

Eesti Kunstiakadeemia
Arhitektuuriteaduskond
Arhitektuuri ja linnaplaneerimise osakond

Ats Buddell

PUINE PUITSTRUKTUUR

Magistritöö

Juhendajad:

MScAAD Martin Melioranski

PhD Renee Puusepp

Tallinn 2016

Autorideklaratsioon:

Kinnitan, et:

- 1) käesolev magistritöö on minu isikliku töö tulemus, seda ei ole kellegi teise poolt varem (kaitsmisele) esitatud;
- 2) kõik magistritöö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd (teosed), olulised seisukohad ja mistahes muudest allikatest pärinevad andmed on magistritöös nõuetekohaselt viidatud;
- 3) luban Eesti Kunstiakadeemial avaldada oma magistritöö repositooriumis, kus see muutub üldsusele kättesaadavaks interneti vahendusel.

Ülaltoodust lähtudes selgitan, et:

- käesoleva magistritöö koostamise ja selles sisalduvate ja/või kirjeldatud teoste loomisega seotud isiklikud autoriõigused kuuluvad minule kui magistritöö autorile ja magistritööga varalisi õigusi kasutatakse vastavalt Eesti Kunstiakadeemias kehtivale korrale;
- kuivõrd repositooriumis avaldatud magistritööga on võimalik tutvuda piiramatul isikute ringil, eeldan, et minu magistritööga tutvuja järgib seadusi, muid õigusaktide ja häid tavaid heas usus, ausalt ja teiste isikute õigusi austavalt ning hoolivalt. Keelatud on käesoleva magistritöö ja selles sisalduvate ja/või kirjeldatud teoste kopeerimine, plagieerimine ning mistahes muu autoriõigusi rikkuv kasutamine.

23. mai 2016. a.

Ats Buddell

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele:

23. mai 2016. a.

MScAAD Martin Melioranski

PhD Renee Puusepp

Magistritöö kaitsmine toimub Eesti Kunstiakadeemia Arhitektuuriteaduskonna arhitektuuri ja linnaplaneerimise osakonna magistritööde hindamiskomisjoni koosolekul 30. mail 2016. aastal.

Kaitstud hindele:

30. mai 2016. a.

Täna oma juhendajaid Martin Melioranskit ja Renee Puuseppa, konstruktiivsete lahenduste konsultanti professor Martti Kiisat, teema ja tekstilise osa konsultanti Eik Hermannit, teksti toimetajat Riin Buddelli ja summary toimetajat Silver Soovälja.

Täna nõuannete ja tagasiside eest EKA arhitektuuriteaduskonda ja magistristuudiate juhendajaid. Täna Lauri Kivilit, Mihkel Urmetit ja Taavi Kuningat puitmajade sektoris toimuva tutvustamisel.

Täna Tallinna Linnaplaneerimise ametit Vanalinna 3D-mudeli kasutusõiguste eest. Autoriõigused: Tallinna Linnaplaneerimise Amet.



SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1. EESTLASE SUHE PUIDUGA.....	7
1.1. Puit ajaloos.....	7
1.2. Puit pärimustes ja rahvakultuuris.....	8
1.3. Traditsioonilised ehitusvõtted.....	9
2. PUIDU ROLL JÄTKUSUUTLIKU KESKKONNA LOOMISEL.....	11
2.1. Inimtegevuse mõju muutustele Maal.....	11
2.2. Puidu olulisus tervema keskkonna loomisel.....	12
2.3. Teel jätkusuutliku keskkonnani.....	16
3. JUHTUMIUURING - MASSIIVPUIDUST MAAILMAS.....	17
3.1. Inseneeritud massiivpuidu olemus.....	17
3.2. Inseneeritud puit meil ja mujal.....	17
4. PUIDU OLEMUS - RAKU TASANDILT INIMSKAALASSE.....	21
4.1. Puidu ülesehitus rakutasandil.....	21
4.2. Rakustruktuuri skaleerimine ja konstruktiivsed põhimõtted.....	23
5. MASSIIVPUIT LINNAEHTITUSES.....	27
5.1. Konkurentsieelised.....	27
5.2. Kiirus ja ressursi vajadus.....	28
6. PUINE STRUKTUUR LINNARUUMIS.....	30
6.1. Situatsiooni kirjeldus.....	30
6.2. Puise struktuuri loodud võimalused.....	31
6.3. Struktuuri püstitus ja tüüplahendused.....	32
KOKKUVÕTE.....	33
SUMMARY.....	35
The Nature of Wood in Timber Structures.....	35
VIIDATUD ALLIKAD.....	37
LISAD.....	39

SISSEJUHATUS

puine <-se 4> <adj> - 1. puust tehtud, puune. *Puine paat. Puised
lusikad. *Paneb kaks lauskjamat puuhalgu päitsisse,
katab puise padja pealt heintega.* N. Baturin.

struktuur <-i 21> <s> - 1. terviku koostisosade asetus, paigutus ja liitumise v.
seostumise viis, (sise)ehitus. a. (aine, materjali puhul).
Kivimi, mineraali, maagi, sulami, puidu struktuur. b.
(abstraktsemalt, mingi süsteemi ülesehituse,
sisemiste seoste, koosseisu kohta).¹

*Magistritöös on kasutatud puise sünonüümina ka väljendeid puidule
omane ja puidu loomuga.*

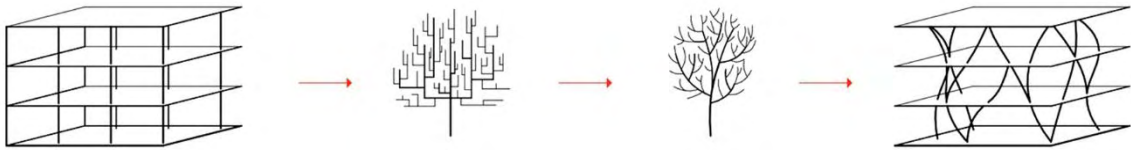
Inimene oma tegevusega on oluliseks muutujaks keskkonna kujunemisel. Siinkohal on oluline erinevus hommiku- ja õhtumaade lähenemisel loodusliku- ja tehiskeskkonna ühendamise vahel – kui esimeses on ühendus keskkondade vahel otsene ja piir nende vahel spirituaalne ja vaid aimatav, siis teisel puhul on ühendus pigem visuaalne ja keskkondade vahel eksisteerivad füüsilised tõkked. Just endale mugava tehiskeskkonna loomisel häirime oluliselt looduslikku tasakaalu ja kahjustame ümbritsevat keskkonda.

Käesolevas magistritöös uurin ühe vanima ehitusmaterjali – puidu – kasutust linnaehituses ja selle potentsiaale ja iseloomu. Puit on väga omanäoline materjal, seda nii otseses kui ka kaudses tähenduses, ja selle kasutus massiivses linnaehituses on marginaalne. Omades toorainet, teadmisi ja tehnoloogiaid on Eestil olemas kõik eeldused saamaks inseneeritud massiivpuidu kasutusel ja arendamisel maailmas eesrindlikuks ja innovaatiliseks riigiks.

Täpsemalt on vaatluse all puidu rakustruktuurist tulenevate ülesehituslike põhimõtete ülekandmine inimöötmelisse skaalasse ja inseneeritud massiivpuidu ülesehitus lähtuvalt puidu

¹ EKI - [EKSS] "Eesti keele seletav sõnaraamat", <http://www.eki.ee/dict/ekss/index.cgi> (vaadatud 2. V 2016).

enda struktuuri loogikast. Eesmärgiks on luua puidule omase struktuuriga konstruktsioon (joonis 1), milles on rõhk seatud arhitektuursele puhtusele ja elegantsile.



joonis 1. Puise struktuuri põhimõte.
allikas: autori skeem

Valdavalt kasutatakse massiivpuidu puhul betoon- ja teraskonstruktsioonidele omast ülesehitust ja ühendamise viise, mis enamikul juhtudel nõuab konstruktsiooni peitmist nii esteetilistel kui ka tulepüsivuse kaalutlustel (joonis 2). Antud töös käsitletava lähenemise juures on inspiratsiooniks pigem tootedisaini läbitöötatus ja puhtus, mis võimaldaks konstruktsiooni ausat, varjamata eksponeerimist (joonis 3).



joonis 2. Näiteid massiivpuidu sõlmedest.
allikas: J. Mayo „Solid Wood“



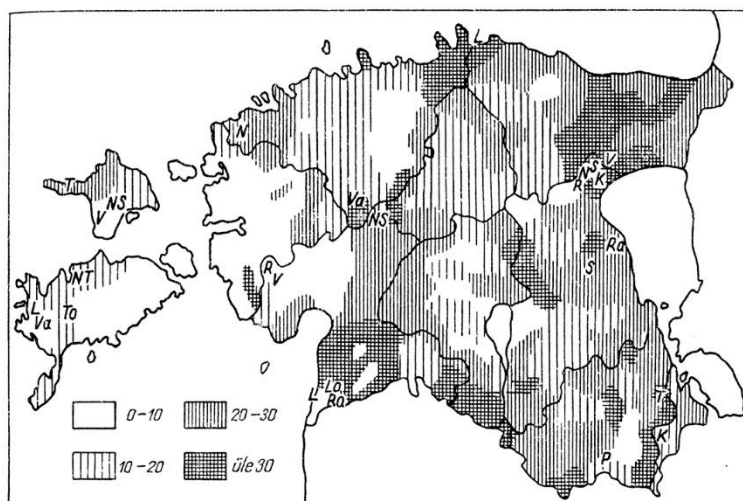
joonis 3. Näiteid spoonist tootedisainist.
allikas: google search

Põhilisteks kasutatavateks materjalideks lahenduste valikul ja väljatöötamisel on inspiratsioon taimeraku struktuurist, Joseph Mayo 2015. aastal ilmunud kogumik „Solid Wood: Case Studies in Mass Timber Architecture, Technology and Design“ ja TTÜ teadlaste poolt 2015. aastal koostatud õpik kõrgkoolidele „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid“. Eestlaste metsarahva staatust kirjeldab Ants Viirese „Puud ja inimesed“.

1. EESTLASE SUHE PUIDUGA

1.1. Puit ajaloos

Üksnes metsas elanud ja metsast sõltuvuses olnud põliste metsaelanike järeltulijatena on meil alati olnud metsa ja puudega eriline side. Mets ja puud andsid kõik vajaliku eluasemest ja tarbeesemetest toidu ja sissetulekuni (joonis 4). Nii ongi nimetatud aega Euroopa metsavööndi maades kuni tööstusrevolutsioonini „puuajastuks“. Tehnilised käsitööoskused ulatuvad meie aladel kaugemale keskaega, kus maapuuseppa on mainitud juba 14.-15. sajandi vahetuse paiku. Keerulisemad ametid, nagu treial ja tisler ilmusid Eesti küladesse vastavalt 18. ja 19. sajandil. Kasvava metsakasutuse juures tekkis vajadus hakata metsa majandama, esimesed sammud selles suunas tehti Eestis juba 17. sajandil. Järk-järgult viis metsa kasutamise piiramine ja uute materjalide propageerimine inimeste kaugenemiseni puidust.²



Talurahva metsatöönduse paiknemine 19. sajandil: K – korvid, L – laevad, Lo – loogad, N – puunõud, P – piibud, R – reed, Ra – rattad, S – sarjad, sõelad, T – tõrv, To – toolid, Va – vankrid. Viirutus märgib metsamaa protsenti valdade üldpindalast 1921. a. andmeil.

joonis 4. Metsasus ja talurahva metsatöönduse paiknemine 1921. aastal.
allikas: A. Viires „Puud ja inimesed“

Suure tõenäosusega võib leida samu tendentse ka globaalses puidu kasutuses, kus puidust võõrandumisele andsid tugeva tõuke ka suured linnapõlengud 1666. aastal Londonis ja 1871. aastal Chicagos, kus mõlemas hävis suur osa linnast.

² A. Viires, Puud ja inimesed. Tartu: Ilmamaa, 2000 [esmatrükk 1975], lk 7–40.

Kõigest negatiivsest hoolimata on puit ilmselt vanim ehitusmaterjal ja meil ei ole endiselt puidule võrdväärset rivaali – suutes sillata suuri avasid ja kerkida kõrgustesse, samas luua hubaseid kodusid ja kuure. Puit on kasutusel nii konstruktsiooni kui ka viimistlusmaterjalina, nii sise- kui ka välistingimustes ja ka mööbli ja tarbeesemete valmistamiseks. Puidu lõhn, tekstuur, muster ja soojus jäävad kättesaamatuks kõigile teistele materjalidele.³

1.2. Puit pärimustes ja rahvakultuuris

Puude ja metsa olulisus kajastub ka vanarahva uskumustes. Metsa minek tähendas kodusest miljööst lahkumist ja millegi võõra ja vägeva mõjualasse sisenemist. Kõigega, mis metsas elas ja tegutses, tuli enda huvides püüda heaga läbi saada, kuna kogu metsa elu üle valvasid Eesti rahvausundi kõige elavamana püsinud kaitsevaimud – metsavaimud. Sellistest uskumustest kinnipidamine aitas metsa väärtustada ja teenis keskkonnakaitse huve.⁴

Inimene püüab selguse mõttes luua sidemeid erinevate nähtuste ja juhtumiste vahel, sellisest käitumisest tulenevalt on välja kujunenud paljud tõekspidamised metsaga ümberkäimisel. Näiteks mängisid siin olulist rolli kuu faasid ja ka tuule suund. Kuu faasidest iseloomustasid kuu loomine ja noorkuu kasvamist ja arenemist, nii peeti õigeks sel ajal puid istutada, et need ilusasti kasvama läheksid. Samas võsa tuli raiuda vanakuu ajal, et see enam uusi võsusid ei ajaks. Kuu faaside järgi tõlgendati ka nn õiget aega leht- ja okaspuu langetamiseks, sama oli ka tuule suundadega nii aja määramisel, millal langetada, kui ka suuna määramisel, kuhu puu langetada. Kõigi nende märkide järgi õigesti talitades pidi saama kindlaks otstarbeks parima puu, mis muidugi jättis aastasse vaid paar päeva, mil näiteks laeva mastimändi langetada tohtis.

Üheks huvitavaks uskumuseks oli veel nn tulioksa⁵ vältimine. Tulioksaga majja pidavat lööma pikne, samuti võis see oks põhjustada tulekahju. Laevaehituses tähendas see laeva või paadi hukku tormis.

³ J. Mayo, Solid Wood: Case Studies in Mass Timber Architecture, Technology and Design. London ja New York: Routledge, 2015, lk 3.

⁴ A. Viires, Puud ja inimesed, lk 41–43.

⁵ Tulioks – tihedalt puu ligidal üles kasvanud oks, tavaliselt esines kuusel harvem männil

Kõik eelnev annab jällegi mõista meie esivanemate tihedatest sidemetest metsa ja loodusega, kus enamik igapäevastest ja aastaajalistest toimetustest olid seotud teatud ilmingutega meid ümbritsevas keskkonnas. Kehtis vastastikuse austuse printsiip – sina mulle, mina sulle!⁶

1.3. Traditsioonilised ehitusvõtted

Puusepa amet on läbi aegade olnud au sees. Mets ja puit andsid pea kõik vajaliku elamiseks – peavarju, tööriistad, tarbeesemed, mööbli, lisaks oli mets ka oluline toiduallikas. Olles puidust nii sõltuv, on oluline mõista selle ehitust ja käitumist, teada erinevate puuliikide iseärasusi ja sellest lähtuvalt valida sobivaimate omadustega puit, täitmaks talle määratud ülesandeid parimal võimalikul moel. Sügavad teadmised puidu kasutamisest on omandatud läbi põlvkondade ja pärandatud edasi järeltulevatele põlvedele. Kvaliteetne tiseritöö on aega- ja oskusi nõudev ettevõtmine. Kõik algab juba õige puu ja sellest sobivaima osa valikuga, vältimaks probleeme puidu töötlemisel ja muutes seeläbi protsess hoopis nauditavaks⁷, kindlasti tagab läbimõeldud tegutsemine ka puidu pikema eluea.

Julgen väita, et just täpsust ja aega nõudva tegevusena on tiseritöö suurema mahuga puitkonstruktsioonehituses kaugeks jäänud. Hoopis lihtsam on asendada elegantsed tapp-ühendused metall-kinnituste ja kruvidega, tegevus on kiirem ja ei nõua nii kõrge kvalifikatsiooniga tööjõudu. Tulemuseks on aga ühendused, mis vaid üksikutel juhtudel võimaldavad puhtaid, lisaviimistluseta lahendusi, tavaliselt tuleb kogu konstruktsioon peita nii esteetilistel kui ka tuleohutuse kaalutlustel viimistluskihtide alla. Lisaks vajuvad seeläbi unustustehõlma ka puutöö oskused ja tehnikad.

Tänapäevased seadmed, näiteks CNC-pingid võimaldavad väga keerukate elementide ja detailide valmistamist suures koguses ja väga lühikese ajaga, muutes seeläbi tiserilahendused mõeldavaks ka suuremahuliste konstruktsioonide juures. Samas säilib läbi digitaalse projekteerimise ja programmeeritud tootmisprotsesside detailide varieeruvuse võimalikkus, muutmata neid veel erilahendusteks – tüüpelement saab seeläbi hoopis uue tähenduse, koondades enda alla samadele reeglitele alluvad elemendid, mille kuju ja mõõtmed saavad vabalt muutuda, olenemata kindlast moodulist.

⁶ A. Viires, Puud ja inimesed, lk 45–54.

⁷ A. Jackson, D. Day, Puutöömeistri käsiraamat [orig pk Collins Complete Woodworker's Manual. HarperCollins Publishers Ltd, 2005], tõlkinud E. Velbri, TEA kirjastus, 2006, lk 9–15.

Kiire tehnoloogilise arengu kõrval on meil veel tislereid ja põlvkondade vanuseid teadmisi puidu kasutusest. Tulevikku vaatavalt oleks Eestil potentsiaal need kaks oskust ühendada – luues tislerekonstruktsiooni tehnoloogi abil, saab puidu konstruktiivset ja esteetilist kvaliteeti pakkuda teadlikule tarbijale tunduvalt suuremas mahus. Eestis on suurepäraseid ettevõtteid, kes pakuvad väga kvaliteetseid inseneeritud massiivpuittooteid liimpuittaladest, -fermidest CLT-paneelide ja valmis majadeni välja. Massiivpuidu sektorit saaks arendada veel kaugemale ja pakkuda maailmas väljatöötatu kõrval ka innovaatilisi traditsioonidest lähtuvaid ja optimeerimist võimaldavaid lahendusi.

2. PUIDU ROLL JÄTKUSUUTLIKU KESKKONNA LOOMISEL

2.1. Inimtegevuse mõju muutustele Maal

Elu ühel planeedil on äärmiselt harukordne ja sellega hooletult ümberkäimine lausa kuritegu. Kahjuks ei mõisteta paljut enne, kui seda enam ei ole. Olles jõudnud Maailmaruumis kaugemale kui kunagi varem, hakkame üha rohkem mõistma ja hindama oma harukordset olukorda. Oleme aastakümneid kuulnud uurimustest ja ennustustest erinevate kliimaatiliste probleemide kohta, mis ulatuvad pealtnäha väikestest muutustest keskmises temperatuuris katastroofiliste ilmastikunähtuste ja koguni massilise väljasuremiseni.⁸ Paljudki sellest võib pidada asjade loomulikuks arenguks ja erinevate kliimaatiliste tsüklite vahelduseks, mis on seotud Maakera tiirlemisega elliptilisel orbiidil ümber Päikese, mille aktiivsus on pidevalt tsükliliselt muutuv, ja samal ajal pöörlemisega ümber oma telje, mille kaldenurk samuti aeglaselt, aga kindlalt pidevalt kõigub. Rääkimata seejuures veel kaudsematest ja mõistetamatutest mõjudest meie väikeses Päikesesüsteemis. Selle kõige kõrval tundub inimene oma tegevusega väga tühine muutuja, kuid see tunne on vägagi petlik.

Inimene on oma elutegevusega tugevalt mõjutamas planeedi ökoloogilist tasakaalu. Kujundades keskkonda enda ümber, muutes seda meile endile mugavamaks, ohutumaks ja efektiivsemaks, oleme tegutsenud pikalt, muretsemata liiga palju end ümbritseva keskkonna pärast. Just tehiskeskkonna loomisel saavad arhitektid näidata teed jätkusuutliku linnaehituse iseenesestmõistetavaks saamise suunas. Ja puidul on potentsiaali mängida selles protsessis olulist rolli. See on küll ainult üks lüli terves ahelas, aga kindlasti mitte vähem oluline kui näiteks autode keskkonnasõbralikumaks muutmine, alternatiivsete energiaallikate kasutusele võtmine päikese ja tuule näol või jätkusuutlik metsamajandus. Selles töös keskendun teemadele, mis on otseselt seotud arhitektuuri ja tervema keskkonna loomisega.

⁸ Climate change: How do we know? Ed. H. Shafiel. – NASA – Global Climate Change: Vital Signs of the Planet (uuendatud 12. XI 2015), <http://climate.nasa.gov/evidence/> (vaadatud 14. XI 2015).

2.2. Puidu olulisus tervema keskkonna loomisel

Üheks oluliseks kliimamuutuste kiirenemise põhjuseks võib pidada inimtekkelist tööstusrevolutsiooni, mis sai alguse 18. saj teisel poolel, ja sellega kaasnenud inimkonna plahvatuslikku kasvu, mis ületas 7 miljardi piiri 2011. aastal, näidates seejuures õnneks kerget aeglustumise tendentsi.⁹ Tehnoloogia arengu ja vajaduste kasvuga on kasutusele võetud järjest uusi maavarasid, millede ammutamine ja töötlemine saastavad keskkonda. Üheks oluliseks kliima mõjutajaks on kasvuhoonegaasid ja eriti süsinikdioksiid, mille sisaldus atmosfääris on ületanud ohutuks peetava 350 (ppm)¹⁰ ja püsinud sellest kõrgemal 1988. aastast alates, ulatudes 2016. aasta märtsiks 403,94 osakeseni miljonist.¹¹ Suurusjärgus 90% inimtegevuse poolt tekitatud CO₂-st pärineb fossiilsete kütuste põletamisest ja tsemendi tootmisest¹² – betoon ja teras on domineerivad materjalid meie linnaehituses, mille töötlemisel kasutatakse fossiilseid energiaallikaid. Ainuüksi ühe tonni tsemendi tootmisel eraldatakse atmosfääri üks tonn süsinikdioksiidi, terasel on sama näitaja keskmiselt 0,5 tonni CO₂-te ühe tonni terase kohta, kuna terase ümbertöötlemisele kulub märgatavalt vähem energiat kui selle algselt rauamaagist kättesaamiseks.¹³ Linnastumise protsessiga kaasneva vajadusega elamispinna, erinevate hoonete ja rajatiste järele pannakse planeedi ja inimkonna tulevik veel enam ohtu.

Oma kerge töödeldavuse ja kättesaadavuse juures praktiliselt üle kogu planeedi, võib maailma ilmselt vanimaks ehitusmaterjaliks pidada puitu. Seejuures on puit võrdlemisi kiiresti taastuv ja ka ainus elav ehitusmaterjal. Just elus olemine ning seeläbi naturaalsus ja tekstuur annavad puidule tema eripära ja kordumatuse, samas tulenevad sellest ka puidu suurimad miinused – kontrollimatusest ja mahumuutustest lagunemise ja põlemiseni. Tööstusrevolutsiooni edenedes tõrjuti puit suures mahus linnaehitusest välja, kuid potentsiaalika ja esteetilise ehitusmaterjalina on see leidmas tagasiteed tihedasse linnakeskkonda, saamaks betooni ja terase kõrval võrdväärseks konstruktsioonimaterjaliks. Tänu uutele tehnoloogiatele ja võimalustele ei ole tuleoht ja materjali omaduste kontrollimatus enam ületamatuteks takistusteks.

⁹ Current World Population. – Worldometers, <http://www.worldometers.info/world-population/> (vaadatud 12. X 2015).

¹⁰ Ppm – parts per million (osakest miljoni osakese kohta).

¹¹ E. Dlugokencky, P. Tans, Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. – NOAA/ESRL, http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html#global_data (vaadatud 6. V 2016).

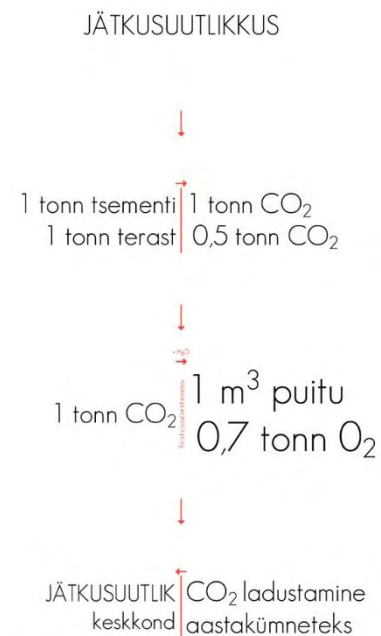
¹² Global carbon budget 2010. – Tyndall^o Centre for Climate Change Research, <http://www.tyndall.ac.uk/global-carbon-budget-2010> (vaadatud 14. XI 2015).

¹³ The carbon footprint of steel – Tata Steel, <http://www.tatasteelconstruction.com/en/sustainability/carbon-and-steel> (vaadatud 12. X 2015).

Puitkomposiitmaterjalid nagu liimpuit, spoonliimpuit või ristkihtliimpuit¹⁴ on oma omadustelt etteaimatavad, kontrollitavad ja mahult püsivad, mis võimaldab suuremas täpsusastmes projekteerimist. Samuti on eelmainitud materjalide tulepüsivus parem kui betoonil ja terasel, olles seejuures etteaimatav ja võrdlemisi täpselt määratav.¹⁵

Keskkonna seisukohalt on puit väga jätkusuutlik materjal, sidudes endasse fotosünteesi käigus muljetavaldava koguse CO₂-te. Nimelt kasutab loodus ühe kuupmeetri puidu tootmiseks suurusjärgus ühe tonni CO₂-te, eraldades protsessi käigus ka ca 0,7 tonni hapnikku.¹⁶ Lisaks tasub mainida, et puidu kasutamisega ladustame ka sinna talletunud süsihappegaasi pikkadeks aastateks turvaliselt hoiule (joonis 5). Metsast ehituspuidu langetamisel ja selle töötlemisel kaasaegsete seadmetega eraldatakse atmosfääri vähem CO₂-te, kui on seda seotud puidu biomassi.¹⁷ Kasutades puitu, on keskkondlik kasu mitmekordne – lisaks tunduvalt väiksemale saastele puidu töötlemisel lisandub sinna ka süsinik, mis on seotud puidu biomassiks. Näiteks võib tuua arvutuse, kus

20-korruselise hoone rajamisel puidust talletatakse sinna ca 3100 tonni süsinikku, samas eraldatakse samasuguse hoone ehitamisel betoonist 1200 tonni süsinikku, mis teeb keskkonna seisukohalt vaheks 4300 tonni süsinikku, mis on võrdeline 900 auto eemaldamisega liiklusest terveks aastaks.¹⁸



joonis 5. Puitkonstruktsiooni eelised.
allikas: autori skeem

¹⁴ Inglise keeles vastavalt glulam (glue-laminated timber), LVL (laminated veneer lumber) või CLT (cross-laminated timber).

¹⁵ J. Mayo, Solid Wood..., lk 11–42.

¹⁶ B. Kuczenski, Sustainability: How much carbon dioxide is stored in 1 cubic meter of wood? – Quora, <https://www.quora.com/Sustainability/How-much-carbon-dioxide-is-stored-in-1-cubic-meter-of-wood> (vaadatud 12. X 2015).

Fotosünteesi keemiline valem: $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$

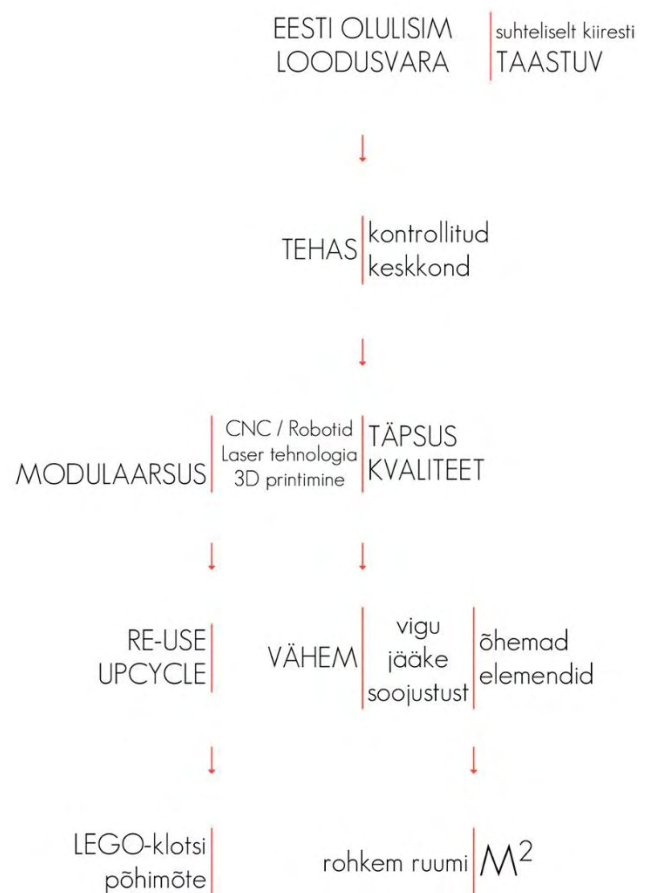
¹⁷ J. Mayo, Solid Wood..., lk 7–11.

¹⁸ A. Cathcart-Keays, Wooden skyscrapers could be the future of flat-pack cities around the world. The Guardian Friday 3 October 2014, http://www.theguardian.com/cities/2014/oct/03/-sp-wooden-skyscrapers-future-world-plyscrapers?CMP=twi_gu (vaadatud 14. XI 2015).

Olles tunnistajaks „puidu uuele tulemisele“, on praegu oma teadmisi omandavate ja maailmavaadet kujundavate inimeste roll 21. sajandi kujunemisel puidu sajandiks¹⁹ äärmiselt oluline ka jätkusuutlikkuse seisukohalt. Mõistes looduslikke protsesse ja aineringlust ning andes aru oma tegude tagajärgedest, saab igaüks hoolitseda selle eest, et keskkond, milles elame, säiliks ka järeltulevatele põlvedele.

Puit on Eesti üks olulisemaid loodusvarasid (joonis 6), siiski on mõnevõrra üllatav, et Eesti on oma väiksuse juures Euroopa suurim puitmajade eksportija Saksamaa, Leedu, Rootsi ja Soome ees²⁰. Seda seletab puidu vähene kasutamine meie enda linna- ja elamuehituses. Puidu ekspordi tubliduse järgi ei saa kindlasti anda hinnangut, nagu oleksime eesrindlik jätkusuutlikku keskkonda rajav ja arendav riik. Oluliseks saab siin ka metsade majandamine ja puidu järelkasvu tagamine. Selles valguses on seis viimase sajandi jooksul muidugi paranenud – Eesti pindalast ligi poole moodustavad metsamaad, samas möödunud sajandi esimeseks pooleks oli see langenud kõigest veerandini

pindalast.²¹ Metsade ja puidu defitsiitseks muutumine oli üheks oluliseks põhjuseks, miks konkureerivatel materjalidel õnnestus puit linnaehitusest kõrvale tõrjuda. Kesk-Euroopas oli



joonis 6. Puidu olulisus Eesti tööstuses.
allikas: autori skeem

¹⁹ A. Rijke, Timber is the new concrete. – dRMM, <http://drmm.co.uk/news/?i=timber-is-the-new-concrete> (vaadatud 12. X 2015).

²⁰ Euroopa puitmajasektor suundub kasvule. Maaleht 7. oktoober 2015, <http://maaleht.delfi.ee/news/maamajandus/uudised/euroopa-puitmajasektor-suundub-kasvule?id=72637277> (vaadatud 7. X 2015).

²¹ E. Pärt, Eesti metsavarud ajaloo tuultes. – Eesti Mets 2008, nr 4, http://www.loodusajakiri.ee/eesti_mets/artikkel862_839.html (vaadatud 15. X 2015).

metsasuse protsent kahanenud 19. sajandiks vaid 10%-ni, olles hiilgeaegadel olnud 90% juures. Jätkusuutliku metsamajanduse tulemusena on see näitaja näiteks Saksamaal tõusnud kolmandikuni kogu riigi pindalast.²² Siinkohal võib öelda, et õnneks on Eesti olnud oma arengus veidi maas, võrreldes näiteks Kesk-Euroopaga, ja meie metsad ei ole langenud massilise linnastumise, põlluharimise ja laevastiku rajamise ohvriks. Võiks öelda, et õppisime enne oma metsa väärtustama ja majandama, kui laialdasemalt kasutama ja eksportima.²³ Omades teadmisi ja võimalusi koos toorainega, paistab võrreldes põhjamaadega meie enda puidukasutus riigisiselt jäävat kinni mineviku dogmadesse ja alusetutesse kartustesse. Eestis on tänu oma väiksusele olnud tunduvalt lihtsam läbi viia uuenduslikke ideid – näiteks võib tuua digiresepti, ID-kaardi ja e-residentsuse. Sellest lähtuvalt on kindlasti võimalik innovaatiline ja tulevikule suunatud mõtlemine ka jätkusuutliku keskkonna rajamisel ja linnaehituses. Arenemine koos meid ümbritsevaga ja evolutsioon tagavad paremad võimalused ellujäämiseks muutuvmas maailmas, mis on ühele väikerahvale kindlasti oluline – olla nähtav ja eristuv, vältimaks oma identiteedi ja kultuuri hääbumist.

Elusorganismi üheks tugevaimaks instinkt on ellujäämisinstinkt, mille nimel ollakse võimelised praktiliselt kõigeks. Näilikult planeedi valitseva jõuna liigub inimkonna invasioon enesehävitusliku jõuna edasi, andmata veel täpselt aru, kuhu see välja viib. Vaadates tagasi massiliste väljasuremiste peale on suurimaks kannatajaks üldjuhul domineerivad liigid, kelle elus püsimiseks on vaja kõige rohkem ressursse. Kuna loodus tühja kohta ei salli, võtab hävingus ellu jäänud edukaim liik, kes suudab kõige paremini kohaneda uute oludega, selle koha üle.²⁴ Inimkond on oma hävitava tegevusega tõstnud alates 20. saj algusest normaalseks peetavat väljasuremise määra üle saja korra.²⁵ Hävitades ümbritsevat ja viies keskkonna ja ökosüsteemi tasakaalust välja, liigume järjest lähemale sündmustele, mil Maa leiab ise ravi teda hävitavale jõule, mis seekord võib osutuda saatuslikuks inimkonnale. Keskkonnahoiu seisukohalt ei ole ükski liigutus meie jätkuvaks eksisteerimiseks liiga väike.

²² R. M. Martin (coordinator), State of the World's Forests 2012. Rooma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012, lk 12.

²³ A. Viires, Puud ja inimesed. lk 7–40.

²⁴ D. Quammen, Planet of Weeds. – Tallying the losses of Earth's animals and plants. – Harper's Magazine, October 1998, lk 57–69.

²⁵ G. Milliken, We're Entering a Sixth Mass Extinction, And It's Our Fault. – Popular Science, 25. IV 2015, <http://www.popsci.com/were-entering-sixth-mass-extinction-and-its-our-fault> (vaadatud 15. X 2015).

2.3. Teel jätkusuutliku keskkonnani

Läbi tulevikku vaatava metsamajanduse ja teadlikult jätkusuutlike mõtteviiside rakendamise on võimalik astuda sammuke lähemale tervemale keskkonnale. Ükski samm ei ole ebaoluline ega liiga väike jõudmaks lähemale süsinikuneutraalsele tehiskeskkonnale – ökoloogiliselt kahjulikele tehismaterjalidele looduslike alternatiivide leidmine on sellest vaid üks osa, milles puidul ja puitkomposiitmaterjalidel on täita suur roll. Arvestades puidu kiiret taastuvust ja ülesehitust – siduda endasse muljetavaldavas koguses süsinikku, on tegemist väga ainulaadse materjaliga. Leides loodetavasti jätkusuutlikuma alternatiivi ka fossiilsetele kütustele ning lootuses kontrollida populatsiooni kasvu, oleme tegemas märkimisväärsed edusamme vähendamaks inimese tekitatud ökoloogilist jalajälge. Arhitektina näen meie võimuses olevat jätkusuutlikuma tehiskeskkonna loomist, kus puit saaks mängida linnaehituses olulist rolli, olles kordades keskkonnasõbralikum kui betoon või teras.

3. JUHTUMIURING – MASSIIVPUIDUST MAAILMAS

3.1. Inseneeritud massiivpuidu olemus

Traditsioonilised massiivpuidust palkehitised vajavad väga kindlate omadustega materjali, nii mõõtetelt kui ka puidu liigilt. Mis tähendab, et sellise materjali saamine on keskkonna seisukohalt väga aeganõudev protsess. Erinevad inseneeritud massiivpuittooted võimaldavad aga kasutada algmaterjali paindlikumalt ja suurema varieeruvusega, kuna massiivsus saavutatakse väikeste elementide kokkupanekul. Nii saab kasutada väga erinevas mõõdus materjali ja ka kasutatavate puuliikide valik on laiem, lisaks on võimalik märkimisväärselt optimeerida kõrgevaliteedilise ja hinnalise puidu kasutust. Järgnevalt mõni näide ja materjalikasutus mujalt maailmast, mis on andnud tõuget inseneeritud massiivpuidu kasutamisele ja lahenduste väljatöötamisele antud magistritöös.

3.2. Inseneeritud puit meil ja mujal

Erilist huvi pakuvad spooni-laadsed algmaterjalid, mille puhul on metsast saadud puust lõpp-elementi jõudva puidu protsent üks suurimaid. Lisaks võimaldab spooni kiht-kihiline kokkupanek ja painutamine väga erineva kuju ja pikkusega elementide valmistamist. Sarnast lähenemist on laialdaselt kasutatud näiteks tootedisainis erinevate mööblielementide valmistamiseks (joonis 7).



joonis 7. Copenhagen laud
allikas: google search

Arhitektuursest vaatenurgast kasutatakse ehituskonstruktsioonides sarnase ülesehitusega elementide valmistamiseks näiteks soomlaste väljatöötatud Kertopuud ja teisi spoonliimpuit tooteid²⁶. Kõik eelmainitud tooted kasutavad kokku liimitud ja pressitud erineva paksusega spooni kihte, mis paiknevad sarnaselt vineerile üks ühes, teine teises sihis, aga ka post-tala elemente, kus spooni kihid on paigutatud kõik piki elementi. Kõik need tooted on valdavalt

²⁶ LVL – laminated veneer lumber

erinevate mõõtudega risttahukakujulised. Mõnede eranditena võiks tuua juhtumid, kus on kasutatud erinevaid lõikeriistu ja -masinaid, andmaks elementidele soovitud kuju.

NÄIDE: Kesk-Saksamaal asuv Pollmeier'i puidutööstus hakkas 2011. aastal välja töötama lamineeritud lehtpuust (ennekõike kasest) tootesarja BauBuche, mille tootmisega alustati 2014. aastal. Sarja valikusse kuuluvad erinevad spoonist lamineeritud tooted postidest talade ja plaatideni välja (joonis 8).²⁷



joonis 8. Pollmeier BauBuche tootesari.
allikas: Pollmeier

Arhitektuurse näitena tooks välja 2015. aastal Andreas Mohr'i poolt oma isale Austriasse projekteeritud tiseristudio „Tischlerei Anton Mohr“ (joonis 9), kus BauBuche tootesarja on elegantselt kasutatud kahekordse tootmis- ja galeriihoone juurdeehituses, täites seejuures nii konstruktiivset kui ka sisekujunduslikku rolli.²⁸



joonis 9. Tischlerei Anton Mohr.
allikas: Pollmeier

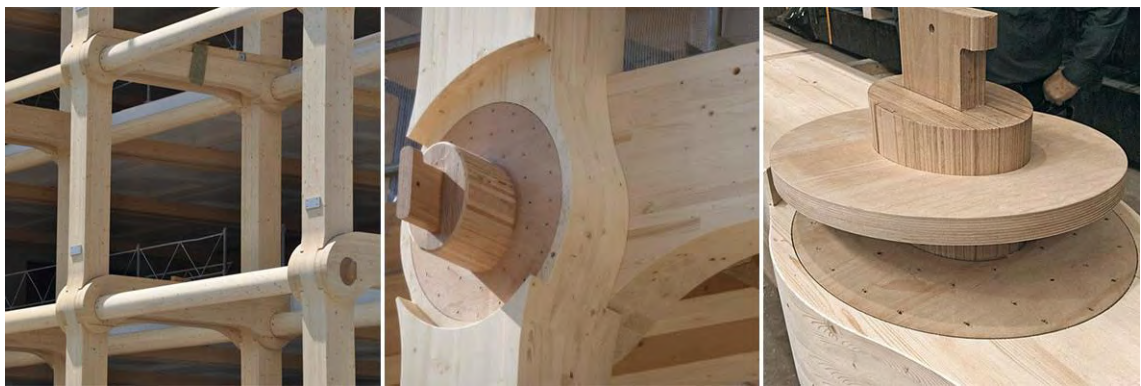
„Oma töös proovin spooni painutades jõuda puidule omasema struktuuri ülesehitusega elementideni.“

²⁷ Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, About BauBuche – Pollmeier, <https://www.pollmeier.com/en/products/baubuche/baubuche-about.html> (vaadatud 10. IV 2016).

²⁸ Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, Timber structure in joinery "Anton Mohr" in Andelsbuch – Pollmeier, <https://www.pollmeier.com/en/references/extension-built-by-joinery-firm.html> (vaadatud 10. IV 2016).

Lisaks spoonile on vaatluse all ka erinevate omadustega puidu omavahelised kombinatsioonid ja koostöö ka näiteks betooni ja terasega ehk komposiitmaterjalid. Üheks huviorbiidis olevaks materjaliks on lehtpuu kombineerimine okaspuuga (inglise keeles *hardwood softwood*) ja nende omaduste rakendamine erinevates positsioonides struktuuris. Näiteks sobib suure tugevusega ja tihe lehtpuu kasutamiseks suurte kontsentreeritud jõudude vastuvõtmiseks ja ülekandmiseks teistele konstruktsiooni osadele, asendades näiteks terast puidu ühenduskohtades. Samas võiks väikese tihedusega, kergelt ja väiksemate tugevusomadustega puitu kasutada vajaliku mahu saavutamiseks näiteks talades kahe töötsooni vahel.

NÄIDE: Erinevate omadustega puidu kombineerimist ilmestab hästi 2014. aasta Pritzker Prize'i laureaadi Shigeru Bani Šveitsi projekteeritud Tamedia büroohoone juurdeehitus, kus liimpuitkonstruktsiooni ühendamiseks kasutati sõlmedes pöögist ühendusdetalle (joonis 10), saavutades nii läbinisti puidust lahenduse.²⁹



joonis 10. Tamedia büroohoone sõlmed.
allikas: *blogspot*

„Oma töös proovin erinevate omadustega puitu kasutades suurendada paindlikkust ja efektiivsust, optimeerides nii ka puidu kasutust“

Komposiitmaterjalina annab huvitavaid tulemusi puitkonstruktsiooni tugevdamine tõmbetsoonis fiiberkangaga, tõstes seeläbi märkimisväärselt puitelemendi kandevõimet. Sellist lahendust on hea kasutada kohtades, kus koormused elemendile kujunevad suuremaks, kui on võimalused elemendi mõõte kasvatada. Lisaks on võimalik konstruktsiooni pingestamine trossidega.

²⁹ J. Mayo, *Solid Wood...*, lk 230–241.

Peamiselt on sellist lähenemist katsetatud maavärinaohtlikes piirkondades, näiteks Jaapanis ja Uus-Meremaal.

Paljudel on lapsepõlvest meeles nn tantsiv kaelkirjak (joonis 11), mille põhja all asuvat plaati vajutades sai puust torudes jooksva jõhvi lõdvaks lasta ja loom kukkus seepeale kokku. Selles lähenemises peitub uskumatu lihtsus ja tarkus, mille kasutusvõimalused puitstruktuuris on mõnevõrra raskendatud puidu niiskussisaldusest tingitud mahumuutuste ja väsimise pärast. Seetõttu tuleks struktuuri pingestamine jutuks avariilukordades täiendava turvalahendusena.



joonis 11. „Tantsiv“ kaelkirjak.
allikas: Amazon

NÄIDE: Maailma esimest järelpingestatud spoonliimpuit konstruktsiooniga hoonet hakati rajama 2009. aastal Uus-Meremaal Wellingtoni (joonis 12). Massey Ülikooli College of Creative Arts, teada kui Te Ara Hihiko (maoori keelest – teerada loomingulisusele), mis on projekteeritud vastu seisma seismilisele aktiivsusele, arvestades hoone paiknemist Wellingtoni murrangujoonel.³⁰



joonis 12. Te Ara Hihiko õppehoone.
allikas: Arrow International

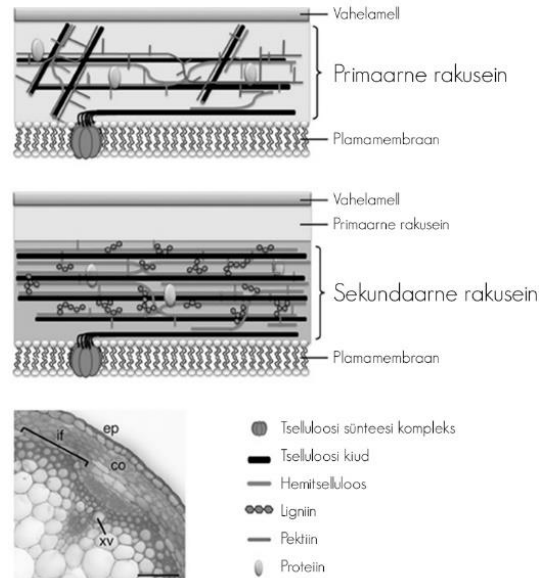
„Oma töös olen vajadusel ette näinud võimaluse luua nn „turvavöö“ efekti läbi pingestatud struktuuri“

³⁰ J. Mayo, Solid Wood..., lk 305–319.

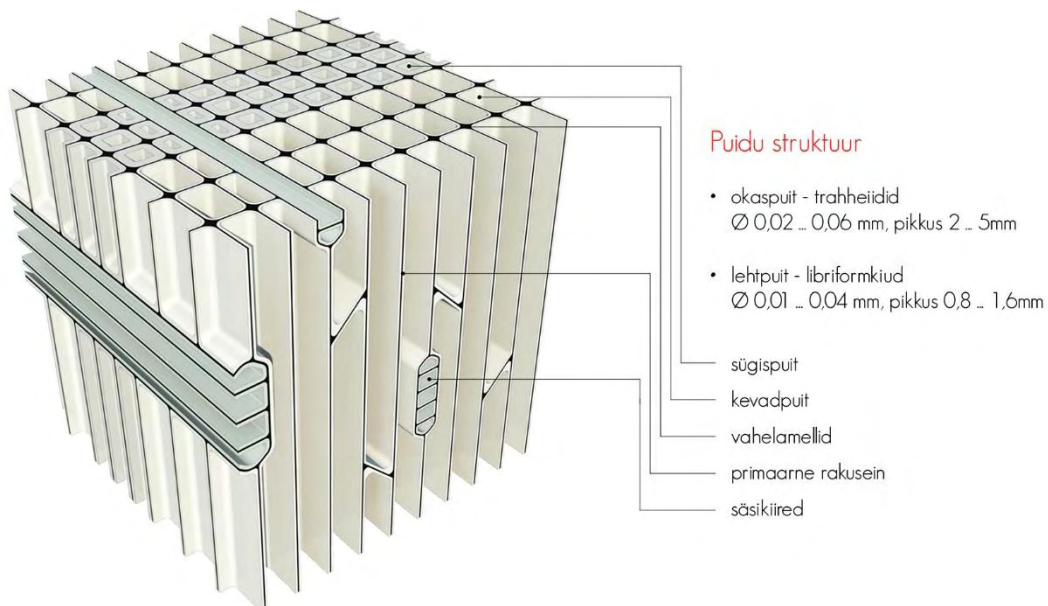
4. PUIDU OLEMUS – RAKU TASANDILT INIMSKAALASSE

4.1. Puidu ülesehitus rakutasandil

Puit kasvatab endale kevadest sügiseni uue kihi aastaringi jagu torujaid rakke. Vastavalt nimetatakse neid okaspuidul trahheiidideks, mis moodustavad enam kui 90% puidu mahust, ja libriformkiududeks lehtpuidul, mille ehitus on okaspuidust märksa keerulisem, sisaldades lisaks tugevuskoele ka juhtkude ja salvestamiskude.^{31,32} Sellises skaalas on puit kiuline materjal (joonis 13). Laskudes rakusisese struktuuri tasemele tulevad nähtavale pikad tselluloosikiud, millest koosnevad puidu raku seinad erinevad kihid (joonis 14). Vaatame rakusisest struktuuri Kagu-Aasias levinud *Acacia Mangium* näitel, kuna rakusisene ülesehituse põhimõtted on sarnased kõigil puidu liikidel.



joonis 14. Rakuseina ülesehitus.
allikas: *frontiers in Plant Science*

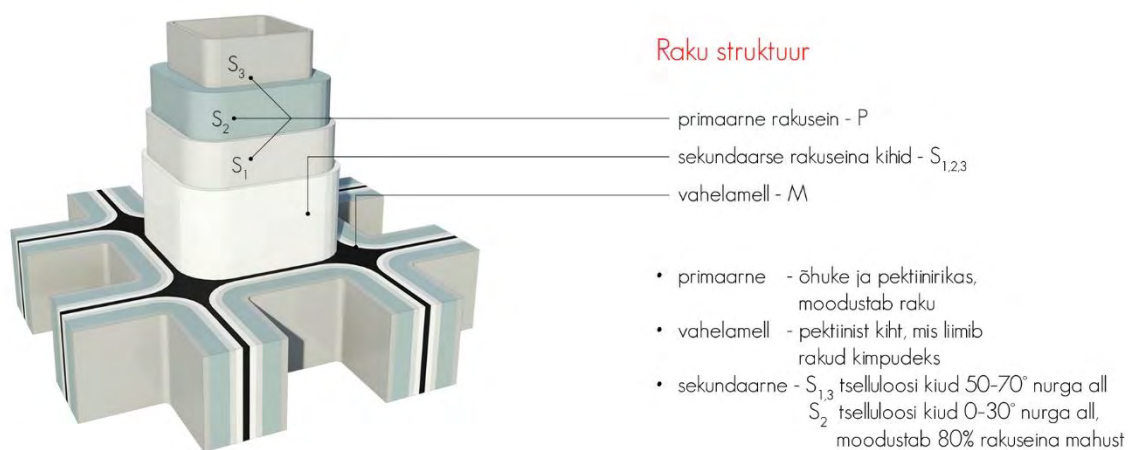


joonis 13. Okaspuidu rakutasandi skeem.
allikas: autori skeem

³¹ E.-J. Just, K. Õiger, A. Just, Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid: õpik kõrgkoolidele. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2015, lk 18–21.

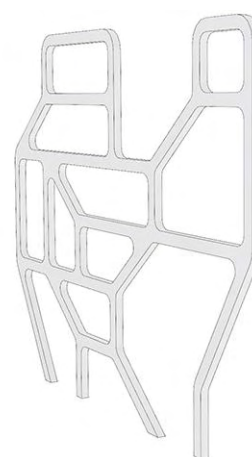
³² Puit – Vikipeedia, <https://et.wikipedia.org/wiki/Puit> (vaadatud 6. V 2016).

Puidu raku esmane sein on väga õhuke ja pektiinirikas, koosnedes erisuunaliselt paiknevatest tselluloosikiududest, millele kasvamise käigus lisanduvad täiendavad seinakihid (joonis 15). Sekundaarne sein koosneb omakorda kolmest kihist, milles igaühes on tselluloosikiud veidi erinevas suunas ja erinevate sidemetega – välimine ja sisemine seina kiht (vastavalt s_1 ja s_3) on suhteliselt sarnased ja tselluloosikiud paiknevad 50–70° nurga all raku suhtes. Raku struktuuri ja tugevuse seisukohalt peetakse olulisimaks vahepealset seinakihti (s_2), mis moodustab ca 80% kogu raku seina materjalist, kusjuures kevad- ja sügispuidu osas on antud seinakihi paksuse erinevus 3–5 korda. Tselluloosikiud paiknevad vahepealses seinakihis raku sihiga kuni 30° nurga all mõneaastase puu puhul, olles 15-aastasel puul juba praktiliselt paralleelsed raku sihiga.³³



joonis 15. Rakuseina kihtide skeem.
allikas: autori skeem

Torujad rakud on omavahel ühendatud pektiinist koosneva vahelamelli kihiga, mis toimib justkui liim ja seob torujad rakud tugevateks nn kimpudeks, moodustades nii tüved ja oksad. Lõigates tüvest õhukese „viilu“ (joonis 16) on tulemuseks välimuselt perforeeritud plaat. Sisuliselt koosneb aga iga perforeringu serv mitmekihiliselt paiknevatest tselluloosikiududest, moodustades võrud, mida omavahel seovad vahelamellid. Sellises proportsioonis meenutab viil tüvest pigem sõrestikku või fermi kui pikki torujaid rakke. Selliselt puidu ülesehitusele lähenemine on



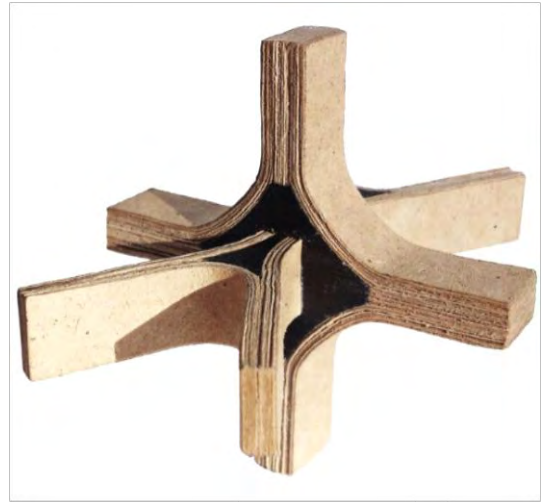
joonis 16. „Viil tüvest“.
allikas: autori skeem

³³ T. A. Tabet, F. A. Aziz, Cellulose Microfibril Angle in Wood and Its Dynamic Mechanical Significance. – INTECH, <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/45624.pdf> (vaadatud 10. IV 2016), lk 115–139.

saanud aluseks edasistele puidu kasutusvõimaluste laiendamistele antud töös, leidmaks puidule omasemaid viise struktuuri ja konstruktsiooni loomisel (skeemid lisades 1 ja 2).

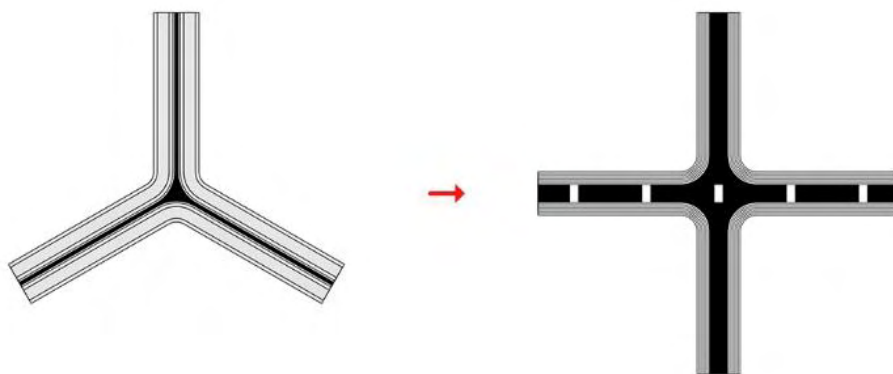
4.2. Rakustruktuuri skaleerimine ja konstruktiivsed põhimõtted

Skaleerides fraktalite põhimõttel rakustruktuuri inimesele kasutatavasse suurusjärku, on tulemuseks ferm, milles nn rakuseinad moodustuvad mitmekihilistest painutatud ja liimitud erineva suuna ja paksusega spoonidest (joonis 17), moodustades tööpõhimõttelt väga sarnase konstruktiivse struktuuri rakuseintele, mis on omavahel ühendatud vahelamellidega, millel on ka fermis täita siduv roll (joonis 18). Lisaks nn rakkude omavahelisele ühendusele fermis toimub läbi vahelamelli ka erinevate



joonis 17. Makett sõlmest.
allikas: autori foto

nurkade alla ristuvate fermide omavaheline sidumine, luues nii ruumiliselt stabiilse struktuuri (joonis 19), milles puidukasutust on optimeeritud läbi erinevate omadustega puidu kombineerimise. Kasutades erinevates positsioonides selle ülesannetele sobivate omaduste, sihi ja mõõtmetega puitu, tuleb eriti välja inseneeritud massiivpuidu jätkusuutlik potentsiaal.



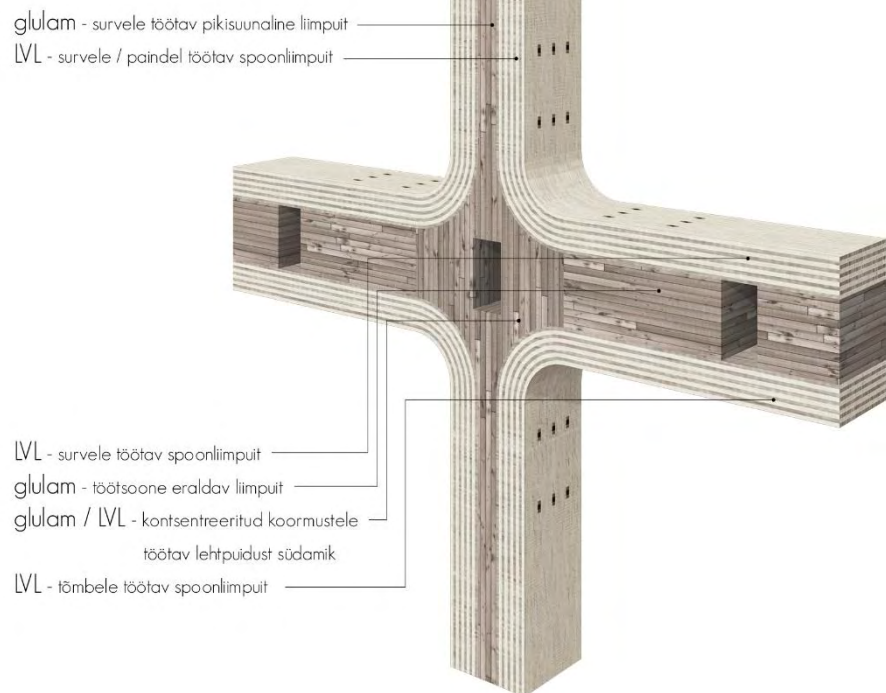
joonis 18. Kihilise rakustruktuuri skaleerimine konstruktiivseks skeemiks.
allikas: autori skeem



joonis 19. Makett kolmes tasandis ristuvatest fermidest.
allikas: autori foto

Kui rakuseintel ja nende kumeratel painutatud spoonist nurkadel on fermis täita jäikust ja stabiilsust tagav roll, siis vahelamellidel on koormusi jagav ülesanne nende vahel. Koosnedes erinevate omadustega puidust nihutab vahelamellis mahtu andev kesisemate tugevusomadustega puit talana töötavad rakuseina surve- ja tõmbetsooni üksteisest vajalikule kaugusele, võimaldades tala keskosasse jäävast neutraalsest tsoonist näiteks kommunikatsioonide läbiviimist. Samas fermide ühendustes ja sõlmedes, kus on suured kontsentreeritud jõud, kasutatakse vahelamellides paremate tugevusomadustega lehtpuitu (joonis 20). Muutuv on ka puidu suund – kui postina töötavale fermi osale annab paindetugevuse kihiline spoonidest rakusein, siis vahelamelli ülesandeks jääb suuresti vaid survele töötamine, mis tähendab survele töötava puidu paiknemist pikisuunaliselt.

Tsoonide funktsioonid ja olemus



joonis 20. Struktuuri erinevate osade tööpõhimõtete skeem.
allikas: autori skeem

Rakulise ülesehituse poolest näeb puit välja kui tihedalt üksteise kõrvale pakitud torud, mis ülekantud skaalas ei ole inimesele kasutamiseks kõige mugavam ruumiline olukord, lisaks on materjali kulu sellise lahenduse puhul



joonis 21. Peamine töösuund rakkudes ja fermides.
allikas: autori skeem

märkimisväärselt üledimensioneeritud. Lähenedes struktuurile lähtuvalt raku ristlõike loogikast, on tulemuseks jäikade ühendustega tasapinnaline ferm, kus oluliseks erinevuseks on 90° pööratud põhiline töötasand konstruktiivses skeemis, olles nüüd nn raku ristlõike sihiline (joonis 21). Ruumilise stabiilsuse saavutamiseks tuleb fermile lisada nurga all ristuv samalaadne ferm või siduda kaks paralleelset fermi jäigastavalt omavahel (joonis 22).



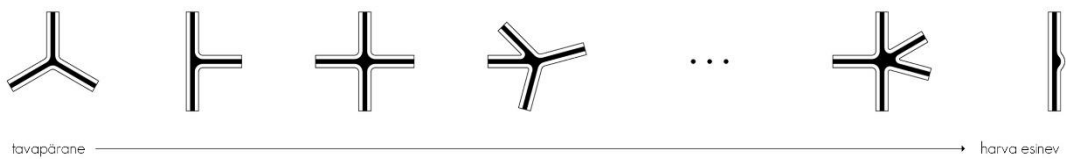
joonis 22. Stabiilse konstruktiivse skeemi saavutamine – ristuvad ja paralleelsed fermid.
allikas: autori skeem

Vaadates puidu rakulist ülesehitust, moodustub enamik ühendusi kolme või nelja raku kokkupuute nurkades, vahel harva esineb viie ja enama raku ühiseid kokkupuuteid (joonis 23). Ülesehitust muudavad keerukamaks ja



Joonis 24. Rakustruktuuri moodustumise mõjutajad.
allikas: autori skeem

mitmekesisemaks vajadustest tulenevalt erisuuna ja -mõõdulised raku ja ruumi ühikud. Selline rakuline ülesehitus tuleneb puidu kasvamise loogikast ja sellest, kuidas ringi haaval lisandub puu tüvele rakke (joonis 24). Soodumusega olla ennekõike ümmargused torud, surutakse need pigem sarnaselt mesilaskärjega nurkseteks, puidul tulenevalt aastaringidest lintideks. Inimese ruumivajadusi arvestades tuleks loodaval struktuuril püüelda horisontaal-vertikaalsete joondumiste poole, erandina saab vertikaalseks liikumiseks kasutada edukalt diagonaalseid lahendusi.



joonis 23. Ühenduse tüüpide esinemise sagedus.
allikas: autori skeem

Puidu loomuga konstruktiivse sõlme ja detailide skeemid on nähtavad lisades 3 ja 4.

5. MASSIIVPUIT LINNAEHTUSES

5.1. Konkurentsieelised

Loodus on läbi evolutsiooni loonud puidu näol hämmastavate omadustega materjali nii töödeldavuse, tunnetuse kui ka tugevusnäitajate poolest, olles seejuures levinud ja kättesaadav praktiliselt üle kogu planeedi. Puit on vaieldamatult hubaseim ja ühe parima tugevuse-massi suhtega kättesaadav ehitusmaterjal (joonis 25), suutes seejuures edukalt konkureerida konstruktsioonis betooni ja terasega. Puidu tugevus survele pikikiudu on samaväärne betooniga, olles seejuures raudbetoonist ca 5 korda kergem – puitmaja on kivimajast 8 korda kergem. Tõmbe- ja paindetugevuselt jääb betoon aga kaugele maha, seal suudab samasuguse massi juures konkurentsi pakkuda teras, millel tulepüsivusnäitajad jäävad samas puidule alla. Lõpuks on alati võimalus massiivpuitu tugevdada sarnaselt raudbetooniga komposiitmaterjalidega – kasutades tõmbetsoonis tugevdavat fiiberkangast või terast näiteks trossi näol. Seejuures pakub puit terasele ka efektiivset kaitset kuumuse eest põlemisel.

Puit on ka energiatõhususe seisukohalt eelistatavam materjal – puidu soojuseriijuhtivus on ca 350 korda väiksem kui terasel ja 15 korda väiksem kui betoonil. Lisaks väärib veelkord meelde tuletamist fakt, et puit on tunduvalt keskkonnasõbralikum materjal kui raudbetoon või teras, millest samaväärse elemendi valmistamiseks kulub vastavalt 5 ja 6 korda rohkem energiat kui liimpuidu puhul.³⁴

Enamikul juhtudel saab otsustavaks siiski projekti maksumus – tavaliselt osutub valituks soodsaim lahendus, aga on ka olukordi, kus materjali või lahendust kiidetakse läbi tema kallima hinna.

PUIDU OLEMUS



joonis 25. Puidu konkurentsieelised.
allikas: autori skeem

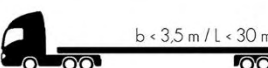
³⁴ E.-J. Just, K. Õiger, A. Just, Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid ..., lk 12–22.

Lähtuvalt Sydney Tehnikaülikooli uurimustööst võib väita, et ka selles kategoorias on puitehitised konkurentsivõimelised, olles kõigis testitud hoonetüüpides soodsama lahendusega kui vastava hoonetüübi konstruktiivne alternatiiv. Täpsemalt oli vaatluse all 7-korruseline büroohoone, mis osutus spoonliimpuitu kasutades 12,4% soodsamaks kui sama hoone tegemine betoonkonstruktsioonist, 8-korruseline ristkihtliimpuidust kortermaja oli vastavalt 2,2% soodsam. Suurima eelise andis 2-korruselise majutuasutuse puitsõrestikust lahendus terase ees, olles 13,9% soodsam. Märkimisväärselt oli ka puitraamidest tööstushoone 9,4% soodsam kui teraskonstruktsioonist alternatiiv. Kindlasti on oluline vahe Eesti ja Austraalia kliimatilistel eripäradel, aga arvestades puidu soojuseri juhtivust peaksid puitkonstruktsiooni eelised meil hoopis tugevamini avalduma.³⁵

5.2. Kiirus ja ressursi vajadus

Suur massivahe hõlbustab oluliselt ka inseneeritud puidu transporditavust ja paigaldamiseks vajaminevat ressursi võrreldes betooni ja terasega. Piiravaks saavad kaalu asemel pigem mõõtmed, mida ilma erilubadeta meie teedel transportida võib. Tavalise poolhaagise puhul on piirideks mõõdud 13,6x2,7x2,45 m, ruumala 90 m³ ja mass 24 tonni.³⁶ Eriloo alusel lubatud suurveose mõõdud ja sellest tulenev saateautode vajadus on näidatud juuresoleval skeemil (joonis 26).³⁷

Ohutus- abinõud	Suurveose laius B (m)													
	B ≤ 3,0		3,0 < B ≤ 3,5		3,5 < B ≤ 4,0		4,0 < B ≤ 5,0		5,0 < B ≤ 6,0		B > 6,0			
	Suurveose pikkus L (m)													
	30,0 < L ≤ 40,0	L > 40,0	24,0 < L ≤ 30,0	30,0 < L ≤ 40,0	L > 40,0	L ≤ 30,0	30,0 < L ≤ 40,0	L > 40,0	L ≤ 24,0	24,0 < L ≤ 30,0	L > 30,0	L ≤ 30,0	L > 30,0	Kõik pikkused
Saateautosid ees	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	
Reguleerijaid	-	1	-	1	2	-	1	2	-	1	2	1	2	2
Saateautosid taga	-	1	-	1	1	-	1	1	-	1	1	1	1	1



joonis 26. Saateautode ja reguleerijate vajalik arv suurveose saatmisel + skeem eelistatud meetoditest.
allikas: Riigiteataja + autori skeem

³⁵ A. Dunn, Final Report for Commercial Building Costing Case Studies – Traditional Design versus Timber Project. NSW, Sydney: Timber Development Association, 2015.

³⁶ ETS Logistika OÜ, Veokite ja haagiste tüübid ning nende mahutavused. – ETS Logistika, <http://www.etslogistika.ee/teadmiseks/veokite-ja-haagiste-mahutavus/> (vaadatud 12. IV 2016).

³⁷ Eriveo tingimused ning eriveo teostamise ja erilubade väljaandmise kord ning tee omanikule tekitatud kulutuste hüvitamise, eriloo menetlustasu ja eritasu määrad, 2015, Lisa 1. – Riigi Teataja, https://www.riigiteataja.ee/aktiis/1090/9201/5002/MKM_m114_lisa1.pdf# (vaadatud 12. IV 2016).

Eelnevast lähtuvalt on võimalusel mõistlik transportida valmis mooduli ja tühja ruumi asemel tihedalt üksteise kõrvale pakitud elemente, millest seejärel juba ehitusplatsil mahuline struktuur püstitada. Massieelised ja kontrollitud tootmismeetoditest ja -keskkonnast tulenevad väikesed tolerantsid muudavad ka püstituse ladusamaks, kiiremaks ja lihtsamaks. Vähem ruumi ja ressursi vajavad tõstemehhanismid, suuremate ühikute ühe korraga paika tõstmine ja näiteks betooni kivinemiseks ja muuks selliseks kuluva aja puudumine viivad miinimumini ajakulu ja tegevused, mida on vaja väljaspool kontrollitud keskkonda rakendada. Vähem potentsiaalseid vigu ja viivitusi tõstab veelgi konkurentsivõimet konkureerivate konstruktsioonimaterjalide ees. Näiteks Londonis 2009. aastal valminud 9-kordse Graphite Apartments'i hoone puitkonstruktsioon püstitati vaid 27 päevaga nelja mehe poolt – 3 päevaga korrus, kärpides nii kogu ehituse ajast 23 nädalat³⁸.

Eeltoodetud elementidest hoonete kiire püstitus on saanud hoogu juurde digitaalsete mudelite ja tootmistehnoloogiate arengust – 3D printimise, CNC-lõikurite, skaneerimise ja robotika näol. Tehases tootmise eelised ei piirdu aga ainult kiire ja täpse tootmisega. Arvutite kontrollitud elementide tootmisel lisandub sinna ka masskohandamine – enam ei oma tootmist silmas pidades tähtsust, kui elementi kohandada igaks puhuks eraldi ja samuti ei kaasne sellega lisakulutusi.³⁹

Digitaalsetest projekteerimis- ja tootmismeetoditest tulenevalt muutub ka modulaarsuse mõiste, mis ei tähenda enam kindla kujuga või määratud sammu tagant võimalikke elemente. Näiteks ei ole CNC-lõikurile oluline, millise kujuga detail tuleb etteantud toorikust välja lõigata. Modulaarsus on allutatud pigem põhimõttele ja reeglitele, mis kirjeldavad elemendi võimalikku varieeruvust – võimaldamaks väga erikujulist lähenemist samade tootmis põhimõtetega.

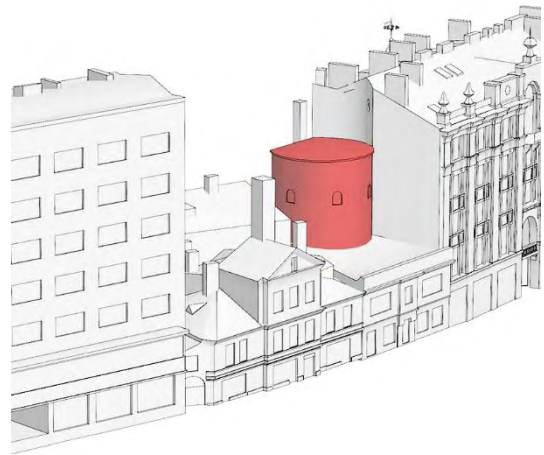
³⁸ J. Mayo, Solid Wood..., lk 47–56.

³⁹ P. Bernstein, Future of Construction: Your Next Building Won't Be Built – It Will Be Manufactured. – Line//Shape//Space, <http://lineshapespace.com/future-of-construction/> (vaadatud 18. IX 2015).

6. PUINE STRUKTUUR LINNARUUMIS

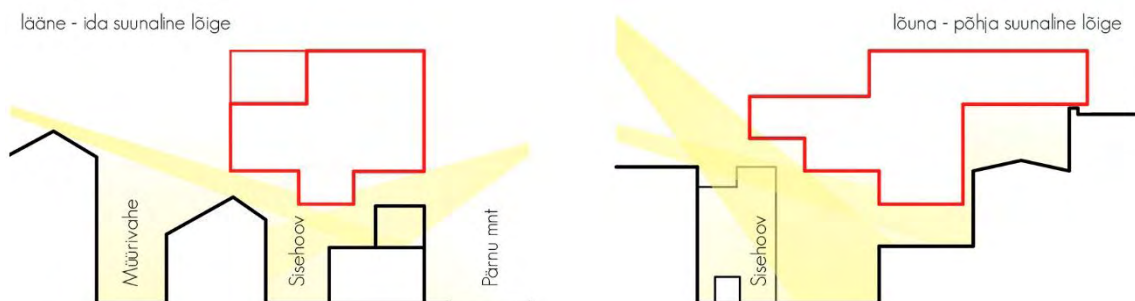
6.1. Situatsiooni kirjeldus

Pärnu mnt 6 ja Valli tänav 4 vahel asub Vanalinna piiril kahel pool endist linnamüüri kaks krunti aadressiga Pärnu mnt 2/Müürivahe 32 ja Pärnu mnt 4/Müürivahe 30, millest esimesel paikneb ka muinsuskaitse all olev keskaegne 14. saj pärit Tallinna linnamüüri Hinke torn koos jupiga linnamüürist (joonis 27). Vaadates linnaehituslikke jooni nii Pärnu maanteelt kui ka Müürivahe tänavalt, torkab silma ilmselge



joonis 27. Situatsiooni skeem Hinke torniga.
allikas: autori skeem

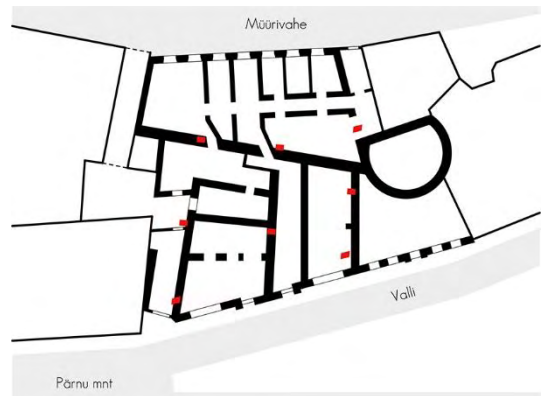
tühimik aadressil Pärnu mnt 6 paikneva 1933. aastal rajatud Urla maja ja Valli 4 paikneva 1925. aastal valminud juugendsugemetega neoklassitsistliku äri- ja kortermaja vahel. Sooviga muuta tänavajoon tervikuks, tekitavad kruntidel paiknevad kultuurimälestised ja kaitsealused hooned hulga kitsendusi. Tuues siia juurde veel loomuliku valguse pääsu Müürivahe tänavalt paiknevate hooneteni ja Hinke torni vaadeldavuse säilimise nii Pärnu mnt kui ka Vanalinna suunalt, on tulemuseks nii alt, pealt kui ka külgedelt piiratud hoonestatav maht (joonis 28). Lükates tagaplaanile praegu kehtivad seadused, krundijoontest ja ehitusõigustest kinnipidamise, võiks vaadelda planeeritavat, üle viie hoone paiknevat mahtu ühtse tervikuna alumiste olemasolevate hoonetega.



joonis 28. Juurdeehituse kitsendused ja valguse juurdepääs kvartalile.
allikas: autori skeem

6.2. Puisse struktuuri loodud võimalused

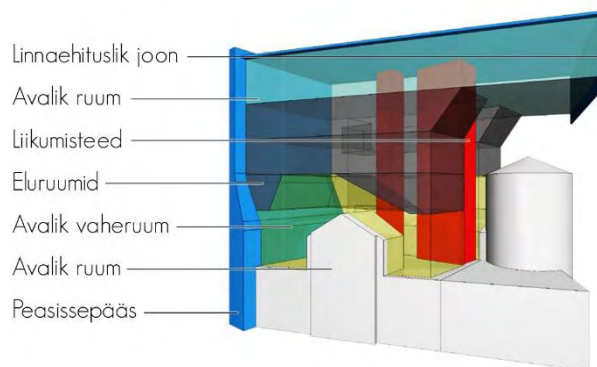
Magistritöös arendatavad puidu ülesehitusest tuletatud fermid annavad antud asukohas võimaluse säilitada suures mahus olemasolevat hoonestust, tõstes rajatava hoonemahu kõrgele nende kohale, kasutades selleks minimaalsel hulgal toetuspunkte (joonis 29). Puidu kasuks mängib olulist rolli ka kergus, mis viib vähemate ja saledamate toetuspunktide vajaduseni olemasolevate hoonete müüridel või läbi nende.



joonis 29. Juurdeehituse toetuspunktide skeem.

allikas: autori skeem

Tõstes rajatava hoonemahu valguse ligipääsu eesmärgil olemasolevatest hoonetest märgatavalt lahku, luuakse lisaks terviklikule ehituslikule tänavajoonele ka põnev vaheruum säilitatavate hoonete katusele, mis nüüd satuvad lisatava puidust hoonemahu alla kontrollitud keskkonda, olles kaitstud meie kliimas tavaliste tuulte, vihmahoogude ja lume eest. See avab uued võimalused elavdamaks Tallinna peatänavaks pürgiva Pärnu maantee äärset kohviku- ja kaubandusmaastikku.



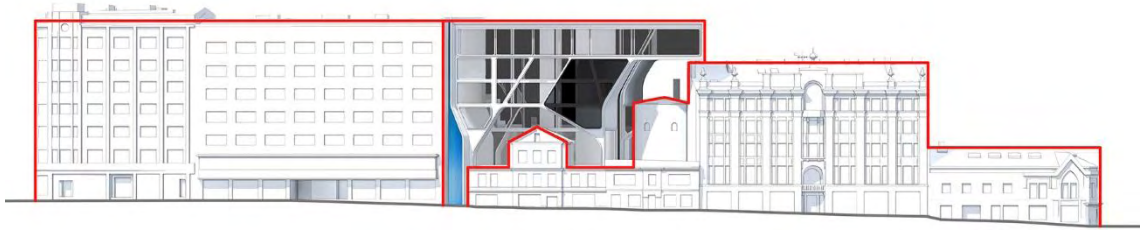
joonis 30. Funktsionaalne skeem.

allikas: autori skeem

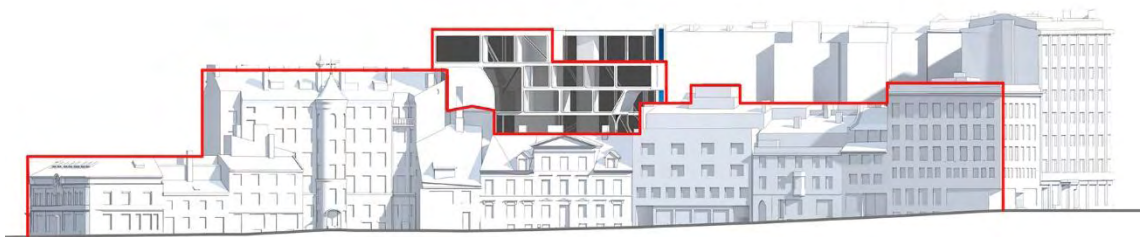
Mahuliselt on kavandatud tekkiv vaheruum koos Pärnu mnt äärsete olemasolevate hoonete ja Hinke torniga loodud teenindama linlaste huve ja vajadusi kohvikute, galeriide ja restoranide näol. Lisanduv ehitusjoont täiendav maht saab suletuma funktsiooni korterite, stuudiote või kontoritega (joonis 30). Luues viimasele

korrusele täiendava evakuatsioonitee läbi Hinke torni, saab võimalikuks ka avaliku funktsiooni rajamine viimasele konsoolsele korrusele. Kogu kompleksi peasissepääs kulgeb läbi terve hoone kõrguva fuajee Urla maja tulemüüri kõrval. See on ainuke koht olemasolevas hoonestuses, kus võib nurga taha keerava Pärnu mnt 4 asetseva hoone fassaadi lammutada – ülejäänud avad fassaadides ei ole esinduslikuks sissepääsuks piisava kõrgusega (joonis 31). Samuti võimaldab selline paigutus avada majade vahel paikneva väikese sisehoovi

nii Müürivahe tänavale kui ka Pärnu maanteele, luues täiendava pääsu läbi kunagise linnamüüri asukoha (skeemid lisas 4).



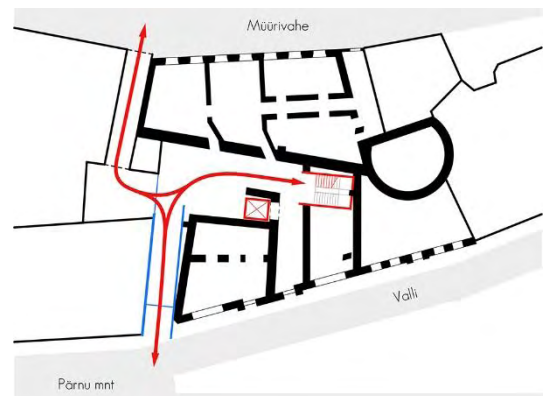
joonis 31. Linnaehituslik vaade Pärnu mnt-lt. Peasissepääs tähistatud sinisega.
allikas: autori skeem



joonis 32. Linnaehituslik vaade Müürivahe tänavalt.
allikas: autori skeem

6.3. Struktuuri püstitus ja tüüplahendused

Lisanduva puidust mahu toetuspunktid läbi olemasolevate hoonete on valitud viisil, mis lubab maksimaalses mahus ära kasutada säilitatavate hoonete planeeringut, luues samas selge logistikaga lahenduse hoone sisemusse, kus see loob lisaväärtust tekkivale vaheruumile ja olemasolevatele hoonetele (joonis 33). Rajatavad puitfermid on paarikaupa paralleelsed ja omavahel seotud, moodustades koos trepiga hoonele stabiilse selgroo, millele annavad lisajäikust vahelagede ja -seinte kandekonstruktsioonid (skeemid lisades 5 ja 6). Struktuuri mooduliteks jaotamisel on arvesse võetud transportimiseks sobivaid mõõtmeid ja süsteemi sisejõudude jaotumist, saamaks teada, kus on kõige sobivamad kohad ühenduste tekitamiseks.



joonis 33. Kvartali logistiline skeem.
allikas: autori skeem

KOKKUVÕTE

Oma magistritöös uurisin puidu kasutust linnaehituses ning selle potentsiaale ja iseloomu. Täpsemalt oli vaatluse all puidu rakustruktuurist tulenevate ülesehituslike põhimõtete ülekandmine inimhõõtmelisse skaalasse ja inseneeritud massiivpuidu ülesehitus, lähtuvalt puidu enda struktuuri loogikast. Eesmärgiks oli luua puidule omase struktuuriga konstruktiivne lahendus, milles rõhk on seatud arhitektuurselt puhtale ja elegantsele puidu loomuga konstruktsioonile. Võttes arvesse eestlaste ajaloolist seotust puidu ja metsaga, ressursse, teadmisi ja tehnoloogiaid, näen Eestil potentsiaali saamaks maailmas eesrindlikuks puidu kasutuse propageerijaks ja innovaatoriks.

Looduselt saab õppida, kuidas evolutsiooniliselt on kujunenud puidu struktuur raku tasandil. Seda struktuuri on võimalik kanda üle inimskaalasse, luues optimeeritud puitstruktuuri, mis järgib oma ülesehituselt puidule omaseid põhimõtteid – kihtkihiliselt jätkatud elemendid, mis oma erinevates osades kasutavad selleks ülesandeks sobivaima koostise ja sihiga materjali, luues sujuvaid painutatud üleminekuid. Loodud konstruktiivne lahendus võimaldab optimeerida erinevate omadustega puitmaterjali kasutust ja luua ausaid, peitmata ühenduste ja konstruktsiooniga puitstruktuure, omades seejuures nii esteetilist kui ka keskkondlikku väärtust.

Väljatöötatud lahendusi testisin Tallinna südalinnas paikneva keeruka ja piiranguterohke tühiku näitel Pärnu maantee alguses. Kasutades ära puitkonstruktsiooni kergust ja esteetikat oli võimalik luua linnaruumiliselt toimiv ja ümbritsevate hoonetega arvestav juurdeehitus, mis vormistab linnaehituslikult tervikuks Pärnu maantee alguse Vanalinna piiril Tammsaare pargi vastas, olles seejuures üheks potentsiaalseks tõmbepunktiks kavandatava Tallinna peatänavaga juures. Tehases valmistatud elemendid võimaldavad oluliselt suurendada täpsust ja kvaliteeti, lisades siia puidu kerguse, on hoone püstisus märgatavalt kiirem ja vähem ressursse nõudev.

Käesoleva töö raames valminud puise konstruktsiooni lahendusi oleks perspektiivis huvitav testida ja analüüsida laboritingimustes. Lootes leida sellest huvitatud osapooli materjali või konstruktsiooni erialadelt meilt või mujalt, näen võimaliku edasiarendusena lahenduse tugevuste ja nõrkusteni jõudmist läbi erinevate eesmärkidega teadustööde.

Väljatöötatud sõlmega koormuskatseid tehes on võimalik koostöös inseneridega täpsustada ja optimeerida materjali kasutust, töötada välja piirid ja vahemikud, kus antud lahenduse eelised

kõige paremini välja tulevad. Lisaks tuleks inseneritarkvaraga (näiteks Autodesk Robot Structural Analysis) katsetada loodud struktuuri toimivust erinevate koormusolukordade puhul ja analüüsida puise sõlme ja struktuuri põhimõtete toimivust, eeliseid ning puuduseid. Kõige eelneva edukal õnnestumisel tuleks välja töötada ka optimaalsed tootmistehnoloogiad ja liinid vastavate massiivpuitelementide tootmiseks. Iga eelmainitud protsess saab olla iseseisev magistri- või doktoritöö, kui mitte mitu, vastaval erialal.

SUMMARY

The Nature of Wood in Timber Structures.

The purpose of this master's Theses is to evaluate the nature and potential of timber utilization in urban development. The application of constructional principles deduced from the distinct cellular structure of timber on large-scale engineering projects is analyzed from the aspect of the logical and evolutionary nature of wood itself. The intention is to present an applicable conclusion in line with said nature with an emphasis on architectural constructs utilizing the unique and elegant character of the wood. As Estonians have throughout the ages been affiliated with the forest, and naturally the resources, knowledge and technology accompanying such an affinity, it wouldn't be unreasonable to anticipate Estonia to be a pioneer and a propagator of innovative contemporary utilization of timber in urban development and architecture as a whole.

Evolution has molded wood into having a particular cellular structure with multi-layered cell walls each containing chains of microfibrils aligned at moderately differing angles in each layer and the cells themselves being surrounded and joined together by compound middle lamella acting as an adhesive. This can be employed on a human scale by devising an optimized timber structure which would adhere to the principles inherent to the wood itself – layered extensions using the most appropriate materials in terms of both consistency and purpose creating smooth and curved, yet firm and durable transitions. This would allow for the optimized usage of the various types of wood in order to build timber structures with candid and unconcealed framework and design while also being environmentally less taxing than concrete or steel.

No small step is futile or irrelevant with the long-term goal of achieving carbon-neutral manmade environments and through the prudent management of forests and the conscious application of sustainable mindsets a healthy environment can be attained. Finding alternatives for ecologically adverse artificial materials is but a part of a larger process, but it is here where wood and composites could have a significant effect. The renewable nature and the ability to tie substantial amounts of carbon make wood a unique material. Architects have the ability to endorse the development of sustainable environments where wood would be an integral component.

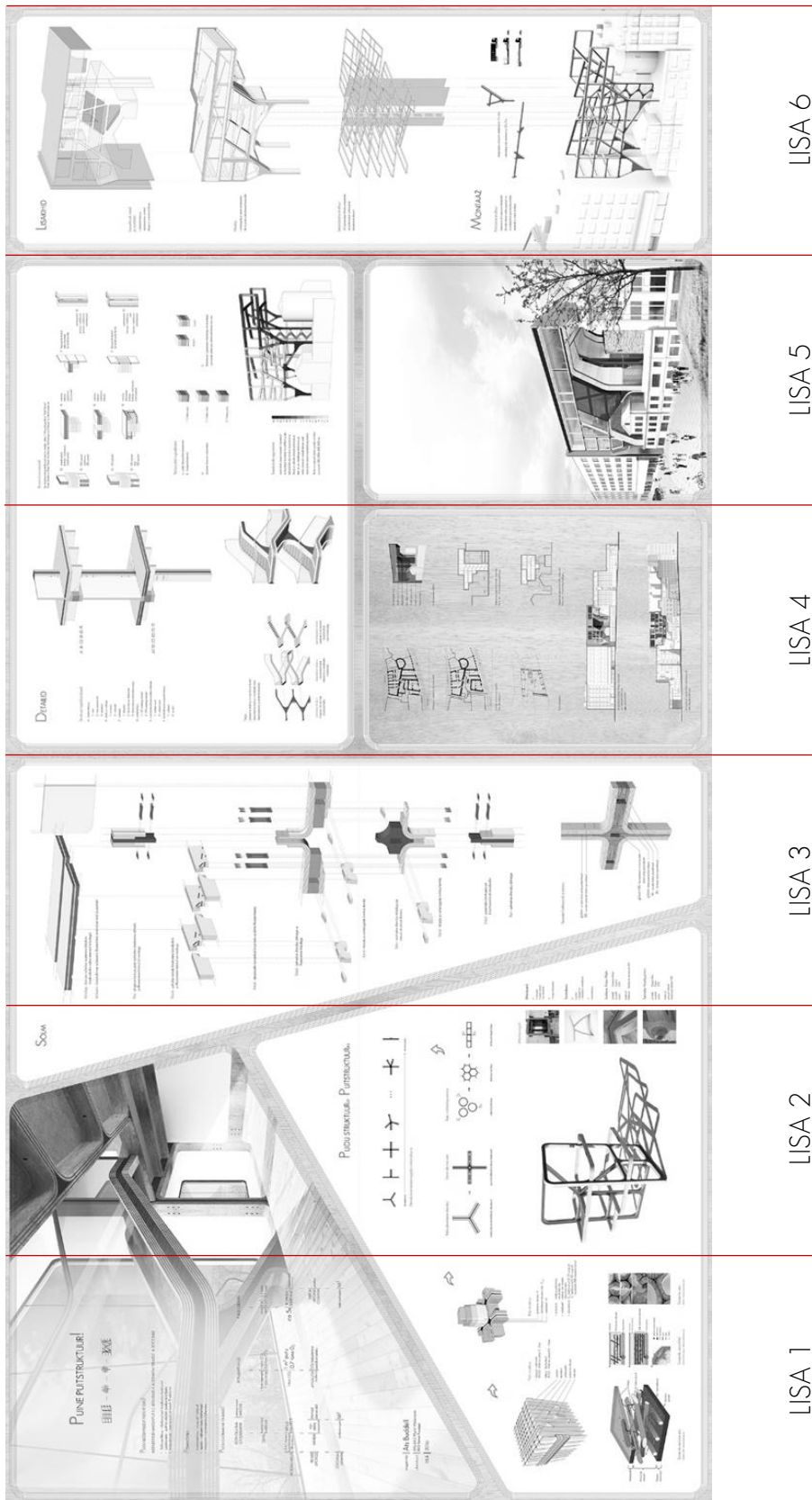
The principles outlined in this Theses were demonstrated by implementing these on a development at a complicated plot of land with substantial municipal restrictions at the beginning of the Pärnu avenue in the center of Tallinn. By utilizing and exploiting the inherent qualities and especially the lightness of wood, it was possible to devise an annex appropriate for the surrounding milieu and tying the quarter into an aesthetic whole. Prefabricated material can substantially increase the preciseness and the quality of the erection process, which can also be considerably accelerated due to the light weight of the materials.

There are prospects in further scientific analyses and vetting of the ideas and principles found in this Theses in laboratory conditions. With participation from interested parties from the fields of material and architectural engineering from either Estonia or elsewhere, it is possible to uncover whether there are further strengths and weaknesses of this concept through various scientific inquiries.

VIIDATUD ALLIKAD

- P. Bernstein, Future of Construction: Your Next Building Won't Be Built – It Will Be Manufactured. – Line//Shape//Space, <http://lineshapespace.com/future-of-construction/> (vaadatud 18.IX 2015).
- A. Cathcart-Keays, Wooden skyscrapers could be the future of flat-pack cities around the world. – The Guardian, Friday, 3 October 2014, http://www.theguardian.com/cities/2014/oct/03/-sp-wooden-skyscrapers-future-world-plyscrapers?CMP=tw_t_gu (vaadatud 14. XI 2015).
- Climate change: How do we know? Ed. H. Shafteel. – NASA Global Climate Change: Vital Signs of the Planet (uuendatud 12. XI 2015), <http://climate.nasa.gov/evidence/> (vaadatud 14. XI 2015).
- E. Dlugokencky, P. Tans, Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. – NOAA/ESRL, http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html#global_data (vaadatud 12. X 2015).
- A. Dunn, Final Report for Commercial Building Costing Case Studies – Traditional Design versus Timber Project. NSW, Sydney: Timber Development Association, 2015.
- Eriveo tingimused ning eriveo teostamise ja erilubade väljaandmise kord ning tee omanikule tekitatud kulutuste hüvitamise, eriloa menetlustasu ja eritasu määrad, 2015, Lisa 1. – Riigi Teataja, https://www.riigiteataja.ee/aktiis/1090/9201/5002/MKM_m114_lisa1.pdf# (vaadatud 12. IV 2016).
- EKI - [EKSS] "Eesti keele seletav sõnaraamat", <http://www.eki.ee/dict/ekss/index.cgi> (vaadatud 2. V 2016).
- ETS Logistics OÜ, Veokite ja haagiste tüübid ning nende mahutavused. – ETS Logistika, <http://www.etslogistika.ee/teadmiseks/veokite-ja-haagiste-mahutavus/> (vaadatud 12. IV 2016).
- Euroopa puitmajasektor suundub kasvule. Maaleht 7. oktoober 2015, <http://maaleht.delfi.ee/news/maamajandus/uudised/euroopa-puitmajasektor-suundub-kasvule?id=72637277> (vaadatud 7. X 2015).
- Global carbon budget 2010. – Tyndall^o Centre for Climate change Research, <http://www.tyndall.ac.uk/global-carbon-budget-2010> (vaadatud 14. XI 2015).
- A. Jackson, D. Day, Puutöömeistri käsiraamat [orig pk Collins Complete Woodworker's Manual. HarperCollins Publishers Ltd, 2005], tõlkinud E. Velbri, TEA kirjastus, 2006.
- E.-J. Just, K. Öiger, A. Just, Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid: õpik kõrgkoolidele. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2015.

- B. Kuczenski, Sustainability: How much carbon dioxide is stored in 1 cubic meter of wood? – Quora, <https://www.quora.com/Sustainability/How-much-carbon-dioxide-is-stored-in-1-cubic-meter-of-wood> (vaadatud 12. X 2015).
- R. M. Martin (coordinator), State of the World's Forests 2012. Rooma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.
- J. Mayo, Solid Wood: Case Studies in Mass Timber Architecture, Technology and Design. London, New York: Routledge, 2015.
- G. Milliken, We're Entering a Sixth Mass Extinction, And It's Our Fault. – Popular Science, 25. IV 2015, <http://www.popsci.com/were-entering-sixth-mass-extinction-and-its-our-fault> (vaadatud 15. X 2015).
- Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, a) About BauBuche – Pollmeier, <https://www.pollmeier.com/en/products/baubuche/baubuche-about.html> (vaadatud 10. IV 2016).
b) Timber structure in joinery "Anton Mohr" in Andelsbuch – Pollmeier, <https://www.pollmeier.com/en/references/extension-built-by-joinery-firm.html> (vaadatud 10. IV 2016).
- E. Pärt, Eesti metsavarud ajaloo tuultes. – Eesti Mets 2008, nr 4, http://www.loodusajakiri.ee/eesti_mets/artikkel862_839.html (vaadatud 15. X 2015).
- D. Quammen, Planet of Weeds. – Tallying the losses of Earth's animals and plants. - Harper's Magazine, October 1998, lk 57-69.
- A. Rijke, Timber is the new concrete. – dRMM, <http://drmm.co.uk/news/?i=timber-is-the-new-concrete> (vaadatud 12. X 2015).
- T. A. Tabet, F. A. Aziz, Cellulose Microfibril Angle in Wood and Its Dynamic Mechanical Significance. – INTECH, <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/45624.pdf> (vaadatud 10. IV 2016).
- The carbon footprint of steel. – Tata Steel, <http://www.tatasteelconstruction.com/en/sustainability/carbon-and-steel> (vaadatud 12. X 2015).
- A. Viires, Puud ja inimesed. Tartu: Ilmamaa, 2000 [esmatrükk 1975].
- Current World Population. – Worldometers, <http://www.worldometers.info/world-population/> (vaadatud 12. X 2015).



PUINE PUITSTRUKTUUR!



PUIDU ÜLESEHITUSEST PUTEHITISEKS!

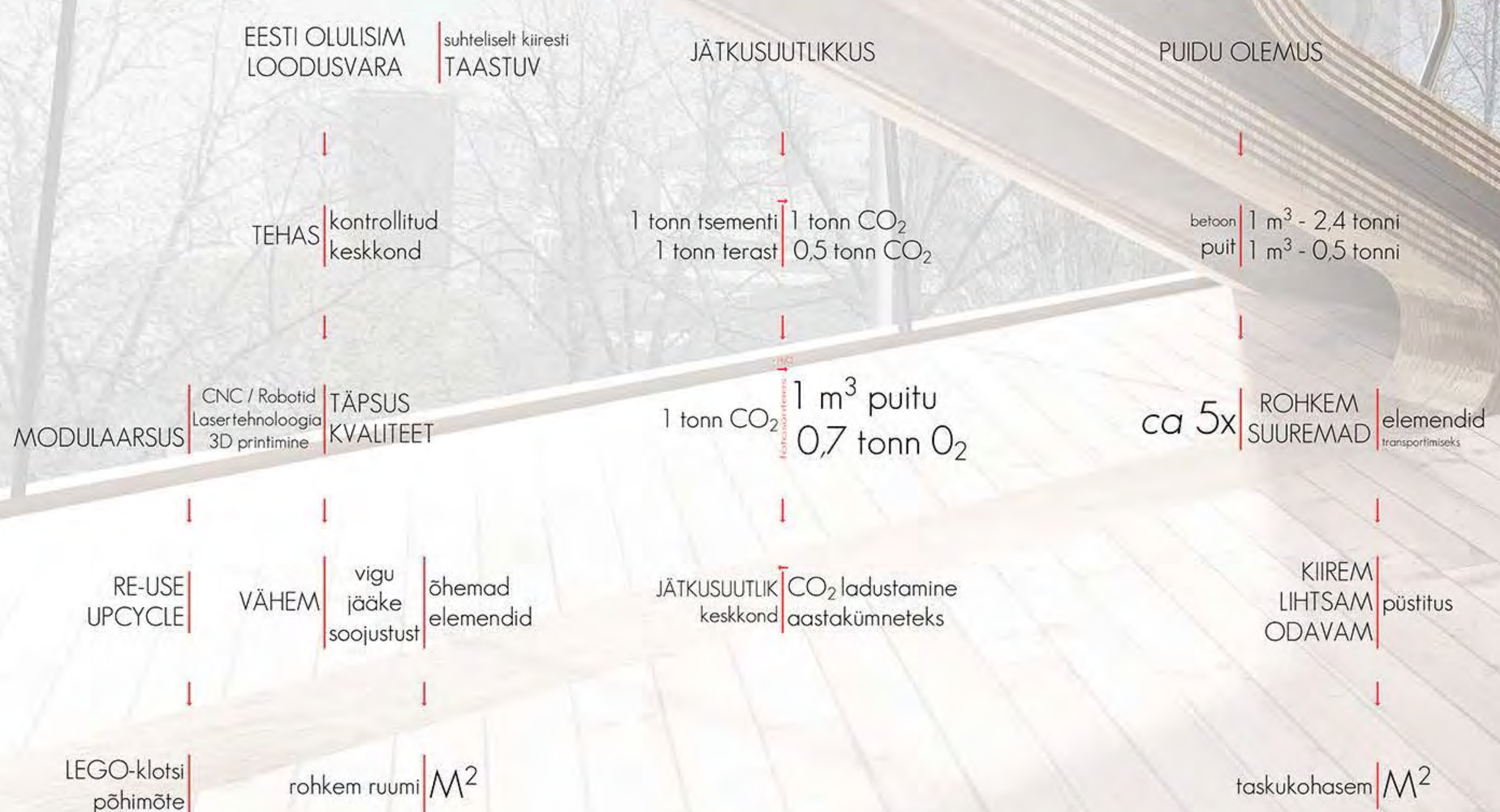
INSENEERITUD MASSIIVPUIT KUI JÄTKUSUUTLIK ALTERNATIIV TERASELE JA BETOONILE

- Jätkusuutlikkus - ökoloogiliselt tasakaalus keskkond
- Loodusvara - puit kui olulisim loodusvara Eestis
- Innovatsioon - teerajajad sarnaselt IT-sektorile

PÕHIMÕTTED

- kombineeritus - okaspuu / lehtpuu
- spoon - väikseim kadu töötlemisel
- komposiit - optimeeritud lahendus

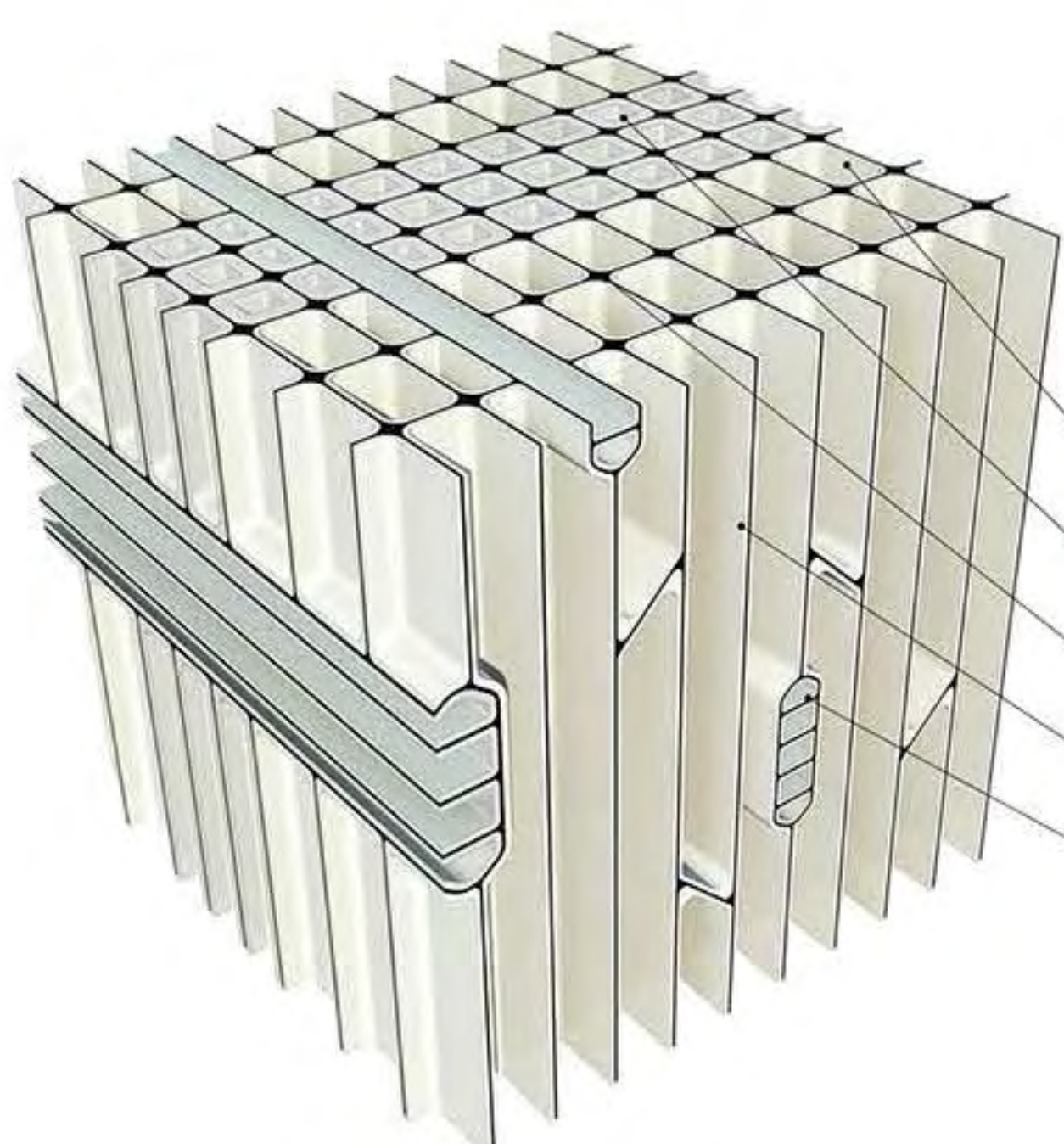
PUIDU GLOBAALNE OLULISUS!



magistritöö | **Ats Buddell**

juhendajad | MScAAD Martin Melioranski
PhD Renee Puusepp

EKA | 2016



Puidu struktuur

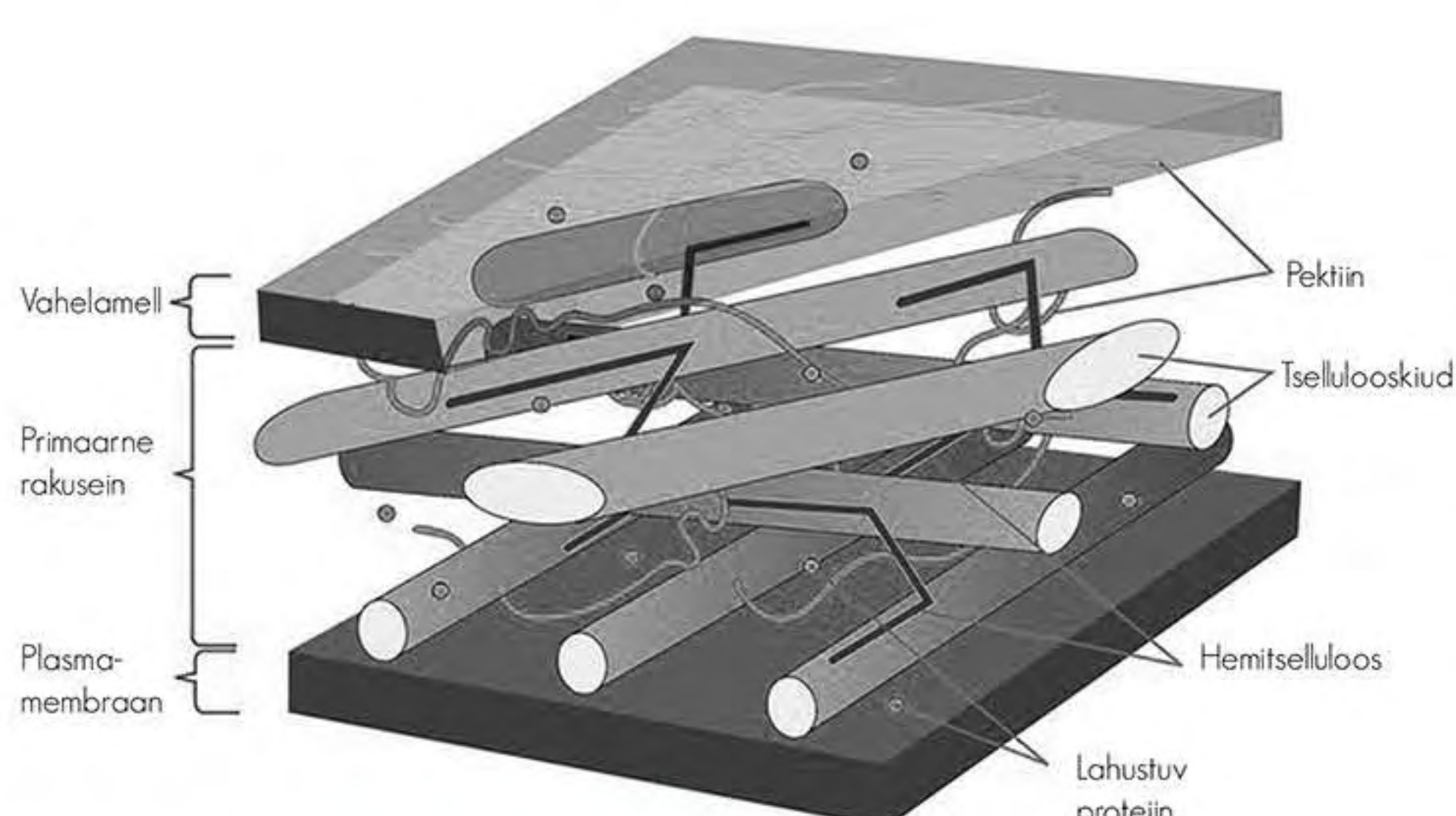
- okaspuu - trahheidid
Ø 0,02 - 0,06 mm, pikkus 2 - 5mm
- lehtpuu - libriformkiud
Ø 0,01 - 0,04 mm, pikkus 0,8 - 1,6mm

- kevadpuu
- sügispuu
- vahelamellid
- primaarne rakusein
- säskitiired

Raku struktuur

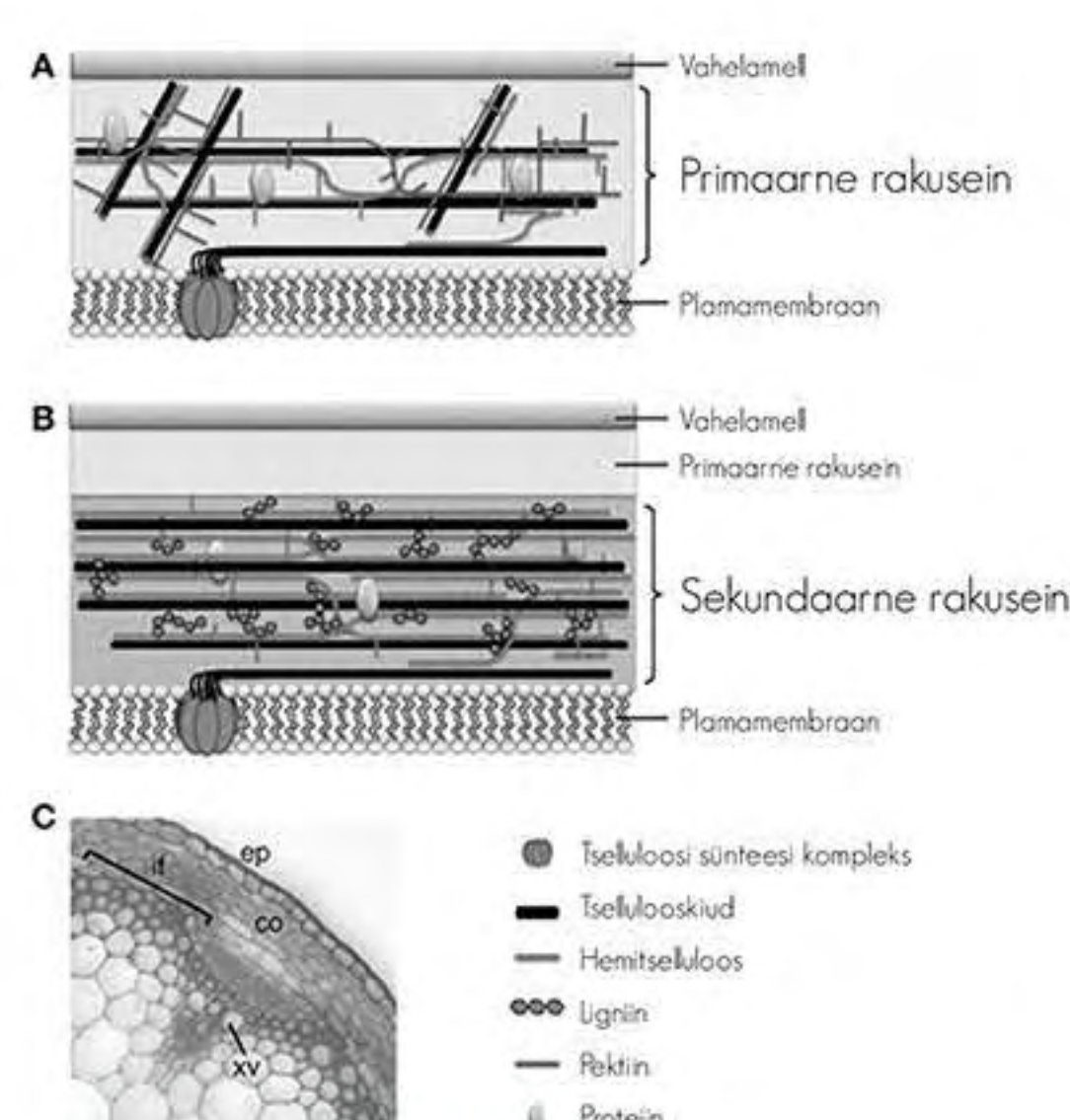
- primaarne rakusein - P
- sekundaarne rakuseina kihid - S_{1,2,3}
- vahelamell - M

- primaarne - õhuke ja pektiinrikas, moodustab raku
- vahelamell - pektiinist kiht, mis liimib rakud kimpudeks
- sekundaarne - S_{1,3} tsellulooskiud 50-70° nurga all
S₂ tsellulooskiud 0-30° nurga all, moodustab 80% rakuseina mahust



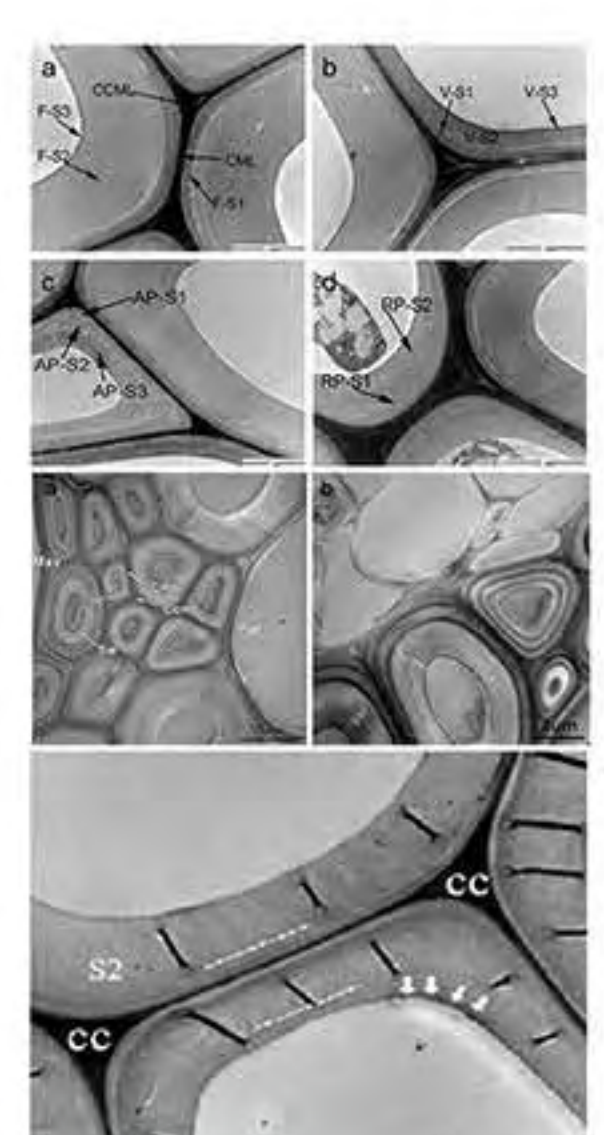
Taimeraku esmane sein

G2MAG 2016 - <http://www.g2mag.com/>



Taimeraku sein

frontiers in Plant Science - <http://journal.frontiersin.org/>



Taimeraku sein

INTECH - <http://www.intechopen.com/>

P

UIDU STRUKTUUR_{IST} P

UITSTRUKTUUR_{IKS}



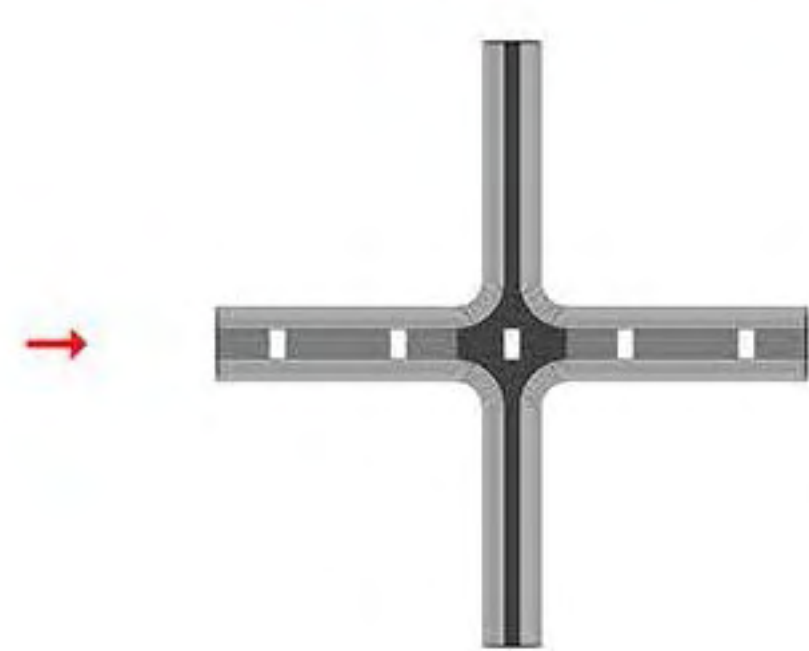
Ühenduste esinemise sagedus rakustruktuuris

Rakkudevaheline ühendus



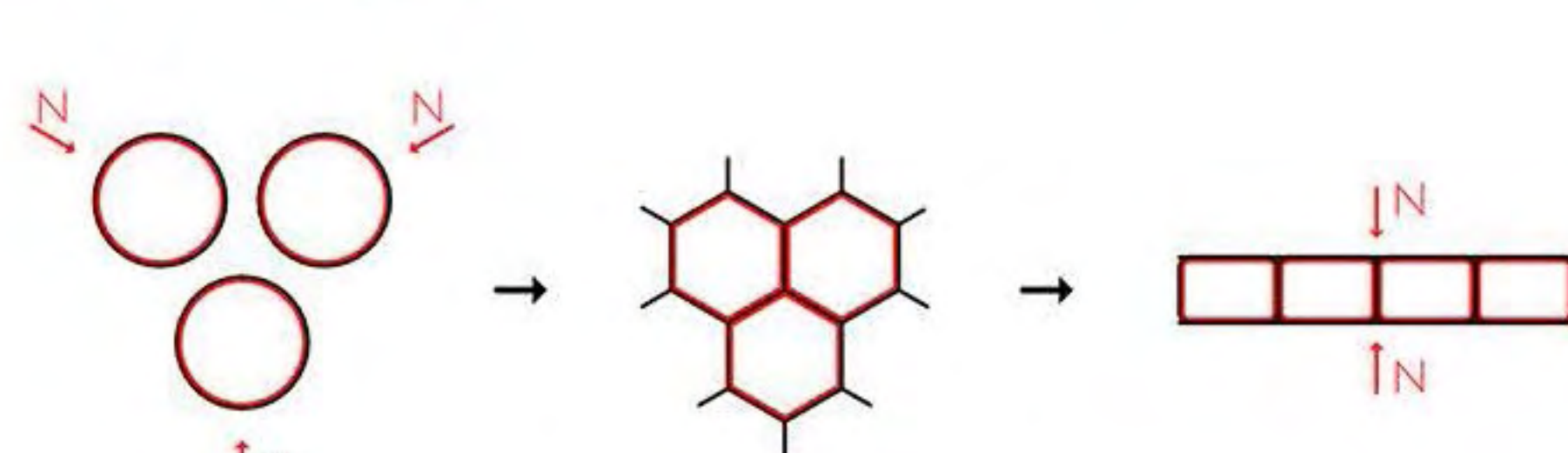
tsellulooskiududest kihilised rakuseinad

Konstruktiiivne sõlm



spoonist kihilised struktuuri töötsoonid

Raku ristlõike kujunemine

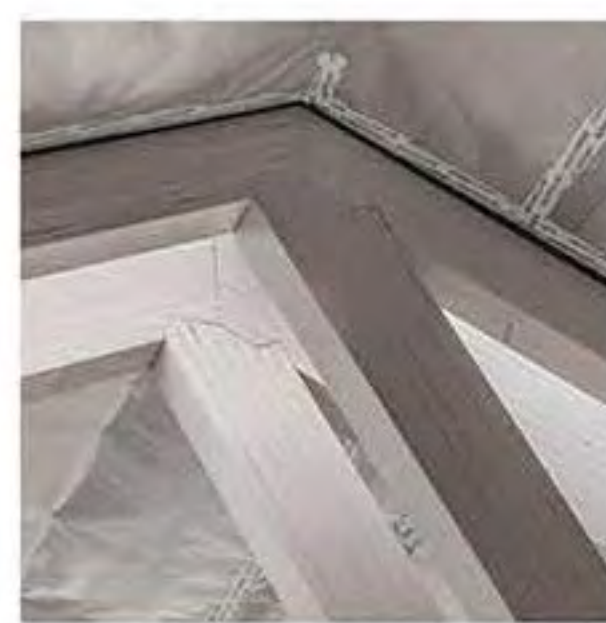
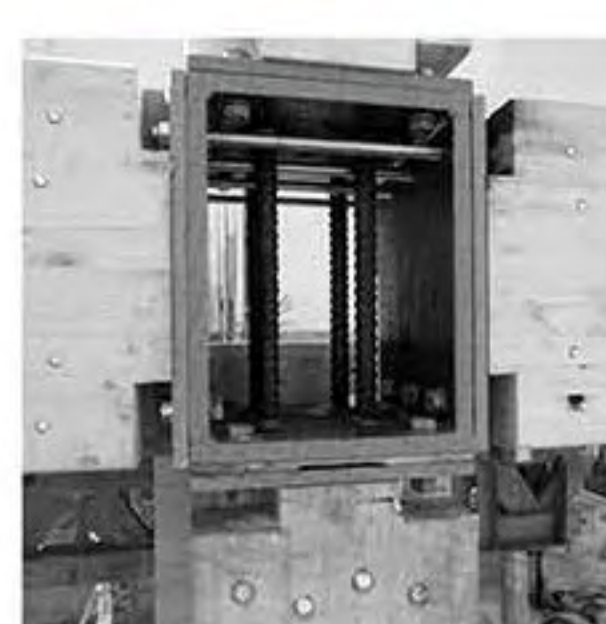


võismõjudega kuju

kokkusurutud kuju

kihilusest tingitud kuju

Juhtumiuringud

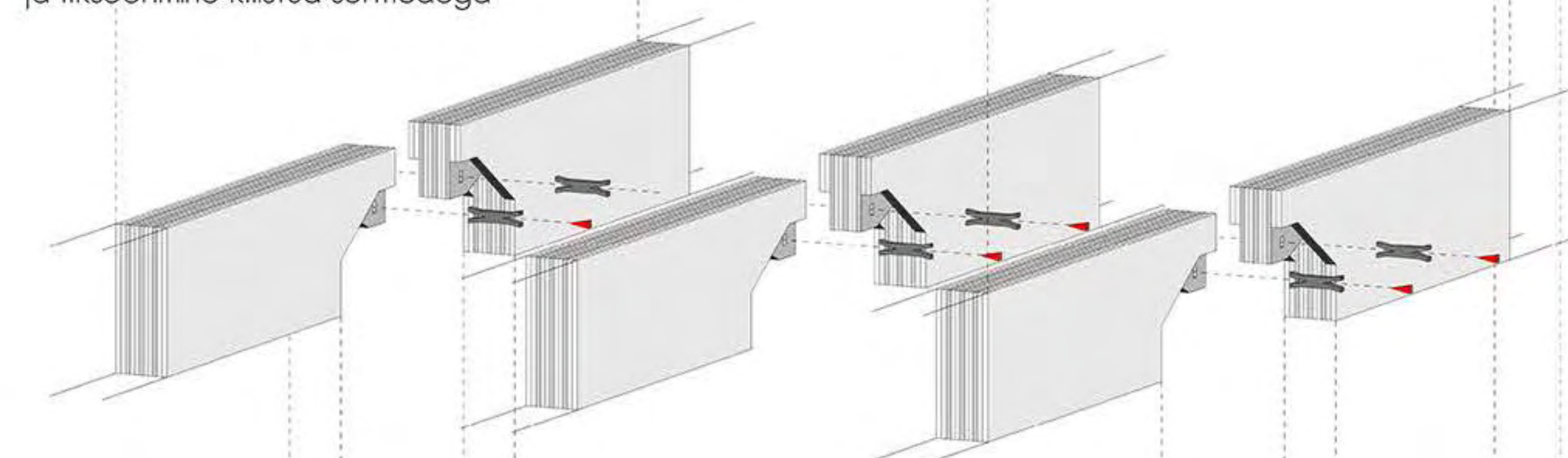


Vahelagi - korruse vahelae asetamine taladele
(saab olla ka valmis element taladega)

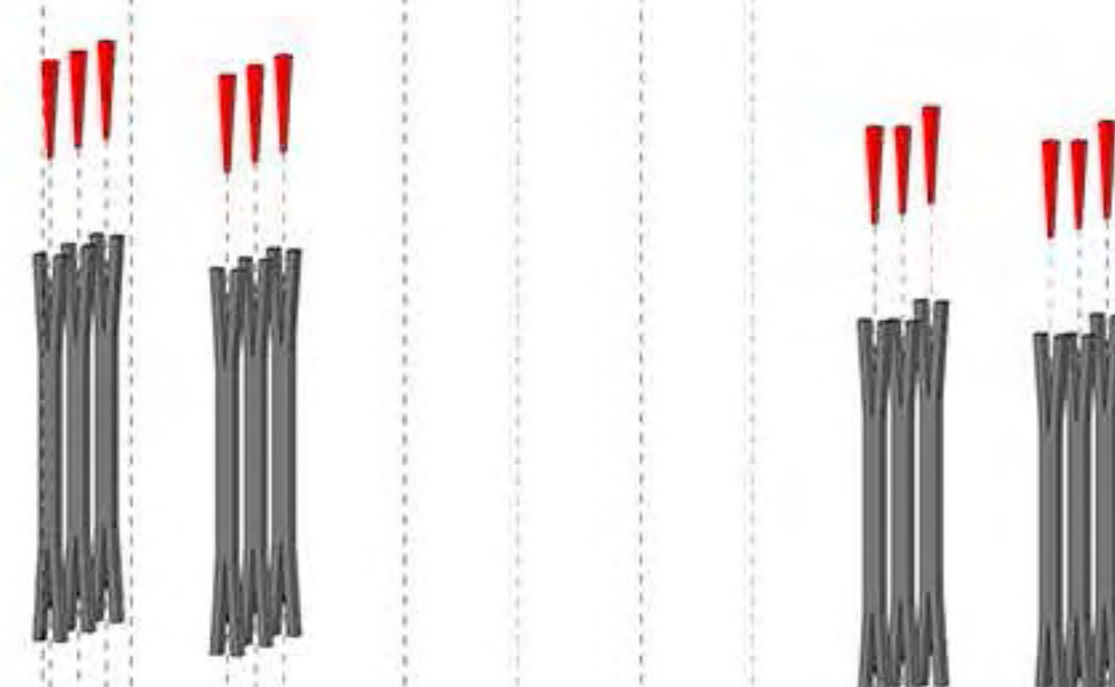
Vahesein - konstruktiivse vaheseina fikseerimine süvendisse talal ja postidel

Post - järgmise korruse posti astmeline kinnitamine sõmlele
ja fikseerimine kiilutud sõrmedega

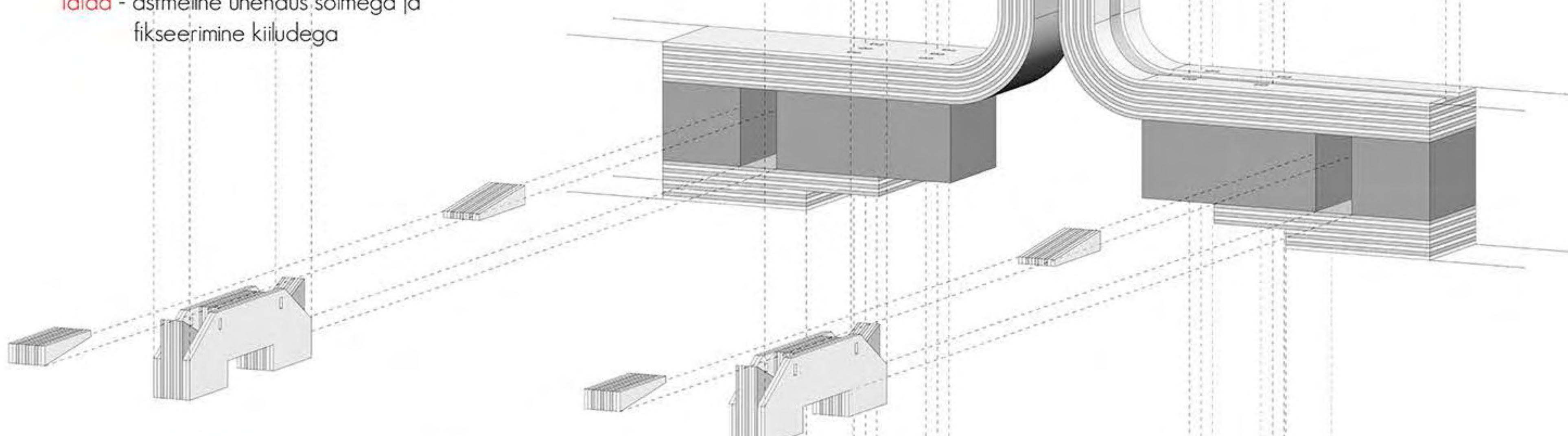
Talad - vahelae talade kinnitumine kandadele
ja fikseerimine kiilutud sõrmedega



Kiilud - absoluudini kuivatatud kiilud tala ja sõmle fikseerimiseks

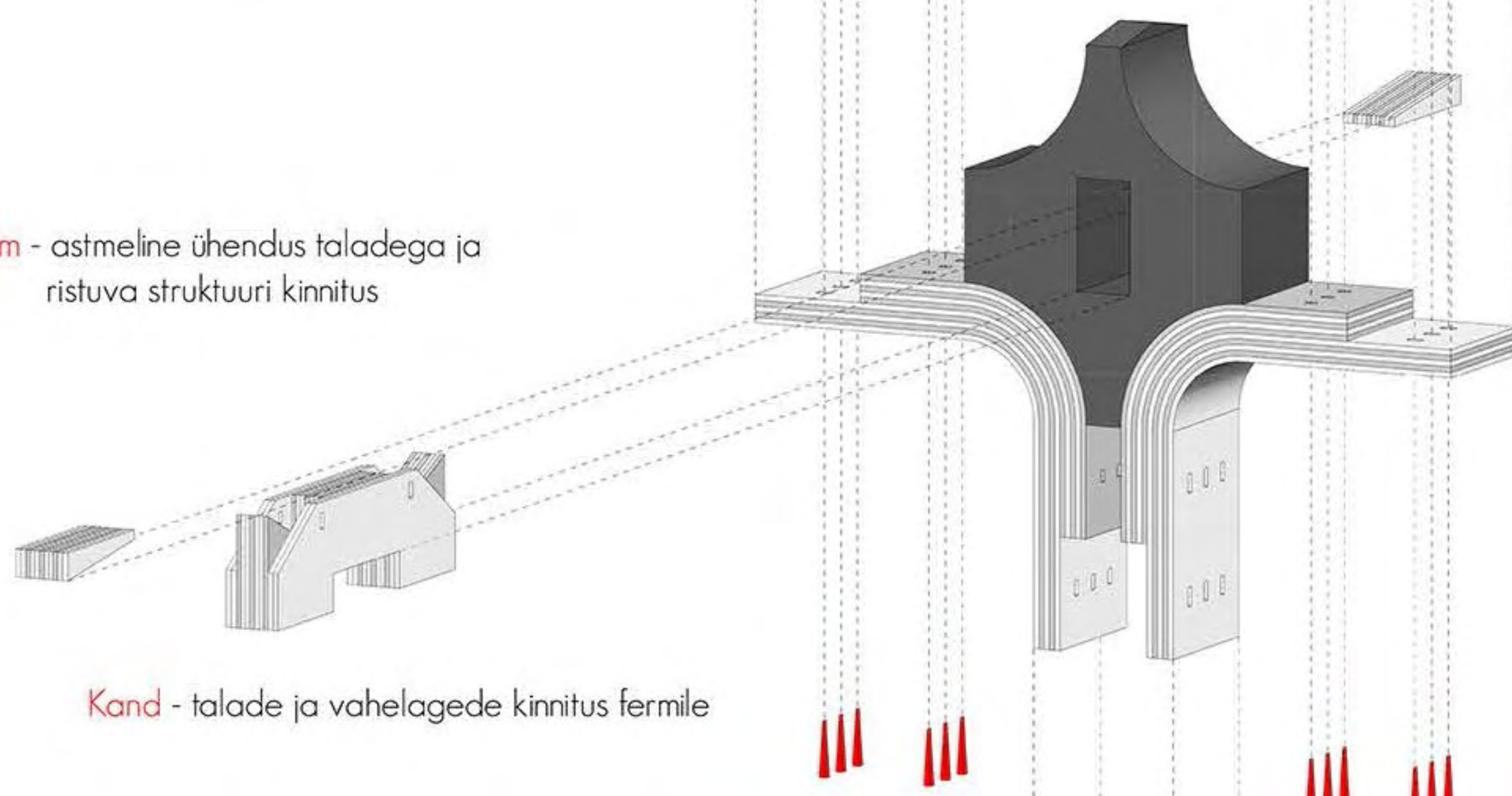


Talad - astmeline ühendus sõmlega ja
fikseerimine kiiludega



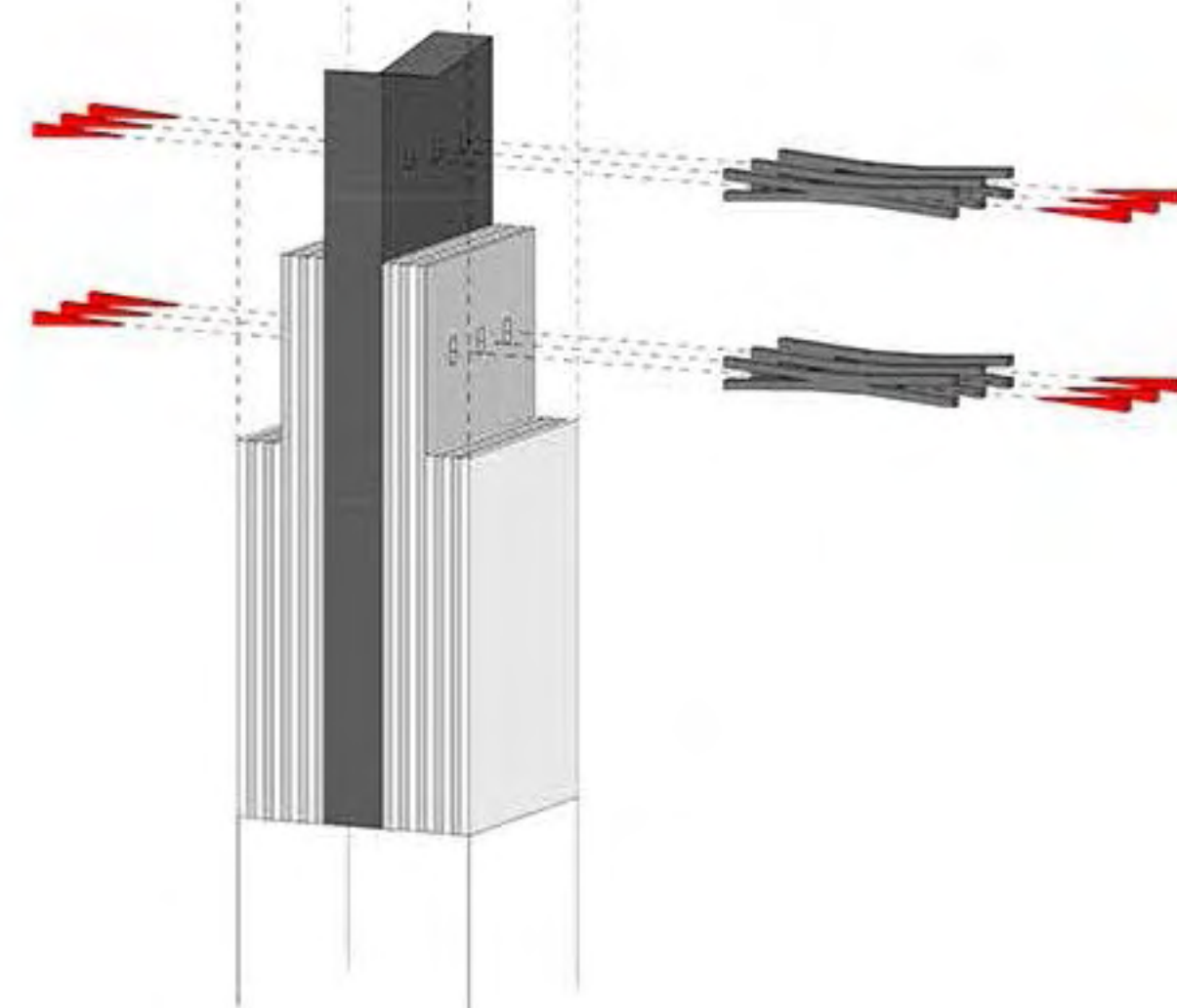
Kand - talade ja vahelagede kinnitus fermile

Sõlm - astmeline ühendus taladega ja
ristuva struktuuri kinnitus



Kand - talade ja vahelagede kinnitus fermile

Kiilud - paremaks kinnituseks on
kiilud kuivatatud absoluudini



Post - astmeline ühendus sõmlega

Ühendused

-
- robustne
- vajab kaitset
- ja viimistlust
- +
- mugav kasutada

Tootedisain

- +
- puhas
- elegantne
- detailideni viimistletud
-
- arvutatavus

Tischlerei Anton Mohr

arhitekt: Andreas Mohr
asukoht: Austria
aasta: 2015

materjal: Polmeier - BauBuche massiivpuit (LVL)

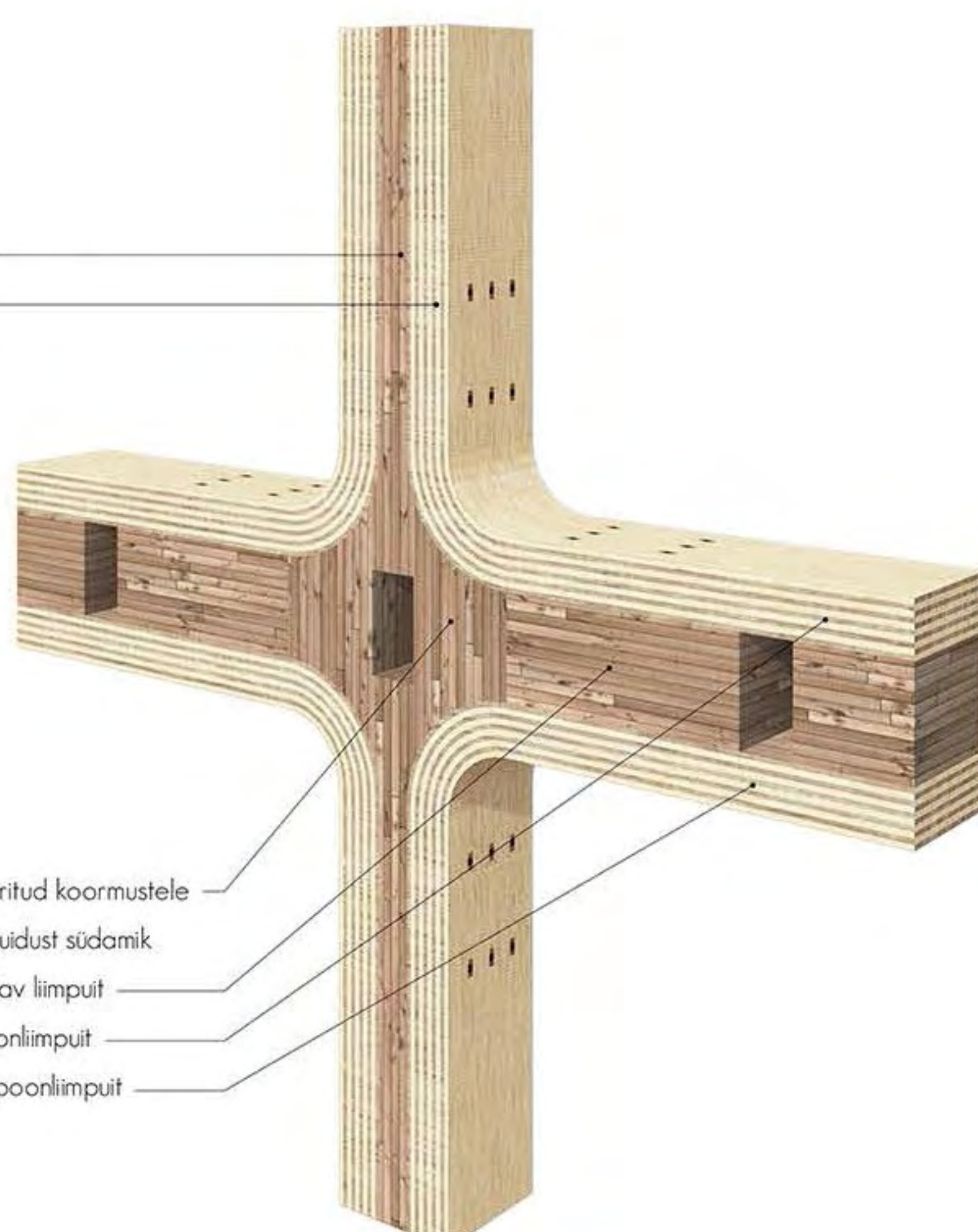
Tamedia Headquarters

arhitekt: Shigeru Ban
asukoht: Šveits
aasta: 2013

materjal: pöögist sõlmest
massiivpuit (glulam / LVL)

Tsoonide funktsioonid ja olemus

glulam - survele töötav pikisuunaline liimpuit
LVL - survele / paindel töötav spoonliimpuit



glulam / LVL - kontsentreeritud koormustele
töötav lehtpuidust südamik
glulam - töökoormuse eraldav liimpuit
LVL - survele töötav spoonliimpuit
LVL - tõmbele töötav spoonliimpuit

DETAILID

Struktuuri tüüplahendused

- A - sõlme nähtavus
 - 1 - laes
 - 2 - laes ja põrandal
 - 3 - peidetud
- B - struktuuri ristlõige
 - 1 - ei muutu
 - 2 - väheneb
- C - vahesein
 - 1 - kergsein
 - 2 - konstruktiivne ühekordne
 - 3 - konstruktiivne helisolatsiooniga
- D - vahelae tüüp
 - 1 - CLT-vahelagi taladel
 - 2 - R/B vahelagi taladel
- E - ruum kommunikatsioonidele vahelae
 - 1 - rohkem ruumi
 - 2 - vähem ruumi
- F - konstruktsiooni soojusmahutavus
 - 1 - väiksem
 - 2 - suurem

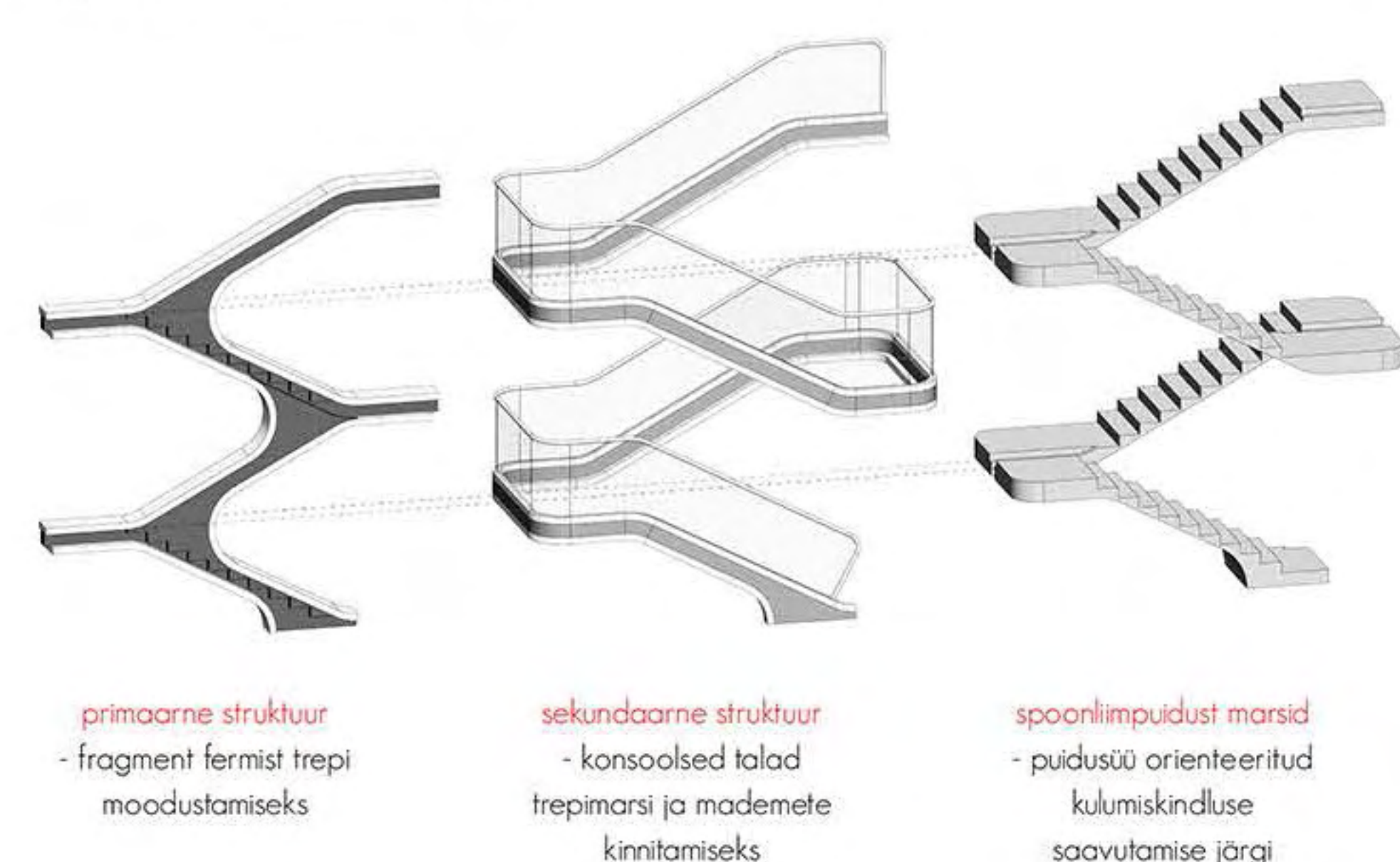
A1, B1, C2, D1, E1, F1

A2, B2, C2, D2, E2, F2



Trepp

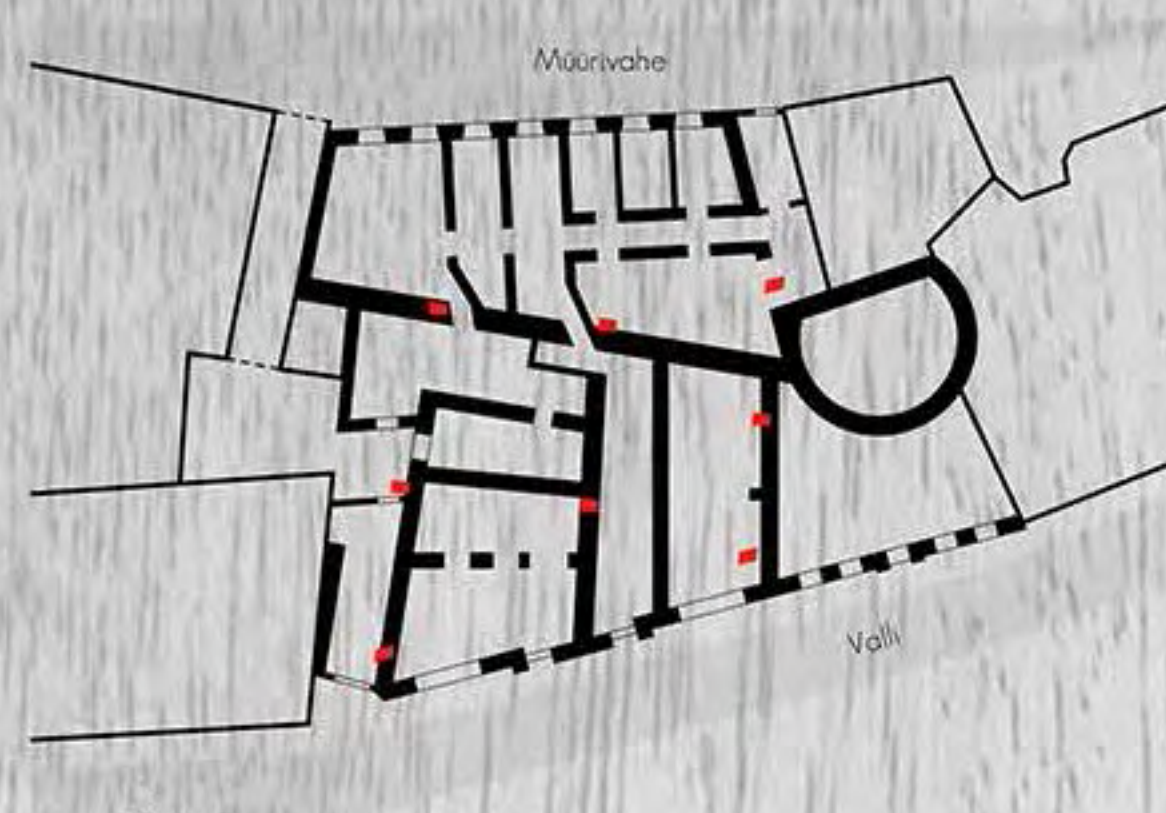
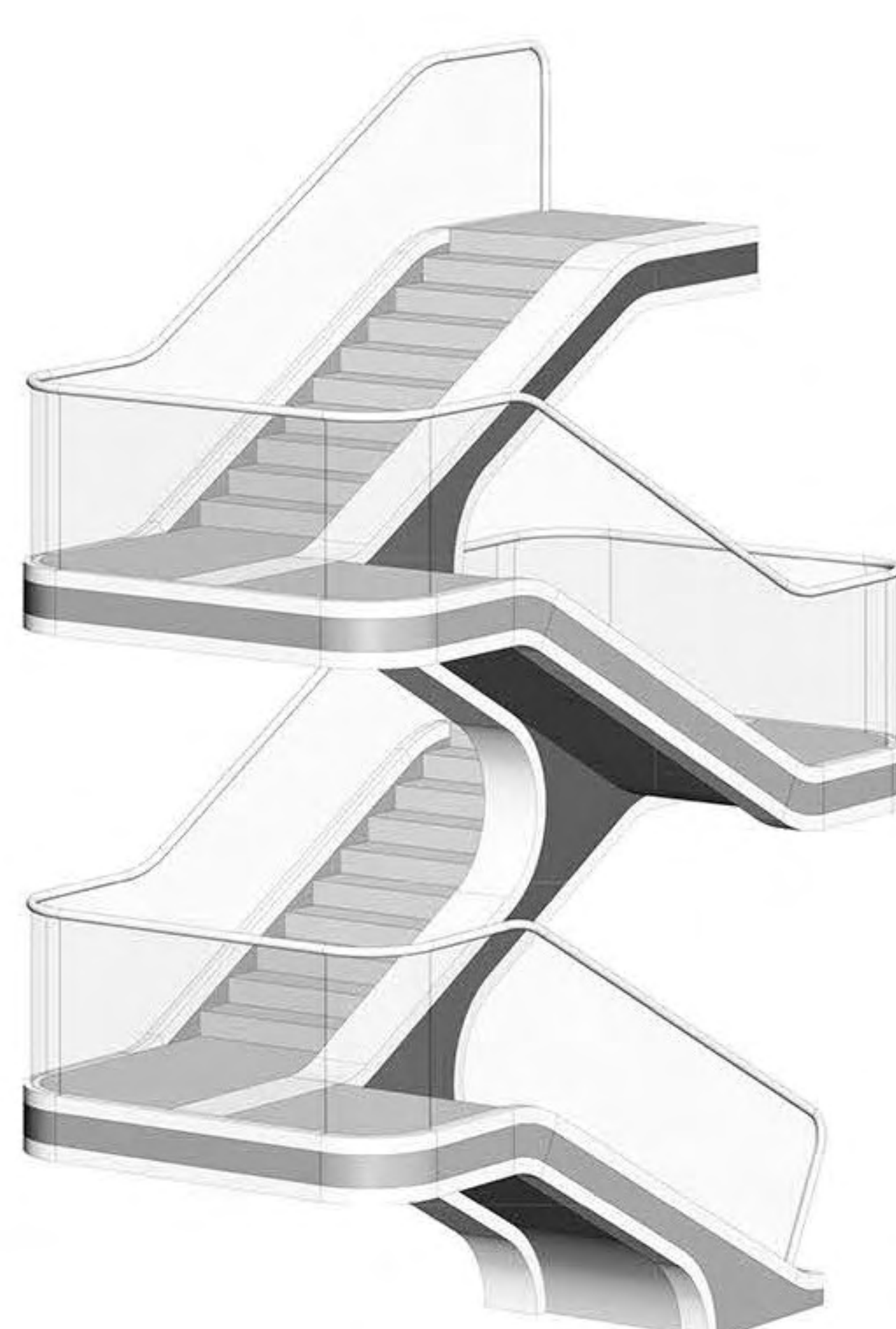
- primaarne struktuur on osa hoone fermist
- sekundaarne struktuur moodustab talad trepimademet ja piirete kinnitamiseks



primaarne struktuur
- fragment fermist trepi moodustamiseks

sekundaarne struktuur
- konsoolsed talad trepimarsi ja mademete kinnitamiseks

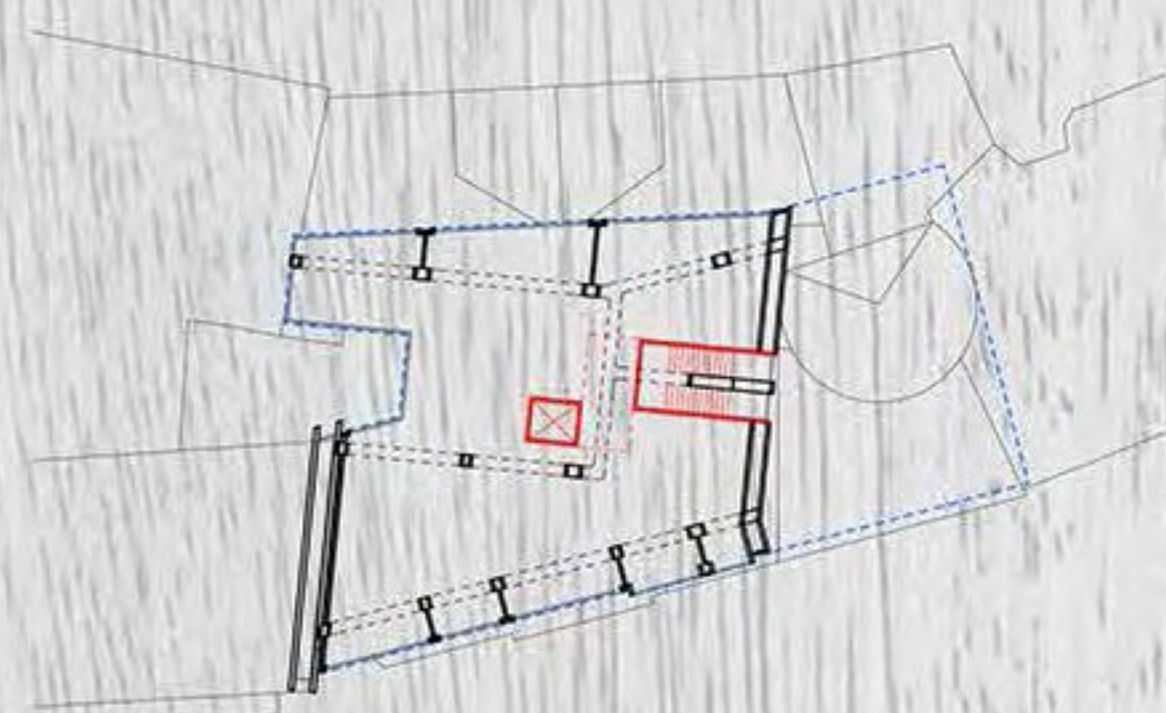
spoonilimpuidust marsid
- puidusöö orienteeritud kulumiskindluse saavutamise järgi



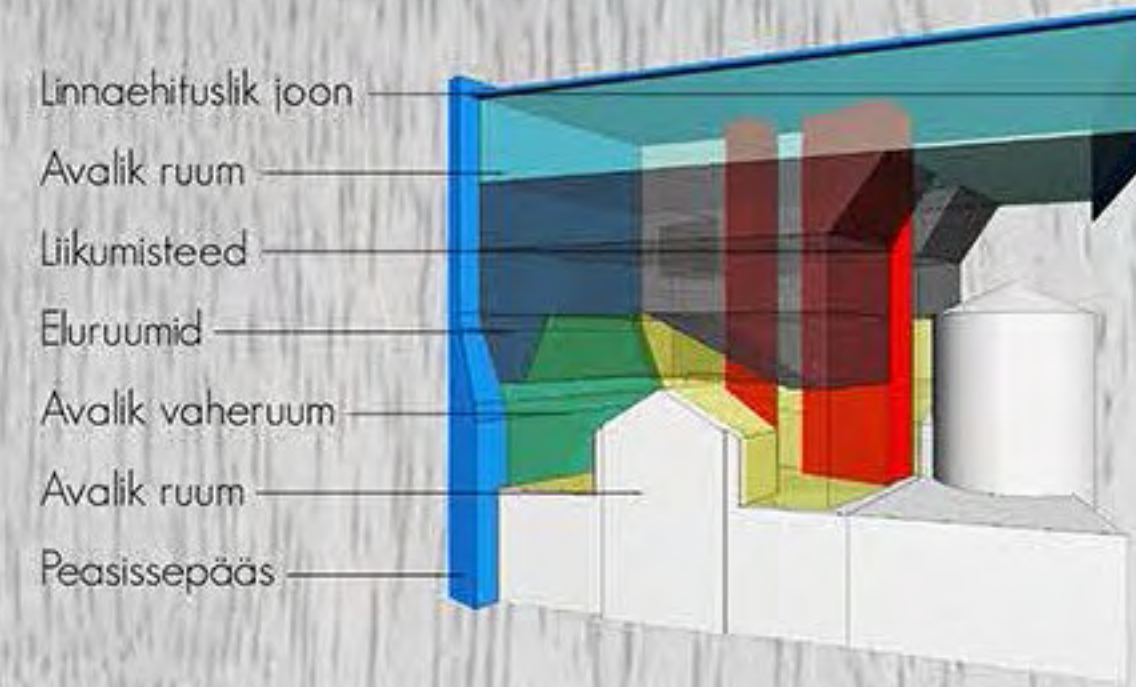
Hetkeselise - rajatava osa toepunktid



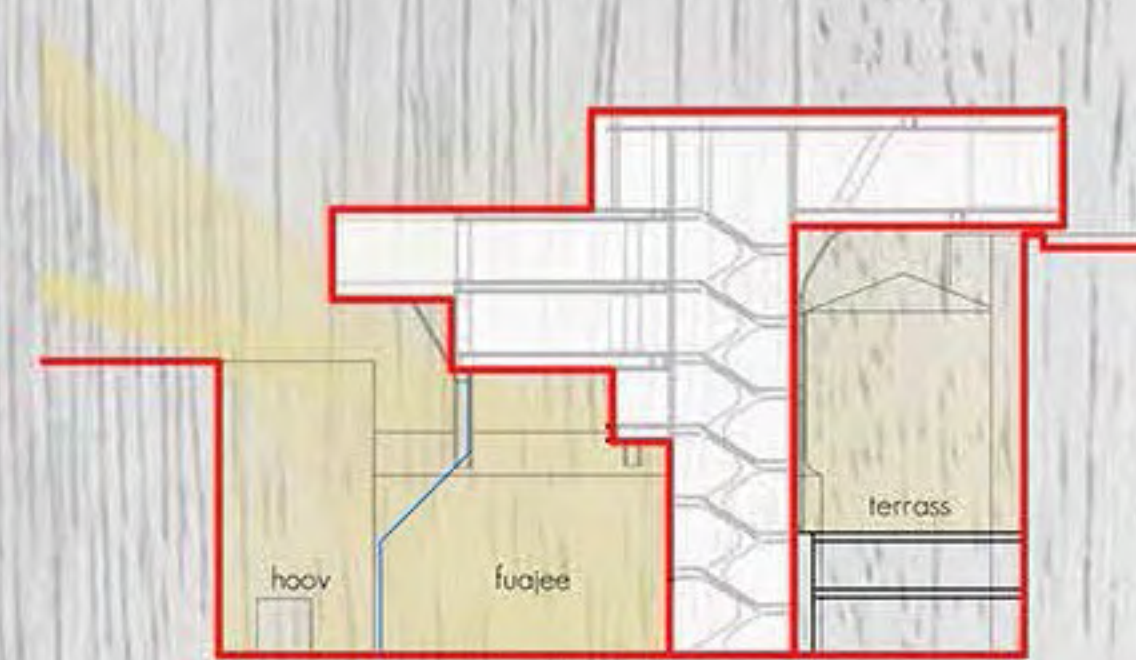
Kvartali avamine ja logistika
- liikumisteed



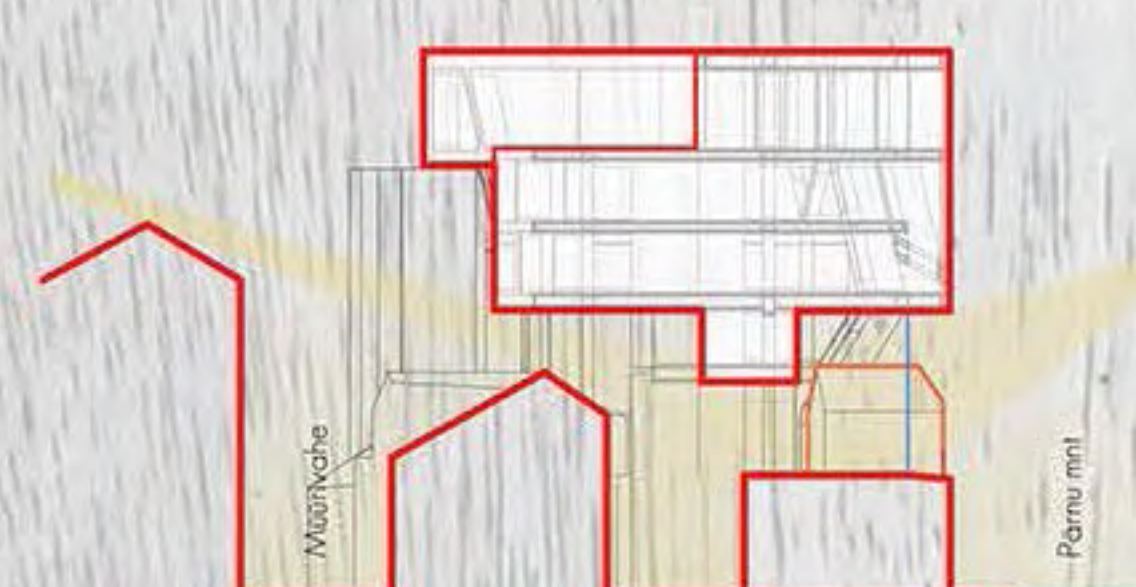
Korruse skeem



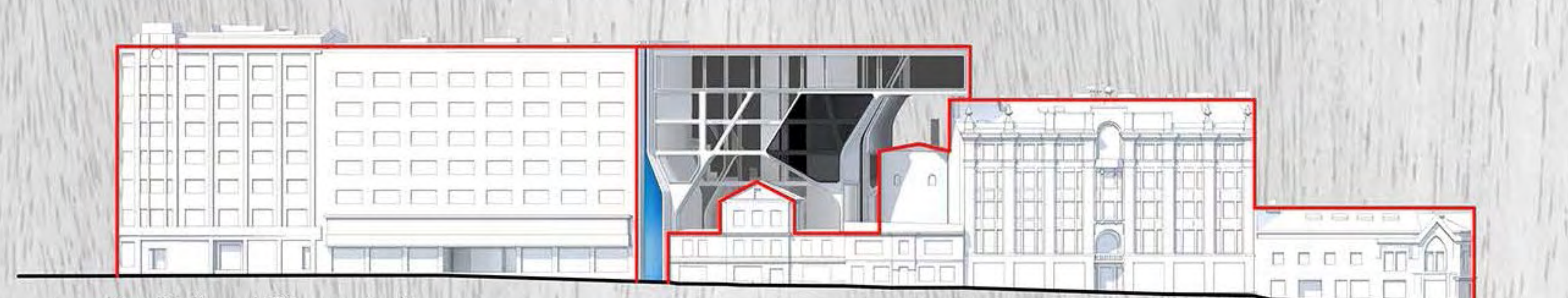
Funktsionaalne skeem



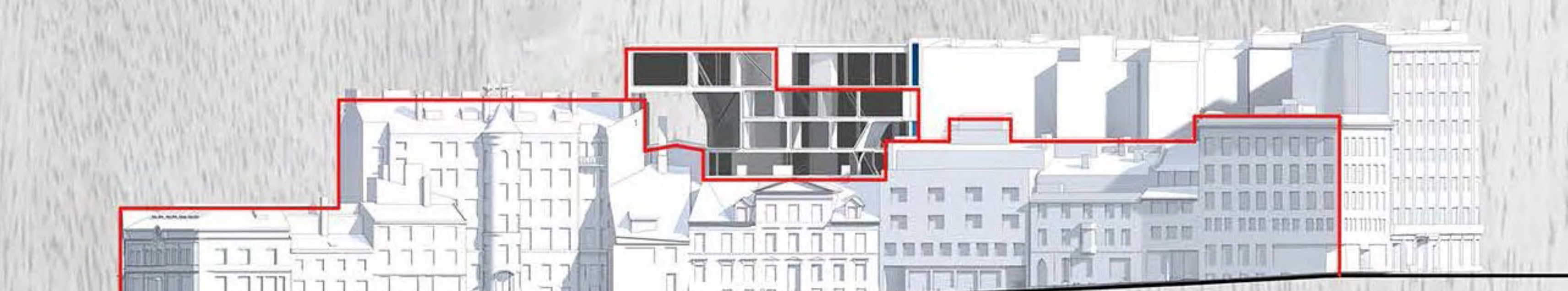
Valguse juurdepääs kvartali sisse
Pärnu mnt - Mäurivahe paralleelilõige



Valguse juurdepääs kvartali sisse
Pärnu mnt - Mäurivahe ristilõige



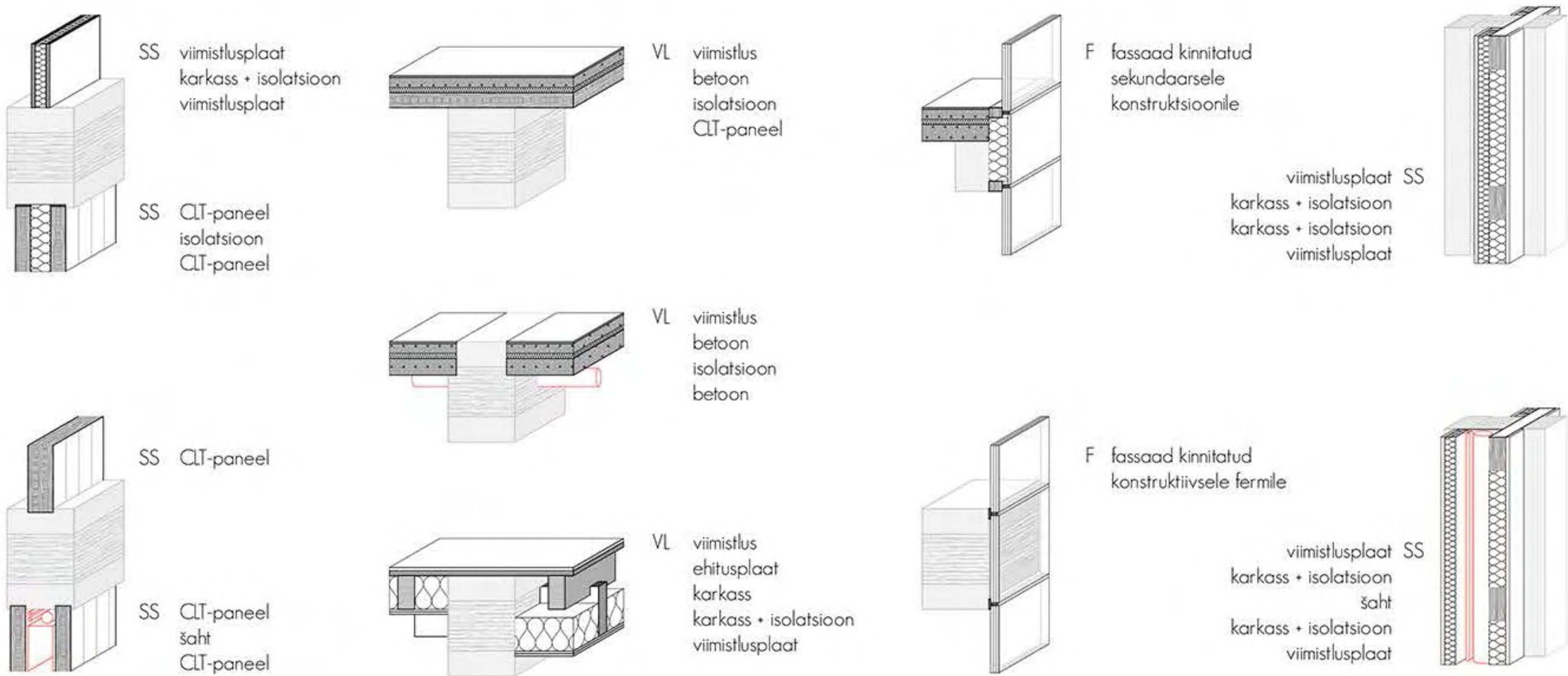
Linnaehituslik vaade Pärnu maanteelt
- linnaehituslik joon
- peasissepääs



Linnaehituslik vaade Mäurivahe tänavalt
- linnaehituslik joon

Konstruksioonitüübid

konstruksioonitüüpide koostamisel on oluseks näited J. Mayo kogumikust "Solid Wood - Case Studies in Mass Timber Architecture, Technology and Design" ja otto-facade.com



Töötsoonide tugevdamine

- a - puidu töösuuna kombineerimine
- b - komposiitmaterjaid

- a spoonide töösuuna varjeerimine

1 / 2 töösuunas

2 / 3 töösuunas

3 / 4 töösuunas

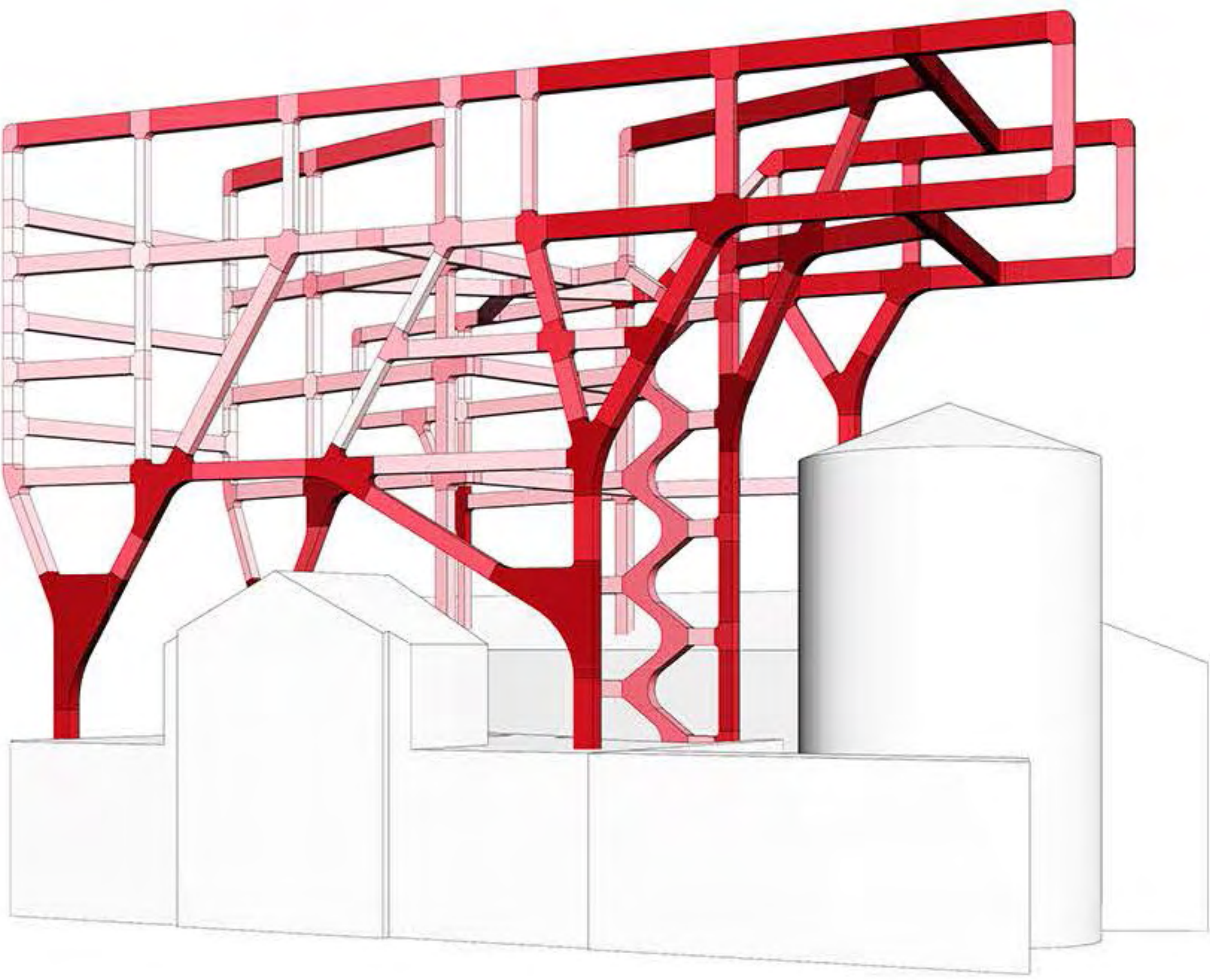
- b tšambetsooni tugevdamine fiiberkanga või trossidega
- puit pakub sellisel juhul efektiivselt kaitset tule eest.

Sisejõudude jagunemine

sisejõudude proportsioonide määramisel on kasutatud Autodeski ForceEffecti ja abitabeleid ehituskonstruktori käsiraamatust. Struktuuri jäikade sõlmede ja keerukuse tõttu on see staatikaga määramatu ja sellest tulenevalt võimalik hinnata vaid sisejõudude proportsionaalset jagunemist.

Struktuuris jäävad talade-postide ristlõiked suurusjärku 900..300 x 600..300 mm.

struktuuri sisejõud



LISAKIHID

Linnaehituslik detail ja avatäited

- valtsplekk-katus ja peasissepääsu portaal
- kirkas ja tumendatud klaas

Viimistlus

- vahelagede ja seinte viimistuskhid
- fermi joonte pikendamine fassaadile

Sekundaarne struktuur

- CLT-paneelidest liftišaht ja trepikoda
- spoonilimpuidust vahelagede kandekonstruksioon

MONTAAŽ

Primaarne struktuur

- inseneeritud massiivpuit elemendid
- fermide elementideks jagamisel on arvestatud transportimiseks sobilike mõõtude ja sisejõududega.

- diagonaalse elemendi mõõtmed ca 10 x 4 m
- sõlmedega tala mõõtmed ca 22 x 3 m

90 m³ / 24 t
8b x 2,45 x 22 m

b x 4 m
l x 28 m

b x 3,5 m / l x 30 m

