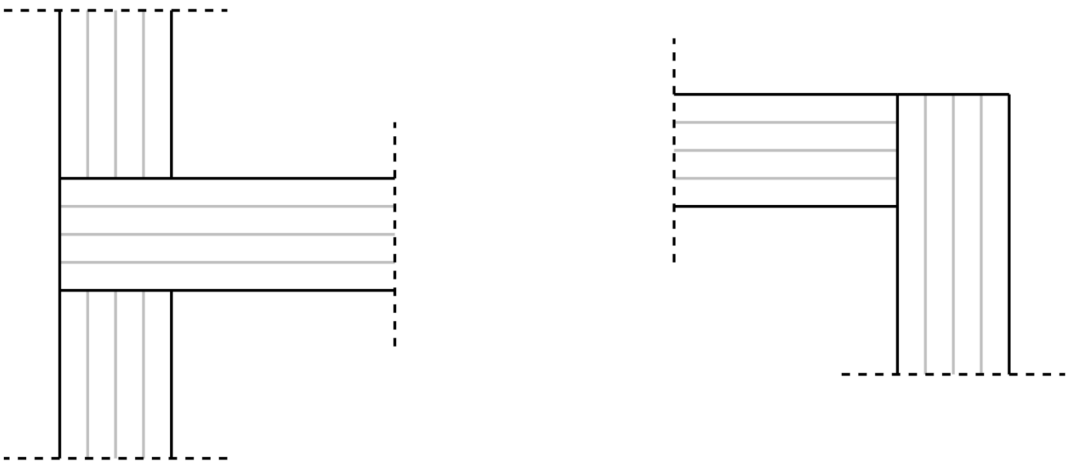
på springorna mellan KL-plattor begränsas av den sida av KL-plattan som kryper minst. För att reda ut exakt hur stora dessa skillnader är behöver grundliga simuleringar och jämförelser av olika väggbeklädnader göras. Figur 6 ger dock en initiell fingervisning om hur stora skillnader det kan handla om, i det här fallet ungefär en procentenhet i fuktkvot mellan inner- och yttersidan som mest. Denna skillnad skulle antagligen inte ge någon betydande påverkan på luftflödet genom den aktuella springan, men ojämn krympning är ändå en faktor som bör beaktas vid en fullständig betraktelse av KL-plattors dimensionsvariationer.

För att ge en fullständigt korrekt bild av omfattningen av den ojämna krympningen bör hänsyn också tas till de inre spänningar som uppkommer i materialet då det spänns och töjs olika mycket i olika riktningar. Något som komplicerar analysen ytterligare är faktumet att konstruktionen är ihopsatt med detaljer som spikar, skruvar och beslag, vilka håller emot de dimensionsvariationer som träet vill genomgå. Det är också okänt hur limningen mellan lagren i KL-plattan påverkar dess fuktning, uttorkning och dimensionsvariation. Dessa analyser ligger också utanför det här projektets nivå.

7.2 Anslutningar

I Edgren och Thorns (2011) intervjustudie nämns genomföringar, dörr- och fönsterkarmar samt anslutning mellan fasadvägg/fasadvägg eller fasadvägg/bjälklag som de tre konstruktionsdetaljer som är mest kritiska för lufttätheten.

Att modellera svällningar och krympningar vid dörrar och fönster är komplicerat utanför det här projektets nivå, vilket betyder att fokus kommer att ligga på möten mellan separata KL-plattor. I en vanlig huskonstruktion finns tre typiska ställen där KL-plattor kan mötas. En fördel med KL-plattor är att de kan göras mycket långa, upp till 12 m (Svenskt trä, 2017b). Detta gör att det ofta är möjligt att undvika att två plattor behöver mötas mitt på en vägg, eftersom hela väggen kan göras i en bit. De avgörande skarvarna mellan olika KL-plattor återfinns alltså huvudsakligen i hörnen mellan olika väggar samt där bjälklaget möter väggarna, se figur 7. I dessa skarvar möts en plattas längdriktning och den andra plattans tjockleks-riktning.



Figur 7: Typiska möten mellan KL-plattor. Till vänster syns ett bjälklag som möter två väggar, sett från sidan. Till höger syns två väggar som möts i ett hörn, sett uppifrån.

I fallet där bjälklag möter vägg måste man ta hänsyn till hur gravitationen påverkar konstruktionen. Även om de ingående delarna skulle krympa på ett sätt som skulle kunna leda till springor, bör KL-plattornas tyngd leda till att dessa springor tätas av sig själva på grund av vikten av de konstruktionsdelar som finns ovanför. Vidden av detta fenomen beror på hur konstruktionen är fäst och förstyvad ovanför det aktuella området, men det är sannolikt att just denna konstruktionsdetalj inte är den avgörande för lufttätheten. Den mest avgörande anslutningen mellan KL-plattor bedöms därför vara hörnen, där KL-plattor möts med olika orientering utan inverkan av gravitation.

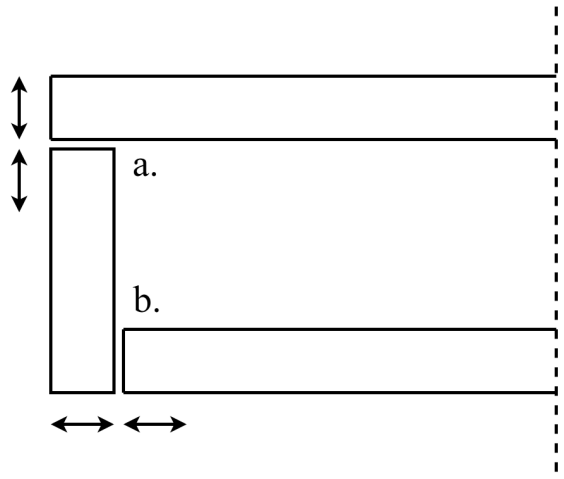
7.3 Uppskattning av lufttäthetsvariationer

För att illustrera möjliga variationer i luftflödet genom dessa hörn, betraktas ett hus med dimensionerna BxLxH=5x10x2.8 m, konstruerat av KL-plattor. Tjockleken på KL-plattorna väljs enligt de mått som Svenskt trä (2017b) anger finns tillgängliga, från 6 cm till 20 cm. Luftläckage presenteras senare för väggtjocklekar mellan dessa värden.

Enligt Petersson (2018) och Warfvinge & Dahlblom (2010) varierar den relativa fuktigheten inomhus mellan ungefär 40 % och 80 % över året i Göteborg. Enligt Burström (2007) skulle detta ge upphov till ungefär 10 procentenheters skillnad i fuktkvot för trä. Både Svenskt trä (2017b) och Brander, Esping & Salin (2005) anger dock att den relativa fuktigheten inomhus varierar mellan ungefär 15 % och 55 % i Göteborg. Dessa värden skulle ge lite lägre än 10 procentenheters skillnad i fuktkvot. Eftersom den relativa fuktigheten är lägre skulle de resulterande fuktkvoterna dessutom bli lägre. För RF-spannet 40 % till 80 % skulle fuktkvoterna, enligt SP (2005), ligga mellan ungefär 8 % och 17 %. För RF-spannet 15 % till 55 % skulle fuktkvoterna istället ligga runt 4 % till 11 %. Dessa fuktkvoter är extremvärden över året. Mellan dessa värden finns ett genomsnitt som är den genomsnittliga fuktkvot som träet kommer att uppå efter lång

tid. Om träet till exempel har en fuktkvot på 12 % vid konstruktionen och utsätts för variationer i RF mellan 15 % och 55 % så kommer det att torka ut över flera år för att till slut nå en genomsnittligt fuktkvot på runt 7.5 %, vilket är genomsnittet av 4 % och 11 %. Över året kommer fuktkvoten sedan att variera mellan just 4 % och 11 %. Beroende på vilken fuktkvot KL-plattan har när den byggs in i konstruktionen och vilka fuktförhållanden den omges av på lång sikt, finns det alltså en stor risk att plattan kommer att torka och därmed krympa avsevärt efter att byggnaden är klar. Utöver denna initiella krympning får sedan även läggas den krymping som sker under den torraste årstiden.

Eftersom samma platta antas gå längs en hel vägg delas värdena för dimensionsändring med två för att endast ta hänsyn till ett hörn, alltså cirka 0.075 ‰ i längdriktning och 0.7 ‰ i tjocklek. För en KL-platta som är 20 cm tjock och utsätts för tio procentenheters variation i fuktkvot betyder detta att plattan kommer att bli ungefär 1.4 mm smalare på insidan. För varje meter som väggen är lång kommer den dessutom att krympa ungefär 0.75 mm i änden. En vägg som är 5 meter lång kommer alltså att bli 3.75 mm kortare i änden medan en vägg som är 10 meter lång blir 7.5 mm kortare. Detta betyder att springans storlek till viss del avgörs av KL-plattornas placering i hörnet. Eftersom dimensionsförändringen i längdled är så starkt beroende av hur lång väggen är bör väggarna placeras så att den kortare väggens längsriktning möter den längre väggens sida i hörnet och inte tvärtom. Detta illustreras i figur 8, där variant a. är att föredra framför b. när en lång och en kort vägg möts. Kommande beräkningar kommer att utföras på springor av typ a.



Figur 8: Illustration av två olika arrangemang i mötet mellan en kort och en lång vägg. Pilarna visar relevanta riktningar för dimensionsvariationerna. Variant a är att föredra.

Luftflödet [m^3/s] genom en springa kan beräknas enligt Hagentoft (2013) som

$$R_a = \frac{1}{2 \cdot S'_e} \cdot \left(\sqrt{S_g^2 + 4 \cdot \Delta P \cdot S'_e} - S_g \right) \tag{4}$$

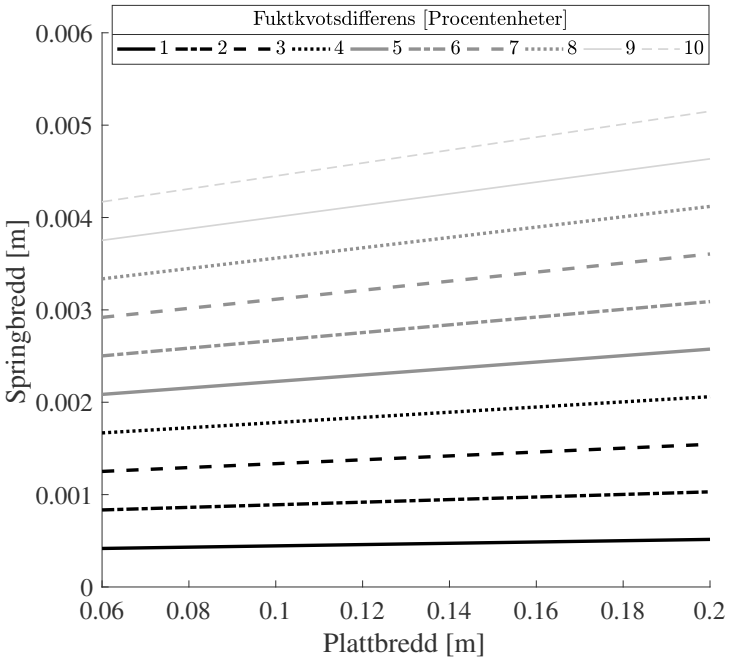
där ΔP är tryckskillnaden över väggelementet, och S_g respektive S'_e beräknas enligt

$$S_g = \frac{12\mu \cdot L}{b^2 \cdot A} \tag{5}$$

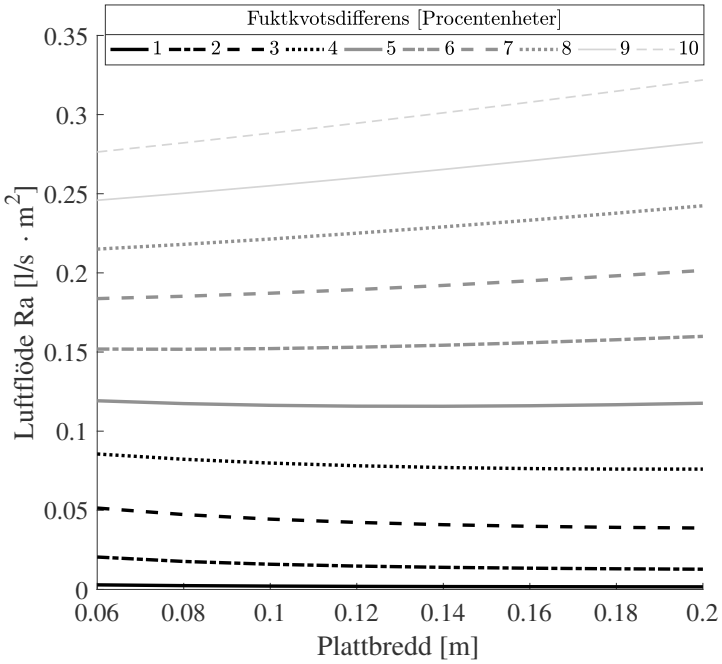
$$S'_e = \frac{1.8 \cdot \rho_a}{2 \cdot A^2} \tag{6}$$

där μ [Ns/m^2] är luftens dynamiska viskositet , ρ_a [kg/m^3] är luftens densitet, L [m] är väggelementets tjocklek, b [m] är springans bredd och A [m^2] dess area. De aktuella värdena är $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$ Ns/m^2, $\rho_a = 1.25$ kg/m^3 och ΔP=50 Pa.

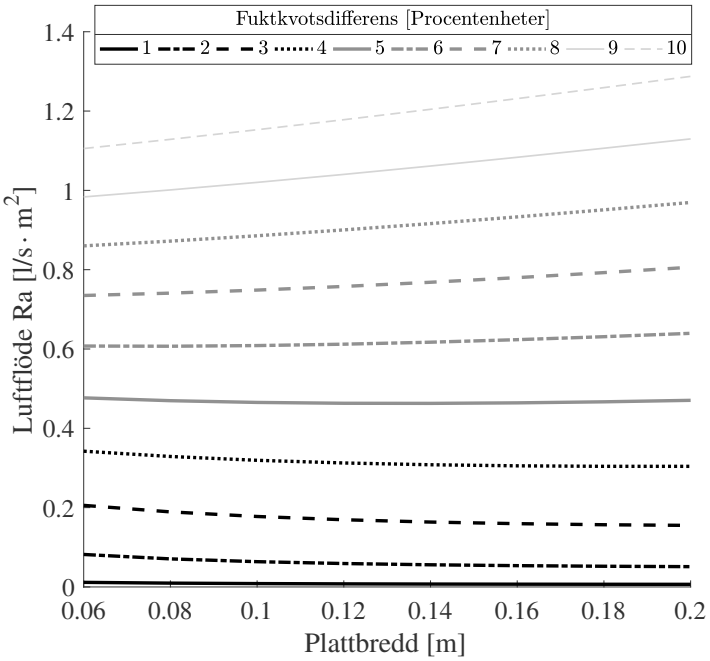
I verkligheten skulle KL-plattorna vara inbyggda i en konstruktion med isolering, väggbeklädnader och dylikt. Antagandet görs därför att hälften av tryckskillnaden över väggkonstruktionen tas av de andra konstruktionsdelarna. Därför sänks R_a till hälften. R_a anges för ett hörn och sedan multiplicerat med fyra för att ge det sammanlagda luftflödet genom alla fyra hörnen i byggnaden. Det kubformade huset har en omslutningsarea på 134 m^2 och antas vara helt lufttätt i anslutningar till tak och golv. Genom att dela luftflödet med omslutningsarean fås ett värde i enheten l/s·m^2 vid 50 Pa, vilket är standard för att beskriva luftläckage i byggnader. Värdena för springbredd och resulterande luftflöde R_a visas i figurerna 9 till 11 för olika plattbredd och olika fuktkvotsdifferenser.



Figur 9: Bredden på springorna i hörnen av typ a för olika bredder på KL-plattorna samt olika fuktkvotsdifferenser.



Figur 10: Luftflödet genom ett hörn av typ a för olika bredder på KL-plattorna samt olika stora skillnader i fuktkvot. Anledningen till att luftflödet sjunker vid ökad plattbredd vid fuktkvotsdifferenser under fem procentenheter är att en ökad plattbredd ger en längre springa som luften måste ta sig igenom.



Figur 11: Det sammanlagda luftflödet genom fyra hörn för olika bredder på KL-plattorna samt olika stora skillnader i fuktkvot.

Den analys som tidigare gjordes med WUFI och presenterades i figur 6 tydde på fuktkvotsvariationer som ligger närmare RF-spannet 15 % till 55 % än 40 % till 80 %. Det skulle betyda att det kan vara rimligt att förvänta en fuktkvotsdifferens på sju procentenheter för de årliga variationerna, runt ett genomsnitt på ungefär 7.5 %. Svenskt trä (2017b) anger att KL-plattor bör ha en fuktkvot på ungefär 12 % när de byggs in i konstruktioner. Plattan torkas alltså först ut till genomsnittsfuktkvoten 7.5 % och sedan ytterligare ungefär 3.5 % ner till den lägsta fuktkvoten under den torraste delen av året. Tillsammans ger detta en maximal minskning av fuktkvoten på ungefär 10-12 procentenheter. Det bör dock noteras att fuktkvotsvariationerna dämpas ju mer KL-plattan byggs in bakom isolering och beklädnader, enligt tidigare resonemang.

Figur 11 visar att enbart krympningen av KL-plattorna kan ge ökade luftflöden som i sig själva är i samma storleksordning som de luftflöden som generellt eftersträvas för en hel byggnad.

7.4 Tätning

Eftersom KL-trä är ett relativt nytt material är det svårt att hitta information om vilka metoder som är mest effektiva för att uppnå god lufttäthet i hus byggda av materialet.

I till exempel vanliga träramshus uppnås lufttäthet huvudsakligen genom användning av ett lufttätande skikt av t.ex. plastfolie, detta eftersom hela väggens yta kan innehålla otätheter (Sikan-

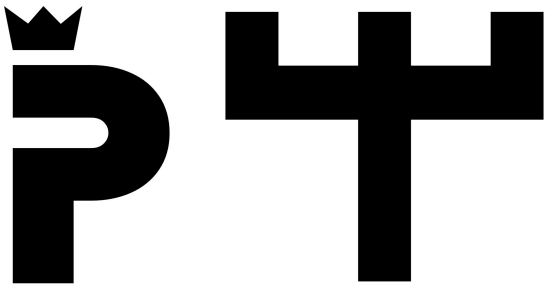
der, 2010). Om väggarna däremot är konstruerade av ett material som är lufttätt i sig självt, som till exempel betong, kan tätningen koncentreras till de springor som eventuellt uppstår där väggarna möter varandra eller andra konstruktionsdelar, som till exempel fönster, dörrar, golv eller tak.

Enligt provningar gjorda av RISE (2017) kan KL-plattor betraktas som lufttäta under normala tryckförhållanden, även då de har utsatts för stora cykliska fuktpåfrestningar. Detta tyder på att det är rimligt att anta att tätning av KL-trä-konstruktioner huvudsakligen kan fokusera på tätning av de tidigare nämnda anslutningarna. Det är också möjligt att använda ett liknande plastfolietätskikt som i en träramskonstruktion, men då den svaga punkten i en plastfolie ändå är skarvningen mellan olika folier står den som bygger ändå inför samma dilemma. Om plastfolien inte erbjuder någon extra lufttätning över väggytorna är den överflödig och tätningen kan lika gärna ske direkt i väggskarvarna.

En möjlig fördel med att använda ett tätskikt i plast är däremot att det kan vara lättare att uppnå rimlig vidhäftning på plastytor än på trä, samt att tejpens vidhäftningsförmåga på trä kan påverkas negativt av att utsättas för de spänningar som orsakas av träets rörelse över året. Plastens dimensioner är konstanta över året.

Sikander (2010) betonar vikten av att de tätningsmaterial som används för att täta springor och dylikt är beständiga under byggnadens livslängd. Ylmen, Hansén & Romild (2012) beskriver hur användandet av plastmaterial och tejper för tätning började i Sverige under 1960- och 1970-talen både på grund av innovationer inom materialvetenskapen och för att spara energi i samband med oljekrisen. De tidigaste försöken att bygga med dessa material fick mindre lyckade resultat, då plasterna och tejperna inte klarat de rådande förhållandena och i vissa fall bröts ned ganska omgående med uppenbara otätheter som följd.

Myndigheterna startade därför utredningar med ambitionen att de tätningsmaterial som var tänkta att byggas in i konstruktioner och därför inte lätt kunde bytas, skulle ha en livslängd på minst 50 år. De tidigaste ansträngningarna ledde till så kallade verksnormer, frivilliga kvalitetsmärkningar som dock senare avvecklades till förmån för EU:s mer allmänt gällande CE-märkning. Då CE-märkningen inte specifikt ställer krav på just 50 års beständighet finns det i dag i Sverige två olika märkningar som indikerar att ett skarvmaterial för luft- och ångspärr bedöms ha en livslängd på 50 år . Dessa är P-märket som ägs av RISE (tidigare SP) samt T-märket som är Boverkets märke. Se figur 12. I Edgren och Thorns (2011) intervjustudie uttrycker flera av de yrkesverksamma respondenterna en stor skepsis inför tejpens påstådda beständighet samt inför möjligheterna att byta ut tejpen efter den påstådda livslängden.



Figur 12: Till vänster RISE P-märke och till höger Boverkets T-märke.

Enligt Ylmén et al. (2012) kan fukt på flera olika vis leda till nedbrytning av de polymera material som tejp består av. En av de mekanismer de beskriver är den mekaniska utmattning som kan uppstå då ett polymert material utsätts för upprepad adsorption och desorption av vatten. Detta händelseförlopp är intressant att studera för att avgöra möjligheten att täta KL-trä-konstruktioner endast i anslutningarna. När den relativa fuktigheten varierar över året kommer tejpen att fuktas och torkas växelvis, vilket skapar en risk för att tejpens fästförmåga påverkas negativt. Samtidigt kommer träet att genomgå dimensionsändringar som kommer spänna tejpen vid torra förhållanden och släppa när det blir fuktigare. Detta skulle kunna förvärra den negativa påverkan på fästförmågan.

8 Undersökning av tejpers fuktkänslighet

För att undersöka tejpens beständighet vid fästning på KL-trä genomförs ett experiment i klimatkammare. Genom att placera träbitar med olika tejpuppsättningar i en kammare där temperatur och luftfuktighet kan varieras, simuleras den fuktpåfrestning som tejpen utsätts för på grund av årstidernas variationer. Vidare i kapitlet följer undersökningens bakgrund, uppställning samt resultat och diskussion.

8.1 Bakgrund och antaganden

Eftersom inomhustemperaturen vanligtvis önskas hållas mer eller mindre konstant över året hålls den konstant vid 20 °C i klimatkammaren. I verkligheten blir temperaturen något högre på sommaren, men enligt Ylmén et al. (2012) krävs 80°C i 12 månader för att simulera 50 års åldring av tejp. Den lilla temperaturhöjningen sommartid lär alltså inte påverka tejpen under den aktuella tidsrymden.

Enligt Petersson (2018) och Warfvinge & Dahlblom (2010) varierar den relativa fuktigheten inomhus mellan ungefär 40 % och 80 % över året i Göteborg. Dessa siffror beror dock kraftigt på specifika konstruktioner, ventilationslösningar osv., men även på vilka antaganden som görs i uppskattningarna av värdena, som t.ex. fukttillskott. Det går att hitta källor som anger andra siffror än de nämnda. Dels av den anledningen och dels för att det är intressant att betrakta någon typ av extremfall, så väljer författarna att programmera klimatkammaren för cykling mellan 10 % och 80 % relativ fuktighet.

Omfattningen av träets dimensionsförändringar beror på det så kallade inträngningsdjupet, vilket är det djup till vilket de yttre fuktförhållandena tränger med en viss amplitud in i ett material. Hagentoft (2013) anger att 50 % av amplituden hos en förändring av fuktnivån utanför materialet tränger in ungefär 1 mm i trä på ungefär tre timmar. Eftersom de aktuella provbitarna har så små dimensioner och eftersom det finns inre spänningar inne i träet som motverkar dimensionsändringar på ytan bedömer författarna att den aktuella cyklingen av fuktnivåer inte bör ge upphov till några märkbara dimensionsförändringar så länge som cykelperioden hålls tillräckligt kort. Detta är en förenkling av verkligheten, då tejpen i en verklig konstruktion hade utsatts både för träets dimensionsförändringar och luftens varierande fuktighet samtidigt. På grund av tidsbrist är det dock inte möjligt att undersöka både dessa faktorer och deras samspel inom ramarna för det här projektet. Att ta hänsyn till dimensionsförändringarna skulle kräva avsevärt längre cykelperioder för att tillåta djupare inträngning i materialet.

Perioden för luftfuktighetscyklingen väljs följdaktligen till åtta timmar, varav fyra timmar är i torrt klimat och fyra timmar i fuktigt klimat. Skiftningen mellan klimaten utförs så snabbt som klimatkammaren tillåter, vilket är ungefär 20 minuter. Med en period på åtta timmar hinns tre cykler per dygn med. Grundantagandet är att en cykel motsvarar ett års fuktpåverkan. För att testa tejpernas påstådda fuktbeständighet i 50 år bör tejperna således tas ut ur klimatkammaren efter 50 cykler och inspekteras. Efter dessa cykler körs sedan klimatkammaren med en period på

sex timmar så länge som klimatkammaren är tillgänglig. Detta ger möjlighet att undersöka vad som händer med tejperna efter den utlovade hållbarheten på 50 år.

Eftersom tejpens funktion är att täta springor i anslutningar och skarvar är det intressant att undersöka några olika förekommande springor. Den enklaste situationen är en springa mellan två plana element. Springan ger möjlighet för fukt och luft att komma in under tejpen på fler ställen än när tejpen sitter utan springa under. Det kan vara relevant att studera ett antal olika springor med olika bredd.

En annan, mer komplicerad situation, uppstår i hörn. Här finns också en springa men det är dessutom extra svårt att applicera tejpen. Oavsett hur försiktigt tejpen appliceras kommer det alltid att uppstå större luftutrymmen under tejpen än vid en plan anslutning. Enligt Eliasson (2010) är erfarenheten och motivationen hos den som utför tejpandet avgörande för att uppnå goda resultat. En slarvig tejpning i ett hörn kan alltså, oavsett om den beror på oerfarenhet, stress eller lathet, leda till otätheter. Tejptillverkaren 3M (2014) skriver i monteringsanvisningar på sin hemsida att det är viktigt att säkerställa att tejpen fäster mot underlaget och att veck i möjligaste mån bör undvikas. Tejpen 3M leveras med delat skyddspapper för att underlätta appliceringen. Tejptillverkaren T-Emballage (u.å) skriver i sin monteringsanvisning att det dessutom är är viktigt att inte belasta tejpen för mycket elastiskt, då den alltid försöker återgå till sin ursprungliga bredd och form.

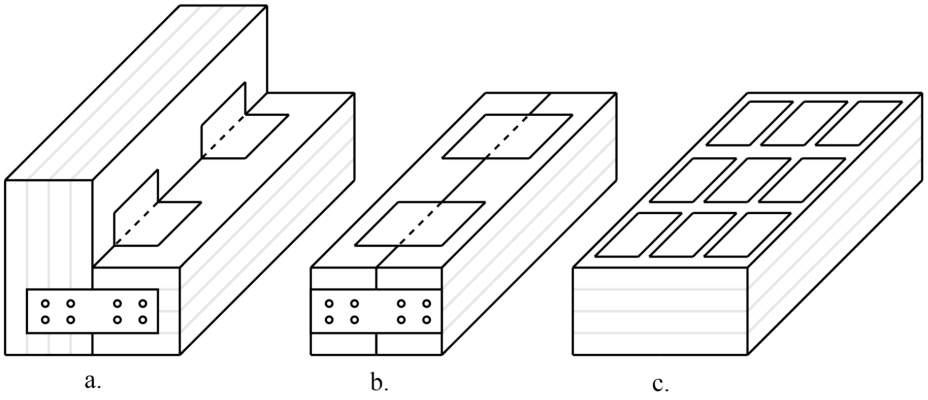
En annan aspekt som är intressant att undersöka är hur tejpens beständighet och vidhäftning påverkas av vilket underlag den tejpas på. Tejptillverkarna 3M (2014) och T-Emballage (u.å) skriver i sina monteringanvisningar att underlaget där tejperna ska fästas bör vara torrt och rent. Byggplatser är dock stökiga och smutsiga och risken är stor att smuts eller fukt finns på de ytor som tejpas, se figur 13 för verkliga exempel. För att simulera dessa smutsförhållanden sätts tejper på ytor som är strödda med betongdamm eller sågspån samt ytor som är fuktiga vid applicering.

Valet av tejper för undersökningen begränsas av vilka praktiska möjligheter det finns för att hitta och införskaffa dem. Det kan vara otydligt exakt vilken funktion en tejp har eftersom det finns olika benämningar för tejper som till exempel ångspärr, vindskydd eller tätningstejp. En tejp kan ha en önskad funktion även om det inte explicit framgår av namnet hos återförsäljaren. För det här projektet fanns möjlighet att införskaffa två tejper, T-Emballage T-flex samt 3M FAST-F. T-flex kallas av tillverkaren för “tätningstejp” och FAST-F för “lufttätningstejp”. Fler sorter och tillverkare finns på marknaden men möjligheten att införskaffa dem fanns inte.

Figur 13: Exempel på smuts på verkliga byggplatser. Foto: Paula Wahlgren. Återgiven med tillstånd.

8.2 Experimentuppställning

Figur 14 visar tre situationer där det är intressant att undersöka tejpens vidhäftningsförmåga. Figur 14 c visar tejpning direkt på en yta. Figur 14 a och 14 b visar tejpning över springor, i hörn och över en plan anslutning. KL-plattorna sågas till lämpliga dimensioner med tanke på ugnens storlek och tejpens utrymmesbehov. Anslutningarna spikas ihop med hålplattor och ankarspik. Detta innebär att eventuella dimensionsförändringar i träet, även om de är små, inte kommer att ge några töjningar i tejperna.



Figur 14: Experimentuppställning för de tre aktuella situationerna. Figur a visar tejpning över springa i hörn, figur b tejpning över plan springa och figur c tejpning på yta.

Två konstruktioner av typ a (hörn), spikas ihop och på varje bit appliceras en full längd av en sorts tejp, se figur 15 och 16. Underlaget är torrt och rent. Värt att notera är att 3M FAST har en tudelad skyddspapp på baksidan av tejpen, vilken underlättar applicering av tejpen i hörnet avsevärt då tejpen kan fästas på ena sidan av hörnet först och sedan det andra. Det var mycket svårare att åstadkomma en bra tejpning med T-flex.

Figur 15: Hörnkonstruktion enligt typ a med tejp T-flex.

Figur 16: Hörnkonstruktion enligt typ a med tejp 3M FAST.

Fyra konstruktioner av typ b (plan anslutning), spikas ihop med tre olika storlekar på springorna mellan bitarna, se figur 17. Bredden på springorna mäts inte exakt. Provbitarna grupperas beroende på hur breda springorna ser ut att vara.

Figur 17: De fyra konstruktionerna av typ b. Nummer 2 och nummer 4 bedöms ha samma springbredd. Nummer 3 har större springa och nummer 1 nästan ingen springa alls.

På nummer 2 och nummer 4 appliceras en full längd tejp då springorna på dessa bitar bedöms vara ungefär lika stora. Nummer 3 bedöms ha en märkbart större springa än nummer 2 och nummer 4 men nummer 1 har nästan ingen springa alls. Därför sätts en bit tejp av vardera sorten över dessa springor. Se figur 18.

Figur 18: De fyra konstruktionerna av typ b med tejp.

På konstruktion c appliceras tejper med varierande underlag, enligt följande, vilket visas i figur 19:

- 5 och 9: så ren och torr yta som möjligt
- 6 och 10: yta nedsmutsad med betongdamm
- 7 och 11: yta nedsmutsad med sågspån
- 8 och 12: fuktig yta

Figur 19: De två tejpsorterna, vardera med underlag från vänster till höger: Rent, betongdamm, sågspån, fuktigt.

Därefter sattes proverna in i klimatkammaren enligt figur 20.

Figur 20: Provkonstruktionernas placering i klimatkammaren. Längst upp typ b, i mitten typ c och nederst typ a.

8.3 Resultat och diskussion

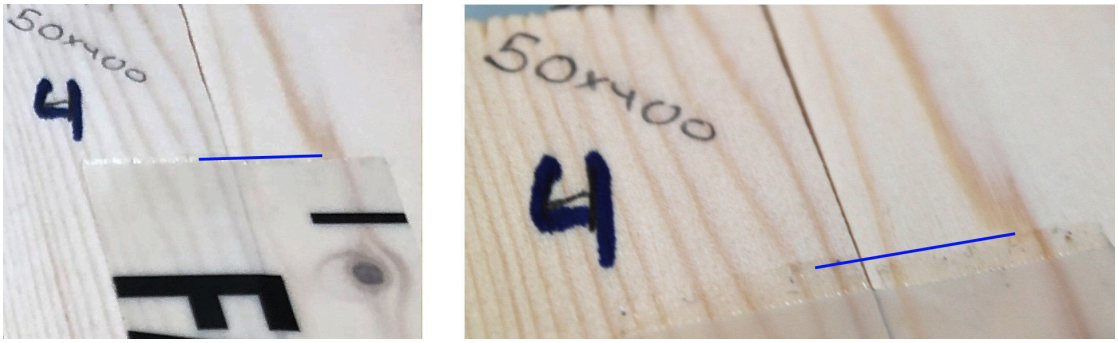
Proverna togs ut ur klimatkammaren efter 50 cykler. En första okulär besiktning visar inga stora uppenbara släpp eller skador, se figurerna 21 och 22.

Figur 21: Tejper med olika underlag efter fuktcykling i klimatkammare.

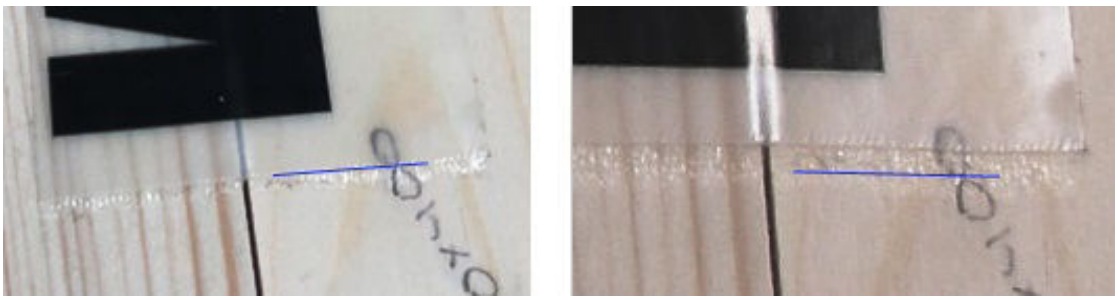
Figur 22: Tejper med olika underlag efter fuktcykling i klimatkammare.

En effekt som kan noteras är att vissa av tejperna har dragits ihop i längsriktningen, vilket har

lämnat en liten limrest vid tejpens ände, se figurerna 23 och 24. Den sannolika förklaringen till detta är att olika mycket spänning har använts vid appliceringen. För att få en så noggrann applicering som möjligt medverkade två personer, en som drog i tejpen för att hålla den rak och en som tryckte fast den efteråt. Om en tillräckligt stor spänning används för att dra i tejpen kan den fästas på ytan i ett utsträckt läge. Efter appliceringen vill tejpen dras ihop igen vilket leder till den observerade effekten. Effekten är större ju längre tejpbiten är och större på 3M-tejperna än på T-flex-tejperna. Detta beror troligtvis på att 3M-tejpen är mer töjbar.



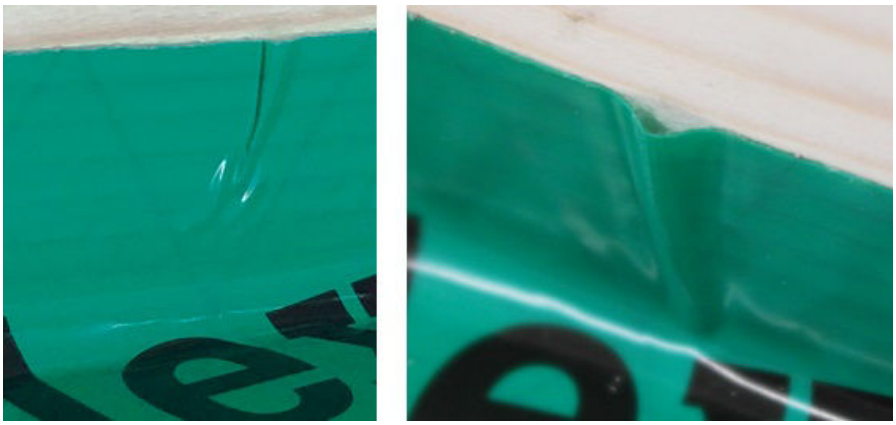
Figur 23: Limrester efter att tejpen dragit ihop sig, troligtvis på grund av spänning vid appliceringen. Den blå linjen är pålagd efteråt för att visa hur tejpen har flyttat sig.



Figur 24: Limrester efter att tejpen dragit ihop sig, troligtvis på grund av spänning vid appliceringen. Den blå linjen är pålagd efteråt för att visa hur tejpen har flyttat sig.

En plats där det syns en tydlig effekt av fuktningen är i de veck som finns i hörntejpningen med T-flex, se figurerna 25 och 26. Här är det tydligt att vecken har blivit större och spridit sig både i sidled och nedåt mot springan.

Figur 25: Veck i tejpen som vuxit under experimentets gång på hörnkonstruktionen med T-flex. Underlaget är torrt och rent.



Figur 26: Veck i tejpen som vuxit under experimentets gång på hörnkonstruktionen med T-flex. Underlaget är torrt och rent.

Det är svårt att avgöra vilken effekt de olika smutsunderlagen har haft på tejpens fästförmåga. Det är tydligt att tejperna som applicerats på rena respektive fuktiga ytor har behållit en helt plan och till synes opåverkad yta. Tejperna med smuts under var dock bubbliga och ojämna redan från början och den eventuella fuktpåverkans effekter är inte stora nog för att vara synliga. Smutspartiklarna skapade redan från början bubblor av luft under tejpen. Så länge som dessa bubblor är avskilda från omgivningen av den omgivande tejpen är det rimligt att de inte växer. Detta skulle i så fall kräva att luft eller fukt avgavs från det underliggande träet. Det är dock rimligt att anta att smutsigt underlag i kombination med inträngande veck skulle leda till större bubblor då detta skulle ge fukten fler möjligheter att angripa tejpens lim.

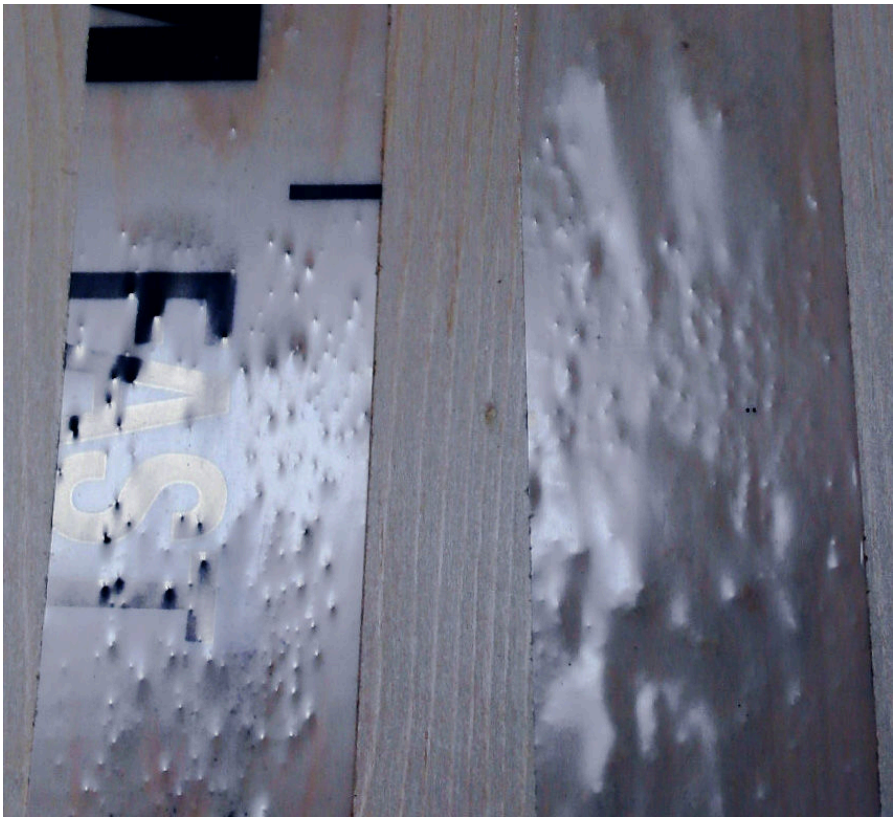
Springornas inverkan på tejpens fästförmåga är också till synes obetydlig. Till skillnad från i ett veck så är tejpen spänd över springan vilket minskar fuktens förmåga att tränga in och successivt

bryta ner mer och mer av limmet. Över den bredaste springan syns dock ett litet tecken på att tejpen har börjat släppa, i det här fallet över en gren i trät, se figur 27. Det är oklart om detta beror på att tejpen fäster sämre i grenen eller om det är lättare att se släppet just där eftersom det är mörkare än det omgivande träet.

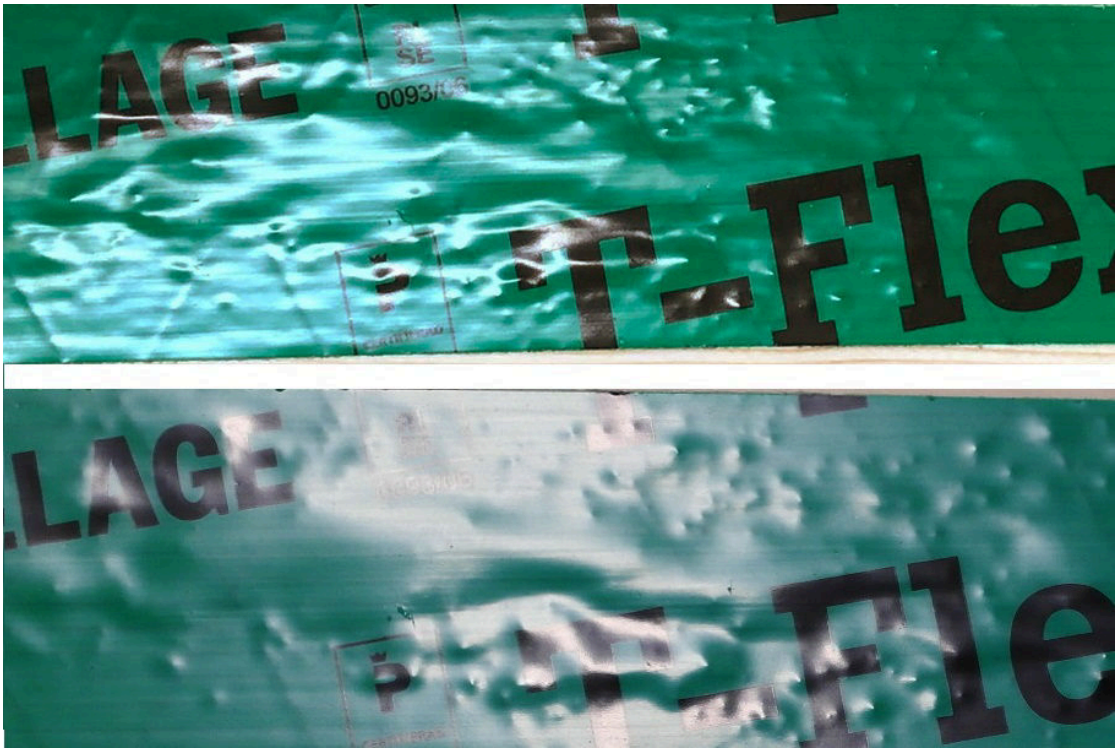
Figur 27: Tejpen ser ut att släppa över en gren på provet med den bredaste springan. Övre bilden visar innan fuktcyklingen, mellersta bilden efter 50 cykler och nedersta bilden efter ungefär 100 cykler samt borttagning av tejpen.

Efter de 50 första cyklerna placerades proverna i klimatkammaren igen och kördes med samma förutsättningar, bortsett från perioden som den här gången sattes till sex timmar. Efter ungefär 50 cykler togs proverna ut och inspekterades igen. Inga stora förändringar noterades jämfört med efter den första cyklingsomgången, vilket visades i figurerna 21, 22, 23, 24, 25, 26 eller 27. En

förändring syntes dock på de tejper som applicerats på smutsigt underlag. Här var det tydligt att det hade utvecklats ansenliga luftbubblor under de tejperna som hade sågspån under, se figurerna 28 och 29. Det var tydligt att detta framförallt hade skett med just sågspånen och inte i alls samma utsträckning med betongdammet. Sågspånen är större än partiklarna i betongdammet, vilket betyder att de förhindrar tejpen från att fästa på en större yta av träet än vad betongdammet gör. De har dessutom en större förmåga att återfå sin tidigare form efter att de har tryckts ihop, vilket gör att de vecklas ut igen och således trycker mot tejpen. Bubblornas exakta omfattning är svår att bedöma då det krävs speciella reflekterande ljusförhållanden för att bubblorna ska vara tydliga på bilder. Få bilder togs på dessa specifika ställen med exakt rätt ljusförhållanden innan experimentet, vilket betyder att det inte finns så mycket att jämföra med. Figur 29 visar dock en jämförelse mellan 50 och 100 cykler för T-flex med sågspånunderlag. Här syns att bubblan har svällt upp och spännt tejpen. Eftersom bubblan inte har stått i kontakt med den omgivande luften tyder detta på att någon typ av gas har bildats, antingen från träet under eller från sågspånet självt.



Figur 28: Bubblor som har bildats under tejpen. Till vänster 3M FAST med betongdamm under, till höger 3M FAST med sågspån under. Bilden har redigerats för att framhäva konturer.



Figur 29: Bubblor som har bildats under tejpen. Övre bilden visar T-flex med sågspånsunderlag efter 50 cykler, undre bilden visar samma plats efter 100 cykler.

Efter att proverna ansågs färdiga i klimatkammaren gjordes försök att ta av tejperna från proverna för att se om det gick att märka någon skillnad i hur svårt det var att avlägsna dem. Det var tydligt att T-flex var betydligt svårare att avlägsna än 3M FAST. Limmet på T-flex hade blivit ännu klistrigare än det var från början och själva tejpmaterial höll inte ihop utan föll ihop i småbitar. 3M FAST däremot behöll sin elasticitet och gick med lite möda att avlägsna i sin helhet. Det var också tydligt att de tejper som haft smutsiga underlag var avsevärt lättare att avlägsna än de rena. Vid borttagningen följde smutsen med tejpen vilket visar vilken betydande del av tejpens fästförmåga som smutsen tar.

På det ställe som visades i figur 27 syntes efter tejpens borttagning att limmet fastnade olika mycket på träet, även detta visas i figur 27. Den yta där tejpen inte lämnade några limrester verkar stämma överens med det område som såg ut att ha släppt efter den första omgången fuktcyklingar. Det bör noteras att det finns en knappt märkbar höjdskillnad (maximalt 1 mm) mellan den sida som syns nederst i bild och sidan med grenen på. Detta kan ha bidragit till att skapa ett område där tejpen inte trycktes ner lika mycket som runt om.

9 Diskussion

Syftet med projektet var att i största möjliga mån utreda och beskriva hur KL-trä påverkas av varierande fuktförhållanden som kan leda till luftläckage. Målet var även att undersöka olika anslutningslösningar samt de metoder som finns för att täta dessa otätheter. Här diskuteras hur utredningen har uppfyllt dessa mål och syften samt hur projektets metod och genomförande har fungerat. Vidare diskuteras konsekvenser och implikationer av arbetets innehåll.

9.1 Allmänt

Utredningen har gett en bild av KL-träets uppkomst, användning och fördelar. I största möjliga mån har den utrett och beskrivit hur materialet påverkas av fukt, även om undersökningen kraftigt har begränsats av problemets komplexitet. När det gäller anslutningslösningar och tätningslösningar erbjuder utredningen däremot inte en så heltäckande bild som skulle kunna önskas. Författarna har haft svårt att få svar från branschaktörer för att få information om vilka lösningar och idéer som finns och om hur frågan hanteras. Det framstår som att frågan är bortglömd eller möjligen underskattad. Det är svårt att avgöra om detta är för att problemet har bedömts vara tillräckligt litet för att försummas eller för att omfattningen inte är allmänt känd i branschen.

Utredningen fokuserar på tejp som tätningslösning men det är möjligt att tänka sig andra lösningar, till exempel någon typ av fogmaterial i springorna. Anledningen till att dessa alternativ inte behandlats är att förutsättningarna för detta bedömdes vara små med tanke på tillgänglig information.

Uppskattningarna av springornas storlek och resulterande luftflöden genom dem var svåra att göra eftersom det finns många olika variabler som påverkar. Det var svårt att få någon enhetlig bild av vilket spann den relativa luftfuktigheten vanligtvis varierar inom. Detta beror på faktorer som till exempel hur mycket fukt som tillsätts luften i en specifik byggnad samt vilken innetemperatur som hålls. De faktiska värdena kommer alltså att bli olika för varje byggnad. De data som presenterats erbjuder dock ett stort spann vilket möjliggör applicering på specifika fall.

Som tidigare har nämnts så fanns inte möjligheten att utföra experiment på dimensionsändringar i trä, då dessa är mycket tidskrävande. På samma sätt fanns inte möjligheten att faktiskt kontrollera hur tejpens beständighet ser ut efter flera år eller årtionden, av förklarliga skäl.

Resultaten från experimentet tyder på att tejpens fästförmåga kraftigt försämras då den limmade sidan exponeras för luft där fuktigheten varierar. Det verkar som om limmet bryts ner av upprepad fuktning och torkning, vilket stämmer överens med de uppgifter som framkom i kapitel 7.4. Det valda fuktintervallet är stort, men det är ändå intressant att notera att tejpen verkar ha släppt på vissa ställen efter bara ett par veckors fuktcykling. Tanken är förvisso att en cykel ska motsvara ett års fuktpåverkan, men i verkligheten samverkar ett antal andra faktorer som töjning och åldring av tejpen. Det verkar sannolikt att tejpen kan släppa mycket under de årtionden som byggnaden förväntas vara i bruk. Detta visar att det är ytterst viktigt att tejpen appliceras på rätt

sätt.

Med tanke på att tejpens fästförmåga verkar påverkas negativt av att utsättas för fukt är det värt att notera att de tejper som applicerades på fuktigt underlag inte uppvisade någon märkbar skillnad i påverkan. En okulär besiktning avslöjar förvisso inte om fästförmågan har påverkats, men det är ändå en indikation på att det krävs upprepade fuktningar och uttorkningar för att få den effekt som setts på andra prover.

Vid framställningen av provkonstruktionerna användes stor försiktighet och noggrannhet för att få så bra resultat som möjligt. Två personer hjälptes åt för att tejpa proverna på provbänkar i bekväm höjd i en bekväm verkstad. Dessa förhållanden skiljer sig kraftigt åt från de förhållanden som kan förväntas på verkliga byggplatser. Att som ensam yrkesutövare tejpa ett svåråtkomligt hörn på en stökig och varm eller kall byggplats är mycket svårare vilket ökar risken för att resultatet blir mindre lyckat.

Under arbetets gång noterades att det är svårt att hitta information och instruktioner om exakt hur tejpen bör användas och hur svåra detaljer bör tejpas. Tillverkarna har produktblad där vissa grundläggande instruktioner finns men möjligheterna att följa dessa är begränsade och verkligheten presenterar alltid situationer som kräver mer komplicerade lösningar. Här är erfarenhet avgörande, vilket beskrevs i kapitel 5.4. Författarna hade ingen kunskap om tejpning vid projektets början, vilket kan tänkas vara fallet även för vissa personer som ägnar sig åt tejpning professionellt.

9.2 Samhälleliga och etiska aspekter

Vid framställningen av ett arbete som det här finns viss risk för påverkan från opartiska aktörer samt spridning av felaktig information. Den information som finns om KL-trä kommer i stor utsträckning från branschorganisationer och tillverkare. Dessa har ett intresse av att sälja sina produkter och därmed av att presentera dem på bästa möjliga sätt. Att som oinsatt bedöma och behandla dessa uppgifter kan vara svårt och potentiellt leda till att felaktiga uppgifter får spridning. Speciellt när det gäller ett nytt material som KL-trä kan det finnas aspekter av materialets funktion eller användning som inte är helt utredda eller fastställda. Som exempel kan nämnas frågan om vilka möjligheter de inre lagren av en KL-platta har att torka ut, eftersom de är helt täckta med lim på båda sidor. Möjligheten finns att oförutsedda konsekvenser av detta i framtiden leder till att forskningen drar nya slutsatser om användandet av KL-trä.

När det gäller metoden för projektet samt utformningen av de ingående experimenten finns det risk att författarnas bedömningar och antaganden är för förenklade. Till exempel antas att fuktning och torkning av tejp med 8 timmars period motsvarar fuktningen och torkningen under ett helt år. Detta antagande görs inte på vetenskaplig grund utan snarare av praktiska skäl. Om slutsatserna av dessa experiment pekar ut någon produkt, metod, aktör eller liknande som ansvarig för en bristande beständighet eller funktion kan detta leda till negativa konsekvenser för dem.

De resultat som presenteras här kan också ha potentiella ekonomiska konsekvenser. Om arbetet pekar på vissa metoder som speciellt framgångsrika kan detta sätta nya standarder vilka kan leda till ökade kostnader för aktörer som tidigare använt andra billigare alternativ. Till exempel kan nämnas väderskydd, vilket behandlas översiktligt i kapitel 4.2. Att täcka över byggplatsen med tält är ett effektivt sätt att kontrollera fuktförhållandena när man bygger in KL-trä i konstruktioner men det medför också uppenbara kostnader för den som bygger. Å andra sidan kan undvikandet av väderskydd leda till negativa konsekvenser som till exempel mögel med medföljande skador på båda byggnader och människor.

Ett ökat användande av trä som konstruktionsmaterial istället för betong och stål skulle kunna ge minskade utsläpp av växthusgaser. Däremot skulle andra typer av miljöpåverkan öka. Ökat skogsbruk skulle kunna leda till minskning av den biologiska mångfalden. I Sverige finns gott om skog men många länder har redan huggit ned all sin skog. Ökad efterfrågan på KL-trä i andra länder skulle kunna leda till större export av skog från Sverige med utsläppsintensiva transporter.

Frågan om ekologisk hållbarhet är komplicerad och svår att definiera. En hållbar byggnad ska tillverkas på ett sätt som genererar ett lågt koldioxidutsläpp och kräver lite energi, men den ska också vara hållbar ur den aspekten att den är beständig och har en lång livslängd. Eftersom KL-trä är ett så pass nytt material och byggnader av materialet inte stått så länge är det svårt att avgöra om det verkligen kan definieras som mer ekologiskt hållbart än byggnader av betong eller stål.

9.3 Behov av ytterligare kunskap och förslag på framtida problemställningar

Det är komplicerat att göra exakta byggnadsfysikaliska modeller för dimensionsvariatoner i KL-trä men vidare forskning skulle kunna ge en större och mer exakt förståelse av fenomenet. Även om detta är möjligt går det att ifrågasätta nyttan av det. Att kunna säga exakt hur stora springor krympningen ger upphov till är kanske inte speciellt viktigt om det väl har konstaterats att springor faktiskt kommer att uppstå. Fokus bör istället ligga på att täta springorna. Däremot finns ett behov av mer noggranna modeller för dimensionsförändringar vid hål i KL-plattor, som fönster, dörrar och genomföringar. Det är oklart hur detta bör göras samt hur stora dessa dimensionsvariationer kan vara.

Forskning skulle också kunna leda till tejper med bättre fästförmåga eller beständighet, men eftersom det finns så många frågetecken kring och problem med tejp kan det vara mer intressant att hitta nya, mer beständiga sätt att täta konstruktioner. Även om forskning och utveckling leder till tejper med mer pålitlig beständighet är den mänskliga faktorn alltid avgörande. Så länge som en lyckad tejpning är beroende av utförarens kunskap, erfarenhet och motivation spelar det ingen roll hur väl tejpen fungerar under optimala förhållanden.

Eftersom problemet är att dimensionerna varierar periodiskt vore det intressant att undersöka möjligheten att använda fogmaterial med förmåga till elastisk töjning i springorna. Även här finns dock frågeställningen kring beständighet och nedbrytning.

10 Slutsatser

Här presenteras de slutsatser som utredningen har kommit fram till på olika områden. Ämnets komplexitet, i kombination med praktiska begränsningar och svårigheter, gör att många av arbetets frågeställningar är svåra att besvara exakt.

KL-trä som konstruktionsmaterial

- KL-trä är ett nytt material vars egenskaper fortfarande är delvis okända.

Fuktrörelser i KL-trä

- Varierande fuktförhållanden kan leda till dimensionsförändringar i KL-trä. Dessa förändringar är små i förhållande till KL-plattans storlek men om det är krympning kan de ändå leda till kraftigt förhöjda luftläckage i konstruktioner där KL-trä ingår.
- Den största delen av krympningen sker i uttorkningsfasen.
- När uttorkningen är klar varierar KL-elementets dimensioner motsvarande ett fåtal procentenheters skillnad i fuktkvot över året. Detta motsvarar ett fåtal millimeter för plattor som är mellan fem och tio meter långa.
- Att göra exakta byggnadsfysikaliska modeller för dimensionändringar i KL-trä är komplext.

Känsliga anslutningar i konstruktioner av KL-trä

- De känsligaste anslutningarna bedöms vara hörn där KL-plattor möts.

Lufttäthet

- Viktiga faktorer för att uppnå god lufttäthet är fokus, motivation, erfarenhet och kunskap.
- Oavsett hur bra de tekniska lösningarna är beror slutresultat på den som utför arbetet.

Tätning

- KL-plattor är lufttäta. Fokus bör ligga på att täta anslutningar, skarvar och genomföringar. Anslutningar och genomföringar tätas vanligtvis med tejp men skarvar mellan KL-plattor skulle också kunna tätas med fogmaterial.
- Tätningslösningarnas beständighet är avgörande för den långvariga lufttätheten.
- Lufttätningstejper verkar ha god fuktbeständighet om de appliceras på korrekt sätt.

- Att testa hur tejpen påverkas av att spännas och töjas på grund av årliga dimensionsvariationer i träunderlaget kräver att mycket långa experiment utförs.
- Det är komplicerat och krångligt att applicera oslitsad tejp i hörn. Det är även svårt att hitta information om hur detta bör göras.
- Slitsade tejper förenklar appliceringen av tejp i hörn.
- Fukt verkar bryta ner tejpens lim och förstöra dess fästförmåga.
- Veck i tejpen är svaga punkter som kan förstoras på sikt.
- Smuts under tejpen orsakar luftbubblor.

11 Referensförteckning

3M. (2014). *Lufttätning av fastigheter i alla väder oavsett årstid* [Produktblad]. Sollentuna: 3M. Hämtad från https://www.paintpro.se/pub_docs/files/Datablad_Produkter_Paint_Pro/Monteringsanvisning-3M-All-Weather-Flashing-Tape-8067.pdf

Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., Johansson, P. (2013). *Bärande Konstruktioner: del 1.* (ISSN 1652-9162, nr 1). Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.

Alev Ü, Pärnalaas M. (2017). *Air leakage levels in timber frame building envelope joints*. Kalmeers T, Elsevier Hämtad från https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317300719

Boverket. (2011). *Boverkets byggregler (föreskrifter och allmänna råd)*. Hämtad från https://rinfo.boverket.se/BBR/PDF/BFS2011-6-BBR18.pdf

Brander, P., Esping, B., Salin, J-G. (2005). *Fukt i trä för byggindustrin*. SP Trätek

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., Thiel, A. (2016) *Cross laminated timber(CLT): overview and development*. Hämtad från http://www.kstr.lth.se/fileadmin/kstr/pdf_files/Timber_Engineering_2017/Cross_laminated_timber_CLT_-__overview_and_development_-_Brandner_Flatscher_Ringhofer_Schickhofer_Thiel.pdf

Brandt, K (2015) *KL-trä - framtid med historia*, Tidningen Trä, Nr 4 2015. Hämtad från https://www.svenskttra.se/tidningen-tra/2015-4/kl-tra-framtid-med-historia/

Burström, P.G. (2007). *Byggnadsmaterial: Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. (Upplaga 2:10). Lund: Studentlitteratur AB.

Dahlblom, M., Warfvinge, C. (2010). *Projektering av VVS-installationer*. (Upplaga 1:8). Lund: Studentlitteratur AB.

Edgren, M, Thorn, D. (2011). *Lufttäthet hos Skanska - En studie i Skanskas metoder, rutiner och attityder till lufttäthet* (Examensarbete, KTH, Byggteknik och ekonomi).

Eliasson, E. (2010). *Att uppnå god lufttäthet: En studie av faktorer som påverkar byggnadens lufttäthet.* (Examensarbete, Chalmers tekniska högskola, Institutionen för Bygg- och miljöteknik).

Hagentoft, C.E. (2013). *Introduction to Building Physics*. Lund: Studentlitteratur AB.

Hansén, M., Romild, J., Ylmén, P. (2012). *Beständighet hos lufttäthetslösningar*. SP Rapport

2012:57, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Petersson B.E. (2018). *Tillämpad byggnadsfysik*. Lund: Studentlitteratur AB

RISE Research Institutes of Sweden. (2017). *Lufttäthetsprovning av KL skivor*. Rapport 7P06612

Rodrigues, V., Martins, A., Nunes, M., Quintas, A., Caetano, N. (2018). *LCA of constructing an industrial building: Focus on embodied carbon and energy*. Hämtad från https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218308300

Sandberg, PI,. Sikander, E. (2004). *Lufttäthetsfrågorna i byggprocessen – Kunskapsinventering, laboratoriemätningar och simuleringar för att kartlägga behov av tekniska lösningar och utbildning*. SP Rapport 2004:22. SP Energiteknik.

Sandberg, PI., Sikander, E., Wahlgren, P., Larsson, B. (2007). *Lufttäthetsfrågorna i byggprocessen - Etapp B. Tekniska konsekvenser och lönsamhetskalkyler.* SP Rapport 2007:23, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Sikander, E. (2010) ByggaL - *Metod för byggande av lufttäta byggnader*. SP Rapport 2010:73, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Southface Energy Institute. (2013). *Blower door and duct pressure testing for duct and envelope tightness verification*. Hämtad från http://www.southface.org/wp-content/uploads/2016/07/blower-door-and-duct-pressure-testing-for-duct-envelope-tightness-verification-factsheet-2013.pdf

Svenskt trä (2003). *Stammens uppbyggnad och fiberriktningar* [Elektronisk bild]. Hämtad från https://www.traguiden.se/contentassets/09b5e3be8e1a400e8e7f77491134d2b2/stammens-uppbyggnad_l.png

Svenskt trä. (2013). *Årsringar*. Hämtad från https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-uppbyggnad/traets-uppbyggnad/arsringar/

Svenskt trä. (2017a). *KL-trähandboken; Fakta och projektering av KL-träkonstruktioner*. Hämtad från https://www.svenskttra.se/siteassets/6-om-oss/publikationer/pdfer/svt-kl-trahandbok-2017.pdf

Svenskt Trä. (2017b). *KL-trä som konstruktionsmaterial*. Hämtad från https://www.traguiden.se/konstruktion/kl-trakonstruktioner/kl-tra-som-konstruktionsmaterial/1.1-introduktion/introduktion

Svenskt trä. (u.å a). *Från timmer till planka.* Hämtad från https://www.svenskttra.se/om-tra/att-valja-tra/fran-timmer-till-planka/

Svenskt trä. (u.å b). *Bygg klimatsmart*. Hämtad från https://www.svenskttra.se/anvand-tra/byggande/varfor-tra/bygg-klimatsmart/

Svenskt trä. (u.å c). *Trä är ett hållbart byggmaterial*. Hämtad från https://www.svenskttra.se/om-tra/att-valja-tra/tra-och-miljo/tra-ar-ett-hallbart-byggmaterial/

Söderlind, L., Axelson, K., Larsson, B., Rylander, H. (2006). *Väderskyddad produktionsmijö - Framtidens byggande.* Göteborg/Halmstad: SBUF 10103.

T-Emballage.(u.å). *Tätningstejp T-Flex* [Produktblad]. Vetlanda: T-Emballage. Hämtad från https://www.t-emballage.se/content/documents/173MUECXRGVF3.pdf

Wahlgren, P., Sandberg, PI., Bankvall, C., Sikander, E., Larsson, B. (2007). *The Effects and Cost Impact of Poor Airtightness—Information for Developers and Clients*.