
CAD
CAM
CNC
CLT

Sisällysluettelo

SISÄLLYSLUETTELO

5	Tiivistelmä	
7-15	Johdanto	*(miksi kehittää?)*
16-22	Mahdollisuus	*(mitä voisi saavuttaa?)*
23-28	Metodi	*(mitä teimme?)*
29-35	Tulokset	*(mitä tehdessä selvisi?)*
36-39	Pohdinta	*(mitä seuraavaksi?)*
40-41	Sanasto	
42	Työryhmä & kiitokset	
43	Lähteet	

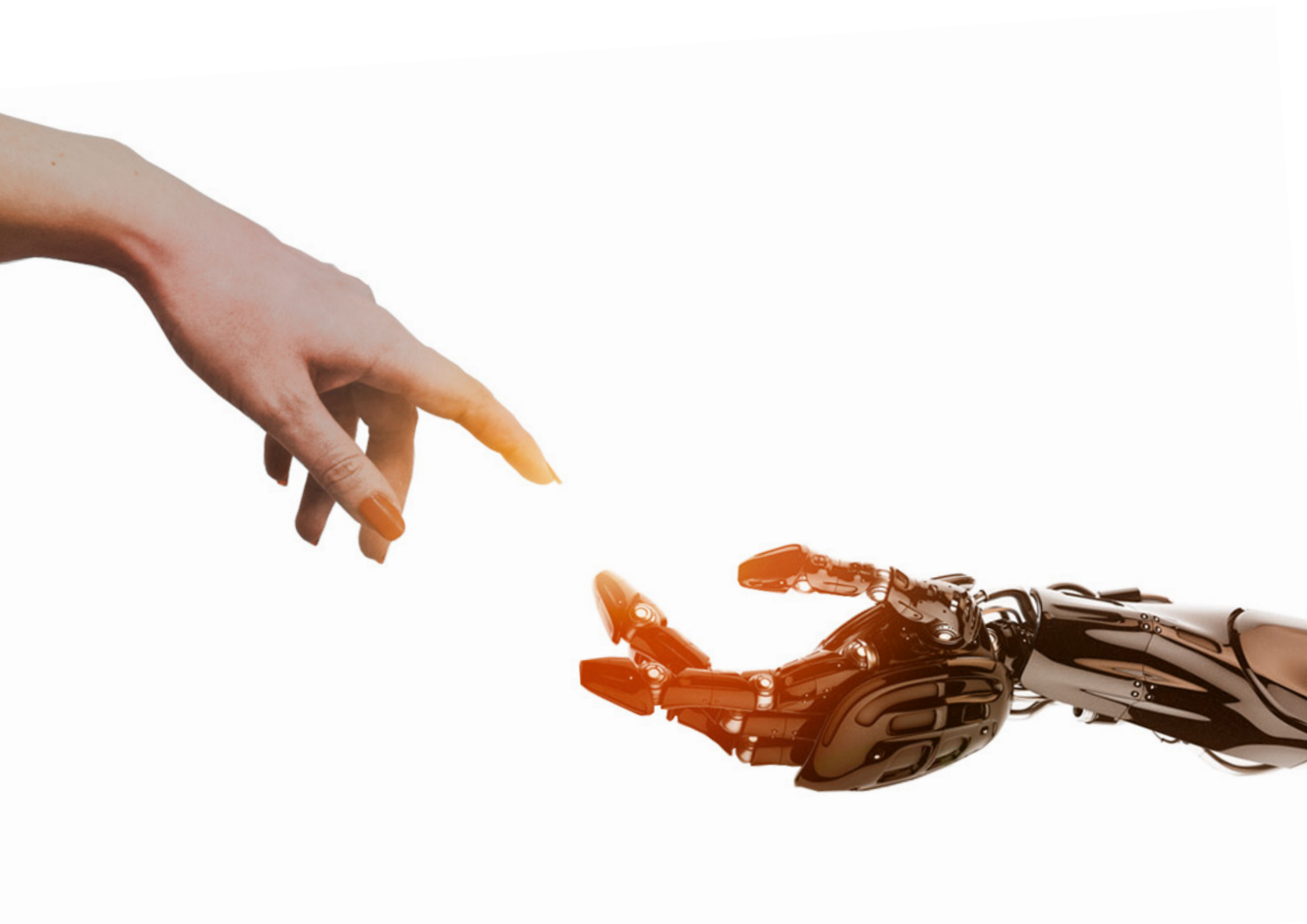


Tiivistelmä

C4-hankkeessa testattiin ja sujuvoitettiin digitaalista työpolkua suunnittelijoilta tuotantoon. Useiden tiedonsiirto- ja jyrsintäkokeiden avulla testattiin ja tunnistettiin tämänhetkiset pullonkaulat ja luotiin niiden pohjalta optimaalinen toimintamalli digitaaliselle suunnittelulle ja tuotannolle.

Digitaalinen sujuvoittaminen parantaa suunnittelijoiden ja tuotannon yhteistyötä. Kun digitaalinen malli saadaan suoraan suunnittelijalta työstökoneelle, voidaan jyrsiä suoraan levyihin esimerkiksi mekaanisia liitoksia ja saadaan kaikki läpiviennit suoraan työstökoneelle. Tämä vaatii sen, että myös suunnittelevalla arkkitehdilla ja/tai rakenne- ja LVIS- sekä muilla suunnittelijoilla on käytössään tarvittava tieto jyrsimen kapasiteetista. Tätä kautta saadaan rakentamiseen tarkoituksen kauneutta – tektonisia ratkaisuja, jotka toimivat hyödyntäen työstökoneiden kapasiteettia ja puun luonnollisia ominaisuuksia.

Hanke toteutettiin 11/2017 - 12/2018 välisenä aikana.



Johdanto

UUSI PARADIGMA

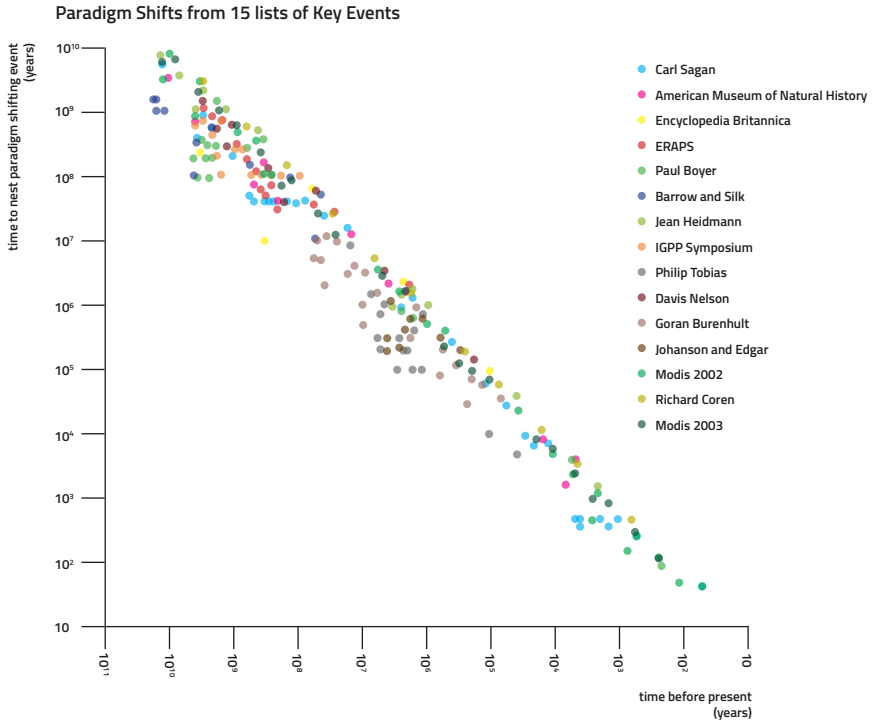
1: Tekoälyn tuleminen

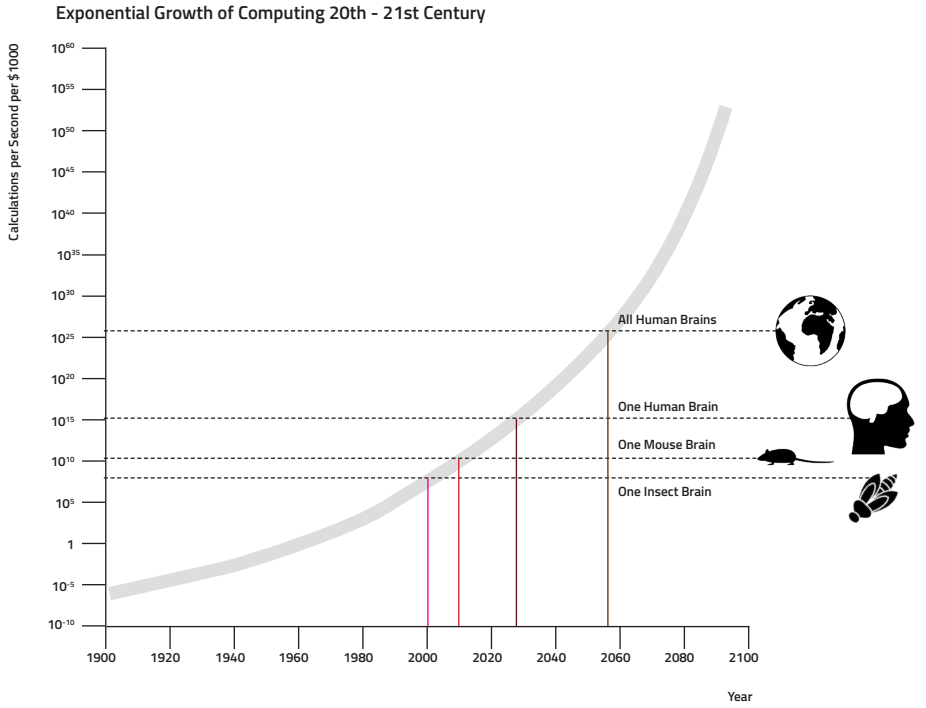
Teknologian ja kulttuurin muutos on kiihtyvää. Teknologiset innovaatiot ovat seuraavaksi viemässä meitä vaiheeseen, jossa ihminen putoaa kehityksen kelkasta. Laskentateho kehittyy kiihtyvällä nopeudella. Keinoäly valtaa alaa ja aiheuttaa valtavan työn muutoksen. Se tulee väistämättä muuttamaan myös rakentamisen. Erilaisia robotteja käytetään maailman rakennustyömailla jo nyt. Tämä on tietenkin hyvä. Rakentaminen on vaarallista ja raskasta työtä. Mitä nopeammin saamme robottien kestävyyden ja tarkkuuden rakentamisen palvelukseen, sen parempi. Jonain päivänä tekoäly ottavat vastuun myös rakennustemme suunnittelusta. Siihen mennessä meidän pitäisi pystyä opettamaan heille, minkälaisissa ympäristöissä tahdomme elää.

2: Kulutuskulttuurin loppu

Ilmaston lämpeneminen, globaalin jäteongelman eskaloituminen sekä lajien massasukupuutto ovat pakottamassa ihmiskuntaa tutkimaan toimintamallejansa tarkemmin. Suuri osa toiminnastamme on kestämätöntä. Seuraavat huikeat teknologiset innovaatiot jäävät näkemättä, jos elinkelpoisuus laskeekin dramaattisesti nopeammin kuin on tähän asti arvioitu. Rakentaminen muodostaa, laskentatavasta riippuen, kolmasosan ihmiskunnan aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä sekä globaalista materiaalinkulutuksesta. (Falk et al., 2018) Ihmiskunnan väkiluvun kasvaessa ja kaupungistumisen kiihtyessä kaikki tarve-ennusteet viittaavat siihen, että meidän pitäisi rakentaa enemmän, entistä nopeammin. Olemme väistämättömän muutoksen edessä. Rakentamisen energiatehokkuutta, laatua, terveellisyyttä sekä kestävyyttä on parannettava ratkaisevasti ja pian.

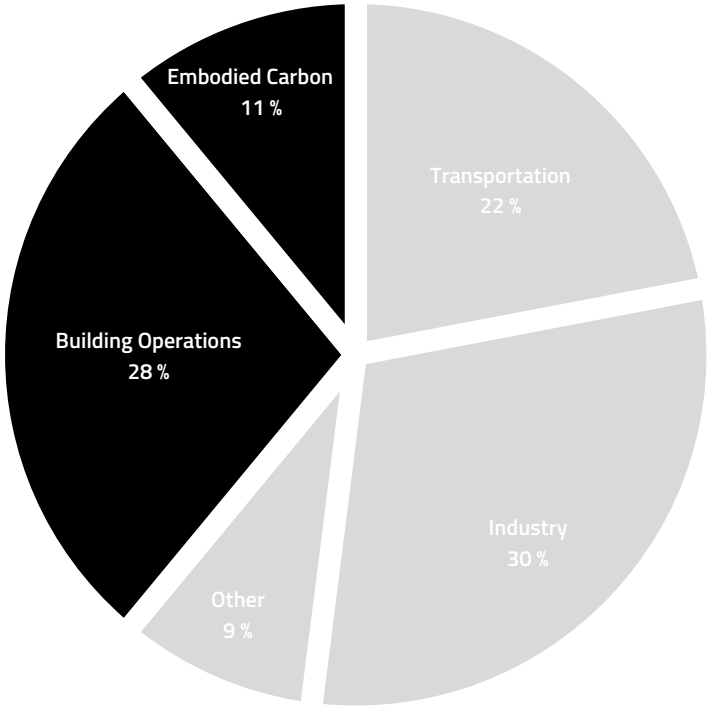






Kaaviot:
Ihmiskunnan kulttuurin kehitys nopeutuu. Käänteentekeviä keksintöjä syntyy yhä tiheämmin.

Global CO2 Emission by Sector



Data Source: UN Environment Global Status Report 2010

PUU JA RAKENTAMINEN

Puu on miltei täydellinen uusiutuva materiaali. Jos rakentamista varten kaadetun puun tilalle istutetaan uutta metsää, käytetty puumateriaali muodostaa hiilinielun. Sementin valmistus ja käyttö aiheuttaa arviolta 8 % koko maailman hiilidioksidipäästöistä. Puuta käyttämällä voidaan säästää hiiltä 50 % käytettyyn betoniin verrattuna. Oikealla laajuudella ajateltuna puurakentaminen voisi siis muodostaa merkittävän osan koko maailman ilmastonmuutoksen ja saasteongelman ratkaisua. (Falk et al., 2018; Li, Rismanchi and Ngo, 2019)

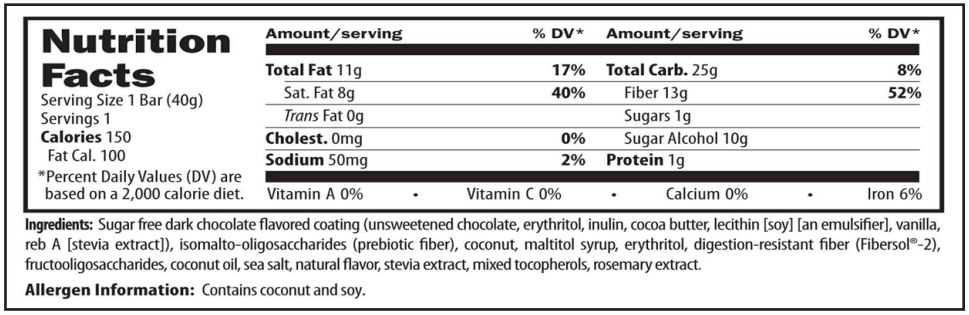
Puun ympärille synnytettävä monomania ei ole sen suositeltavampaa kuin esimerkiksi betoninkaan. Sen sijaan tulee suosia hybridiratkaisuja, joissa oikeat materiaalit ovat oikeissa paikoissa tukemassa toisiaan. Esimerkiksi toteutettaessa suurten kohteiden maanpäälliset rakenteet puusta, kevenee niitä vasten olevien betoniperustuksien materiaalimenekki – sopivissa perustusolosuhteissa ratkaisevastikin. (Waugh Thistleton Architects, 2018)

Ilmastonmuutos on jo täällä. Arkkitehtien ja muiden suunnittelijoiden tulee pyrkiä ekologisesti parempiin ratkaisuihin heti – aivan jokaisessa jo pöydällä olevassa projektissa.

Puun käyttö teollisessa rakentamisessa on vähäistä. Puunkäytön trendi nousee arkkitehtuurissa aika ajoin. Yleensä sitä on kuitenkin totuttu käyttämään vain vuorauksena. Laajempia merkityksiä puurakentamisesta saadaan irti, kun sitä opitaan käyttämään rakenteena ekologisilta arvoiltaan huomattavasti heikompien, betonin ja teräksen sijaan.







Nutrition Facts

Serving Size 1 Bar (40g)
Servings 1
Calories 150
Fat Cal. 100
*Percent Daily Values (DV) are based on a 2,000 calorie diet.

Amount/serving	% DV*	Amount/serving	% DV*
Total Fat 11g	**17%**	**Total Carb.** 25g	**8%**
Sat. Fat 8g	**40%**	Fiber 13g	**52%**
Trans Fat 0g		Sugars 1g	
Cholest. 0mg	**0%**	Sugar Alcohol 10g	
Sodium 50mg	**2%**	**Protein** 1g	

Vitamin A 0% • Vitamin C 0% • Calcium 0% • Iron 6%

Ingredients: Sugar free dark chocolate flavored coating (unsweetened chocolate, erythritol, inulin, cocoa butter, lecithin [soy] [an emulsifier], vanilla, reb A [stevia extract]), isomalto-oligosaccharides (prebiotic fiber), coconut, maltitol syrup, erythritol, digestion-resistant fiber (Fibersol®-2), fructooligosaccharides, coconut oil, sea salt, natural flavor, stevia extract, mixed tocopherols, rosemary extract.

Allergen Information: Contains coconut and soy.



Puun ekologiset, esteettiset, akustiset ja antibakteerisetkin edut tunnistetaan. Puun laajaa ja sen ominaisuuksia oivaltavaa käyttöä estävät mm. vanhentuneet ja puulle epäsuosiolliset rakennusmääräykset sekä asenteet. Kaupallisen visionäärisyyden ja kunnianhimon puute sekä hintaperusteinen kilpailutus laatupisteiden sijaan estävät kehitystä. (Jones et al., 2016)

Rakentamisen ala muuttuu valitettavan hitaasti ja tutkimustiedon hyödyntämisen sijaan rakentamista vaivaa toimiminen totuttujen tapojen orjuudessa.

Massiivipuurakenteilla on paitsi ekologinen, myös kosteutta ja lämpöä tasaava vaikutus. Lisäksi yksinkertaiset rakennustavat ja rakenteet ovat helposti korjattavissa, huollettavissa ja kierrätettävissä. Terveellisyyden ja turvallisuuden tulisi olla prioriteetteinä kaikessa rakentamisessa.



Antibakteerisuus | *Akustiikka* | *Nopeus (jopa +20% verrattuna perinteisiin tapohin)* | *Keveys (jopa 80% keveämpää kuin betoni)* | *Esteettisyys*

Eettisyys | *Hiilijalanjälki* | *Kierrätettävyys* | *Terveys, sisäilma, allergiavapaus* | *Turvallisempi ja terveellisempi työmaa*

Esimerkiksi antibakteeriset hyödyt saadaan esille vain, kun puun raakapinta jätetään esille. Kuitenkin palomääräykset kerrostalorakentamisessa vaativat peittämään suuren osan puupinnasta esim. kipsilevyllä.(Muilu-Mäkelä, Haavisto and Uusitalo, 2014) Paloturvallisuutta ajateltaessa massiivipuurakenteille tulisi olla omat määräykset, koska ne käyttäytyvät ominaisuuksiensa takia eri tavalla kuin esimerkiksi teräs- ja betonirakenteet. Massiivipuu sammuu itsestään, kun irtain palokuorma on palanut pois. Uusimmat tutkimukset ehdottavatkin tämän huomioimista rakenteita suunniteltaessa perinteisten paloluokkien sijaan. (Wiesner et al., 2019)

Koska hinta on pitkään ollut rakennusalan ainoa mittari, yrityksillä ei ole ollut kiinnostusta riskin ottoon ja kehitystyöhön. (Jones et al., 2016)”Kuutiohinnan kirous” on osaltaan periytynyt suomalaisen puuteollisuuden perinteestä, jossa on pyritty minimihintaiseen massatuotteeseen.

Puu on orgaanista eli sen koostumus ei ole homogeeninen. Tämän takia puu vaatii jatkojalostusta massatuotannon laajuudessa. CLT homogenisoi puun ominaisuudet ja CLT levy on kantava kaikkiin suuntiin. (Waugh Thistleton Architects, 2018)

Pitkien rakennusaikojen projekteissa ongelmaksi muodostunut säälle altistuminen on leimannut puun käyttöä riskiksi. Tämäkin on nykyosaamisella käännettävissä vahvuudeksi. Kaikessa rakentamisessa tulisi siirtyä rakentamiseen, jossa kuivaketjusta pidetään huolta hyödyntämällä esimerkiksi Kuivaketju 10 -menetelmää. Hallirakentamisen kustannukset eivät myöskään ole iso kustannuserä koko rakentamisessa etenkin ottaen huomioon sen suoman suojan ja turvan työmaata ajatellen.



Akseli Gallen-Kallela:
"Rakennus"

Kenties vahvin mielikuvallinen ongelma on puhtaasti kulttuurinen. Me suomalaiset olemme tottuneet katsomaan mallia muualta ja oppineet vähitellen väheksymään omaa, vahvasti puurakentamiseen liittyvää rakentamisperinnettämme. Ajatusmallia ovat tukeneet historiassa ennen paloturvallisten vaihtoehtojen kehittymistä tapahtuneet katastrofaaliset tulipalot.

Puun työstämiseen ja puurakentamiseen liittyy eri kulttuureissa jopa vuosituhansia vanhaa osaamista ja perinteitä, jotka ovat unohtuneet nykyaikana. Traditio perustuu käsityölle. Maailman pelastaminen ei onnistu kuitenkaan yksittäisten käsityöläisten toimesta. Todelliset ympäristövaikutukset saavutetaan skaalattavilla globaaleilla puutuotteilla. Toisin sanoen puu muuttuu aidosti vihreäksi kullaksi vasta, kun jalostamme sen riittävän pitkälle esimerkiksi digitalisaatiota hyväksi käyttäen. Digitaalisilla ratkaisuilla ja käsityöperinteen oppeja niihin integroimalla voimme saada aineelliseen materiaaliin kestävää aineetonta lisäarvoa. Oikein mitoitettu ja ymmärretty teollinen puurakentaminen voi olla merkittävässä roolissa maailman pelastamisessa.

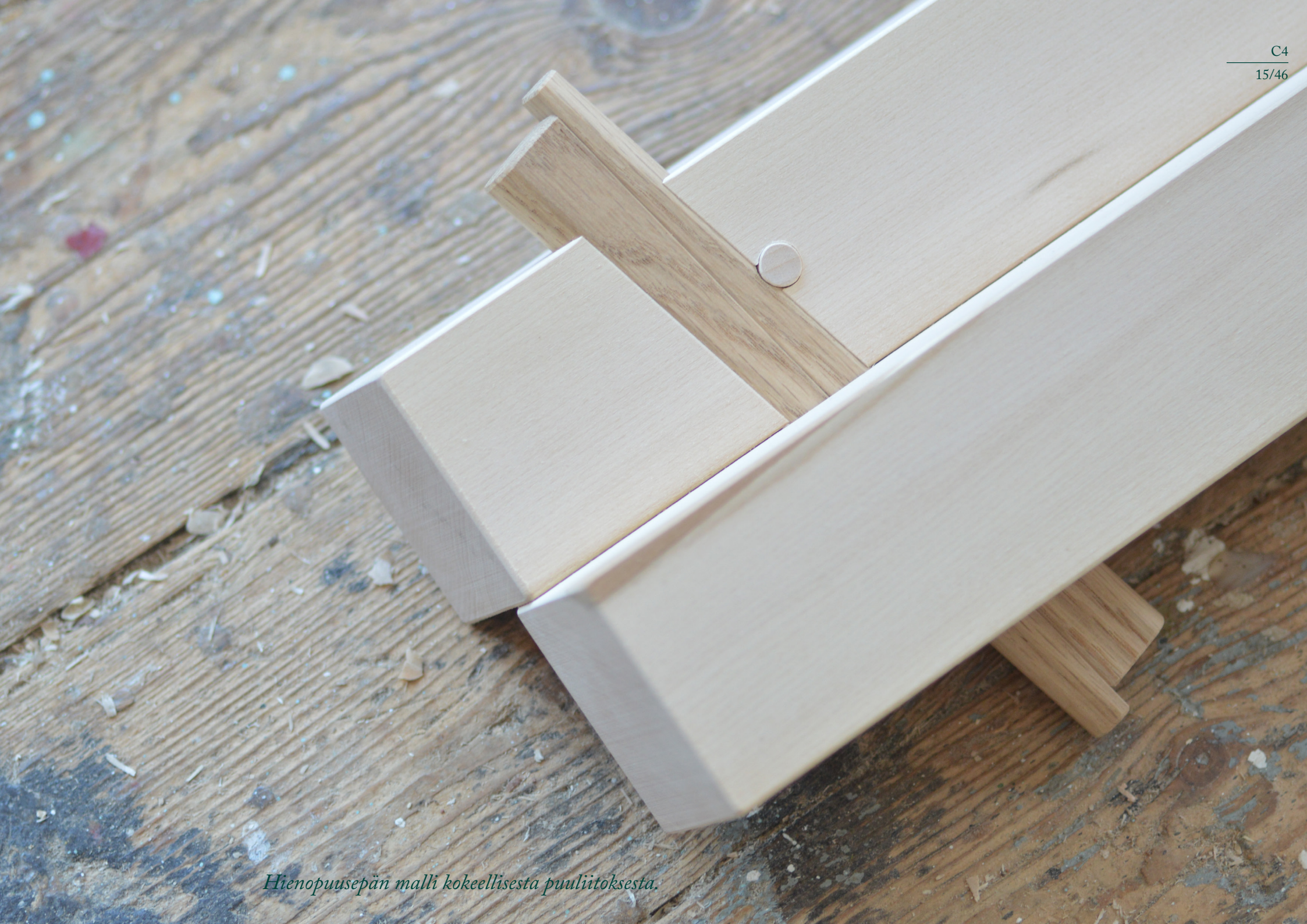




CLT-Plantin valmistamia CLT-levyjä

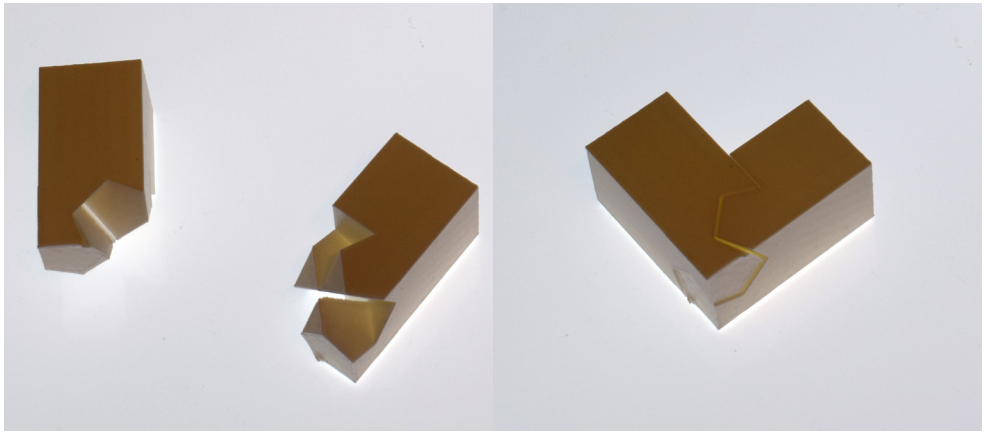


CNC-koneen CLT-levystä jyrsimä koepala.

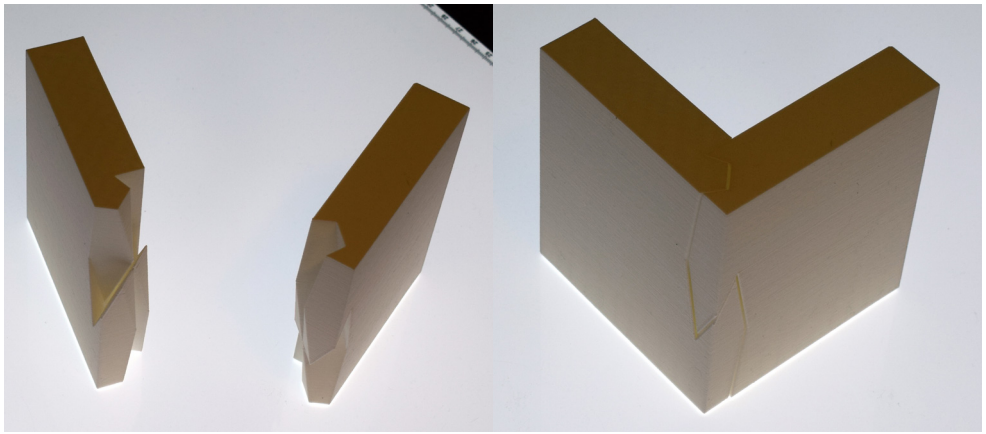


Hienopuusepän malli kokeellisesta puuliitoksesta.

Mahdollisuus



3D-printterin, sekä pöytä-CNC:n avulla suunnittelija voi testata liitosten toiminnallisuutta nopeasti (rapid prototyping). Kuvassa japanilainen puuliitos ja siitä tehty levymäinen muunnelma (tehty CLT-seinän mittasuhteisiin).



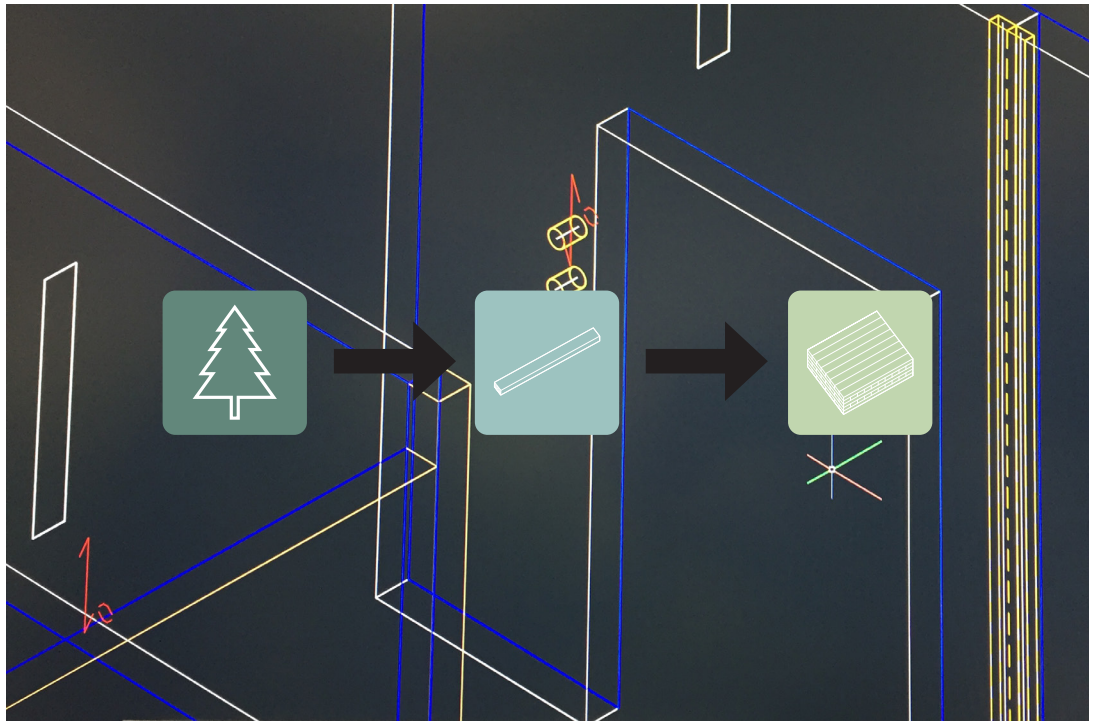
CLT:N POTENTIAALI

CLT - ristiinlaminoitu puu - on levytuote, joka valmistetaan sahatavarasta ja liimasta puristamalla. Liiman määrä ja mahdolliset terveysvaikutukset huolestuttavat monia. Kuitenkin yhdessä CLT-levyssä on keskimäärin vähemmän myrkyllisiksi todettuja ainesosia kuin tyypillisessä lenkkitossussa.

CLT on melko uusi rakennusmateriaali. Se kehitettiin Keski-Euroopassa 1990-luvun alkupuolella. Suomen ensimmäinen CLT-tehdas, Crosslam, perustettiin Kuhmoon vuonna 2014. Suomalainen puu ei valtaosin ole yhtä laadukasta rakennuspuuta kuin vaikkapa Alppi-ilmastosta korjattava tiivissyinen materiaali. Suomalainen puu soveltuu kuitenkin mainiosti CLT:n tyyppisen puutuotteen valmistamiseen.

CLT on kevyttä, mutta kestävää. Se mahdollistaa nopean rakentamisen ja on tällä hetkellä paras uusi mahdollisuus puurakenteiden yleistämiseksi massarakentamisessa. Laajemmin: se on paras näköpiirissä oleva vaihtoehto kestämättömälle betonille.

Tällä hetkellä CLT:n potentiaalia hukataan suunnittelemalla siitä ratkaisuja, jotka ainakin ulkoasultaan ja peruslähtökohdiltaan imitoivat betonirakentamista. Uusia mahdollisuuksia voisi löytää yhdistämällä puurakentamisen perinnettä CLT-rakentamiseen. Digitaalinen suunnittelu ja tuotanto yhdistettynä CLT:hen soveltuisivat hyvin teollisen mittakaavan rakennejärjestelmien luomiseen. Työmailta siirtyisi työtä tehtaille ja tehtailta suunnittelutoimistoihin. Esivalmistusasteen nostaminen ja materiaalin keveys nopeuttavat rakentamista ja kuljetuksia sekä tekevät rakentamisesta keveämpää. (Van De Kuilen et al., 2011)

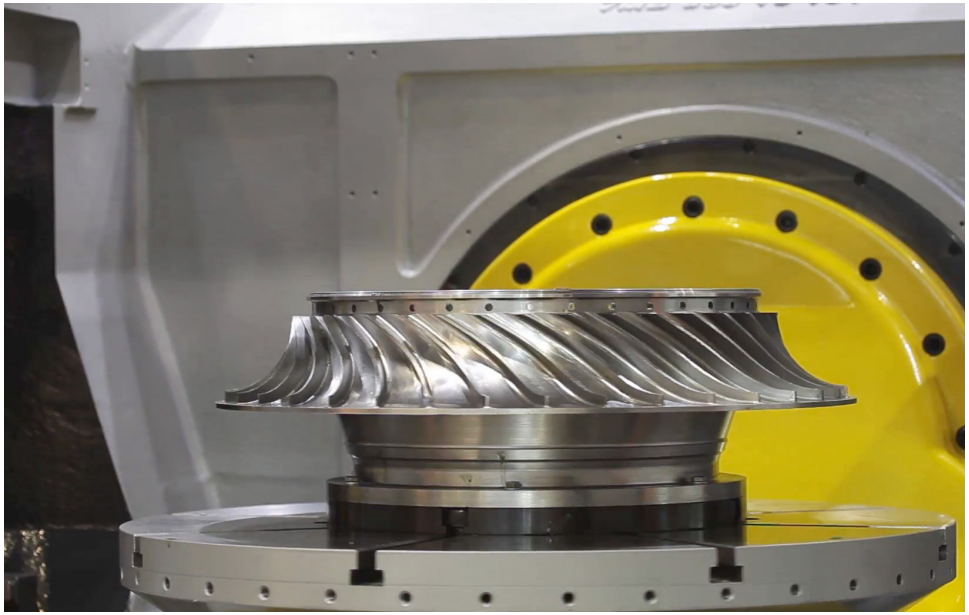




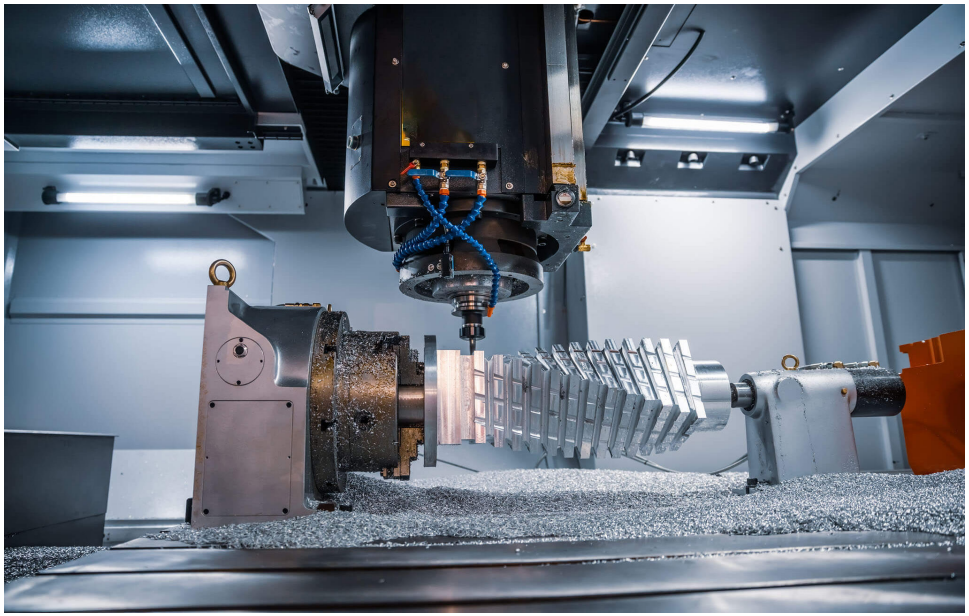


KIERTOTALOUS

CLT sopii osaksi kiertotaloutta. Materiaalinhankinnan eli puun kasvattamisen, valmistuksen sekä käytössä muutettavien tai purettavien CLT-rakenteiden massiiviosat voidaan jalostaa ja uusiokäyttää tai kierrättää valmistusaikaisen oheistuotteen tapaan. Puun sahaustuote ja ylijäämäpalat voidaan käyttää lämmityksessä ja energiantuotannossa. Rakentamisessa, kuten kaikessa inhimillisessä tuottavassa toiminnassa tulee siirtyä 100 %:sesti kierrätettäviin ratkaisuihin.



Päällä ja alla:
Lentokoneen- ja autonrakentamisessa käytettävää CNC -työstötarkkuutta.



ARKKITEHTUURI

CLT:tä työstetään hintaluokassa miljoonien eurojen arvoisilla CNC-laitteilla. Vastaavia laitteita käytetään esim. lentokoneteollisuuden osia valmistettaessa. Nämä tietokoneohjatut laitteet toimivat millimetrien murto-osien toleransseissa. Niiden työstöpotentiaali on siis aivan eri luokkaa kuin mihin rakennusalalla on totuttu. Vaikka tarkkuudessa ja materiaalitehokkuudessa ei tulevaisuudessa mentäisi lähellekään laitteiden täyttä kapasiteettia, voitaisiin silti kehittää tekniikoita ja työtapoja, joiden avulla rakentaminen voisi nousta aivan uudelle tasolle. CLT-elementteihin työstetään tätä nykyä talotekniikan läpivientejä ja ovien sekä ikkunoiden asennusdetaljiikkaa jo tehtaalla. Täsmälliset leikkausmuodot voisivat kuitenkin mahdollistaa esimerkiksi rakenteellisten liitosten jyrsimisen suoraan levytuotteeseen.

Rakenteellisen tektoniikan uusi tuleminen kutkuttaa arkkitehtuurin näkökulmasta. Talojen kauneus voisi jälleen olla tarkoituksen kauneutta rakenteellisten ornamenttien kautta. Kiertotalouden periaatteet tulisivat huomioiduiksi mekaanisin puuliitoksin, joita pystyisi muuntelemaan ja kierrättämään myös uusissa kohteissa. Tiloilta vaaditaan yhä enemmän joustavuutta. Mekaanisin puuliitoksin kiinnittyvät ratkaisut voisivat tehdä tiloista eläviä käyttäjien tarpeiden mukaan.



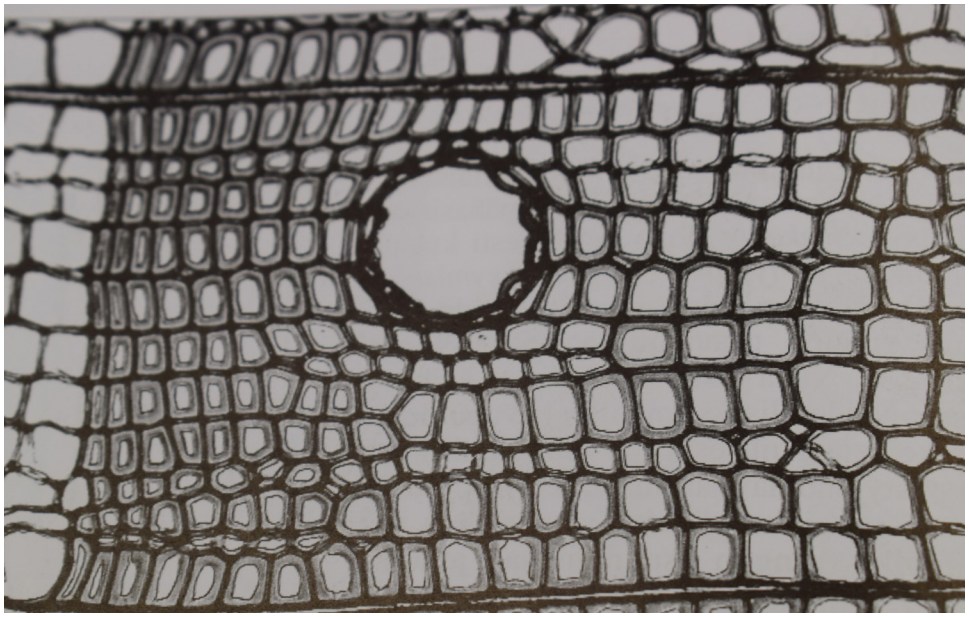
Maailman vanhin puurakennus, Horyu-Jin buddhalaistemppeli Japanissa, on rakennettu 600-luvun alussa.

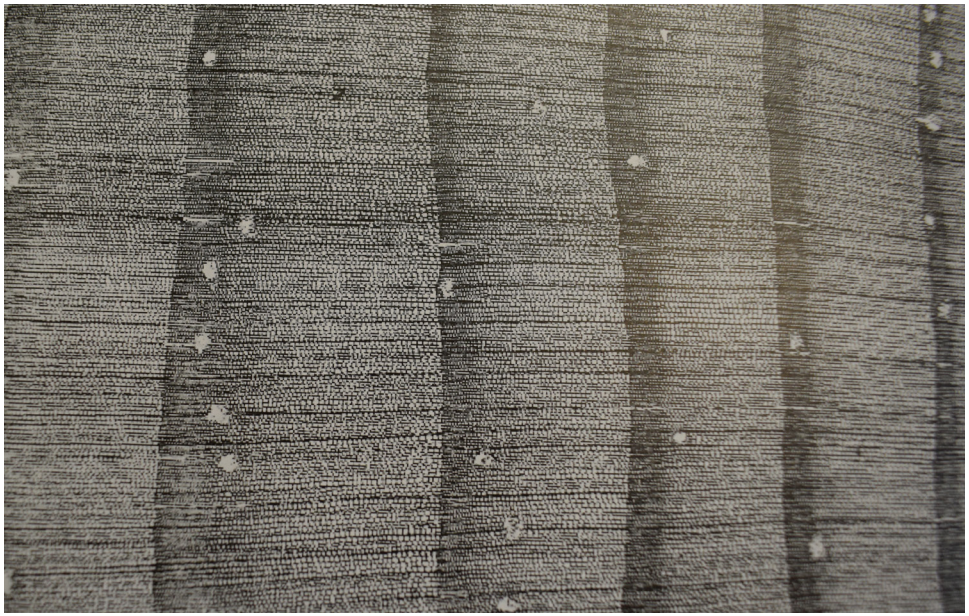
MITÄ PUUSTA RAKENNETAAN MUUALLA?

Tärkein CLT:n käyttökeskittymä sijaitsee edelleen Itävällassa, Saksassa ja Sveitsissä. Iso-Britanniassa materiaalin suosion kasvu on voimakasta, kuten toisaalta koko Euroopassa. Euroopan CLT-tuotanto kaksinkertaistuu aikavälillä 2016-2020 (arv. 1.2M kuutiometriä vuodessa vuoteen 2020 mennessä).

Alppimaat: Itävalta, Saksa ja Sveitsi kuuluvat niihin, joita suomalaiset ovat tottuneet seuraamaan puurakentamisen mallimaina. Kohtuukokoisia hankkeita (<6 kerrosta) toteutetaan niillä seuduin runsaasti, osin myös erittäin korkealla kunnianhimolla. Keskieurooppalaiset eivät ole vannomassa fanaattisesti puhtaiden puurakenteiden nimeen, vaan käyttävät tyypillisesti CLT:tä hybridirakenteen osana. Kantavia osia toteutetaan tyypillisesti myös betonista sekä teräksestä.

Ainakin romanttisesti ajatellen (näkemykset rakentamisen teknisistä laatukriteereistä saattavat vaihdella yllättävän paljon kulttuureittain) puurakentamisosaamisellaan huomiota kiinnittää myös Japani sekä nykyisin aiempaa enemmän Pohjois-Amerikka. Hieman yllättäen on todettava, että maakohtaisen kilpailun suurten (yli 7 kerrosta) ”täysin” puurakenteisten hankkeiden toteutusmäärästä voittaa Iso-Britannia. Seuraavalla sijalla on Kanada, jonka jälkeen tasapisteissä ovat Norja ja Ruotsi. (Waugh Thistleton Architects, 2018)





Orgaanisen materiaalin viehätys:
Ylh: Poikkileikkaus kuusesta (Picea abies) vuosiluston rajalta. Leveät ohutseinäiset kevätpuun (Earlywood) kuidut muuttuvat vähitellen (kuvassa oikealta vasemmalle) kapeiksi paksuseinäisiksi kesäpuun (Latewood) kuiduiksi. (Kuidut kuvina. Marja-Liisa Ilvessalo-Pfäffli)
Alh: Poikkileikkaus männystä (Pinus sylvestris). Kevätpuu muuttuu Kesäpuuksi vähitellen.

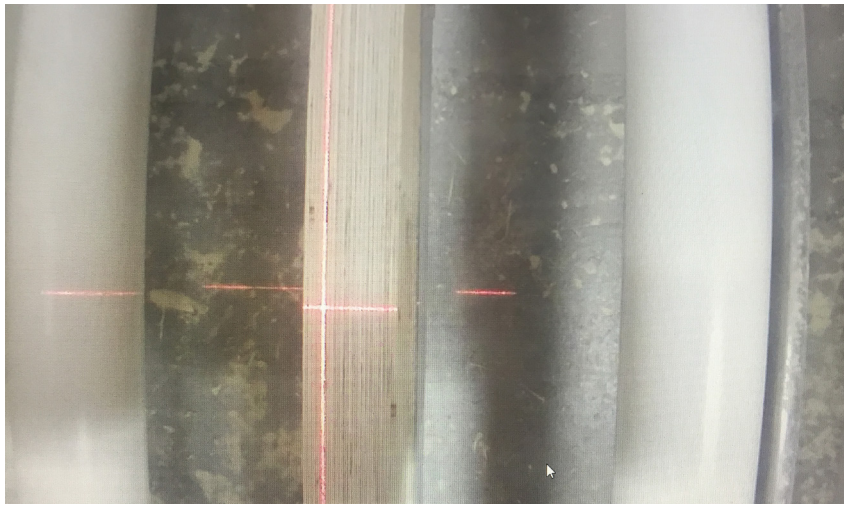
SUUNNITTELUHAASTEET

Asuinrakentaminen sisältää skaalautuvuutensa vuoksi tärkeimmän lupauksen puurakentamisen tehokasta levittämistä ajatellen. Suunnittelijan mahdollisuuksien kannalta julkinen rakentaminen voi silti olla tehokkaampi alusta puurakentamisen ratkaisujen kehittämiselle. Julkinen rakentaminen on - verrattuna suomalaiseen asuinrakentamiseen - vapaa betonistandardisoinnin painolastista. Uudenlaisten ratkaisujen tutkimismahdollisuudet ovat paremmat pitkäkestoisissa ja huolellisesti suunniteltavissa suurissa julkisissa rakennushankkeissa verrattuna asuinrakentamisen suunnittelun tiukkaan aikataulu- ja budjettiraamiin. CLT on toki alkanut yleistyä julkisessa rakentamisessa, Kuhmon puukoulu on siitä kaikin puolin hyvä esimerkki. Korkeammallekin kunnianhimotasoille kurkottavia puurakennushankkeita saisi nähdä viime aikaista tiuhempaan.

Todellisuutta on, että suomalaiset ovat tottuneet paitsi rakentamaan, myös suunnittelemaan betonista. Jo arkkitehdin luonnokset tahtomattaankin viittaavat betonirakentamiseen seinänpaksuuksien sekä muun mitoituksen osalta (muokkaustarve esim. puurakenteeksi voi olla pieni, mutta yleisesti näin kuitenkin on). Rakenteellinen ajattelu perustuu pitkälti moderniin perinteeseen eli käytännössä BES-järjestelmän mukaisiin malleihin. Puun ominaisuuksien sekä sen mahdollisuuksien voimakkaampi tuominen mukaan suunnittelijoiden palettiin lienee koulutusasia.



CNC-kone kohdistaa työstöalueen laserin avulla. (CLT Plant)



CAD-CAM-CNC-CLT

Hypoteesimme on:

1. Työstökoneissa piilee hyödyntämätöntä potentiaalia
2. Potentiaalia täydemmin käyttämällä voisi ratkaisevasti nostaa puutuotteen jalostusastetta, teknistä suorituskykyä, kauneutta sekä arvoa
3. Työpolussa suunnittelijalta tuotantoon on kehittämisen varaa

Metodi



HAASTATTELUT

Vaikka CLT Suomessa on trendikästä ja voimakkaassa nosteessa, ovat alalla toimijat kuitenkin kooltaan pieniä (Stora Enso on mittakaavaltaan suuri toimija, mutta sen CLT-tuotanto keskittyy Keski-Eurooppaan). Kotimaisten CLT-tehtaiden välillä tietoa on liikkeellä verrattain vähän. Tämä on rakennusalalle tyypillistä – tuotekehitykseen ei löydy aikaa tai muita resursseja. Koska sateenvarjo-organisaatiota CLT:n asian edistämiselle ei (vielä) ole, on esimerkiksi terminologian standardisointi puutteellista. ”Perusasioiden” selvittäminen haastattelemalla eri CLT-levy- sekä elementtituottajia, muodostuikin tärkeäksi osaksi hankettamme.

LEVYTUOTE

Eri tehtaat tuottavat käytännössä samaa levymateriaalia. Eri tuottajien suurmitat vaihtelevat marginaalisesti, mutta jokaisen tuote on kutakuinkin mitoitettu kerrostalorakentamisen tarpeisiin. Puutavara on kaikilla valmistajilla vastaavaa: suomalaista kuusta tai mäntyä välillä 20…40mm (lisäksi ainakin osa tehtaista tarjoaa mahdollisuuden laajemmalle pintapuuvalikoimalle). Levyjen paksuus puutavaran kerrannaisina välillä 60mm…300mm.



Materiaali

	Mitkä ovat CLT-levytuotteenne maksimimitat?Onko puristettavan levyn koolla eroa työstettävään levyyn (leveys x pituus min/max)?	**Miten levynne laskutusmitat määräytyvät leveys- ja pituussuunnassa?**
Punkaharjun Puutaito	40000 x 4200 x 300	
Hoisko CLT Finland	11,9mx3,4m	Asiakkaan tarpeen mukaan. Ei mitään porrastusta
Crosslam	Puristus mitan rajat ovat (4000-12000)x(2500-3200)mm. Työstettävän levyn mitoissa otetaan huomioon työstövarat, jotka ovat vähintään 80mm pituus suunnassa ja 40mm leveys suunnassa. Tällä voidaan toteuttaa minimi- ja maksimissaan (3920-11920)x(2440-3160)mm	Sekä leveys-, että pituussuunnassa laskutusmitat määritetään 100mm jaolla.
Timberpoint	max leveys 3,5m, pituus 44m, paksuus 0,35m	Laskutamme neliöissä
CLT Plant	3500x16000 aihio, 3460x15960 valmis	



Työstöterät

Mitkä ovat yleisimmät työstötyökalut joita käytätte?	Tappiterä	Kiekko	Muut jyrsimet	Sirkkeli	Ketjusaha
Punkaharjun Puutaito	x	x	x	x	
Hoisko CLT Finland	x	x	x	x	
Crosslam	x	x		x	
Timberpoint	x	x		x	x
CLT Plant	x	x		x	x

Terät	**Mitkä ovat käyttämienne tappiterien työstökapasiteetti (L=syvyys min/max, Ø=halkaisija min/max)?**	**Minkälaisia syrjäporauksia pystytte tekemään (syvyys max, halkaisija min/max)?**	**Kuinka pieniä kappaleita voitte työstää jyrsimellänne ilman erillistä kiinnitystä? (leveys x pituus min/max)?**
Punkaharjun Puutaito	Ø=3...60, L=20...200	Ø=4/80, L=330	150x150 mm
Hoisko CLT Finland	Ø=50, L=300 | Ø=40, L=250	Ø=30, L=300	kaikki onnistuu jos on tuettu alustasta.
Crosslam	min Ø=10, L=50 | max Ø=40, L=120	min Ø=10, L=50 | max Ø=40, L=120	Tämä on vaikeasti määrättävissä. Yleensä riippuu levyn paksuudesta ja työstön tyypistä. Pienien kappaleiden työstöissä tapilla voidaan käyttää
Timberpoint	Ø=16-80, L=60-300mm	Ø=35-50, L=3000	0,5m x 0,5m
CLT Plant	Ø=40, L=160 | Ø=80, L=300	L=2000	2000x2000mm

TYÖSTÖT

CLT-tehtailla on työstöjen tekemiseen liittyviä pieniä teknisiä eroja, joita kannattaa vertailla erikoisosaamista ja -kapasiteettia vaativissa hankkeissa. Nämä pienet erot voivat muodostua merkittäviksi, kun aletaan suunnitella ja toteuttaa kunnianhimoisempia ratkaisuja, kuten rakenteellisia osia tai esimerkiksi rakenneliitoksia suoraan elementtiin. Perushankkeista selviytyvät kaikki.



Tiedostoformaatit

Mikä on työstökoneenne ohjausohjelmiston natiivi tiedostomuoto?	.xpi	.pgm	.ewd	.anc	.tcn	.bvx
Punkaharjun Puutaito	x	x	x			
Hoisko CLT Finland				x		
Crosslam					x	
Timberpoint						x
CLT Plant						x

Missä tiedostomuodoissa olette vastaanottaneet leikkuutiedostoja?	.ifc	.dwg	.sat	.dxf	.rvt	.bvx
Punkaharjun Puutaito	x	x	x	x		
Hoisko CLT Finland	x	x	x			
Crosslam	x	x	x			
Timberpoint	x	x			x	
CLT Plant	x	x				x

Missä tiedostomuodoissa teillä on valmius vastaanottaa leikkuutiedostoja?	.ifc	.dwg	.sat	.dxf	.rvt	.bvx	.3dm	.pln
Punkaharjun Puutaito		x	x	x				
Hoisko CLT Finland	x	x	x				x	x
Crosslam	x	x	x				x	
Timberpoint	x	x				x		
CLT Plant		x				x		

Laitteet / ohjelmistot	Mitä CNC-työstökoneita käytätte?	Mitä työstökoneen ohjausohjelmistoa/-ohjelmistoja käytätte?
Punkaharjun Puutaito	Uniteam, SCM Routech, Ergon	Xilog, Osai, MMi
Hoisko CLT Finland	Routech area	OSAI
Crosslam	Uniteam	TpaCAD
Timberpoint	Hundegger	Cambium/Hundegger
CLT Plant	Hundegger	Cambium

TIEDOSTOFORMAATIT

Levytuotetta sekä työstökoneen ominaisuuksia tärkeämmät erot tehtaiden välillä liittyvät tiedostoformaatteihin. Eri tehtailla on käytössä eri ohjelmistot 3d-tiedon vastaanottamiseen, sen kääntämiseen CLT-koneen ymmärtävään muotoon sekä itse CLT-koneen ohjaamiseen. Yleisimpien CAD-formaattien avaaminen tehtailla on periaatteessa mahdollista, mutta usein tietoa häviää tiedostokäännöksen tekovaiheessa. Suunnittelijan on tärkeä ymmärtää, että CNC-työstökone ei lue 3D-tiedostoa sellaisenaan, vaan 3D-tiedosto pitää kääntää sarjaksi työstökomentoja ja jokainen pinnanmuotoilu määritetään työstöoperaatioksi.



Tiedostoformaatit

Tiedostomuoto	Alaformaatit	Geometrian tyyppi avattaessa Mastercamilla L=lines S=Solid N=Nurbs surface	Koko Kt
dwg	2004 Lines	L	12 985
dwg	2004 Natural	L	4 078
dwg	2004 Solids	S	8 001
dwg	2004 Polylines	L	10 979
dwg	CAD Imperial	L	34 850
dwg	CAM Metric	L	12 740
dwg	R12 Lines & Arcs	L	7 020
dwg	R12 Natural	L	4 891
dwg	Solid Meshes 3D Polylines	S	12 670
dwg	Solid Meshes	S	12 670
3dm		N	16 237
Iges	Mastercam	N	57 126
x_t	Mastercam	N	17 281
sat	ACIS 1.5	S	28 647
stp		S	34 602
vda		N	106 828
stl	Binary	S	2 063 066
IFC			278 438
btl			



Geometriset rajoitukset

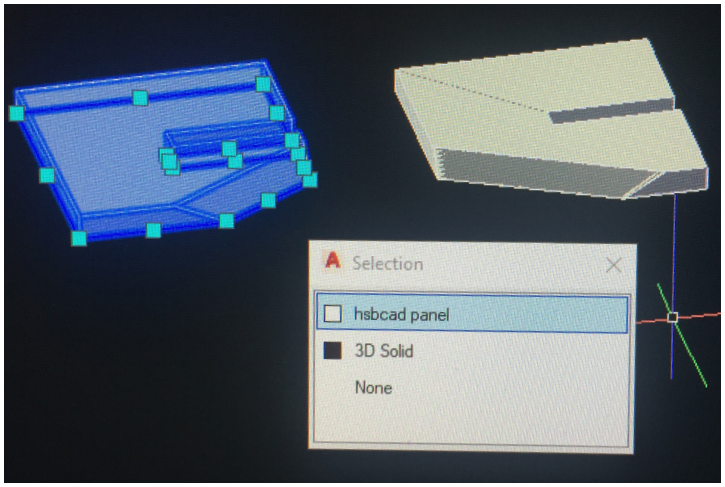


Teränopeudet



Työstönopeudet

Itse työstöön liittyvät konkreettisemmat ongelmat ratkeavat tehokkaimmin tapauskohtaisesti CNC-koneen kuljettajan toimesta.
Työstö- ja teränopeuksien vaihteluja on mahdotontakin arvioida muutoin kuin reaaliajassa. Niitä varioimalla vastataan puumateriaalin epätasaisuuksiin, oksaisuuteen jne.







Työstötesti tiedonsiirrosta ja jyrsinnän toleranssista. (CLT Plant)

KOEPALAT

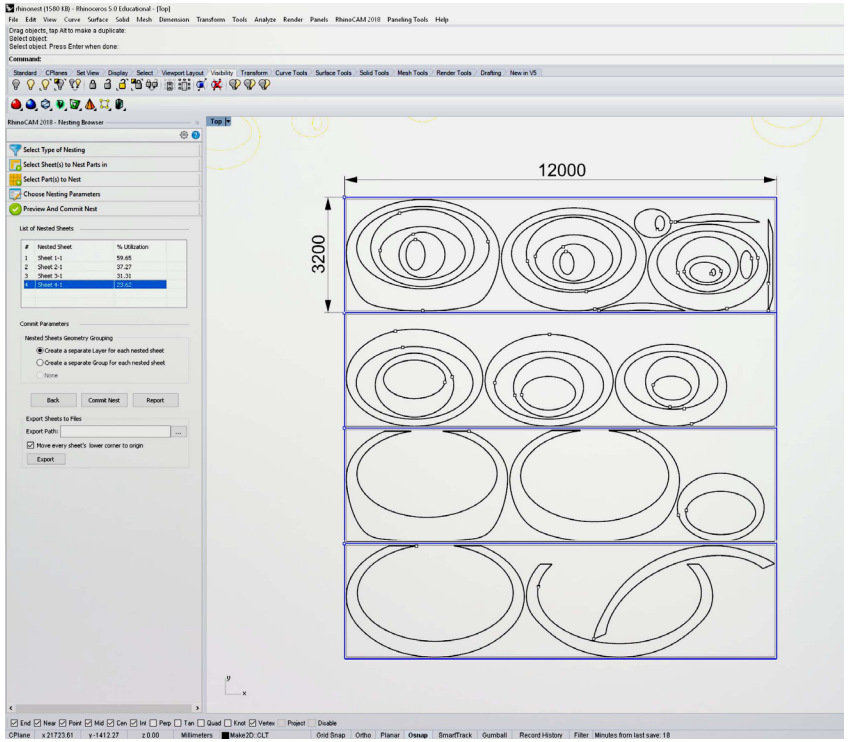
Teimme C4-hankkeessa koepaloja joulukuussa 2018. Koepalat muodostuivat lopulta geometrisesti yksinkertaisista testeistä. Niissä haettiin oppia enimmäkseen työstöjäljen ja materiaalin toleransseista sekä tutkittiin eri terien tuottaman työstöjäljen visuaalisia eroja. Valtaosa koepalojen tekemiseen varatusta työajasta kului tiedostonsiirron ongelmien parissa, vaikka tiedostoformaattien tutkiminen oli aloitettu jo etukäteen. Tämä on kuvaavaa CLT-rakentamiselle ja koko rakentamisen digitalisaation kentälle tänä päivänä. Asiat eivät todella tapahdu nappia painamalla – vaikka niin periaatteessa pitäisi. Sekä suunnittelijoiden että tuotantopuolen ohjelmistot kaipaavat kehitystä ja yhteisen rajapinnan parantamista.



Suunnittelijan tuottamia lukuisia kokonaisgeometriaversioita vertailuun.

TIEDOSTOKOKEET

KIRA-digihankkeemme ja siihen liittyneiden suunnitteluhankkeiden perusteella oli nopeasti selvää, että suurin pullonkaula CLT-rakentamisen kehittämisessä liittyy tiedostonsiirtoon. Kuvaavaa on, että edellisessä kohdassa kuvaillusta koepalaosuudesta suurin osa aikaa kului tiedostonsiirron optimoimiseen.



Leikkuupalojen nestaustesti RhinoCAM-ohjelmistolla.

RAPID PROTOTYPING

3d-tulostimet sekä niiden ohjelmistot ovat hyvin käyttäjäystävällisiä ja hyvä esimerkki siitä, miten suunnittelija voi optimoida työstettävyyttä. Vaikka 3d-tulostin on erilainen työkalu kuin jyrsin, tarjoaa se kuitenkin hyviä mahdollisuuksia suunnittelijalle hahmottaa suunnitelmien ja elementtien toteutettavuutta. 3d-tulostin ja 3-akselinen vanerijyrsin antavat jo erinomaiset mahdollisuudet ymmärtää tuotantopuolen laitteistohaasteita: nestaus, teräsvalinnat, kohdistus, ajonopeus, syysuunta, kääntäminen, tiedostojen aukeaminen jne.

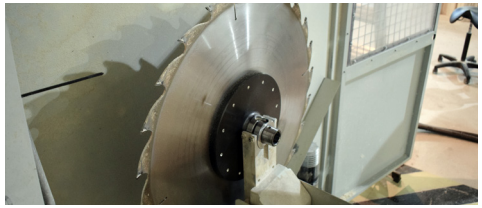
Tulokset



JOHTOPÄÄTÖS

Suunnittelijan mallin hyödyntäminen CLT-tehtaissa sellaisenaan ei yleensä vielä toteudu. Potentiaali suunnittelijan tiedon suoraviivaiselle kääntämiselle tuotantoon on olemassa. Valitettavasti sen saaminen toimivaksi standardiksi vaatii lisää ohjelmistojen kehittämistyötä. Tällä hetkellä järkevintä on hyväksyä, että osa tästä työstä ei vielä tapahdu automaattisesti. Koska mallinnusten osia saatetaan joutua piirtämään käsin ainakin osassa tehtaita, pitää todeta että “CAD-CAM-CNC-CLT” on nykyisin periaatteessa enemmän: “CAD-CAD-CAD-CAM-CNC-CLT”. Ajallisesti pidempään toimineet tehtaat ovat jo tehneet omaa itsenäistä kehittämistyötään ja ovat näin saaneet prosessia muovattua paremmaksi.

Valmiin työpolun sijaan pyrimme tässä vaiheessa tunnistamaan parhaat tiedostonsiirtoformaatit sekä ne asiat, joita suunnittelijat voivat liittää malleihinsa jo nyt.





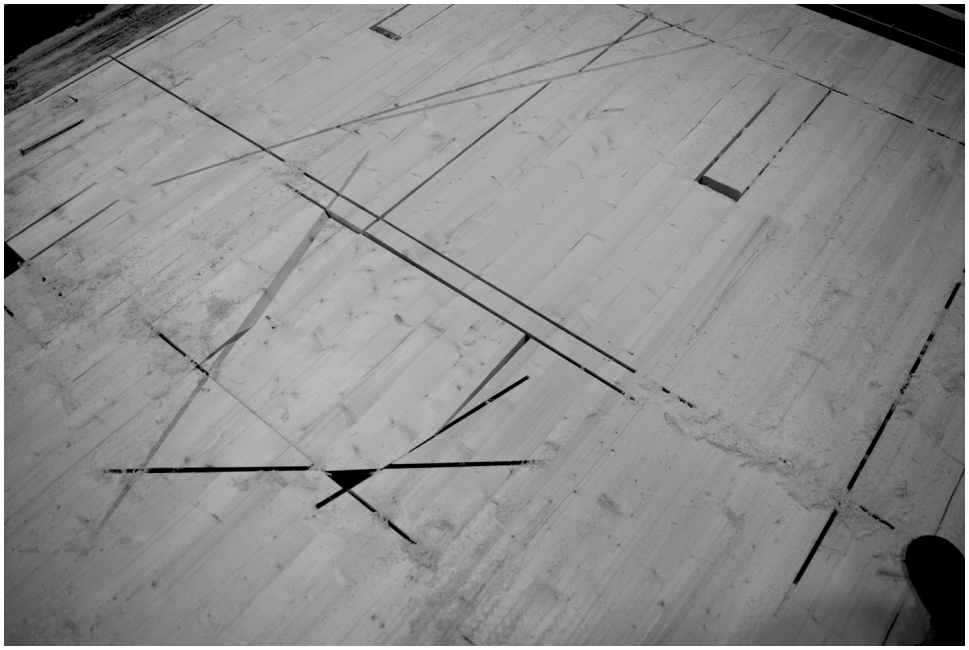
Erilaisia terätyyppejä (Crosslam)

OHJELMISTOJEN PUUTTEET

Sujuva digitaalinen työpolku katkeaa eri vaiheissa syystä tai toisesta. Tiedonsiirto ei ole saumatonta. Geometrian muuttumisen, korruptoitumisen tai tiedon katoamisen uhka kasvaa sitä suuremmaksi mitä useampia kertoja tiedostoja joudutaan siirtämään ohjelmistolta toiselle.
Open source -ajattelu voisi auttaa ohjelmistojen kehitystyötä ja siten CLT- ja puurakentamisen edistymistä. Alla on muutamia poimintoja sekä suunnittelijapuolen että tuotantopuolen ohjelmistojen puutteellisuudesta.

LÄPIVIENNIT

Ohjelmistojen puutteet aiheuttavat harmia. CLT-rakentamisen potentiaali on siinä, että kaikkien erikoissuunnittelijoiden työstöt saadaan samoihin elementteihin ja näin työmaalla käytettävät kalliit ja virhealttiit tunnit vähenevät. Kuitenkin esimerkiksi melko yleisellä AutoDeskin HSBCAD -ohjelmistolla oli ongelmia kaikkien kaarevien muotojen kääntymisessä, vaikka asiaa kokeiltiin useissa eri tiedostomuodoissa. Erityisen haasteellisia olivat muun muassa sylinterin muotoiset leikkausmuodot, jotka ovat rakentamisessa tyypillisiä kaikkien läpivientien muodossa. Jos kaikkien suunnittelijoiden malleista ei saada vietyä millintarkkaa tietoa tuotantoon, kadotetaan digitaalisen tuotannon potentiaali.



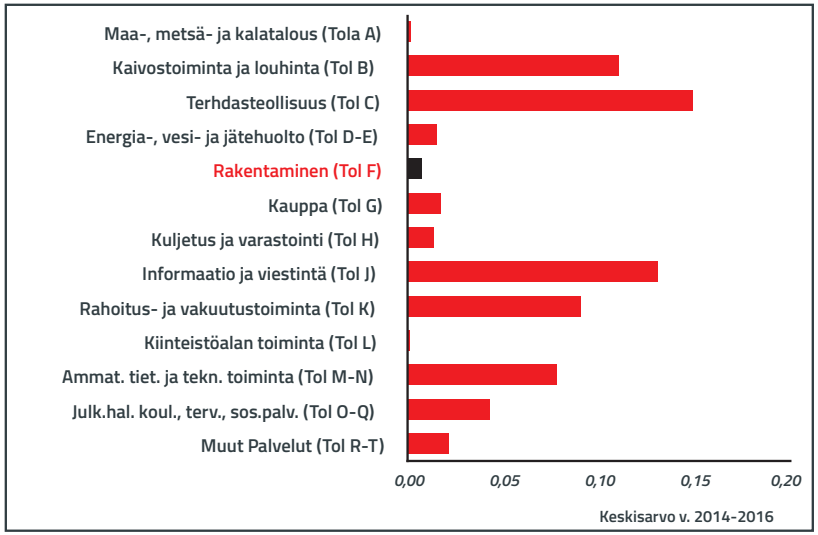
”ESINESTAUS”

Tarjousten paikkaansa pitävyyttä ja hukan minimointia helpottaisi varsinaista tehtaan nestausta edeltävä arkkitehdin tekemä esinestaus. Tämän avulla materiaalimenekkiä ja toimeksiannon hintaa voidaan tehtaalla arvioida tarkemmin. Automaattisissa nestausohjelmistoissa on puutteita. Rhinoceros ohjelmiston päällä toimiva Rhinocam hoitaa kätevästi varat reunoihin ja leikkuukappaleiden väliin optimoiden ja minimoiden tarvittavan levymäärän. Kuitenkin Rhinocam pystyy suorittamaan nestauksen vain 2D-viivoista (curves, polylines) eikä 3D-kappaleista.

GRASSHOPPER BEAVER-PLUGIN & HUNDEGGER

Parametriseen mallintamiseen soveltuva Grasshopperin plug-in Beaver -ohjelmiston avulla on mahdollista määritellä suoraan radat (terätyypit ja leikkuugeometriat) arkkitehdin malliin. Kuitenkin Beaverin tuottama Hundeggerin natiivi tiedostomuoto btl. ei toimi kaikkien CNC-koneiden kanssa. Uusimmassa Hundeggerissa btl. ei aukea.
Laitevalmistajien omat rajoitukset estävät kehitystä. Esimerkiksi Hundegger CNC-jyrsimen 64- ja 32-bittiset versiot eivät ymmärrä toistensa tiedostoja.

Tutkimus- ja kehitys -intensiteetti (T&K -investoinnit / arvonlisä) eri päätoimialoilla (Lähde: Tilastokeskus)





OSAAMINEN

Tehtaiden henkilöstö on tyypillisesti rakennusalan henkilöstöä. Osalla nuoremmasta työvoimasta on tietokoneiden käyttöön liittyvä perusosaaminen. Ohjelmistojen linkittäminen ja lisäosien ohjelmointi vaatisi kuitenkin laajempaa ja syvällisempää tietokoneosaamista. Suunnittelijoilla ei ole riittävää ymmyrrästä esimerkiksi tiedotoformateista ja mallinnuskäytännöistä ja digitaalisen työpolun testaaminen koetaan aikasyöpöksi projekteissa. Näin päädytään turhauttaviin työkäytäntöihin, joissa jotenkuten käännettyä mallia siivotaan päivätolkulla.

KEHITYSEHDOTUKSIA

Tehtaiden kehitysehdotuksia listattuna kyselyn ja haastattelujen pohjalta.
-Suurin haaste on tällä hetkellä saada eri osien (esim kerrostalo), tunnukset seuraamaan CAD-ympäristöstä CAM-ohjelmiin. Nyt on liikaa manuaalista uudelleen nimeämistä, koska tätä ei ole vielä saatu missään ratkaistua.
-Pitäisi saada suunnittelusta ainakin aina 3D malli ja kaikki elementit siinä erikseen mallinnettuina. Vielä voisi olla raakanestaus, mutta se voi olla liikaa vaadittu. Myöhemmin saisi olla CNC ohjelma CADistä suoraan työstökoneelle, mutta se on pitkä tie. Silloin pitää olla kaikki terätiedot jo CADissä selvillä.
-Yhteinen verkkotiedosto, jossa voidaan jakaa puolin ja toisin esim. kuvia ja josta voidaan seurata reaaliaikaisesti suunnitelmien kehitystä ja muutoksia.
-Yksi softa, jossa on konversiot ohjelmien välillä.
-Suunnitteluohjelmiston pitää olla sellainen, että kun kerran joku suunnittelee/mallintaa rakennuksen, sen työstöt ja aukot ovat suoraan siirrettävissä työstökoneelle, esim. IFC-mallista suoraan bvx -muotoon. Silloin tietenkin suunnittelijoiden ja tehtaiden täytyy olla tiiviissä vuorovaikutuksessa, jotta suunnittelijat tietävät, mikä on tuotannossa mahdollista toteuttaa ja mikä ei.



Erilaisin pintakäsittelyin voi parantaa kestävyyttä kosteudelle ja samalla tuoda esille kerroksellisuutta esteettisenä tehokeinona. (Crosslam)

PARADIGMA

Pohtimisen arvoinen kysymys on, pitäisikö tehtaiden nähdä itsensä vähemmän rakennusalan toimijoina ja enemmän digitaalista teknologiaa hyödyntävinä edistyneinä puutuotevalmistajina. Kehittämällä tiedonsiirtoa ja luomalla standardeja voisi olla mahdollista siirtää suunnittelu- ja ohjelmointityön painopistettä sekä vastuuta toteutettavien mallien täsmällisyydestä pois tehtailta suunnittelijalle.

CLT-alan kehittymiselle edullisinta olisi vastaavan paradigman laajentaminen itse työmaiden prosesseihin: rakennustyömaista kokoamistyömaiksi. CLT-rakentaminen voi tuoda disruption vanhanaikaiselle rakentamisen alalle, jos työpolkua ja tuotetta lähdetään kehittämään monialaisella osaamisella.

...olisiko siinä tulevaisuus?



CNC-koneen CLT-levyyn jyrsimä oviaukon kulma.



Hienopuusepän malli kokeellisesta puuliitoksesta.

Pohdinta



Lähtökohtainen hypoteesimme oli, että on mahdollista parantaa tiedon liikkuvuutta ja tiedostojen kääntämistä suunnittelijoiden käyttämien suunnitteluohjelmien ja CLT-tehtaiden käyttämien työstöohjelmien välillä. Hankkeessa selvisi, että eri ohjelmistojen rajapinnoissa on paljon puutteita. On paljon tekemistä, jotta suunnittelijan ohjelmistoista saadaan kehittyneitä malleja sujuvasti tuotantoon.
Luultavasti järkevä ensi askel kohti kykyä toteuttaa kompleksisia geometrioita olisi määrittää tärkeimmät työstöt suoraan arkkitehdin malliin, jotka voitaisiin liittää työstötiedostoon tehtaalla. Siihenkin on vielä matkaa - tällä hetkellä tarvitaan erikoisohjelmistoja käännösten tekemiseksi. Realistisempi ensi askel olisi standardoida elementtien litterointi sekä mittojen ja merkintöjen esitystapa niin, että tärkein tieto olisi aina 3D-tiedostossa tehtaalla työskentelevien saatavissa.

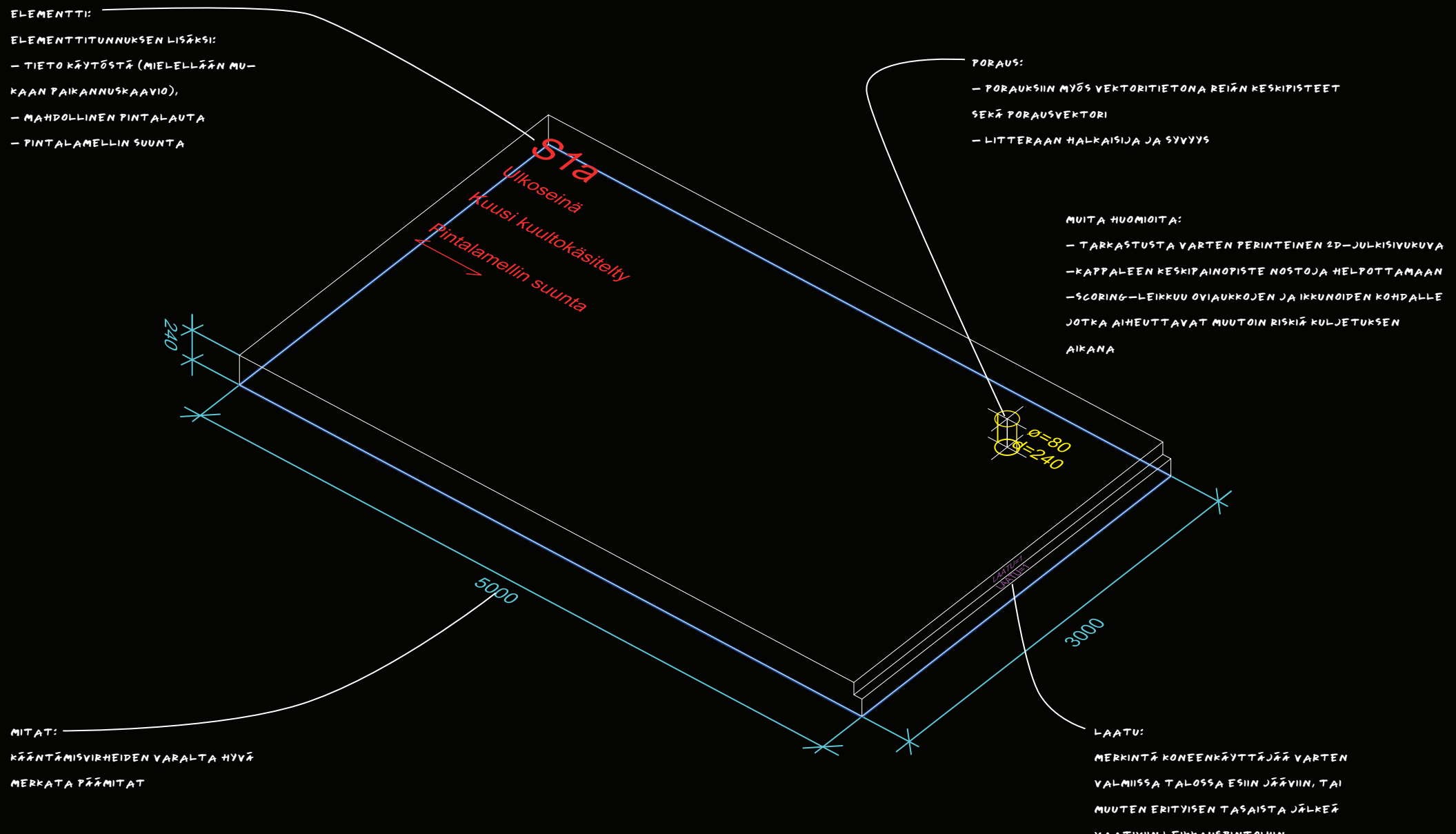
Pidemmällä tähtäimellä pitäisi pohtia, mistä löytyisi resurssia koodata universaali kääntäjäohjelma, joka soveltuisi nimenomaan rakentamisen tarpeisiin. Toisaalta täytyy hyväksyä, että informaatiotekninen murros on vasta tapahtumassa ja että ohjelmointiin ja tietokoneisiin liittyvää koulutusta tehdään perusopetustasolla koko ajan. Uusi työvoima omaa siis aina vain paremmat mahdollisuudet oppia vaadittavat tietotekniset taidot. Vaatimustason kasvaessa on haasteena saada pätevä työvoima muuttamaan pienille paikkakunnille, joissa tehtaat yleensä sijaitsevat. Tällä hetkellä puurakentamiseen liittyy pakollisia tehtäviä ja osaamisalueita, jotka eivät ole kenenkään vastuulla. Pääsuunnittelijana toimivan arkkitehdin vastuualueetta voisi laajentaa Sveitsin, Itävallan ja Saksan mallien mukaan. Myös tämä kehityssuunta vaatisi arkkitehdin- ja rakennesuunnittelijakoulutuksen päivittämistä puurakenteiden osaltaLopputuloksena tulee tähdätä koko rakennusalan paradigman muutokseen. Rakennustyömaat tulevat muuttumaan kokoamistyömaiksi, joissa kestävät ja vahvat robotit asentavat osia millin tarkkuudella. Tehtaiden osuus on tuottaa valmiimpia ja tarkempia osia.

	NYT	TULEVAISUUDESSA
TEHTAALLA:	TUOTEVALMISTAMINEN (YLEISPÄTEVÄ)	OSAVALMISTAMINEN (SPESIFINEN)
RAKENNUS-PAIKALLA:	RAKENTAMINEN (SOVELTAMINEN)	KOKOAMINEN (ASENTAMINEN)

NYT (PERIAATE)	NYT (KÄYTÄNTÖ)	MAHDOLLISUUS (JO NYT)
1: ARK LUONNOS	1: ARK LUONNOS	1: ARK LUONNOS
2: PARAMETRINEN MALLI	2: CAD-MALLI	2: PARAMETRINEN MALLI
3: CAM-MALLI	3: TEHTAAN LUONNOS	3: TYÖSTÖOHJELMA
4: TYÖSTÖOHJELMA	4: CAM-MALLI	4: TYÖSTÖ
5: TYÖSTÖ	5:TYÖSTÖOHJELMA	
	6:TYÖSTÖ	

Digitalisaatiosta ei ole saatu vielä lähimainkaan kaikkia hyötyjä irti. Usein kuultu vastaus ongelmatilanteessa on ”ohjelmisto ei pysty”. Jos ohjelmisto ei suoriudu, se pitää ohjelmoida! Rakennusalalla on totuttu siihen, että ”rauta maksaa”. Sekä tehdasinvestoinnit että rakennushankkeet liikkuvat investoinneiltaan miljoonissa, kun taas suunnittelun ja ohjelmoinnin kohdalla puhutaan murto-osista. Investoimalla suunnitteluun, ohjelmointiin ja tuotekehitykseen saataisiin rautakin takomaan tehokkaammin. Aineettomalla lisäarvolla on saavutettavissa huomattavasti kannattavammat markkinat – eteenkin Suomen kokoisen pienen maan kohdalla.

Kannustamme sekä suunnittelijoita että tuontantopuolta jakamaan keskenään avoimemmin tietoa alan kehittämiseksi!



Kuva on haastattelujen pohjalta syntyneen tämän hetken (CAD-CAM-CNC-CLT beta v0.9) elementtimallin ideaalisisällöstä. Tiedostoformaatiksi suosittelemme tällä hetkellä (12/2018) 3D-dwg:tä. Leikattavien kappaleiden tulee olla solideja.

Sanasto



CAD
Computer-aided Design, suom. ”Tietokoneavusteinen suunnittelu”

CAM
Computer-aided Manufacturing, suom. ”Tietokoneavusteinen valmistus”

CNC
Computer Numerical Control, suom. ”Tietokoneistettu numeerinen ohjaus”

CLT
Cross-laminated Timber, suom. “Ristiinlaminoitu puu”

3D-malli
Mikä tahansa, mitä tahansa kolmiulotteista tietoa sisältävä suunnitteludokumentti

Tietomalli (Building Information Model / BIM)
Rakennuksen toteuttamiseen tai ylläpitoon liittyvää spesifistä tietoa sisältävä kolmiulotteinen suunnitteludokumentti

Suunnittelijan malli
Tapauksesta riippuen joko 3d-malli tai tietomalli. Sisältö tyypillisesti rakennesuunnittelijan mallintamaa, mutta tietyissä tapauksissa mahdollisesti myös arkkitehdin mallintama.

Ohjelmointi
Työstöratojen määrittely (mikä terä, mikä nopeus, missä järjestyksessä)

Kara
Työstökoneen terän kiinnityskappale.

Rata
Reitti, jota pitkin työstölaitteen terä kulkee työstössä.

Scoring
Jyrsintä vain osin pinnasta. Käytetään esim. kun osa halutaan leikata pois vasta työmaalla.

Suunnitteluohjelma
Suunnittelijan CAD-ohjelma.

Syrjätyöstö
Levyn sivusta tapahtuva työstö

Terä
Esim. pyöröterä, tappiterä, pyörösahanterä, poranterä, moottorisahan terä (ks. kuvat sivulla 30)

Tiedostoformaatti
Suunnittelu- tai valmistustiedoston tallennusmuoto.

Työstö
Tietyllä terällä ajettava rata

Työstöohjelma
Työstökonetta ohjaava ohjelma. Syöttää perättäisiä työstöjä työstökoneeseen.

Työstökone
Tietokoneen ohjaama eri teriä sisältävä laite, joka tekee leikkaukset, poraukset ja jyrsinnät CLT-levyyn (tai muuhun materiaaliin).

Jyrsin
Kansankielinen ilmaisu työstökoneelle.

Z-akseli
Tavallisesti suunnitteluohjelmistoissa korkeusakseli (XYZ)

0-taso
Työstöpöydän taso eli työstettävän kappaleen alin taso.

Probing
0-tason etsiminen ei-manuaalisesti. Voi tapahtua työstökoneesta riippuen esimerkiksi laserin tai magneetin avulla.

Työstövara
Terän liikkeen ympärille tai jäljelle jäävään työstettävään kappaleeseen sen koossa säilyttämiseksi jätettävä marginaali.

C-levy
CLT-levy, jossa pintalauta kulkee levyn poikkisuunnassa.

L-levy
CLT-levy, jossa pintalauta kulkee levyn pituussuunnassa.

Työryhmä ja kiitokset



C4 työryhmä: Tommi Alatalo, Emmi Keskisarja, Heikki Paso, Janne Teräsvirta, Antrei Hartikainen

Työryhmämme esittää kiitokset hankkeen rahoittajille:
Ympäristöministeriön KIRA-digiohjelmalle sekä Suomen Kulttuurirahaston Uudenmaan rahastolle. Suuret kiitokset CLT-tehtaille hyvästä yhteistyöstä, innostuneesta asenteesta ja kehityshengestä!
Toivottavasti pääsemme yhdessä kehittämään ja toteuttamaan kunnianhimoista puuarkkitehtuuria!

Kiitämme lämpimimmin seuraavia henkilöitä, jotka ovat tehdasvierailuilla toimineet yhteistyökumppaneinamme:
Juha Virta, Miikka Vainio, Miia Korhonen, Markus Pääkkönen, Esa Rautiainen, Tiina Heiskanen, Ville Manninen, Tomi Malin, (Crosslam | Kuhmo), Jukka Peltokangas, Maarit Liikala, Beata Kallio, Matias Yli-Mannila, Matti Yli-Sissala (Hoisko CLT Finland | Hoisko), Petri Hyvönen, Anne-Mari Leppinen, Jani Kallio, Henrik Tapio ja ryhmähaastatteluun osallistunut koko tuotannon tiimi (CLT Plant | Kauhajoki),
sekä kyselyyn osallistuneita:
Timo Pennanen, Janne Tirronen, Jukka Silvennoinen (Punkaharjun Puutaito),
Marko Suonpää (Timberpoint).

Lähteet

Falk, J. et al. (2018) 'Exponential Climate Action'. Available at: http://exponential-roadmap.futureearth.org/wp-content/uploads/2018/09/Exponential-Climate-Action-Roadmap-September-2018.pdf.

Jones, K. et al. (2016) 'Adoption of unconventional approaches in construction: The case of cross-laminated timber', Construction and Building Materials. The Authors, 125, pp. 690–702. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.088.

Van De Kuilen, J. W. G. et al. (2011) 'Very tall wooden buildings with Cross Laminated Timber', Procedia Engineering. Elsevier B.V., 14, pp. 1621–1628. doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.204.

Li, J., Rismanchi, B. and Ngo, T. (2019) 'Feasibility study to estimate the environmental benefits of utilising timber to construct high-rise buildings in Australia', Building and Environment. Elsevier, 147(October 2018), pp. 108–120. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.09.052.

Muilu-Mäkelä, R., Haavisto, M. and Uusitalo, J. (2014) 'Puumateriaalien terveysvaikutukset sisäkäytössä-kirjallisuuskatsaus', 5, p. 10. Available at: http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp320.htmwww.metla.fi.

Waugh Thistleton Architects (2018) 100 projects UK CLT. Available at: https://www.thinkwood.com/clt100book.

Wiesner, F. et al. (2019) 'Structural capacity in fire of laminated timber elements in compartments with exposed timber surfaces', Engineering Structures. Elsevier, 179(October 2018), pp. 284–295. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.10.084.

GOVERNMENT KEY PROJECT

KIRA-digi

&



