

Cecilia Halonen

JOUSTAVASTI LAAJENTUVA JA MUUNTUVA KEN-MODULAARISUUS

Japanilainen ken-mitoitus apuna muuntojoustavassa moduulirakentamisessa

JOUSTAVASTI LAAJENTUVA JA MUUNTUVA KEN-MODULAARISUUS

Japanilainen ken-mitoitus apuna muuntojoustavassa moduulirakentamisessa

Cecilia Halonen
Opinnäytetyö
Kevät 2022
Rakennusarkkitehdin tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennusarkkitehdin tutkinto-ohjelma

Tekijä(t): Cecilia Halonen

Opinnäytetyön nimi: Joustavasti laajentuva ja muuntuva ken-modulaarisuus

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Flexibly expandable and convertible ken-modularity

Työn ohjaaja(t): Kai Tolonen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2022

Sivumäärä: 45 + 2 liitettä

Moduulirakentaminen on ollut kovassa noususuhdanteessa viime vuosien aikana. Suurin syy tähän on sen kustannustehokkuus. Moduulirakennustuotannossa moduulit esivalmistetaan hyvin pitkälle tehdasoloissa ja kootaan yhteen työmaalla. Rakennusprosessin aikataulu, kustannukset ja materiaalihävikki jäävät verrattain pieniksi. Moduulien välinen joustava vaihtelu ja muuntelu eivät kuitenkaan ole vielä saavuttaneet sujuvaa tasoa.

Tämän opinnäytetyön aiheena oli muuntojoustava modulaarinen rakentaminen. Tavoitteena oli löytää ratkaisumalli moduulirakentamisen joustavan muunneltavuuden ja laajennettavuuden haasteeseen.

Aluksi perehdyttiin moduulirakentamisen hyötyihin ja haasteisiin. Työssä tutkittiin eri rakennejärjestelmiä pohtien niiden soveltuvuutta modulaarisuudelle ja muuntojoustavuudelle. Lisäksi tutkittiin jo toteutettua tai toteutumassa olevaa moduulirakentamista perehtymällä kolmeen moduulirakennukseen Suomessa ja Ruotsissa. Merkittävimpänä osana työssä perehdyttiin japanilaisen perinteisen arkkitehtuurin ideologiaan ja menetelmiin, minkä tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin ne voisivat toimia länsimaisen moduulirakentamisen muuntojoustavuuden haasteen ratkaisemisessa.

Tutkimuksen perusteella huomattiin, että japanilainen perinteinen arkkitehtuuri on erittäin potentiaalinen kenttä löytää uudenlainen perspektiivi moduulirakentamisen muuntojoustavuudelle. Opinnäytetyön lopputuloksena syntyi neljä erikokoista moduulia, joiden mitoitus perustuu japanilaiseen ken-ruudukkoon. Moduuleille suunniteltiin 5–6 erilaista seinäelementtivaihtoehtoa, jotka olisivat vapaasti valittavissa ja vaihdettavissa. Työn lopussa otettiin käyttöön yhteensä 20 moduuliratkaisua, joista ohjelmoitiin esimerkinomainen ken-modulaarinen rakennushahmotelma ja sen luonnospohjapiirustukset.

Asiasanat: Moduulirakentaminen, tilaelementti, elementtirakentaminen, muuntojoustavuus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Architecture

Author(s): Cecilia Halonen

Title of thesis: Flexibly expandable and convertible ken-modularity

Supervisor(s): Kai Tolonen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2022

Number of pages: 45 + 2 appendices

Modular construction market has been in a boom during the last years. The main reason for that is its great cost-efficiency. In modular construction process standardized components of a structure are produced in an off-site factory and assembled later on-site. The schedule, labor costs and material waste of the construction process will be relatively minimal. Currently the flexibility in convertibility between the modules has not yet achieved a fluent level.

The topic of the thesis was flexible and convertible modular construction. The aim of the work was to find a solution for the challenge brought by the flexibility and convertibility in modular construction. The architectural ideology of the thesis's result is based on a traditional Japanese architecture.

The first step of the thesis was to investigate the general aspects of the modularity as well as its benefits and challenges. The work also investigated different structural systems mostly used in building construction in aim to bring up their applicability in flexible modularity. Additionally, the thesis looked into a few existing modular buildings in Finland and Sverige. The most remarkable part of the thesis was the research of the ideology and methods of the traditional Japanese architecture which was to aim to discover its potential in solving the challenge of the flexibility in modularity.

Based on the research of the work it is possible to state that traditional Japanese architecture is indeed a potential field in finding new perspectives for flexible and convertible modular construction. As the result of the thesis, modules based on Japanese ken grid in four different sizes were designed. From five to six prefabricated wall elements were designed for the each of the modules depending on the size of the modules. At the end of the work, 20 modules were taken into use and a simulation of an exemplary Ken-modular building and floor plan sketches were designed.

Keywords: modular construction, space element, prefabrication, flexibility, convertibility

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	MODULAARISEN RAKENTAMISEN MAHDOLLISUUDET JA HAASTEET	7
2.1	Moduulirakentaminen yleisesti	7
2.2	Moduulirakentamisen hyödyt.....	9
2.3	Moduulirakentamisen haasteet.....	10
2.4	Rakennejärjestelmien tutkiminen.....	12
2.4.1	CLT	12
2.4.2	Teolliset massiivihirsirakenteet	14
2.4.3	Rankarunko.....	16
2.4.4	Pilari-palkkijärjestelmä	17
2.5	Japanilainen perinteinen arkkitehtuuri	18
3	MODUULIRAKENTEISIA ESIMERKKIRAKENNUKSIA	22
3.1	Tukholman Norra Tornen -kaksoistornitalot.....	22
3.2	Tampereen Hervannan CLT-moduulipuukerrostalot	23
3.3	Satavuon koulu ja päiväkot.....	25
4	RATKAISU JOUSTAVASTI MUUNTUVALLE JA LAAJENTUVALLE MODULAARISUUDELLE	27
4.1	Muuntojoustavuus	29
4.2	Rakennejärjestelmä.....	30
4.3	Mitoitus.....	31
4.4	Moduuliratkaisut	31
4.5	Esimerkinomainen ken-modulaarinen rakennushahmotelma ja luonnospohjapiirustukset.....	33
5	YHTEENVETO	42
	LÄHTEET.....	43
	Liite 1 Alustava tilaohjelma, 1. ja 2. kerros	
	Liite 2 Alustava tilaohjelma, 3. ja 4. kerros	

1 JOHDANTO

Rakennuksen tilojen koko ja käyttötarkoitus voi ajan kuluessa muuttua käyttäjän tarpeita vastamattomaksi. Jokin tila on jäänyt todelliselle tarpeelle liian ahtaaksi tai väljäksi, kun taas toinen tiloista haluttaisiin toimivan täysin toisessa käyttötarkoituksessa. Tällaisen muutoksen vuoksi olisi hyvä, että rakennus on vaivattomasti muunneltavissa mahdollisimman vähin resurssein. Muuntojoustavalla moduulirakennustekniikalla on mahdollista vastata tähän tarpeeseen.

Työn alussa käydään läpi moduulirakentamisen perusasioita sekä kartoitetaan sen hyötyjä ja haasteita. Moduulirakentamiseen perehdytään myös tutkimalla kolmea eri jo valmistunutta tai valmistumassa olevaa moduulirakennusesimerkkiä. Työssä myös tutkitaan rakentamisessa käytettyjä tyypillisimpiä rakennejärjestelmiä ja niiden soveltuvuutta modulaariselle rakentamistekniikalle. Lisäksi merkittävänä osuutena työssä tutkitaan japanilaista perinteistä arkkitehtuuria ja selvitetään, millä tavoin moduulirakentaminen voisi ammentaa siitä näkökulmaa ja pohjaa muuntojoustavuudelleen. Työn tavoitteena on löytää ratkaisu moduulirakentamisen muuntojoustavuuden sujuvuuden haasteelle.

Työssä suunnitellaan esimerkinomainen rakennushahmotelma ja sen luonnospohjapiirustukset, joka ilmentää japanilaisen perinteisen arkkitehtuurin tarjoamaa potentiaalia länsimaisessa muuntojoustavassa moduulirakentamisessa.

2 MODULAARISEN RAKENTAMISEN MAHDOLLISUUDET JA HAASTEET

2.1 Moduulirakentaminen yleisesti

Modulaarinen- eli tilaelementtirakentaminen tarkoittaa rakentamistapaa, jossa rakennus kasataan työmaalla kokoon tehtaalla valmiiksi rakennetuista moduuleista. Moduuli on taas kasattu tehtaalla yhteen tasoelementeistä. Moduuli on rakennuksen yksittäinen tilaosa, joka voi käsittää kokonaisen tilan tai osan siitä rajoittuen yleensä seiniin, lattiaan ja kattoon. Moduulien tavallisimmat käyttökohdet tällä hetkellä ovat pien-, rivi- ja kerrostalot, majoitus- ja hoitolaitosrakennukset sekä koulu- ja päiväkotirakennukset. (1; 2.)

Moduulit ovat kantavaseinäisiä ja ne on nykyään valmistettu kaikkein tavallisimmin rankarakenteisena, mutta myös massiivipuulevy rakenne tai näiden molempien yhdistelmä on ollut käytössä nykypäivän teollisuudessa. Rankarakenteisena toteutettu moduuli koostuu puurangoista ja/tai palkeista, joiden k-jako on tavallisesti sovitettu vastaamaan villalevyjen leveyttä. Jäykistävässä rakennusosissa on mahdollista käyttää massiivipuulevyä. Ulkoverhoilu on tavallisesti toteutettu puupaneelipinnalla tai jollakin muulla ulkoverhouslevymateriaalilla. (1; 2.)

Massiivipuulevyn käyttö moduulirakentamisessa on hyvin uutta, sillä se on ollut käytössä suomalaisessa rakentamisessa vain viimeisten kymmenen vuoden ajan. Massiivipuulevy, kuten esimerkiksi ristiin liimattu CLT- tai kerrannaisliimattu LVL-levy, muodostaa moduulin kantavan rungon. Lattia- ja kattorakenne on mahdollista toteuttaa jonakin muuna rakenteena, kuten esimerkiksi palkkirakenteisena. Lämmöneristyskerros toteutetaan massiivilevyn ulkopuolella, jonka päälle tuleva ulkoverhoilu vastaa yleensä edellä mainitun rankarakenteisen moduulin ulkoverhousta. (2.)

Tällä hetkellä moduuleille ei ole vielä kehitetty standardisoituja vakiomittoja. Moduulit valmistetaan tilaajan suunnitelmien mukaisesti noudattaen samoja periaatteita ja menetelmiä kuin tasoelementtirakentamisessa. Massiivipuulevyrakenteen osalta levypaksuudet ovat vakiomittaisia, joskin joitakin erikoislevyjä on saatavilla. Moduulien valmistus lähtee rakentamalla aluksi tasoelementit tasoelementtijärjestelmän mukaisesti ja kokoamalla ne sitten tehtaalla linjastolla moduuliksi. (Kuva 1.)

Moduulien seinärakenteet voidaan siis toteuttaa samoilla rakennetyypeillä kuin tasoelementtijärjestelmässä. Moduulit kokoaminen linjastolla tapahtuu erillisissä vaiheissa: Prosessin alussa kootaan runko ja lopussa asennetaan kalusteet. Moduulit on mahdollista suunnitella niin, että ne ovat yhdestä tai useammasta sivusta avoimia, jolloin mahdollistetaan laajempien vapaiden tilojen muodostuminen. Tämä on hyvin tavallista esimerkiksi koulu- ja päiväkotikohteissa. Avoimien sivujen kantavuus ja jäykistäminen on otettava huomioon jo moduulien tehdasvalmistusvaiheessa. (2.)



KUVA 1. Moduulin valmistus (4)

Moduulirakenteisten rakennusten perustukset ovat tavallisesti rossipohjatyypisiä, jotka tulee suunnitella kulkemaan jatkuvina moduulin kantavien seinien alla. Perustuksen haastavuus on sen liittymiskohta moduulin seinään ja sen pystysuuntainen mittatarkkuus. (2.)

Moduulien välipohjiin muodostuu automaattisesti kaksoisrakenne, sillä se koostuu alemman moduulin kattorakenteesta ja ylemmän moduulin lattiarakenteesta. Välipohja on tavallisesti toteutettu massiivipuulevy-, ranka- tai näiden molempien yhdistelmä rakenteena. Kuljetuksen asettamat mitoitusrajoitukset määrittävät moduulien välipohjien jännevälin suurelementtejä pienemmiksi. Välipohjan jänneväliin vaikuttaa myös värähtelymitoitus. (2.)

Yläpohja on tavallisesti toteutettu NR-ristikkorakenteisina lohkoina tai palkkirakenteisina kattoelementteinä, jotka toimivat myös sääsuojana moduulien asentamisessa. NR-ristikot voidaan kannat-

taa samanlaisilla menetelmillä kuin tasoelementtirakentamisessa. Moduulin kattorakenne voi toimia myös jäykistävänä rakennusosana käyttämällä niissä esimerkiksi massiivipuulevyä tai rankarakenteen kohdalla levytystä. (2.)

Moduulien liittymäkohtiin muodostuu elementtisaumoja, joiden näkyvyyttä voidaan muunnella ulkoverhouksen levytyksen suunnalla. Päälekkäisten moduulien välisissä liitoksissa käytetään ääri-
näeristimiä äänen etenemisen vähentämiseksi tai estämiseksi sivutiesiirtymänä rakenteita pitkin. (2.)

Pystykuormat tuodaan alas moduulien kantavia seiniä pitkin, aivan kuten tasoelementtijärjestelmässä. Kantavien ja jäykistävien rakennusosien mitoittaminen tapahtuu myös samoilla menetelmillä kuin tasoelementtijärjestelmässä. Moduulien seinät suunnitellaan toimimaan levyjäykisteenä. Myös jatkuvan sortuman estämisessä menetellään kuten suurelementtijärjestelmässä: Suositeltavaksi menetelmäksi on esitetty vaihtoehtoista kuorman siirtoreittiä, jossa voidaan hyödyntää palkkien-, seinämäisten palkkien- ja elementtien välisiä liitoselinratkaisuja. (2.)

Paloturvallisuuden osalta moduulien rakennusosat mitoitetaan suurelementtijärjestelmän mukaan. Moduulin katto ja lattia mitoitetaan toimimaan osastoivana ja kantavana rakennusosana niin alapuolisessa kuin ullakkopalossa. Kantavat seinät mitoitetaan palotilanteessa toimiviksi käyttämällä esimerkiksi levytystä tai hiiltymämitoitusta. Moduulien vaakarakenteiden jännevälit ovat usein niin lyhyitä, että tilan sisäiset väliseinät voidaan jättää palomitoituksen ulkopuolelle. Rakennuksen jäykistäminen tapahtuu yleensä samoilla (levytyis)jäykisteillä kuten murtorajatilassa. (2.)

Moduulit voidaan valmistaa eri valmiusasteissa, mutta kustannustehokkain tapa on viedä ne tehtaalla mahdollisimman pitkälle. Pisimmälle viedyssä valmiusasteessa moduuli sisältää pintamateriaalit, kiintokalusteet, talotekniikan, ikkunat ja ovet sekä ulkoverhoilun. Moduulien rakentaminen ja kuljettaminen tehdään huolellisesti säältä suojattuna, joten niiden kuivaketju voidaan säilyttää katkeamattomana. (3, s. 8.)

2.2 Moduulirakentamisen hyödyt

Moduulirakentaminen tehostaa rakennustuotantoa ja rakennukset voivat näin valmistua lyhyemmällä aikataululla ja kustannustehokkaammin. Moduulit voidaan viedä pitkälle kuivissa ja tarkoin

kontrolloiduissa tehdasoloissa, millä on monia hyviä etuja. Tämä mahdollistaa vakaamman laadunvarmistuksen, minkä ansiosta moduulien rakenteet säilyvät kuivina ja voivat täten säästyä kosteusvaurioilta. Tehtaalla työskenteleminen on myös terveellisempää ja turvallisempaa. (1; 2.)

Moduulirakentaminen on erittäin standardisoitunutta, jolloin varsinkin suunnitteluvaiheen työmäärä ja -kustannukset jäävät hyvin pieniksi. Lisäksi automatisoitunut tehdastuotanto tehostaa prosessia entisestään ja vähentää tarvittavien resurssien määrää. (1; 2; 3, s. 13.)

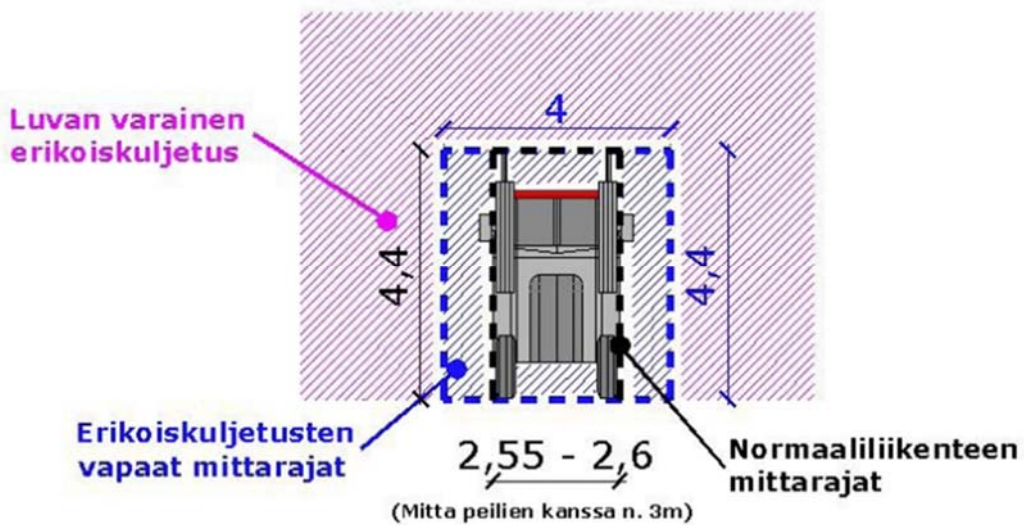
Moduulien rakentaminen hallituissa tehdasoloissa synnyttää verrattain vähemmän materiaalihävikkiä. Moduulien valmistuessa tehtaalla työmaavaihe jää myös hyvin vähäiseksi ja moduulirakenteinen talo voi nousta jopa tunneissa. Nykyisellä tekniikalla työmaan tehtäviksi jää vain aluekaapeloinnit, perustustyöt, putkitukset ja tilaelementtien kytkennät. Rakennukset voidaan saattaa vastaanottovalmiiksi reilusti lyhyemmällä aikataululla verrattuna esimerkiksi perinteiseen paikallarakennettuun taloon. Tämä kaikki voi myös heijastua rakennuksen ostajalle edullisempaan myyntihintana. Moduulien yhtenä etuna voidaan pitää myös niiden yhteen liittämisen automaattisesti syntyvää kaksoisrunkorakennetta, millä voidaan saavuttaa parempi ääneneristävyys rakenteessa. (1; 2.)

2.3 Moduulirakentamisen haasteet

Nykyisellään moduuleiden vaihtelu tai muuntelu ei ole vielä kovin sujuvalla tasolla vallitsevasta rakentamistekniikasta ja ajattelutavasta johtuen. Moduulirakentamisen yhtenä oleellisena haasteena onkin moduulien väliset liitoskohdat. (1; 2.)

Moduulit esivalmistetaan tehtaalla hyvin valmiiksi pintoja myöten, joten työmaalla ei ole enää helppoa päästä käsiksi tilaelementtien väliin tekemään liitoksia. Tällä hetkellä moduulien välinen liitostekniikka suunnitellaan tavallisesti niin, että kaksoisrunkoseinissä on jo valmiiksi asennettuna liitososat, jotka sitten kiinnittävät moduulit yhteen niitä kootessa ja jotka voivat jäädä runkojen väliin ilman muuta työstämistä. Liitososien suunnittelussa tulee huomioida akustiset asiat. Nykytekniikalla liitokset on tavallisesti toteutettu käyttämällä teräslevyjä ja ruuveja. Moduulien välistä liitostekniikkaa olisi siis hyvä uudelleen pohtia, jotta moduulien joustava vaihtelu, siirtely ja muuntelu olisi sujuvaa. (1; 2.)

Moduulien kuljetus tapahtuu käytännössä aina erikoiskuljetuksella, joten niiden mitoituksessa on huomioitava erikoiskuljetuksia koskevat määräykset. Erikoiskuljetukset jaetaan vapaisiin ja luvanvaraisiin kuljetuksiin, joista jälkimmäinen on maksullinen. Erikoiskuljetuksen luvanvaraisuus tulee voimaan, kun liikenteen vapaat mittarajat tai normaaliliikenteessä sallitut massat ylittyvät. Pituuden ja massan rajat riippuvat ajoneuvotyypistä. Kuvassa 2 on esitetty erikoiskuljetuksen keskeisimmät poikkileikkausmitat. Erikoiskuljetuksen vapaat mittarajat ovat tavallisesti leveyden osalta 4 metriä, korkeuden osalta 4,4 metriä ja pituuden osalta jopa 20 metriä (riippuen ajoneuvotyypistä). Leveyden olisi hyvä olla maksimissaan neljä metriä, jotta kuljetus voitaisiin toteuttaa yhdellä saattoautolla. (19, s. 9–10.)



KUVA 2. Erikoiskuljetuksen mittarajat (19, s. 9)

Standardisoitua liukuhihnatuotantoista moduulirakentamisen suunnittelua ohjaavat tavallisesti tuotannolliset seikat. Tämä voi helposti ajaa rakennuksen mittasuhteiden olemaan erillään ihmisestä. Moduulirakentamisen yhtenä haasteena onkin suunnittelun ihmislähtöisyyden ja sen mittasuhteiden inhimillisyyden huomioiminen, jotta uusi tuotettava rakennuskanta ei muutu ihmiskunnasta irralliseksi ja epäkäytännölliseksi.

Lisäksi suurien ja raskaiden moduulien nostaminen työmaalla aiheuttaa rasituksia ja pahimmillaan vaurioita niiden runkorakenteeseen. Tämä on hyvä ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa, jotta vaurioiden syntyminen voidaan ennaltaehkäistä. (2.)

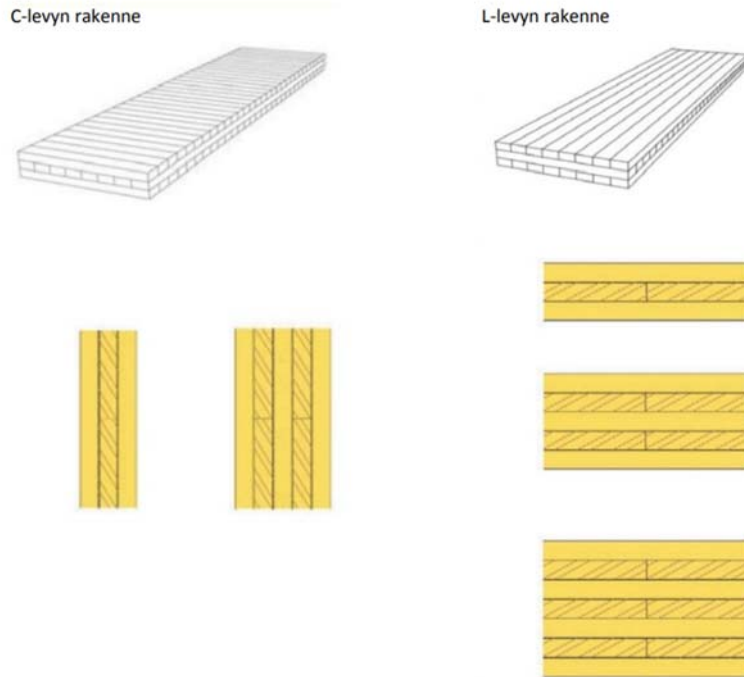
2.4 Rakennejärjestelmien tutkiminen

Moduulirakentamisen parhaan mahdollisen muuntojoustavuuden saavuttamiseksi tässä opinnäytetyössä perehdyttiin erilaisiin rakennejärjestelmiin ja yritettiin löytää muuntojoustavalle moduulirakentamiselle kaikkein parhaiten soveltuva rakennejärjestelmä. Tutkittavien rakennejärjestelmien käytettäväksi materiaaliksi päädyttiin valitsemaan puu.

2.4.1 CLT

CLT, eli Cross Laminated Timber, on ristiinliimatuista puukerroksista valmistettu massiivipuulevytuote, jossa kerroksia voi olla kolmesta seitsemään kappaletta. Se voi toimia sekä rakennuksen jäykistävänä että kantavana rakenteena niin rakennuksen pysty- kuin vaakarakenteissa. (4; 6.)

Rakennuksen aukot ja liitokset toteutetaan tehtaalla. CLT-levyjen mitat vaihtelevat valmistajakohdaisesti, mutta esimerkiksi Crosslamin valmistamien elementtien maksimitat ovat 3,2 x 12 metriä. Käytännössä levyjen leveys olisi hyvä olla maksimissaan 3,1 metriä, jotta elementin reunoilla on riittävästi varaa työstämiselle. Levyjen paksuus voi vaihdella 60 millimetristä 300 millimetriin. Crosslamin valmistamien levyjen rakenteet vaihtelevat pintalamellien suunnan mukaan: C-levyjen pintalamellit kulkevat lyhyemmän sivun suuntaisesti ja L-levyssä pidemmän (kuva 3). (4; 6.)



KUVA 3. CLT C-levyn ja L-levyn rakenne (6)

CLT-levyn käyttäminen rakentamisessa antaa mahdollisuuden joustavalle aukotukselle seinissä, välipohjissa ja ulokerakenteissa. CLT-elementtejä valmistetaan vaihtelevissa valmiusasteissa tilaajan toiveiden mukaan: Pisimmälle vietyä elementtiin voidaan asentaa eristeet, pintamateriaalit, ikkunat ja ovet valmiiksi. (4; 6.)

CLT on teollinen puutuote, joka on luja ja ympäristöystävällinen. Valmistusmenetelmänsä ansiosta puun parhaat ominaisuudet pääsevät siinä loistonsa. Se saavuttaa erittäin korkean kapasiteetin muun muassa jäykkyyden ja kestävyuden osalta, mutta on siihen nähden hyvin kevyt. CLT-levyn paino on esimerkiksi vain viidesosa betonin painosta. Lujutensa ja keveytensä ansiosta CLT on erinomainen vaihtoehto korkeassa rakentamisessa: Suomessa ja maailmalla onkin viime vuosien aikana noussut esimerkiksi monia CLT-rakenteisia korkeita puukerrostaloja. (4; 5.)

Koska puu pyrkii tasapainokosteuteen ympäristönsä kosteuden kanssa eli toimii kosteuspuskurina, CLT:llä voidaan saavuttaa erittäin laadukasta ja miellyttävää sisäilmastoa. Lisäksi puu on lämmönjohtavuudeltaan hyvin alhainen, joten se on yleisesti koettu olevan hyvin miellyttävän tuntuinen ihoa vasten. (5.)

CLT on yksiaineinen materiaali, joten se on hyvin hengittävä. Se päästää lävitsensä ilman sisältämät kaasut diffuusiona. CLT on kuitenkin myös eristävä materiaali ja täten parantaa rakennuksen lämmöneristävyyttä ja vähentää ilman kosteuden konvektiovirtausta rakenteen läpi. CLT-rakennusten seinät tehdään yhtenäisinä ja saumattomina eikä levyjen väliin jätetä rakoja, jolloin rakennus on ilmatiivis ja lämpöhäviöt voidaan minimoida. CLT-levy toimii itsessään myös höyrynsulkurakenteena puukerroksiensa ja niiden välisten liimakalvojen ansiosta. Lämmin sisäilma ei siis pääse virtaamaan eristekerrokseen, jolloin rakenne säilyy kuivana. (5.)

Palotilanteessa CLT-levyn pinta hiiltyy, mutta ei romahda, sillä rakenteen mitoituksessa on otettu huomioon hiiltymisvara. Nelikerroksiset ja niitä korkeammat puukerrostalot sekä jotkin julkiset puurakennukset tulee kuitenkin varustaa sprinklausjärjestelmällä nykyisten palomääräysten mukaisesti. Lisäksi nykyisillä palonsuojamaaleilla CLT-levyn pinnasta voidaan saada jopa syttymätön rakenne. (5.)

CLT-levyt työstetään CNC-koneella, jolla tuotetta on mahdollista työstää hyvin monipuolisesti. Se mahdollistaa hyvin monipuoliset mahdollisuudet esimerkiksi levyjen aukotuksessa ja pintakäsittelyssä. Valmistustavasta johtuen CLT-tuotannossa syntyy materiaalihukkaa, mutta hyvällä suunnittelulla se on mahdollista saada mahdollisimman vähäiseksi. Siksi on tärkeää huomioida aivan suunnittelun alusta alkaen, että rakennus toteutetaan CLT:stä. Esimerkiksi tilojen suunnittelussa tulisi ottaa huomioon CLT-levyn maksimi- ja minimimitat. (6; s. 5–6.)

2.4.2 Teolliset massiivihirsirakenteet

Hirsirunko on vuosisatoja vanha rakennusjärjestelmä. Ennen vanhaan hirrestä rakennettiin pääasiassa vain pientaloja käsityövoimin, mutta nykyajan teollisilla tuotantomenetelmillä hirsirakennuksia

on mahdollista toteuttaa suuressa mittakaavassa. Hirsirakennuksessa niin kantavat kuin muut rakenteet rakennetaan massiivipuuhirrestä. Suomessa hirsien valmistuksessa käytettävä puu on pääsääntöisesti mäntyä. (2; 4.)

Massiivihirren vahvuuksia ovat sen teollinen valmistaminen, mittatarkkuus, kuljetuksen helppous, yksiaineinen seinärakenne ja ekologisuus. Teollisten hirsien valmistus on erittäin automatisoitu, joten se ei vaadi paljon työntekijöitä. Valmistuksessa käytettävä CNC-tekniikka mahdollistaa korkean mittatarkkuuden. Hirsien kuljettaminen on erittäin yksinkertaista, sillä kappaletavarana ne on mahdollista pakata hyvin tiiviiksi paketti. Sen haasteita puolestaan ovat sen kestävyys ja jäykkyys (pystykuorma, jäykistys ja liitokset), ankkuroinnin toteutus, painuma (paitsi painumaton hirsi) ja akustiset ominaisuudet. Muun muassa jäykkyyden ja nurjahduskestävyyden rajallisuuden vuoksi hirsirakennuksen suositeltava kerroslukumäärä on maksimissaan kolme. (2.)

Teollisia massiivipuuhirsia on eri tyyppisiä: massiivipuuhirsi erilaisilla profiileilla (esim. pyöröhirsi ja kulmikas höylähirsi), jota käytetään pääasiassa pientalorakentamisessa, sekä lamelli- ja painumaton hirsi, joita nykyään käytetään tavallisesti suuremmissa kohteissa. Hirsien mitat ja profiilimuoto sekä liimattujen hirsien (lamelli- ja painumaton hirsi) lamellirakenne vaihtelevat valmistajakohtaisesti. (2; 4.)

Painumaton hirsi valmistetaan ristiin liimaamalla useita lamellikappaleita. Sen painumattomuus on kantavina osina toimivien pystysuuntaisten lamellien ansiota. Painumattomasta hirrestä toteutettu rakennusosa muistuttaa CLT-levyseiniä. Lamellihirsi taas valmistetaan liimaamalla yhteen useita lamelleja eli puukerroksia ja höyläämällä se haluttuun profiiliin. Lamellihirsi mahdollistaa hirren tasanemmat ominaisuudet sekä pienemmän painumisen hirsityypistä riippuen. (2; 4.)

Perinteisten hirsirakennusten merkittäviä ja näkyviä ominaispiirteitä ovat olleet niiden nurkat. Nämä perinteiset nurkkaliitokset on toteutettu ns. ristinurkkamenetelmällä. Nykyään hirsivalmistajilla on kuitenkin tarjottavissa myös toisenlaisia, jopa hyvin huomaamattomia vaihtoehtoja nurkkaliitoksille, kuten niin kutsutut lohenpyrstönurkka, jiirinurkka tai citynurkka. (2.)

Hirsirakenteiset seinät ovat sinänsä hyvin yksinkertaisia suunniteltavia, sillä ne muodostuvat vain yhdestä yksiaineisesta rakennekerroksesta. Massiivihirsisen ulkoseinän U-arvo on kuitenkin suh-

teellisen korkea ja väliseinien osalta ääneneristävyyttä verrattain alhainen. Väliseinien ääneneristävyyttä voidaan kuitenkin parantaa toteuttamalla niiden rakenne kaksoisrunkona, jossa rakennetaan lisärunko joko hirsirungon kylkeen tai kahden hirsirunkopuoliskojen väliin. (2.)

Hirsiseinän jäykistyksen osalta nurjahduskestävyys on erityisesti huomioitava suunnittelussa. Nurjahdustuenta voidaan toteuttaa esimerkiksi hirsinurkilla, aukkopielien karapuilla tai följäreillä. Hirsirakennuksessa käytettävät pilarit tulee toteuttaa säädettävillä pilarikengillä varusteltuina, mikäli se kiinnittyy painuvaan hirsiseinään. (2.)

Teollisen hirsirungon välipohja toteutetaan tavallisesti ripalaattana tai massiivipuulevynä, joka tuetaan seiniin konsolien avulla, sillä hirsiseinät jatkuvat yleensä yhtenäisenä rakennusosana välipohjan ohi. Yläpohja voidaan toteuttaa NR-ristikkorakenteisena tai palkkirakenteisina kattoelementteinä. (2.)

2.4.3 Rankarunko

Rankarunko on kaikkein yleisin Suomessa käytetty rakennusten rakennejärjestelmä. Rankarungon toiminta perustuu kantaviin seiniin, joiden runkotolppia ja -pilareita pitkin rakennuksen kuormat kulkeutuvat perustuksille ja jotka myös tavallisesti jäykistävät rakennuksen. Tämän vuoksi kantavat seinät tulee aina sijoittaa samassa kohdassa eri kerroksissa, mikä aiheuttaa rajoitteita tilasuunnittelulle. Ne voivat olla yhden kerroksen korkuisia, jolloin vaakarakenne tuetaan seinien päälle. On myös mahdollista toteuttaa seinät kaksikerroksisina, jolloin vaakarakenne kiinnitetään seinien kylkeen. Vaakarakenne voidaan käyttää vaihtoehtoisesti palkkirakennetta tai massiivipuulevyä. (7.)

Jäykistyminen voidaan toteuttaa vinotuilla nurkista, vinolaudoituksella tai jäykällä rakennuslevyllä. Aukkojen ylityspalkkien ja niiden päissä sijaitsevien rankojen kestävyys aiheuttaa myös rajoitteita kantavien seinien aukotusmahdollisuuksiin niiden koon ja sijoittelun suhteen. Lisäksi seinän jäykistyksen osalta seinässä täytyy aina olla riittävästi levytystä jäykistämisen toimivuuden takaamiseksi, mikä osaltaan myös vähentää seinien aukotusmahdollisuuksia. Rankarakenne toteutettuna ulokkeet ja seinämäiset palkit vaativat erityistoimenpiteitä, joten tilasuunnittelussa tämäkin on otettava huomioon. (7; 8, s. 260.)

Runkotolpaksi voidaan valita esimerkiksi massiivipuu, viilupuu, liimapuu tai uumakannake. Suomalaisessa rakentamisessa runkotolpat kiinnitetään tavallisesti alasidepuuhun, joka tuetaan perustuksiin teräsliittimillä. Jos rakennuksen alapohjan alapuolella on ryömintätila tai kellaritila, alasidepuu voidaan myös kiinnittää alapohjapalkiston yläpintaan tai palkiston päälliseen jäykkään rakennuslevyyn. Alasidepuun sijaitessa kiviaineisen perustuksen päällä, se erotetaan alustastaan kapillaarikatkolla, kuten esimerkiksi kattohuopakaistaleella. (8, s. 260.)

Rungon kiinnittäminen perustukseen tapahtuu alasidepuiden läpi kiinnitettävillä vähintään 0,6 millimetrin pulteilla, terästapeilla noin 2000 millimetrin jaolla tai litteäteräksillä joka kolmanteen tai neljenteen tolppaan kiinnitettynä. Tartuntapituuden tulee olla vähintään 300 millimetriä. (8, s. 260.)

Runkotolpat ovat yleensä 50 mm x 95–175 millimetrin soiroja 600 millimetrin jaolla. Seinään tuleva lisälämmöneriste tuetaan rimoilla, jotka voidaan kiinnittää niin rungon sisään kuin ulkopuolelle. (8, s. 260.)

Ikkuna- ja oviaukkojen pieliin asennetaan lisäsoivot, jotka kiinnitetään alasidepuuhun tai toteutetaan ikkuna-aukon korkuisina. Aukkojen yläpuolelle toteutetaan tarkoituksenmukaiset palkkiratkaisut. (8, s. 261.)

Rankarungon kantokyvyn rajoittavia tekijöitä ovat rangan tukipainekestävyys ala- ja yläohjauspuussa sekä rangan nurjahduskestävyys. Näihin voidaan kuitenkin vaikuttaa rangan poikkileikkauksen koolla sekä nurjahdus- että tukipainekestävyyden osalta ja tukipainekestävyyden osalta myös ala- ja yläohjauspuun oikeanlaisella materiaalivalinnalla poikittaiselta puristuslujuudeltaan. (7.)

2.4.4 Pilari-palkkijärjestelmä

Pilari-palkkijärjestelmän toiminta perustuu massiivisiin, kantaviin pilareihin ja palkkeihin, jotka siirtävät rakennuksen pystykuormat perustuksille. Puinen pilari-palkkirunko voidaan toteuttaa esimerkiksi liima- tai kertopuusta. Runko voidaan jäykistää käyttämällä esimerkiksi masto-, ristikko-, levy- tai kehäjäykistysmenetelmää. Pilarit voidaan toteuttaa korkeudeltaan kerroskohtaisina, jolloin palkit

tuetaan pilarien päälle, tai kahden kerroksen korkuisina, jolloin palkit tuetaan pilarien kylkeen. (7; 9, s. 15.)

Pilari-palkkijärjestelmällä rakennuksen kaikki seinät voidaan toteuttaa kevytrakenteisina ja ei-kantavina, jolloin rakennuksen tilasuunnittelu ja aukotus on hyvin joustavaa ja vapaata. Pilarit tulee sijoittaa samoihin kohtiin eri kerroksissa pystykuormien ja jäykistyksen vuoksi. Tämä tulee huomioida tilojen suunnittelussa. Rakennuksen painuminen on myös vähäistä pystyrakenteiden yhdenmukaisten mittojen ansiosta. Rakennuksen ulkovaippa toteutetaan tavallisesti pilari-palkkirungon ulkopuolelle. (7; 9, s. 15.)

2.5 Japanilainen perinteinen arkkitehtuuri

Japanilainen perinteinen arkkitehtuuri on standardisoitunutta, modulaarista puuarkkitehtuuria. Sen tyypillisimpiä piirteitä ovat puiset rakenteet, rakennuksen kohottaminen hieman maatasen yläpuolelle sekä olki- ja kaakeloidut katot. Seinien ja ovien paikalla sijaitsevilla liukuvilla paneeleilla (fushuma) sisätilojen kokoa ja käyttötarkoitusta pystytään muuntelemaan erittäin jouhevasti. (10; 11.)

Yksi ehkä kaikkein merkittävimmistä teemoista japanilaisessa rakennuksessa on sen inhimillinen, ken-ruudukkoon perustuva standardisoitunut mitoitus. Ken on Japanin perinteiseen mittajärjestelmään kuuluva pituusyksikkö, jonka käyttö on aikoinaan ollut tavanomaisen yleistä niin ihmisten arjessa kuin rakentamisessa ja joka on suhteutettu ihmisen mittasuhteisiin. Mitoitus on olennainen arkkitehtuurin elementti rakennuksen ja ihmisen välisen suhteen luomisessa, sen avulla ihmistä ympäröivä ympäristö voidaan inhimillistää. (10, s. 25, 34.)

Vaikka metripituusjärjestelmä on ollut Japanissa käytössä jo vuodesta 1891, tavanomaista asuamista kontrolloidaan silti perinteisellä mittajärjestelmällä. Sen perusyksikkö on japanilainen jalka, niin kutsuttu shaku, joka on lähes täsmällinen englantilaisen jalan kanssa. Seuraavassa on esitetty shakun suhde Japanin perinteisessä mittajärjestelmässä:

1 ri = 150 jō = 1 500 shaku

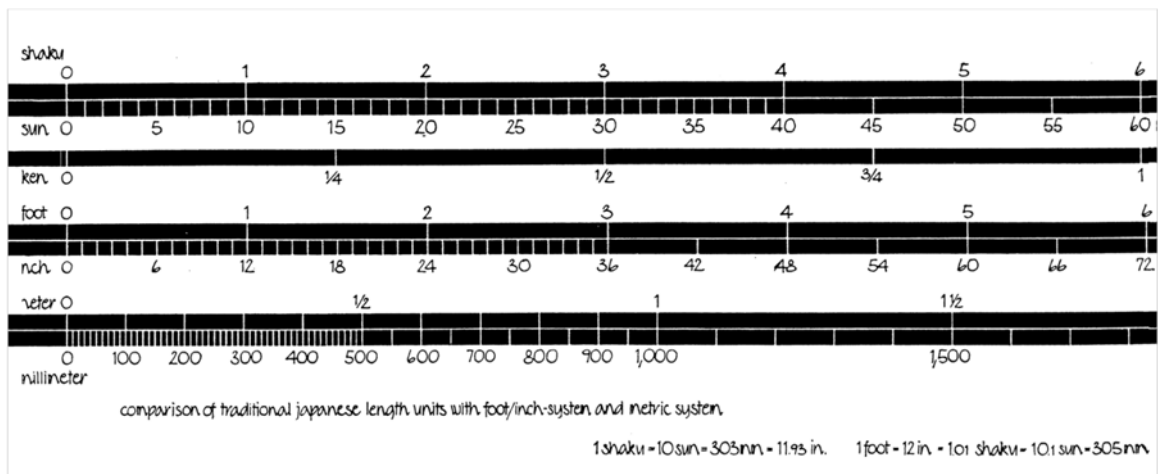
1 jō = 10 shaku = 100 sun

1 shaku = 10 sun = 100 bu

1 sun = 10 bu = 100 rin

1 bu = 10 rin. (10, s. 32.)

Ken-pituusyksikkö ilmestyi Japanin keskiajan puolenvälin jälkeen. Se on alun perin määritetty merkitsemään kahden pilarin välistä välimatkaa missä tahansa puurakenteessa. Se vaihteli mitassaan, mutta sitten se standardisoitiin asuntoarkkitehtuurissa ja sitä alettiin käyttää pääasiassa kaupungeissa. Ken on käynyt läpi monia muodonmuutoksia, mutta lopulta se vakiintui käytettäväksi suunnittelumuodulina kahdessa eri menetelmässä: kyō-ma- ja inaka-ma-menetelmässä. Lopulta pilarien keskipisteestä keskipisteeseen kulkeva 6-shakun inaka-ma menetelmän ken korvasi 10 shakun jō-yksikön ja se sisällytettiin osaksi japanilaista mittayksikköjärjestelmää. Tämän perimmäinen syy oli kenin läheinen suhde ihmisen mittasuhteisiin sekä sen käytännöllisyys ja arkipäiväisyys. Ken on tarkoittanut siis eri asiaa eri aikoina ja eri alueilla Japanissa. Kuvassa 4 on esitetty japanilaisen pituusmitan muunnoksia metri- ja tuumajärjestelmässä. (10, s. 32, 36.)



KUVA 4. Japanilaisen pituusmitan muunnoksia (10, s. 32)

Japanilainen pituusyksikköjärjestelmä on verrattain hyvin yksinkertainen:

$$1 ri = 36 chō = 2\,160 ken = 3\,927\,165,12 mm = 12\,884,40 ft = 2,44 mi$$

$$1 chō = 60 ken 36 jō = 109\,087,92 mm = 357,90 ft$$

$$1 jō = 10 shaku = 3\,030,22 mm = 9.94 ft$$

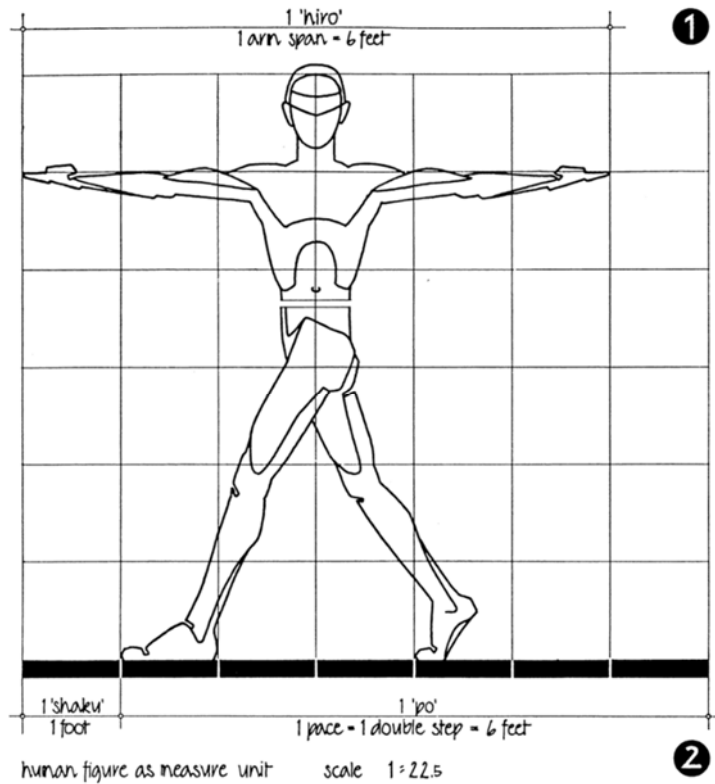
$$1 ken (inaka-ma) = 6 shaku = 1\,818,13 mm = 5,97 ft$$

$$1 shaku = 10 sun = 303,02 mm = 11,93 in$$

$$1 sun = 10 bu = 30,30 mm = 1,19 in$$

1 bu = 10 rin = 3,03 mm = 0,12 in (10, s. 36.)

Yksi ken on siis 1 818,13 millimetriä, mikä on yhtä kuin kuusi shakua eli japanilaista jalkaa. Kuvassa 5 on esitetty, että kuusi shakua on japanilaisen keskivertomiehen käsivarsimitta. (10, s. 36.)



KUVA 5. Ihminen mittayksikkönä (10, s. 11)

Japanilainen talo on kokonaisuudessaan äärimmäisen standardisoitunut niin materiaaleja, mitoitusta, suunnittelua, rakentamista kuin puutarhaa myöten. Tämä on yli 300 vuoden aikaisessa kehityksessään hioutunut niin erinomaiseksi, ettei sen katsota juurikaan tarvitsevan mitään muutoksia. Tämä erittäin kokonaisvaltainen standardisointi on hyvin kilpailukykyinen nykyarkkitehtuurin kanssa ja pystyy toisintodistamaan käsitykset rakentamisen standardisoinnin ja esivalmistuksen yksipuolisuudesta. (10, s. 37.)

Ken-ruudukon myötä arkkitehtisuunnittelussa ei enää olla kiinni yksittäisten huoneiden, materiaalien, detaljien, julkisivujen tai katon muodon suunnittelussa. Arkkitehdin suunnittelutyö voi keskittyä vain tilojen järjestyksen ja koon ohjelmoimiseen ja materiaali- ja teknisiin valintoihin rajatusta, mutta ei arkkitehtuuria liian rajoittavasta valikoimasta. Lisäksi kattomuodon suunnittelu sekä sisä- ja ulkotilojen yhdistäminen toisiinsa tapahtuu ken-ruudukon ansiosta hyvin luonnollisesti. Yhtenäisen, järjestelmällisen ken-ruudukon käyttäminen vapauttaa suunnittelijan jatkuvasta uusien tilayksiköiden, muotojen ja rakennuksien suunnittelutyöstä. Arkkitehtisuunnittelusta voi tulla sujuvampaa, tehokkaampaa ja vapaampaa. (10, s. 37.)

Koska japanilainen asuinrakennus on ennalta määritelty sen kaikkine osineen, myös käyttäjä voi tuntea rakennuksen paremmin niin suunnittelun kuin toteutuksen osalta. Tämän myötä asuinrakennusten arkkitehtuuri on osa jokaisen japanilaisen arkipäivää, jolloin jokaisella on riittävä ymmärrys rakennuksesta ja sen toiminnasta. (10, s. 37.)

Kun eri kokoiset asuinrakennukset erilaisine huonejärjestelyineen muodostetaan ohjelmoimalla ne ken-ruudukon identtistä yksiköitä, rakennusosat ovat mahdollista esivalmistaa. Japanilaisessa talossa käytetyt rakennusosat voidaankin valmistaa säätämällä vain vaihtelevien yksiköiden määrä kohdalleen. Tämä vähentää tarvittavaa työmäärää ja aikaa. Osa japanilaisen rakennuksen rakennusosista, kuten ikkunat, ovet, lattiamatot ja sisäkaton osat, ovat vaihdettavissa ja niitä myydään kaupoissa, joten käyttäjä voi helposti vaihtaa vaurioituneet tai muutoin uusimista vaativat rakennusosat. Vanhan rakennuksen käyttöikä voidaan täten jatkaa sujuvasti ja vanhat rakennusosat kierrättää. (10, s. 37.)

3 MODUULIRAKENTEISIA ESIMERKKIRAKENNUKSIA

Luvuissa 3.1–3.3 tutkitaan moduulirakentamista jo valmistuneiden tai valmistumassa olevien moduulirakennusten kautta. Perehtymällä esimerkkimoduulirakennuksiin saadaan entistä parempi käsitys moduulirakentamisen muuntojoustavuuden nykytilanteesta sen hyvine ja haasteellisine puolineen. Tämä edistää opinnäytetyön päämäärän saavuttamista, joka on ratkaisun löytäminen moduulirakentamisen muuntojoustavuudelle. Työn esimerkkirakennuksiksi valittiin Tukholman Norra Tornen -kaksoistornitalot, CLT-moduulipuukerrostalot Tampereen Hervannassa ja Satavuon koulu- ja päiväkotirakennus Laukaalla.

3.1 Tukholman Norra Tornen -kaksoistornitalot

Office for Metropolita Architecture -toimiston suunnittelemat Norra tornen -kaksoistornit ovat valmistuneet vuonna 2018 ja 2020. Kaksi tornitaloa, toinen 125 metriä ja toinen 110 metriä, ovat tällä hetkellä Tukholman keskustan alueen korkeimmat asuinrakennukset. Korkeammassa vuonna 2018 valmistuneessa, niin kutsutussa Innovationen Tower -tornissa (kuva 6) on 35 kerrosta ja 182 asuntoa 44 neliömetrin kokoisista kaksioista 271 neliömetrin kattohuoneistoihin. Suurin osa asunnoista on 80–120 neliömetrin kaksioita ja kolmioita. Asuntojen lisäksi rakennukset sisältävät elokuvahuoneen, illallishuoneen juhlia varten, vierasmajoitushuoneiston, saunallisen kuntosalin rentoutumisalueella sekä vähittäismyyntitiloja pohjakerroksessa. Lyhyempi, niin kutsuttu Helix Tower -torni sisältää 138 asuntoa sekä palvelutilat. (12; 13.)



KUVA 6. Tukholman Norra Tornen -kaksoistornien Innovationen-torni (12)

Tornin vaipan arkkitehtoninen muotokieli on syntynyt harkitusta, polveilevasta vertikaalisten ja horisontaalisten lohkojen vaihtelusta: ne muodostavat julkisivulle epätasaisen mutta samalla yhtenäisen pinnan, jossa suojaosat, sisäänvedetyt parvekkeet vaihtuvat kaavamaisesti ulkoneviin olohuoneisiin. (12.)

Julkisivun vallitsevana materiaalina on käytetty kohojuovaista värjättyä ja harjattua betonia, joka tekee tornin arkkitehtonisesta ilmeestä hyvin brutaalin. Tornit on rakennettu tehtaalla esivalmistetuista tasoelementeistä. Rakennus olisi myös voitu valmistaa moduulirakenteisena. (12.)

Tukholman kaupunki ja sen ympäristö on kovassa muuttoliikkeen paineessa, mikä ajaa rakentamaan tiiviimmin ja korkeammin (13). Norran Tornen -asuintornitalot tuovat esille uudenlaisen ratkaisun tähän monien kaupunkien kohtaamaan haasteeseen. Ne osoittavat, että vaikka rakentaminen korkeaa ja tiivistä, se voi myös sisältää mahdollisuuden nauttia raikkaasta ulkoilmasta. (12.)

3.2 Tampereen Hervannan CLT-moduulipuukerrostalot

Tampereen Hervantaan valmistuu vuoden 2022 keväällä kaksi Tampereen yliopiston arkkitehtipiskelijöiden suunnittelemaa moduulipuukerrostaloa (kuva 7). Lumipuuksi nimetyt kerrostalot

voittivat arkkitehtipiskelijoille suunnatun puurakentamiseen tukeutuvan opiskelija-asumisen ideakilpailun vuonna 2020. (14.)



KUVA 7. Tampereen Hervannan moduulipuukerrostalot (14)

Kerrostalot ovat kuusikerroksisia. Ne kasataan työmaalla CLT-valmismoduuleista, joihin tulee yhteensä 120 opiskelija-asuntoa. Kohteen pääsuunnittelusta on vastannut Arkkitehdit LSV ja CLT-tilaelementtien toimittajana toimi Elementti Sampo. Hankkeen urakoitsijana toimi Rakennusliike Tikirak. (14.)

Kilpailun palkintolautakunta kuvaili työtä kokonaisuudessaan varmaotteisesti ja taitavasti esitettyksi puukerrostalaratkaisuksi, jonka julkisivujen yleishahmo on valoisan kepeä ja puuarkkitehtuuria ilmentävä. Kilpailun arvosteluperusteita ehdotuksia arvosteltaessa olivat seuraavat:

- Työ osoittaa vahvoja ideoita TOAS:in Hervantajärven kohdetontin opiskelija-asuinkerrostalojen tulevaisuuteen kohdistuvissa ratkaisuissa ja arkkitehtonisessa hahmossa.
- Suunnitteluratkaisu on innovatiivinen ja mieleenpainuva.
- Ratkaisun arkkitehtonisuus ja rakennuksen liittyminen ympäristöönsä on korkealaatuista.
- Ratkaisu on toimiva.
- Puun käyttö on toteutettu uudella tavalla ottaen huomioon sen luontaiset materiaaliominaisuudet ja vaatimukset pitkäikäisyydestä.

- Ratkaisu on ekologinen ja rakennusten koko elinkaari on vähähiilinen.

Lisäksi palkintolautakunta mainitsi arvostelupöytäkirjassaan, että se on arvostelussaan huomionut enemmän kilpailutöiden ideoita sekä arkkitehtonisia ja toiminnallisia etuja kuin yksityiskohtien virheettömyyttä. (15, s. 3; 16.)

3.3 Satavuon koulu ja päiväkot

Laukaalla sijaitseva Satavuon koulu ja päiväkot on valmistunut vuonna 2018 toimimaan kolmen kyläkoulun, Saivion, Tarvaalan ja Vuonteen yhteisenä aluekyläkouluna (kuva 8). Se rakennettiin teemalla ”sadalle oppilaalle sadaksi vuodelle” ja sen on sanottu olevan Suomen ensimmäinen ekokoulu. Tilat ovat mitoitettu 140 oppilaan ja 40 päiväkotilaisen mukaan. (17.)



KUVA 8. Satavuon koulu ja päiväkot (18)

Valmistumisvuonnaan rakennus oli ehdolla Vuoden puurakennukseksi. Hankkeen pääsuunnittelijana toimi Tero Wéman Arkkitehtipalvelu Oy:sta ja projektinjohtourakoitsijana NCC Suomi Oy. (17.)

Ekologisuus oli ohjaava periaate ei vain rakennuksessa itsessään vaan myös koulun pedagogisessa ajattelussa ja jokapäiväisessä toiminnassa. Opetuksessa käytetään sähköisiä opetusmateriaaleja niin paljon kuin mahdollista. Rakennuksen katolle sijoitettu 220 aurinkopaneelin muodostama 60 kWp:n aurinkosähkövoimala tuottaa osan koulun tarvitsemasta energiasta. (17; 18.)

Rakennus on jaettu tilojen päätoimintojen mukaan kolmeen erilliseen yksikköön. Ensimmäisessä ja suurimmassa yksikössä sijaitsevat koulu ja päiväkot, toisessa tekniset- ja taideluokat ja hallinto-, keittiö- ja yleispalvelutilat sijaitsevat kolmannessa yksikössä. Koulu on rakennettu CLT-elementeistä. Sen rakenneratkaisu on modulaarinen, jossa rakennuksen eri osilla on sama mittakaava ja mitoitus. Näin rakennuksesta on saatu joustavampi, ja sitä esimerkiksi voidaan laajentaa lisäämällä uusia moduuleja. Rakennus on teknisesti hyvin edistyksellinen mutta myös eloisa ja kutsuva. (18.)

4 RATKAISU JOUSTAVASTI MUUNTUVALLE JA LAAJENTUVALLE MODULAARISUUDELLE

Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää ratkaisu modulaarisuuden joustavalle muunneltavuudelle ja laajennettavuudelle. Lopputuloksena syntyneen ken-modulaarisen suunnitteluratkaisun arkkitehtoninen ideologia perustuu japanilaiseen perinteiseen arkkitehtuuriin. Suunnittelutyötä ovat lisäksi määritelleet ja ohjanneet yleiset rakentamista ohjaavat määräykset ja ELY-keskuksen määräykset erikoiskuljetuksista.

Japanilainen perinteinen arkkitehtuuri on itsessään pitkälle hioutunutta modulaarista ja standardisoitunutta arkkitehtuuria. Tutkimustyön perusteella ilmeni, että japanilaisen perinteisen arkkitehtuurin ideologia ja menetelmät voisivat toimia uudenaikaisena ja potentiaalisena näkökulmana ja ratkaisuna länsimaiselle muuntojoustavalle moduulirakentamiselle. Japanilaisen perinteisen arkkitehtuurin piiristä löytyy paljon elementtejä, joita olisi syytä ottaa tarkempaan tarkasteluun länsimaisessa moduulirakentamisteollisuudessa. Siinä esimerkiksi

- mitoitus perustuu ihmisen mittasuhteisiin suhteutettuun ken-ruudukkoon
- rakennusosat liittyvät toisiinsa ponttauksilla
- rakennusten rakenne ja muoto on modulaarinen
- tilojen käyttötarkoitus on hyvin muuntojoustava väliseininä toimivien liukuvien paneelien ansiosta
- kantavien pilareiden väli säilyy säännönmukaisena
- laajamittainen standardisointi on hyvin moni-ilmeistä
- tatami-lattiamattoja käytetään huonetilojen ohjelmoimisessa
- rakennusten muodot ovat hyvin eheitä
- tietyt rakennusosat ovat helposti vaihdettavissa
- katto on myös modulaarinen, joka rakennetaan lattiamattojen määrän mukaan.

Edellä mainitut piirteet voisivat erityisesti olla hyvin toimivia länsimaalaisessa muuntojoustavassa moduulirakentamisessa. Näiden elementtien avulla voitaisiin esimerkiksi löytää nykyistä sujuvampi ratkaisu moduulien väliselle liitosratkaisulle ja tätä myöten moduulien vapaalle vaihtelulle ja siirteilylle.

Japanilainen perinteinen arkkitehtuuri myös osoittaa, että kokonaisvaltainen standardisointi ei välttämättä tarkoita yksipuolista rakennussuunnittelua ja arkkitehtuuria, vaikka näin hyvin usein ajatellaan. Päinvastoin se on todistanut, että standardisoitu arkkitehtuuri voi olla myös hyvin vaihtelevaa ja moni-ilmeistä. Rakennuksen tilat järjestäytyvät hyvin selkeästi ja säännömukaisesti. (Kuva 9.)

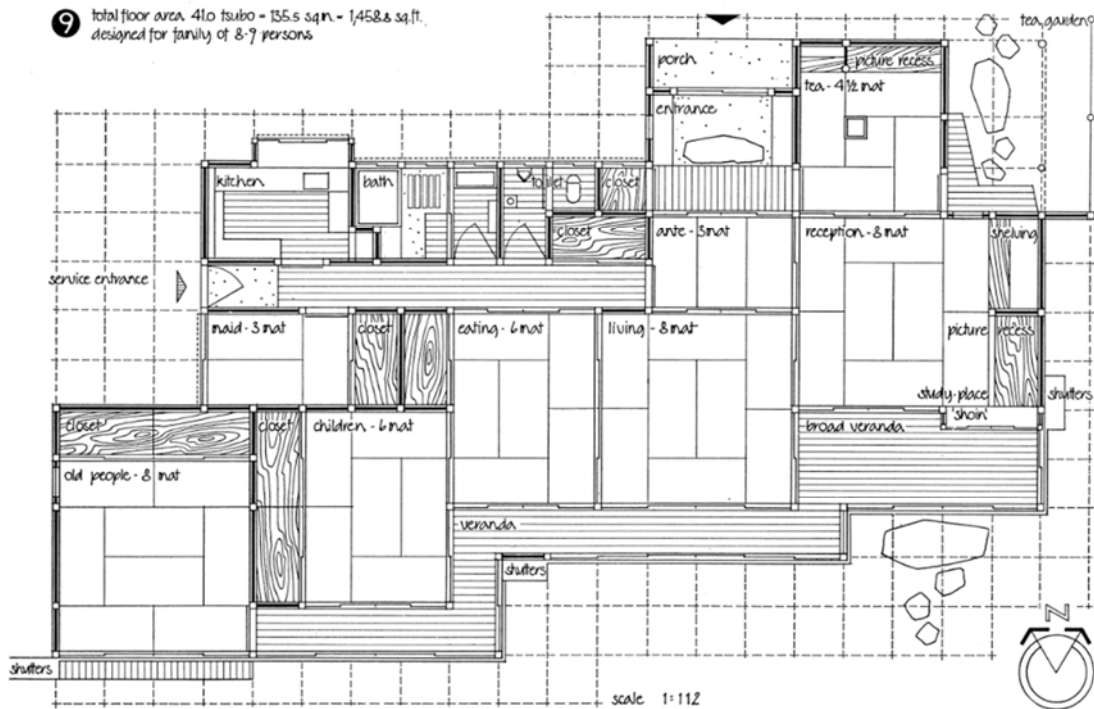
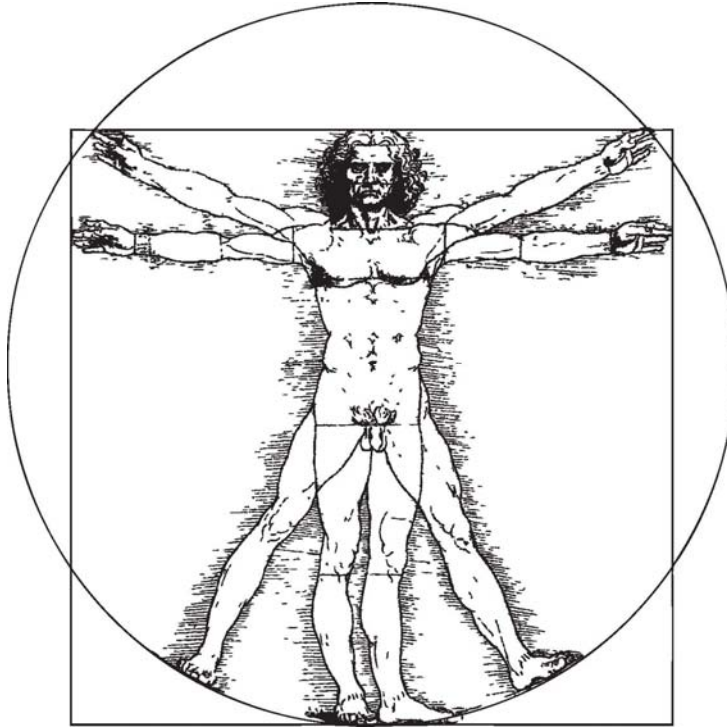


FIGURE 15 (continued): Select examples of typical residences.

KUVA 9. Tyypillinen 8–9 hengen japanilaisen perheen kodin pohjapiirros (10, s. 61)

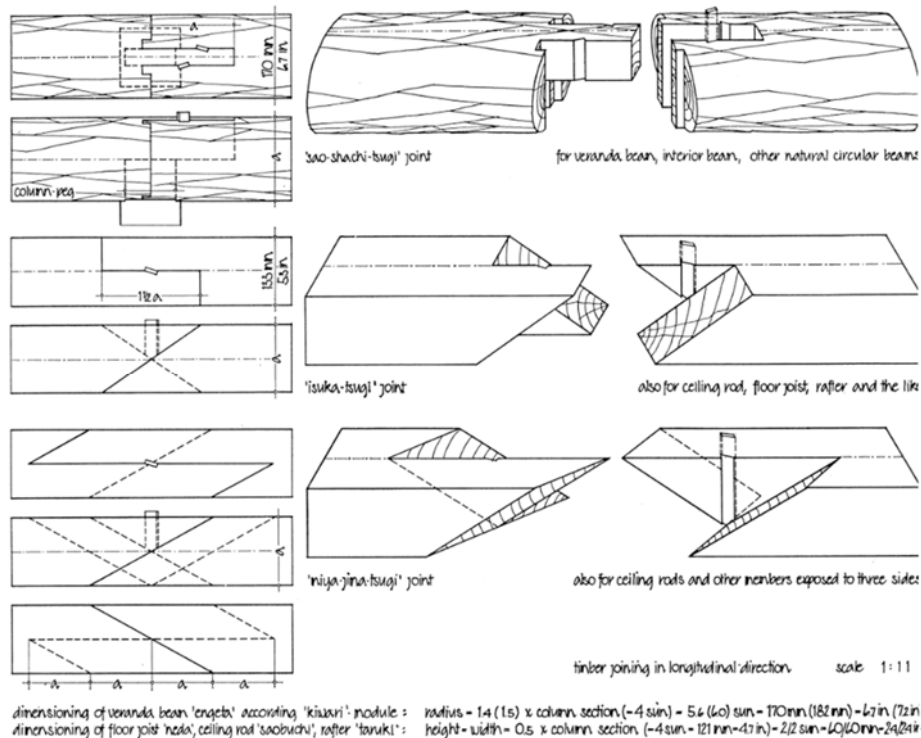
Japanilaisen ken-mitoituksen länsimainen vastine on Sveitsissä syntyneen ranskalaisen arkkitehdin, Le Corbusierin, kehittämä moduloori (20). Se perustuu Leonardo da Vincin Vitruviuksen mieheen (kuva 10). Sekä ken- että moduloorimenetelmä pohjautuvat siis miehen keskimääräisiin mittoihin jättäen naissukupuolen huomioimatta. Tämä voi rajoittaa menetelmien soveltamista sellaiseen. Ken-ruudukkoa on kuitenkin mahdollista jatkokehittää sekä päivittää ja sen käyttäminen modulisuunnittelussa voi olla ratkaisu moduulien joustavan muunneltavuuden ja laajennettavuuden sujuvuuteen.



KUVA 10. Vitruviuksen mies (21)

4.1 Muuntojoustavuus

Moduulien vapaan vaihtelun ja siirtelyn ratkaisemiseksi länsimaissa voitaisiin ottaa esimerkkiä japanilaisen talon ponttiliitosratkaisuista. Kuvassa 11 on esitetty yksi esimerkki japanilaisen talon pitkittäissuuntaisista ponttiliittymistä. Moduulien liittäminen toisiinsa ponttiliittymillä ilman rakenteen reiättämistä voisi sallia moduulien sujuvamman irrottamisen toisistaan jälkikäteen. Ponttaamisen käyttäminen myös moduulien seinäelementeissä voisi mahdollisesti ratkaista moduulin seinäelementtien vapaan muuntelun ja vaihtelun. Edistysaskel tälle muutokselle olisi, että sahateollisuus alkaisi viemään ajatusta japanilaisen talon ponttiliittymistä pidemmälle ja kehittelisi moduuleille sopivia ponttiliitosratkaisuja.



4.2 Rakennejärjestelmä

Tutkimustyön perusteella työssä todettiin, että CLT:n käyttäminen ken-modulaaristen moduulien rakenteena tulisi olemaan parhaiten toimiva ratkaisu. Tässä opinnäytetyössä moduulien rakennejärjestelmäksi valittiin siis CLT-massiivipuulevy. CLT:tä käytetään niin moduulien alapohjan, ulko-seinien kuin yläpohjan kantavana rakenteena.

CLT soveltuu muuntojoustavaan modulaarisuuteen erittäin hyvin, koska se voi toimia sekä rakennuksen jäykistävänä että kantavana rakenteena niin rakennuksen pysty- kuin vaakarakenteissa. Lisäksi sen aukotus on verrattain hyvin vapaata ja CNC-koneella levyä pystytään työstämään sujuvasti ja mittatarkasti, mikä on etu modulaarisuudelle ja erityisesti tässä työssä sovellettavalle keruudukon käyttämiselle moduulien mitoituksessa ja muuntelemisessa. Lisäksi todettakoon, että CNC-tekniikka voisi mahdollisesti toimia hyvin myös moduulien ponttiliitosten toteuttamisessa.

4.3 Mitoitus

Ajoneuvon ylittäessä Suomen tieliikenteen normaalit mittarajat, kuljetus määritellään erikoiskuljetukseksi, joka voi olla joko luvanvarainen tai vapaa kuljetus. Kuljetuksen mittojen ylittäessä leveyden 4 metriä, korkeuden 4,4 metriä tai pituuden 16 metriä, kyseessä on maksullinen luvanvarainen kuljetus. Tätä haluttiin tässä työssä välttää kustannustehottomuussyistä, joten moduulin ulkomitat päädyttiin rajaamaan maksimissaan (4x4,4x16) metriin. (19.)

Työn moduuliratkaisujen mitoitus perustuu ken-ruudukkoon ja suunnittelutyön edetessä kävikin ilmi, että ken-ruudukon käyttäminen moduulien suunnittelussa toimii todella hyvin. Suunnittelijalle vapautuu paljon resursseja käytettäväksi, sillä ken-ruudukkoa käyttämällä tämän ei esimerkiksi tarvitse käyttää aikaa jatkuvien uusien mitoituksien miettimiseen. Kenin myötä tilat ovat myös jo luonnollisesti suhteutettu ihmisen mittasuhteisiin, jolloin suunnittelija voi keskittyä esimerkiksi vain uusien tilaohjelmien ja rakennusmuotojen luomiseen. Vain mielikuvitus on todella rajana ja vapaa, kun rakennus kootaan ken-ruudukkoon perustuvista moduuleista. Julkisivun materiaalivalinnoilla ja kattomuodoilla voidaan lisätä julkisivujen moni-ilmeisyyttä.

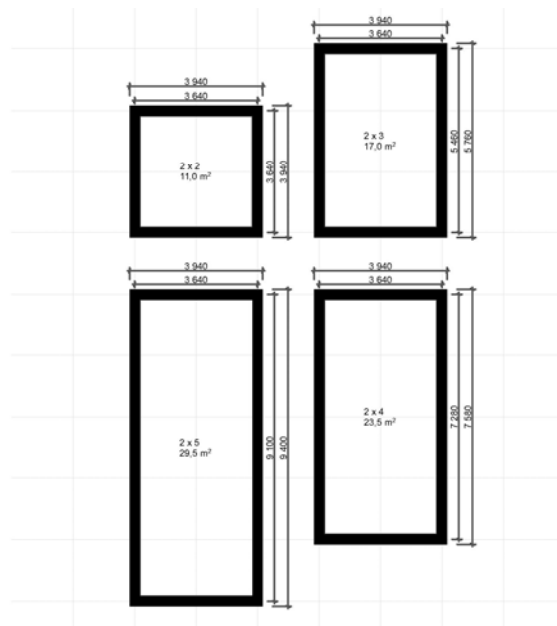
Japanilaisessa perinteisessä arkkitehtuurissa mitoitus on siis kenin myötä luonnostaan hyvin inhimillistä. Tämän ajan länsimaista yhteiskuntaa ja sitä myöten myös moduulirakentamisteollisuutta ohjaa hyvin hallitsevasti kustannustehokkuusajattelu. Se on kannattavaa talouskasvun kannalta, mutta on hyvin mahdollista, että moduulien suunnittelussa ja mitoituksessa ihmisen mittasuhteet voivat tätä myöten jäädä toissijaisiksi. Ihmisyyden unohtuminen rakennussuunnittelussa voi pahimmillaan johtaa ihmisestä irralliseen ja epävieraseen rakennettuun ympäristöön. Tässä työssä moduulien suunnittelussa ja mitoituksessa arvotettiin inhimillisyyttä, mihin ken luonnollisesti sopii hyvin.

4.4 Moduuliratkaisut

Moduulien mitoitus perustuu ken-ruudukkoon. Tässä työssä kenin on määritelty olevan tasaluku 1 820 millimetriä. Ken-ruudukon linja päätettiin kulkevan seinärakenteen keskipisteessä. Se voisi kulkea myös esimerkiksi vaakarakenteen (ala-, väli- ja yläpohja) ulkoreunojen mukaan. Moduulien

yhteen kokoamisessa työmaalla jäisi mahdollisesti tehtäväksi moduulien liittymäkohdan lattian valmistaminen.

Moduulikoot ovat seuraavat pienimmästä suurimpaan: 2ken x 2ken, 2ken x 3ken, 2ken x 4ken ja 2ken x 5ken (kuva 12). Yhden kenin käyttäminen olisi ollut turhan epäkäytännöllistä, sillä sisätiloista olisi tullut liian ahtaita. Kahden kenin leveysmitta on mahdollista saada pysymään vapaan erikoiskuljetuksen leveysmitan alapuolella, joka on neljä metriä.



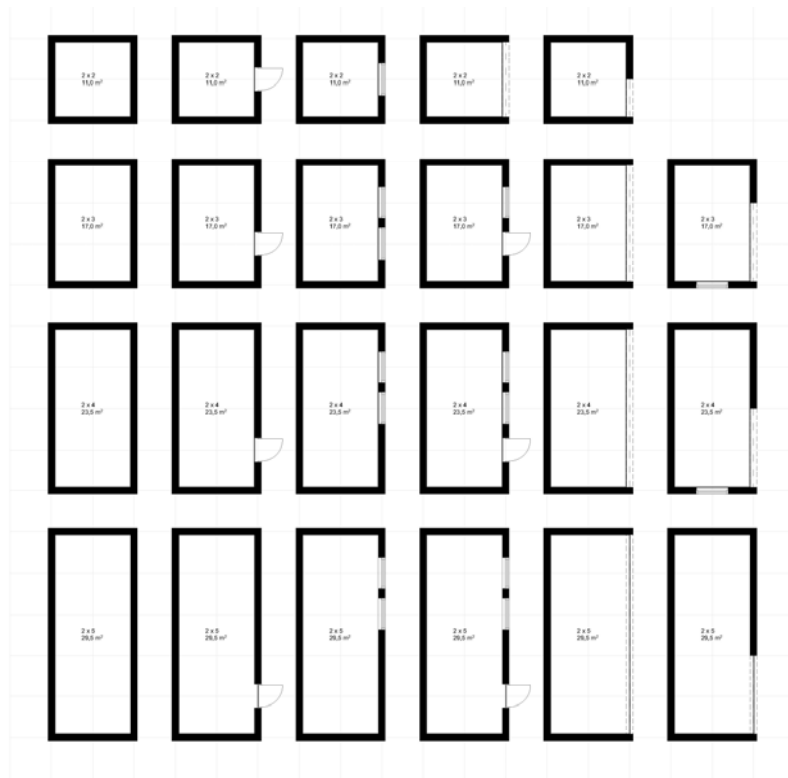
KUVA 12. Kenin mukaan mitoitettut moduulikoot

Työssä syntyi neljä eri kokoista moduulivaihtoehtoa, jotka voitaisiin kasata moduulin koosta riippuen 5–6 erilaisesta seinäelementtivaihtoehdosta. Esimerkinomaisina suunnitellut seinävaihtoehdot ovat

- umpio
- ikkunallinen
- ovellinen
- ikkunallinen ja ovellinen

- kokonaan avoin sekä
- puoliksi tai 1–5/1–5 avoin riippuen moduulin yksiköiden määrästä.

Seinät voisivat avautua myös puolen kenin verran, mikä tarkoittaa 910 millimetriä. (Kuva 13.)



KUVA 13. Moduulien eri seinävaihtoehdot

4.5 Esimerkinomainen ken-modulaarinen rakennushahmotelma ja luonnospohjapiirustukset

Työn lopussa valittiin yhteensä 20 moduuliratkaisua, joita testattiin esimerkinomaisessa ken-modulaarisessa rakennuksessa. Lopputuloksena syntyi Kaliforniassa sijaitsevan Sea Ranch -rakennusratkaisutyyppiä mukaileva ken-modulaarinen rakennushahmotelma ja sen luonnospohjapiirustukset. Tavoitteena oli nähdä, miten ken-modulaarisista moduuleista olisi mahdollista toteuttaa hy-

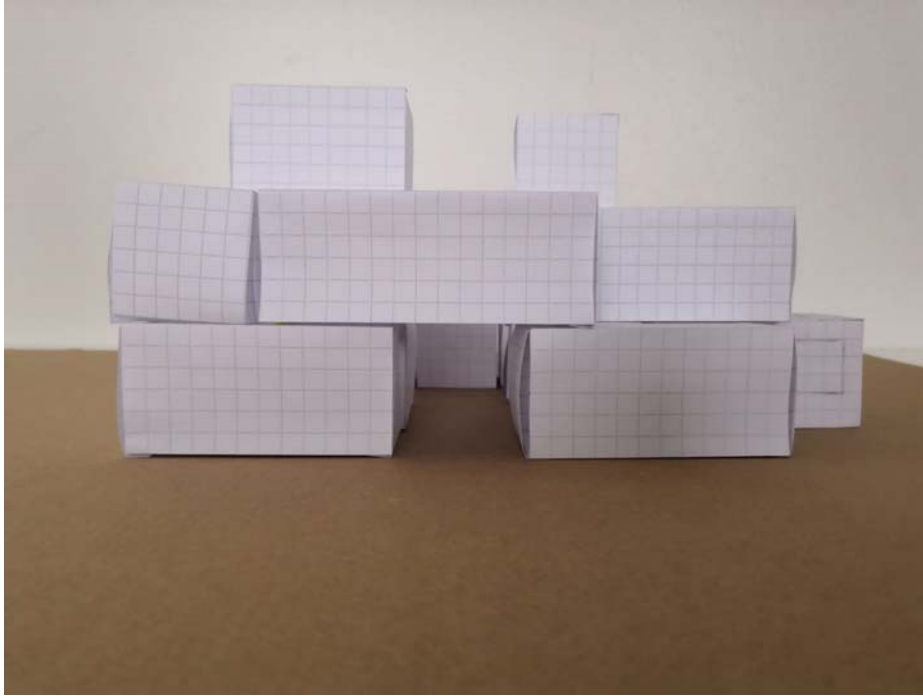
vää länsimaista rakennusarkkitehtuuria. Suunnittelutyötä ohjaamaan rakennuksen käyttötarkoituksesta päätettiin, että siellä voisi toteutua esimerkiksi yhteisöasumista tai se voisi olla vuokrattava kokonaisuus 20–30 henkilön ryhmien retriiteille tai tapahtumille.

Rakennuksen suunnittelutyö aloitettiin valmistamalla pienoismallimoduulit ruutupaperista, ikään kuin ken-ruudukkoa käyttäen (kuva 14). Tämän jälkeen valittiin rakennukselle miellyttävä maisema, johon sitä voitiin alkaa sovittamaan. Sopivaksi maisemaksi valikoitui Suomen Lapin tunturien kaltaisen vuoristoinen ympäristö.



KUVA 14. Ruutupaperista valmistetut pienoismallimoduulit

Rakennusta alettiin hahmottelemaan ensin luonnostelemalla sitä käsin kynällä paperille ja kasailemalla pienoismallimoduuleja erilaisiin muodostelmiin. Kuvassa 15 on esitetty yksi esimerkki pienoismallimoduuleista kasatuista muodostelmista.



KUVA 15. Pienosmallimoduuleista kasattu varhainen rakennushahmotelma

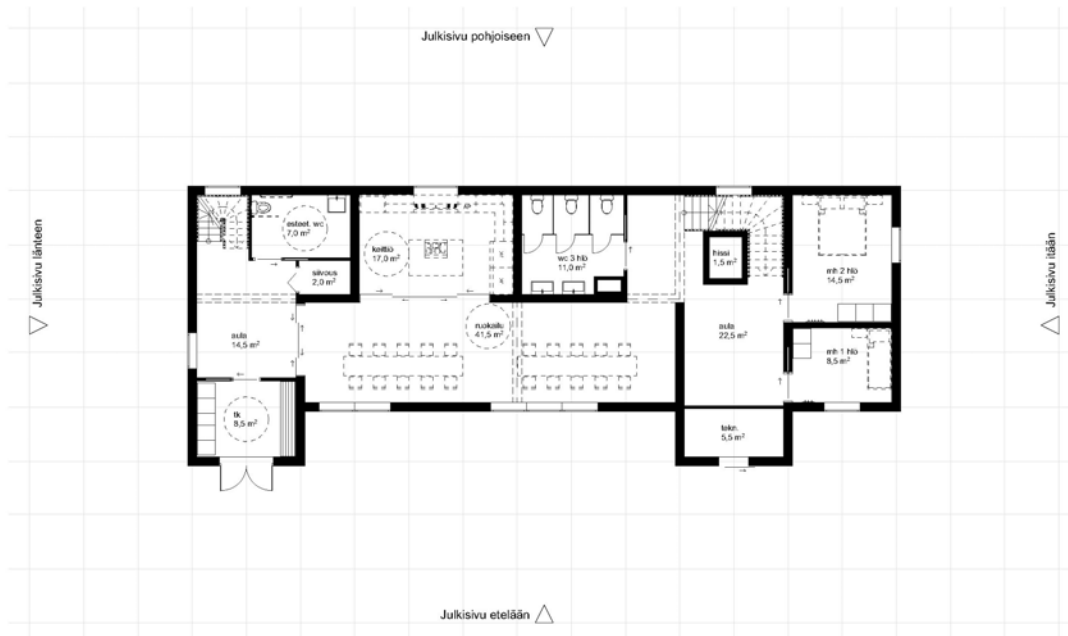
Sopivan rakennusmuodon löydyttyä suunnitelma vietiin SketchUp-ohjelmaan, jossa siitä luotiin luonnosmainen 3D-malli. Sen jälkeen mallin viivapiirustus vietiin Photoshop-kuvankäsittelyohjelmaan, jossa sen pääjulkisivulle luotiin nopea visualisointikuva jatkosuunnittelun pohjaksi (kuva 16).



KUVA 16. Rakennushahmotelman pääjulkisivukuvan välivaihe

Suunnitelmaa alettiin samaan aikaan työstämään ArchiCAD-mallinnusohjelmassa, jossa aloitettiin rakennuksen tilaohjelman alustava hahmotteleminen erivärisiä vyöhykkeitä käyttäen. Sen pohjalta suunnitelma työstettiin lopulliselle tasolle. Tilaohjelmat löytyvät tämän opinnäytetyön lopusta liitteistä 1 ja 2.

Lopullisissa luonnostasoisissa pohjapiirustuksissa ensimmäisessä kerroksessa sijaitsevat länsipuolelta itään päin katsoen sisäänkäynti ja tuulikaappi, aula, esteetön wc, ruokailutila, keittiö, kolmen henkilön yleinen wc, tekninen tila sekä majoittumishuoneet yhdelle ja kahdelle henkilölle. Neljänteen kerrokseen saakka ulottuvat portaat ja hissi sijaitsevat rakennuksen itäpuolella. (Kuva 17.)



KUVA 17. Luonnospohjapiirustus, 1. krs

Toisessa kerroksessa sijaitsevat länsipuolelle sijoittuvan tornin ensimmäinen kerros, 16 henkilön sauna- ja pesutilat, esteetön wc, pukuhuone, säilytyskomero sekä oleskeluauula ja -huone parvekkeineen (kuva 18.)



KUVA 18. Luonnospohjapiirustus, 2. krs

Kolmas kerros on varattu ainoastaan majoittumishuoneille ja kahdelle pienelle wc:lle. Majoittumishuoneita on yhteensä kolme ja ne ovat kahdeksalle ja kahdelle henkilölle. Tornin ylin kerros nousee rakennuksen länsipuolella. (Kuva 19.)



KUVA 19. Luonnospohjapiirustus, 3. krs

Neljänteen kerrokseen sijoittuvat pienen hissi- ja porrasaulan lisäksi parvekkeelliset yhden sekä kolmen hengen majoittumishuoneet (kuva 20).



KUVA 20. Luonnospohjapiirustus, 4. krs

Suunnittelutyön aikana huomattiin, että ken-ruudukon käyttäminen tilasuunnittelussa toimii hyvin. Työssä toteutettujen pohjasuunnitelmien huonekoot ovat pääasiassa muodostettu ohjelmoimalla ne puolikkaista ja kokonaisista ken-ruuduista. Työn edetessä kuitenkin huomattiin, että ken-ruudukon mukaan suunnitteleminen voi toisinaan vaatia kompromisseja muun muassa ainakin porrasmittauksen ja esteettömyyden kohdalla. Esimerkiksi halkaisijaltaan 1 500 millimetrin pyörähdysympyrän mahtuminen vaati toisinaan lukuisten eri vaihtoehtojen läpikäymistä tilojen järjestäytymiselle.

Työssä myös julkisivun aukotuksen suunnittelussa käytettiin apuna ken-ruudukkoa. Ikkunoiden ja ovien sijoitteluken-ruudukon mukaan toi suunnitteluun jouhevuuatta sekä tehokkuutta ja mahdollisti julkisivun aukotuksesta hyvin linjakkaan, järjestelmällisen ja täten sopusuhtaisen.

Työn esimerkinomaisen rakennuksen kaikki ulkoseinien kulmat ovat suorita. 45 asteen kulmat olisivat ehkä voineet olla mahdollisia, mutta tässä työssä päädyttiin pitäytymään vain suorissa kulmissa.

Japanilaisessa perinteisessä arkkitehtuurissa katot ovat yhtä lailla modulaarisia, joten tässäkin työssä kattomuodot muodostettiin käyttämällä ken-ruudukkoa. Rakennuksen katot ovat pulpettikattoja sekä epäsymmetrisiä harjakattoja.

CNC-tekniikan ansiosta CLT on työstettävissä erittäin monipuolisesti, mikä voi mahdollistaa yksilöllisten profiilien toteuttamisen. Tämän myötä CLT-rakenteisten ken-moduulirakennusten julkisivujen ilmeitä voitaisiin monipuolisesti elävöittää ja täten saada aikaan hyvin yksilöllisiä lopputuloksia. Tämän työn rakennushahmotelman julkisivujen päämateriaaliksi valittiinkin CNC-koneella erilaisiin profileihin työstettyä CLT:tä puun eri luonnollisissa sävyissä, joka on havainnollistettu kuvan 21 eteläjulkisivun visualisointikuvassa. Kattojen sekä ovien ja ikkunoiden karmien ja puitteiden värit ovat tumman harmaat.



KUVA 21. Lopullinen visualisointikuva rakennushahmotelman eteläisestä julkisivusta

5 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli löytää toimiva suunnitteluratkaisu joustavasti muunneltavalle ja laajennettavalle modulaarisuudelle. Työn ensimmäisessä osassa tehtiin tutkimustyötä modulaarisen rakentamisen yleisistä seikoista hyötyine ja haasteineen. Sen jälkeen tutkittiin yleisimpiä suomalaisessa rakentamisessa käytettyjä rakennejärjestelmiä ja pohdittiin niiden soveltuvuutta muuntojoustavaan modulaariseen rakentamiseen. Modulaarisuutta tutkittiin myös perehtymällä jo toteutettuun tai toteutumaisilla olevaan moduulirakentamiseen tutustumalla kolmeen erilaiseen modulaariseen rakennukseen. Lisäksi merkittävämpänä osana työssä tutkittiin japanilaista perinteistä arkkitehtuuria ja pohdittiin sen elementtien soveltuvuutta länsimaiselle muuntojoustavalle moduulirakentamiselle.

Työssä saatiin luotua neljä japanilaiseen ken-ruudukkoon perustuvaa erikokoista moduulia, joille suunniteltiin moduulin koosta riippuen 5–6 erilaista seinäelementtivaihtoehtoa. Moduulit olisivat näistä vapaasti kasattavissa ja myöhemmin muunneltavissa. Työn lopussa otettiin käyttöön yhteensä 20 moduulia, joista ohjelmoitiin esimerkinomainen ken-modulaarinen rakennushahmotelma ja sen luonnospohjapiirustukset. Tutkimustyön perusteella voidaan todeta, että japanilaisessa perinteisessä arkkitehtuurissa olisi paljon potentiaalia länsimaisen moduulirakentamisen muuntojoustavuuden haasteiden ratkaisemisessa.

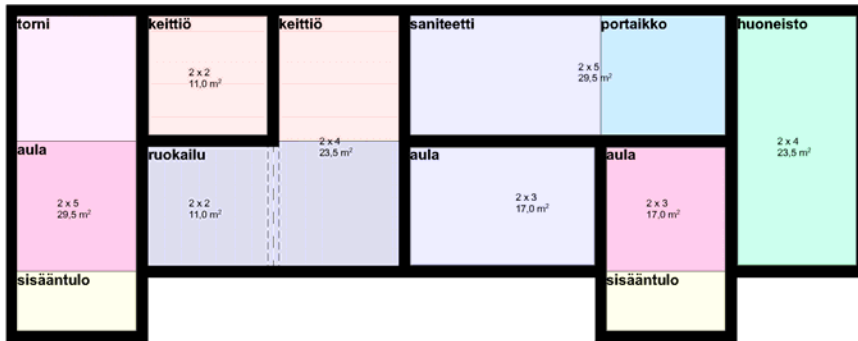
Mahdollisuus moduulien joustavaan muunteluun, vaihteluun ja laajentumiseen lisäisi merkittävästi moduulirakentamistuotannon kilpailukykyä. Toimivien ratkaisujen löytyminen tähän vaatii asiaan vihkiytymistä ja täysin uudenlaisten näkökulmien käyttöönottoa. Ken-modulaarisuus voisi olla yksi näistä uusista näkökulmista. Mielenkiintoista olisi selvittää ken-moduulien vientimahdollisuus Japaniin. Moduulithan ovat kenin myötä valmiiksi mitoitettu japanilaiseen mittajärjestelmään, joten niiden potentiaali japanilaisilla moduulirakentamismarkkinoilla voisi olla hyvinkin lupaava.

LÄHTEET

1. Porthan, Piritta 2018. Moduulirakentaminen tuo murroksen rakennusteollisuuteen. Talotekniikan verkkolehti 28.11.2018. Hakupäivä 1.12.2021. <https://talotekniikka-lehti.fi/moduulirakentaminen-tuo-murroksen-rakennusteollisuuteen/>.
2. Puuinfo 2022. Teolliset rakennusjärjestelmät. Teams-luento 4.2.2022.
3. Koljonen, Atso 2021. Tilaelementtien mahdollisuudet pientalorakentamisessa. Modulaarisen pientalomalliston suunnittelu. Tampereen ammattikorkeakoulu. Rakennusarkkitehdin tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 15.12.2021. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/502137/Koljonen_Atso.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
4. Puuinfo 2021. Puutieto. Käyttökohteet. Yleisimmät rakennejärjestelmät. Hakupäivä 16.12.2021. <https://puuinfo.fi/puutieto/kayttokohteet/yleisimmat-rakennejarjestelmat/>.
5. Crosslam. Tuotteet. Crosslam-levy ja sen ominaisuudet. Hakupäivä 24.1.2022. <https://www.crosslam.fi/tuotteet/crosslam-levy-ja-sen-ominaisuudet.html>.
6. Crosslam 2017. CLT-suunnittelun ohje -esite.
7. Puuinfo 2021. Rakenteet. Hakupäivä 16.12.2021. <https://puuinfo.fi/rakenteet/>.
8. Siikanen, Unto 2008. Puurakentaminen. 6. painos. Helsinki: Rakennustieto Oy.
9. Valjus, Juha 2010. BES 2010 Pilari-palkkirungon jäykistys ja liitosratkaisut. Finnmap Consulting. Hakupäivä 7.1.2022. <file:///C:/Users/Cecilia/Downloads/Valjus%20Pilari-palkkirungon%20j%C3%A4ykistys.pdf>.

10. Engel, Heino 2020. Measure and Construction of the Japanese House. Japan: Tokyo. Hakupäivä 14.1.2022. Tuttle Publishing. <https://ebookcentral-proquest-com.ezp.oamk.fi:2047/lib/oamk-ebooks/reader.action?docID=2028879&ppg=22>.
11. Okamoto Miho 2020. Traditional Japanese Architecture. Kimono Tea Ceremony Maikoya. Hakupäivä 23.3.2022. <https://mai-ko.com/travel/culture-in-japan/traditional-japanese-architecture/>.
12. Reinier de Graaf 2018. Norra Tornen / OMA | Reinier de Graaf. Archdaily. Hakupäivä 22.3.2022. https://www.archdaily.com/905500/norra-tornen-oma-reinier-de-graaf?ad_source=search&ad_medium=projects_tab.
13. Peltonen, Markku Rainer 2019. Tukholmaan valmistui ennätysellisen korkea asuinkerrostalo, joka on kuin veistos – Kalasataman torneista yksi yltää pari kerrosta korkeammalle. Helsingin sanomat-verkkolehti. Hakupäivä 23.3.2022. <https://www.hs.fi/koti/art-2000005969520.html>.
14. Rakennuslehti 2022. Hervantaan nousee opiskelijoiden suunnittelema puukerrostalopari – moduulit paikalleen lähes asumisvalmiina. Hakupäivä 7.1.2022. <https://www.rakennuslehti.fi/2021/05/hervantaan-nousee-opiskelijoiden-suunnittelema-puukerrostalopari-moduulit-paikalleen-lahes-asumisvalmiina/>.
15. Tampereen yliopisto 2020a. Puurakentamiseen tukeutuva opiskelija-asumisen ideakilpailu Suomen arkkitehtikouluissa 2019. Arvostelupöytäkirja 5.3.2020.
16. Tampereen yliopisto 2020b. Puurakentamiseen tukeutuva opiskelija-asumisen ideakilpailu Tampereen yliopiston arkkitehtuurin yksikön opiskelijoille on ratkaistu. Lehdistötiedote. Hakupäivä 29.1.2022. <https://toas.fi/wp-content/uploads/2020/03/TAU-TOAS-ideakilpailu.-Lehdist%C3%B6tiedote-5.3.2020.pdf>.

17. Laukaa 2022. Asuminen ja ympäristö. Julkiset rakennukset. Koulut ja päiväkodit. Satavuon koulu ja päiväkoti. Hakupäivä 22.3.2022. <https://www.laukaa.fi/asukkaat/asuminen-ja-ymparisto/julkiset-rakennukset/koulut-ja-paivakodit/satavuon-koulu-ja-paivakoti/#62232420>.
18. Kummala Petteri. Satavuo School and Daycare Centre. Navi.Finnisharchitecture.fi. Hakupäivä 17.3.2022. <https://finnisharchitecture.fi/satavuo-school-and-daycare-centre/>.
19. Kuntaliitto 2019. Erikoiskuljetukset suunnittelussa. E-kirja. Hakupäivä 9.4.2022. https://julkaisut.vayla.fi/pdf9/kuntaliitto_erikoiskuljetukset_ebook.pdf.
20. Wikipedia 2022. Modulor. Hakupäivä 7.5.2022. <https://en.wikipedia.org/wiki/Modulor>.
21. Shutterstock 2020. Vitruvian man. Hakupäivä 4.5.2022. <https://www.shutterstock.com/image-vector/vitruvian-man-by-leonardo-da-vinci-1015039279>.



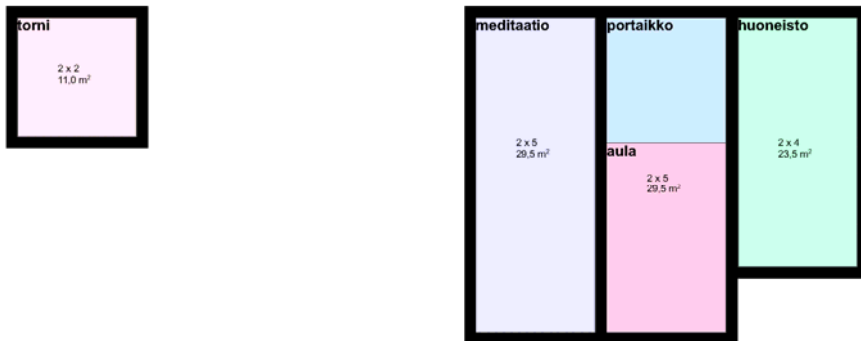
1. krs

1:100



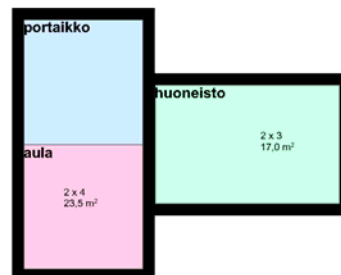
2. krs

1:100



3. krs

1:100



4. krs

1:100