Joosep Pärn



TOPOLOOGIAST TÜPOLOOGIAKS

Ebastandardse loomuliku puidu rakendamine arhitektuuris digitootmistehnoloogiate abil

Eesti Kunstiakadeemia
Arhitektuuriteaduskond
Arhitektuur ja linnaplaneerimine

Magistritöö

Topoloogiast tüpoloogiaks
Ebastandardse loomuliku puidu rakendamine arhitektuuris digitootmistehnoloogiate abil

Joosep Pärn

Juhendajad:
Martin Melioranski
Ingmar Melioranski
Eik Hermann

Tallinn 2026

Autorideklaratsioon

Töö autorina kinnitan, et

1. käesolev lõputöö on minu isikliku loomingulise töö tulemus, seda ei ole osaliselt ega tervikuna kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud;

2. töös sisalduva(te) originaalse(te) teos(t)e loomisega seotud isiklikud autoriõigused kuuluvad minule kui töö autorile ja teos(t)ega seotud varalisi õigusi käsutatakse vastavalt Eesti Kunstiakadeemias kehtivale korrale;

3. olen koostanud töö iseseisvalt ning kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd (teosed), seisukohad ja mistahes muudest allikatest pärinevad andmed on töös nõuetekohaselt viidatud.

/allkirjastatud digitaalselt/

Kuupäev ja aasta: 21.04.2026

Autori nimi: Joosep Pärn

Õppekava: Arhitektuur ja linnaplaneerimine

Sisukord

Sissejuhatus 5

Meetod 6

1 Uurimus 7

1.1 Tehnoloogia ja keerukuse suhe 7

1.1.1 Minevik: Loomuliku vormi traditsiooniline rakendus 7

1.1.2 Olevik: Arhitektuuri abstraktseks muutumine 8

1.1.3 Tulevik? Loomuliku keerukuse lahendamine läbi digitaalsuse 9

1.2 Näiteid loomuliku puidu kasutamisest tänapäeval 11

1.2.1 Case study: Woodchip Barn 11

1.2.2 Case study: Torinosu, Hidakuma 13

1.2.3 Case study: The Forest Datum 15

1.3 Puidu topoloogiline analüüs 17

1.3.1 Loomuliku puidu väärtused 17

1.3.2 Puidu mikrostruktuur 18

1.3.3 Harude potentsiaal 19

1.3.4 Harude tüübid 21

1.4 Materjalivaliku kriteeriumid 25

1.4.1 Lehtpuude potentsiaal 25

1.4.2 Koostöö raietega 25

1.4.3 Linnapuud ehitusmaterjalina 26

2 Rakendus 27

2.1 Vormiotsingud: Topoloogiast tüpoloogiaks 27

2.1.1 Katsetused läbi maketeerimise 27

2.1.2 Vormi lihtsustamine 37

2.1.3 Harudest struktuuri eksperiment 39

2.1.4 Orgaaniline Vierendeeli tala 41

2.1.5 Orgaaniline post 45

2.1.6 Tapid 47

2.1.7 Topoloogiline jaotus 49

2.2 Elementide kombineerimine struktuuriks 51

2.2.1 Rakustruktuur 51

2.2.2 Parameetriline planeerimine ja tolerants 55

2.3 Loomulikust puidust hoone prototüüp 59

2.3.1 Orgaanilise puitstruktuuri võimalused 59

2.3.2 Projekti asukoht 61

2.3.3 Hoone funktsioon 63

2.3.4 Ehitusobjektil töötamine 69

3 Arengusuunad 73

Kokkuvõte 74

Resümee 75

Abstract 77

Allikad 79

Illustratsioonid 81

Sissejuhatus

Töö lähtepunktiks on idee arhitektuurimaastikul toimunud pikaajalisest muutusest, kus esialgselt töötlemata materjali kasutamine on süsteemselt asendunud mitmekordselt töödeldud ja tehislike materjalidega.[1] Tehnoloogia areng on suunatud looduse pakutud keeruliste vormide asendamisele standardsete elementidega, mille käsitlemine oleks lihtsam ja etteennustatavam.

Selle protsessi käigus on hääbunud ajaloolised oskused märgata ja ära kasutada olemasolevaid potentsiaale, mis looduslikes materjalides juba olemas on. Unustatud on ajaloolised vernakulaarsed ehitusvõtted, mis hädavajadusest pidid rakendama käepäraste materjalide omadusi. Seeläbi oleme saavutanud lihtsuse ja süsteemide kergemini toimiva skaleeritavuse, kuid kas neid varjatud potentsiaale mitte kasutades on ka midagi väärtuslikku kaduma läinud?

Tehnoloogia areng on võimaldanud meil looduse optimeerida tööstuslikuks materjaliressursiks, mille puhul suuri transpordikulusid, keskkonna muutmist ja materjali töötlemiseks kuluvat energiat peetakse iseenesestmõistetavaks paratamatuseks. Ajalooliselt on nende tehnoloogiate puudumine sundinud igat loodusest saadud elementi väärtustama selle loomulikul kujul ning rakendama selle omadusi maksimaalselt, seeläbi kulutades vähem energiat ja luues väiksema süsinikujalajäljega ehitisi.

Praeguseks hetkeks on tehnoloogia arenenud piisavalt kaugele, et lubada meil neid säästlikke vernakulaarseid võtteid taaskord luubi alla võtta. Industriaalseid töömeetodeid on rakendatud, et keerulist looduslikku materjali ennast lihtsustada ja standardiseerida, kuid uuemad digitaalsed tootmistehnoloogiad kannavad endas võimalust seda looduslikku keerukust mõista ja sellega tegeleda ilma materjali ennast füüsiliselt lihtsustamata. Eesmärgiks ei ole arhitektuuri ajas tagasi viia, vaid ühendada erinevate meetodite tugevaimad küljed. Digitaalne tehnoloogia, mis suudab arvestada keeruliste vormidega ja suurte andmemahtudega on tööriist, mis lubab tagasi tuua vernakulaarse ehituse säästlikkuse ja intelligentse ressursside kasutamise.

Projekti keskmeks on loomulik vähetöödeldud puit ning sellega kaasnevad bioloogiliselt arenenud omadused ja tugevused. Suutes neid omadusi looduslikult keerulisest topoloogiast tuvastada, on võimalik neid rakendada ka orgaaniliste elementidena ehituse otstarbeks. Selle asemel, et puitelementide vormi lihtsustada, tuleb leida rakendus, mis on analoogne selle konkreetse puu osa looduslikule funktsioonile.

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks on digitaalsetele tootmismeetoditele toetudes tuua loodusliku vähetöödeldud puidu loomulik potentsiaal ja materjalisäästlikkus tagasi arhitektuuri.

1. Z. Mollica, M. Self, Tree Fork Truss: Geometric Strategies for Exploiting Inherent Material Form. - Advances in Architectural Geometry 2016. Toim S. Adriaenssens jt. Zürich, 2017, https://zacharymolli.ca/assets/download/Mollica-Self-AAG-Tree-Fork-Truss.pdf (vaadatud 8. IV 2026). lk 140

Meetod

Magistritöö esimene pool tegeleb teoreetilise taustauuringuga uurides puitu kui looduslikku materjali, eesmärgiga tuvastada selle orgaanilise vormi potentsiaale, mida saaks tänapäeva ehituses rakendada.

Esimesena analüüsitakse areneva tehnoloogia materjalidele rakendamist, võrreldes ajaloolisi loomulikku vormi hindavaid meetodeid tänapäeva standardiseerimisele suunatud tööstusega. Sellest püstitub magistritöö filosoofiline seisukoht, millele toetudes täpsemaid lahendusi otsida.

Inspiratsiooni ja eeskujude leidmiseks võrreldakse kolme vähetöödeldud puitu kasutavat eksperimentaalset projekti. Kuigi nende toormaterjal on analoogne, läheneb iga projekt selle kasutamisele erinevalt nii puidu reaalsete omaduste rakendamises kui ka üldistes väärtustes.

Eelmistest peatükkidest saadud teadmiste taustal uuritakse puidu bioloogilisi omadusi ja füüsikalisi tugevusi. Need teadmised suunavad edaspidi arendatavaid puidu kasutamise viise, et maksimaalselt väärtustada loodusest saadavaid potentsiaale. Seejärel tegeletakse kvantitatiivse uuringuga Tallinna linnas maha võetavatest puudest – materjal, mis tänapäevases ehituses rakendust ei leia, kuid võib väljapakutavas lahenduses kõrge potentsiaaliga tooraine olla.

Teine pool magistritööst tegeleb teoreetilise uuringu alusel praktiliste lahenduste välja pakkumisega. Otsitakse loomulike puitelementide rakendamiseks meetodit ja struktuuri, mis ühendaks looduslikud potentsiaalid tänapäevaste arhitektuursete väärtustega. Oluliseks meetodiks on loodusest kogutud okste digitaliseerimine, mis lubab elementidega katseid teha nii füüsiliselt kui digitaalselt. See tekitab arusaama sellise materjalikasutusega kaasnevast problemaatikast nii arhitektuuri planeerimise kui ka ehitamise faasides. Tulemuseks on konkreetsed struktuursed elemenditüpoloogiad, mis põhinevad puidu loodusliku kuju erinevatel topoloogilistel vormidel.

Nende orgaaniliste ehituselementide kasutamine nõuab uut lähenemist kogu projekteerimise protsessile. Selleks on uuritud nende elementide rakendamiseks kõige sobilikumaid suuremal skaalal struktuure. Oluline roll on ka sellise materjali kasutamiseks vajalike digitaalsete tööriistade ja planeerimismeetodite välja töötamisel.

Meetodi testimiseks arendatakse Tallinnasse vähetöödeldud puidust struktuuriga avalik hoone. Protsess lubab läbi mängida digitaalset tootmistehnoloogiat rakendavad töömeetodid ehitusobjektil ning tegeleda materjalikasutusele kõige sobilikuma funktsionaalsuse ja esteetilise keele leidmisega.

1 Uurimus

1.1 Tehnoloogia ja keerukuse suhe

1.1.1 Minevik: Loomuliku vormi traditsiooniline rakendus

Vernakulaarseid ehitusmeetodeid on läbi aegade defineerinud aeglane ja ratsionaalne areng, mis sõltus rohkem kohalikust olukorrast ja kogukonna teadmistest kui parasjagu levinud arhitektuuristiilidest ja esteetikast.[2] Kasutati neid materjale, mis olid kättesaadavad, rakendades läbi generatsioonide pärandatud oskusi. Sellised ehitusmeetodid kandsid endas piiranguid. Materjali standardseks töötlemine ei olnud tööjõukulu poolest alati realistlik variant. See tähendas, et tuli leppida nende vormidega, mis materjalile looduslikes tingimustes tekkinud oli. Lihtsate näidetena võib ette kujutada kivimüüri või vana palkmaja, kus ehituselemente on töödeldud minimaalselt, sisaldades aastasadade pikkuseid kogemusi ehitamisest.

Sellised meetodid kandsid endas loomulikku lihtsust ning nende realiseerimiseks kuluv energiahulk oli madal[3]. Kuid vaimse pingutuse mõistes nõudsid need ehitised autorilt rohkem. Kivimüüris tuleb igale kivile sobiv koht leida ning iga tekkinud vahe jaoks tuleb leida sobiv kivi. Palkmajas peab iga järgmise palgi kumerus sobituma eelmisega, nõudes otsinguid ja katsetusi. Ebastandardse kujuga puit nõuab lihtsate ühenduste asemel keerulisi tappe ning arvestamist kaootiliste sisejõudude ja moondumistega.

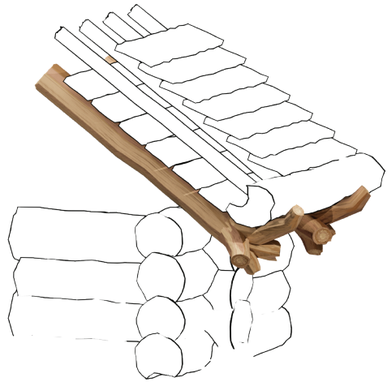
Eeskujusid materjali loomuliku kuju otstarbekast kasutamisest võib leida üle maailma. Näiteks on Soomes Karjalas palkmaju ehitades kasutatud kuritsy nime all tuntud sarikaid. Need olid konksukujuliste juureotstega palgid, mis paigutati katusekonstruktsiooni nii, et juured ulatuks ülespoole. Juurte peale toetus seest tühi palk, mis oli aluseks katuse kõikide järgmiste kihtide kinnitamisele.[4] Seega palke vähem puhastades ja juurte eemaldamisega vähem vaeva nähes, saavutati ehitades efektiivne ja lihtne liitekoht. Loomuliku vormi intelligentne kasutus tähendas väiksemat energiakulu ja materjali säästmist.

Viikingilaevade ehitamisel määrati eraldi meistrimees, kelle ülesandeks oli metsast iga otstarbe jaoks õige puu valida. Lagendikul kasvava laia tamme kõverad oksad sobisid hästi laeva ribideks. Oksa hargnemine tüvest tekitas loomuliku konsooli – tüvest sai laeva põhja mööda jooksev kiilson ja oksast sai selle vertikaalne tugi.[5] Vastutasuks selle otsingu eest rakendas materjal osava meistrimehe kätes ehitise kasuks kogu oma loomuliku potentsiaali.

2. J. Stevens, R. Nelson, Digital Vernacular: Architectural Principles, Tools, and Processes, New York: Routledge, 2015, lk 11

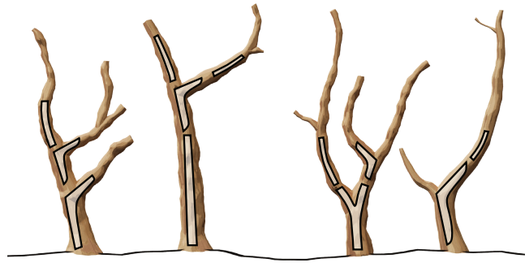
3. Z. Mollica, M. Self, Tree Fork Truss.., lk 140-141

4. J. B. Hilling, The Wooden Architecture of Northern Europe: From the Viking Era to the 20th Century. London: Lund Humphries Publishers Ltd, 2022. lk 69



Illustratsioon 1. Kuritsy sarikad

5. K. Durham, Viking Longship. Oxford: Osprey Publishing, 2002.



Illustratsioon 2. Ebastandardse puidu kasutamine viikingilaevade ehituses

1.1.2 Olevik: Arhitektuuri abstraktseks muutumine

Tänapäevane materjale standardseteks ühikuteks taandav meetod võimaldas plaanidel muutuda skemaatilisest tööriistast täpseks reaalsuse representatsiooniks, mis lubab arhitektil planeeritavat hoonet detailideni läbi töötada enne, kui ehitus algab. Ühest küljest annab see hoone autoritele ulatusliku kontrolli tulemuse üle ning kindlustab, et materjalide ettearvamatud omadused ei sekkuks ja muudaks planeeritavat vormi.

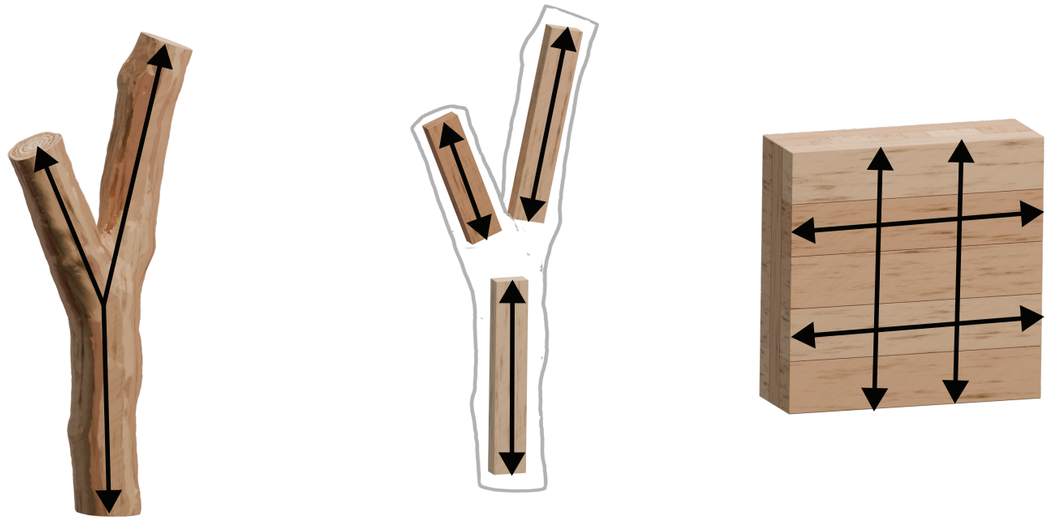
Teisest küljest tekkis arhitektuuri protsessis järsk katkestus arhitekti intellektuaalse töö ja ehituse praktilise läbiviimise vahel[6]. Hoonet planeerides vähenes vajadus arvestada reaalse materjaliga, sest elementide lihtsustatud representatsioon paberil oli piisav ning standardsed ehitusmeetodid piisavalt usaldusväärsed, et projekt realiseerida. Arhitekti ei ole enam ehitusega niivõrd otseselt seotud ja suur osa tema tööst lõpeb fiktiivse hoone valmides.

Digitaalsuse omaks võtmine arhitektuuris võimendas seda eraldatust intellektuaalse ja reaalse vahel veel enam. Modelleerimine võimaldab luua vorme, mis on füüsilisest maailmast täielikult eraldatud. Reaalsed materjalid asendusid abstraktsete digitaalsete üldistustega, kus elementide füüsilised omadused ja reaalses ruumis tajutav skaala ei väljendu.

Sarnane protsess on toimunud ka materjali käsitlemises. Puidu väärtustamine on tänapäeva arhitektuuris tõusev trend. Arenev puidutööstus võimaldab looduslikul materjalil asendada betooni ja oluliselt langetada ehituse ökoloogilist jalajälge, kuid kas puidu kasutamine võiks olla veelgi säästlikum, kui selle looduslike omadusi rohkem väärtustada? Puit, mis rohke töötlemise abil on muutunud kõrgtehnoloogiliseks materjaliks ning võimaldab varasemalt võimatuid vorme ellu viia, on kaotanud olulise osa loodusliku puidu struktuursetest omadustest. Loomulikud tugevused, mis puu kasvuga on tekkinud, on ohverdatud, et luua homogeenne materjal, mille omadused oleks kergesti ennustatavad.[7]

6. K. Zwerger, Wood and Wood Joints: Building Traditions of Europe, Japan and China. Basel: Birkhäuser, 2000, lk 58

7. Z. Mollica, M. Self, Tree Fork Truss.., lk 140



Illustratsioon 3. Puidu omaduste homogeniseerimine

1.1.3 Tulevik? Loomuliku keerukuse lahendamine läbi digitaalsuse

Läbiv muster ehitustehnoloogiate arengus on materjali aina põhjalikum töötlemine, eesmärgiga protsessi lihtsustada. Standardiseeritust on hakatud väärtustama rohkem kui variatsiooni. See tähendab, et materjali tootmisse panustatud energiahulk kasvab hüppeliselt ning vähendab vastutasuks faktorite hulka, millega arhitektuur arvestama peab. Näiteks nagu maast kivi korjamine kulutab energiat vähe, kuid peame seejärel mõtlema ja otsima, kuhu kohta see kivi seina ladudes täpselt sobiks. Selle edasiareng on tellis, mille tootmiseks kulub rohkem energiat, kuid see-eest on ladumine lihtsam töö, kus eelnevad tellised järgmise paigutust ei mõjuta.

Digitaalsetel tootmistehnoloogiatel on potentsiaal energiakulu ja lihtsuse vahel uus tasakaal leida. Tänapäeval on tehnoloogia peamiseks kasutuseks ja väärtust loovaks osaks just materjali töötlemine ja lihtsustused, kuid digitaalse lähenemise üheks põhiliseks tugevuseks on just inimese jaoks keeruliste olukordadega tegelemine ja nende automatiseerimine. Ehk siis on võimalus tehnoloogiat rakendada mitte materjali enda lihtsustamisele, vaid lihtsustamata materjali keerukuse lahendamiseks.

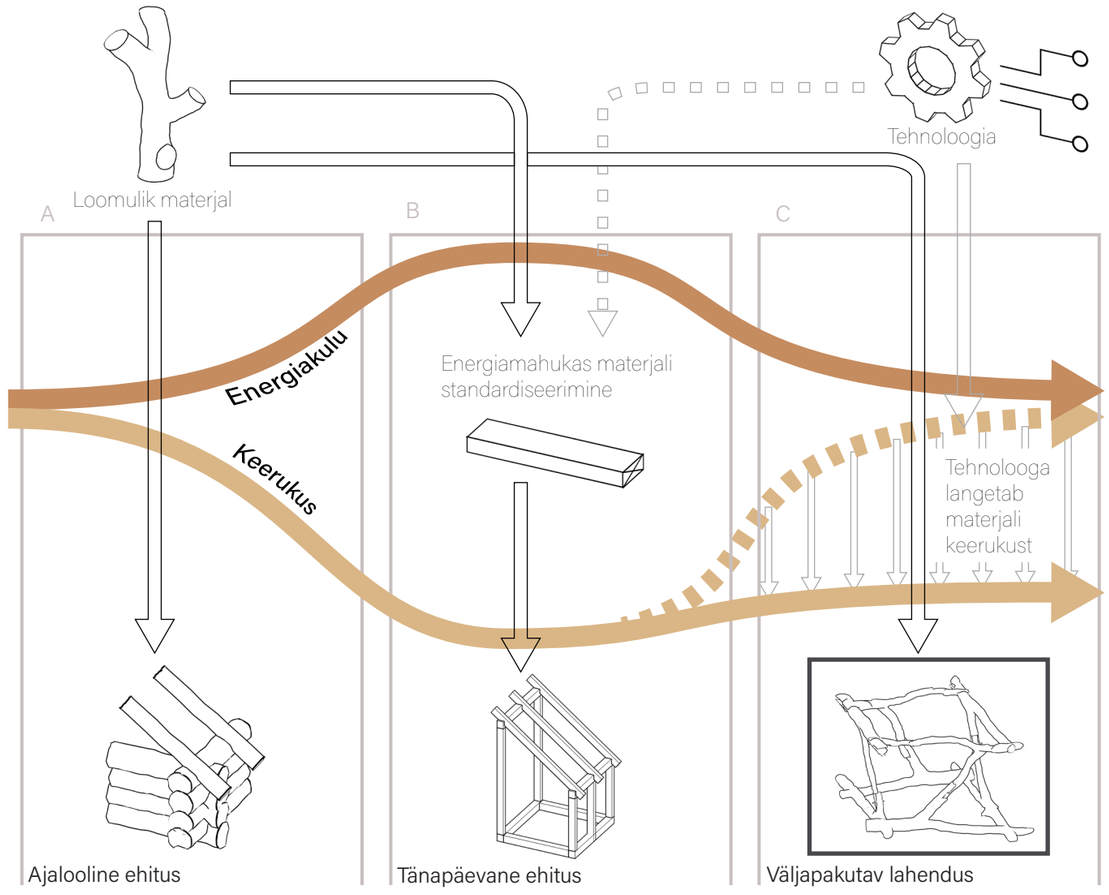
Parameetriline ja orgaaniline arhitektuur kannab endas justkui sõnumit, mis väärtustab loodusliku maailma vorme üle täielikult standardiseeritud maailma. Kuid reaalsuses ei saaks meetodid, mille abil seda saavutatakse, olla kaugemal loomulikkusest. Selle asemel, et loomulikkust kaasata digitaalsesse arhitektuuri, on täielikult digitaalsed lahendused jõudnud füüsilisse maailma.

Siit kerkib küsimus - kas oleks võimalik tehislikult loomulike vormide imiteerimise asemel rakendada seda, mis on meil juba olemas? Materjaliressursid ei ole lõputud ning on oluline avastada leidlikke viise ära kasutada kõiki varjatud potentsiaale, mis loodusest jätkusuutlikul viisil võtta annab. Ebastandardne puit ei jää küll ehitusest täiesti kõrvale, kuid kõik selle tänapäevased rakendused on väärtust alandavad kasutused (*downcycling*), mis suurel määral ei arvesta materjali loomuliku potentsiaaliga. Mida enam neid olemasolevaid potentsiaale oma ehitiste kasuks rakendada suudame, seda väiksemal hulgal on lõpuks materjali vaja. Puidu mõistlik ja efektiivne kasutus võiks viia tulevikuni, kus iga puud saaks rakendada tervenisti ilma vähendatud väärtusega ülejääkideta ning samal ajal väheneks suures pildis ka kogu puidu kulu.

Mõeldes puidust kui ehitusmaterjalist, tulevad esimesena ette palgid, prussid, plangud ja paneelid – kõik korrapärased ja standardsed elemendid. Ent vaadates puud looduses on see palju enamat. Puu kasv ei allu meie ortogonaalsetele standarditele, vaid looduslikele reeglistikele, mis inimese perspektiivist tundub kaootiline ja ettearvamatu. Kõiki puu kõverusi ja hargnemisi peetakse ehituses väheväärtuslikuks ülejäägiks, mis võimaldab meil rakendada ainult väikese osa sellest materjalist. Kuid vaadates minevikku ei ole see alati nii olnud. Neid korrapäratuid osi materjalist saaks teoreetiliselt kasutada ehituses, kuid see oleks äärmiselt keeruline ja töömahukas. Ajalooliselt on sellele lähenetud läbi inimese tajude ja käte, kuid see võimaldas luua ainult väikesel skaalal objekte või siis kestis suuremate hoonete ehitus kauem kui tänapäevases kiire majandusega maailmas vastuvõetav on.

Selles olukorras saavad potentsiaalselt olla abiks digitaalsed tootmistehnikad. Palke 3D skaneerides saab luua digitaalseid representatsioone, millega erinevaid struktuure katsetada. Parameetrilised meetodid või tehisintellekt saavad olla abiks täpsete paigutuste leidmisega ning konstruktsiooni tugevuse testimisega. 3D printimise või CNC freesimise abil oleks võimalik toota standardsetest materjalidest elemente, mis loomuliku materjali vormiga täpselt sobituksid. Spetsiifilise kujuga elementide ühendamine vajaks ka iga kord erinevaid tappe, mida saaks toota digitaalse mudeli järgi freesides.

Kui neid meetodeid süstemaatiliselt rakendada, saaksid need olla abiks loomulike vormide kasutamisest tingitud keerukusega tegelemisel. Tulemuseks on ehitusmeetod, mis sarnaselt arhailisematele lähenemistele ei kuluta palju energiat materjali töötlemiseks, kuid on samas piisavalt lihtsustatud ja süstemaatiline, et olla skaleeritav.



Illustratsioon 4. Energiakulu ja keerukuse suhe

1.2 Näiteid loomuliku puidu kasutamisest tänapäeval

1.2.1 Case study: Woodchip Barn

Architectural Association School of Architecture-is aastal 2016 loodud projekti Woodchip Barn juhtivaks ideeks on puidu loomulike omaduste rakendamine. Tavaehituses ohverdatakse puidule omased loomulikud tugevused, kui sellest standardse elemendi tootmise käigus puidu kiud läbi lõigatakse. Seejärel kui on vaja saavutada spetsiifilist vormi, töödeldakse puitu veelkord näiteks liimpuiduks, eirates suures osas algset kiulisust ning tekitades uus homogeensem tugevus. Selles lähenemises on vastuolu – materjali töödeldakse vähemalt kaks korda, et saavutada funktsioon, mis mõnes puitelemendis oleks olnud olemas juba loomulikul kujul.[8]

Loomuliku puidu väärtustamiseks valiti projekti jaoks välja Architectural Association School of Architecture-ile kuuluvast Hooke park-ist 20 hargnevat puitelementi. Materjal 3D-skaneeriti fotogrammeetria abil ning saadud 3D mudelite keerukust optimeeriti parameetrilise süsteemiga, mis taandas iga elemendi telgjoonteks ja ristlõigeteks[9].

Loodud sillataolise struktuuriga varjualune rakendab hargnevaid puitelemente põhimõttel, et iga kolmeharulise objekti otspunkte on võimalik lihtsustatult kohelda planaarse geomeetriana ning elementi õigesti positsioneerides ja keerates on võimalik toetada mistahes läheduses olevat kolme punkti. Suures pildis koosneb kogu struktuur kahest telgjoonest, mille vahele asetatakse puitelemente sellisel viisil, et kaks haru asuvad alati ühel teljel ning kolmas teisel teljel, tekitades haru enda tugevuse abil jäiga konstruktsiooni. Põhiteljed määrati arhitektide poolt ning harude paigutamiseks loodi Grasshopperi programmis parameetriline süsteem, mis ükshaaval elementide otspunktid telgede järgi paika keeras[10].

Valik genereeritud struktuure jõudis simulatsioonide abil analüüsimiseks insenerideni. Neist variantidest parim käis läbi veel ühe parameetrilise süsteemi, mis elementide asukohti täpsustas ning modelleeris kõik vajalikud lõikekohad ja tapid CNC töötlemiseks.[10]

Loodud meetod rakendas vaid 20 puitelementi, kuid on piisavalt paindlik, et valitud rakendus oleks võimalik lihtsal viisil skaleerida. Kuigi struktuur lahendatakse parameetriliste meetodite abil, on lähenemine siiski suuresti lähtuv inimlikust loomingust. Elementide paigutus on arhitektide poolt selgelt defineeritud ja parameetrilised tööriistad on vaid abivahend, mis struktuuri täpsustavad lubades katsetada suuremat hulka iteratsioone. Parameetriliste süsteemide etappideks jagamine lubab arhitektil ka iga sammu vahel sekkuda, mis tekitab hübriidse töömeetodi, kus inimene, loomulik vorm ja digitaalne tööriist toimivad tihedalt läbipõimunud koostöös.

8. P. Devadass jt. Robotic Fabrication of Non-Standard Material. - Generative Robotics. Toim S. Ahlquist. 2016, lk 206-213, https://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia16_206.pdf (vaadatud 8. IV 2026). lk 207

9. P. Devadass jt. Robotic Fabrication of Non-Standard Material.., lk 208

10. Z. Mollica, M. Self, Tree Fork Truss.., lk 144-147



Illustratsioon 5. Woodchip Barn struktuuri skeem



Illustratsioon 6. Woodchip Barn struktuur



Illustratsioon 7. Woodchip Barn ehitus

1.2.2 Case study: Torinosu, Hidakuma

Üks potentsiaalne suund puidu loomulikku vormi rakendada on analüüsida igat elementi nii süvitsi, et leitakse kõige kasulikum rakendus just sellele elemendile individuaalselt, minimeerides seeläbi vajadust igasuguse täiendava töötlemise järele. Loomulik vorm saab kasutusele võetud täies mahus koos kõikide eripärade ja ebakorrapärasustega.

Hidakuma büroo Torinosu nimeline projekt kehastab seda suhtumist kõige puhtamal kujul. Rakendust otsiti Jaapani Hida piirkonnas kasvavale puidule, kus järskude mäekülgede peal kasvavate puutüvede alumised otsad on lumekoormuse tõttu viltu vajunud ning enamus puid on seetõttu kõverad. Igat puitelementi on detailselt 3D skaneeritud ning leitud kõige efektiivsem ja esteetilisem viis neid kombineerida. Ehitatud installatsioon annab selgelt edasi arhitekti visiooni ning säilitab loodusliku vormi peaaegu täies mahus. Minimaalseks töötlemiseks, mida elemendid vajasid, rakendati liitreaalsust – lõikekohta näitav 3D mudel asetati kohakuti reaalse palgiga, mis seejärel mootorsaega parajaks lõigati.[11]

Kuid selline lähenemine on raskesti skaleeritav suuremat objektide seeriat vajavale ehitisele. Kui maht ja elementide hulk kasvab, on võimatu sellist vormide kombinatsiooni inimmõistuse abil leida ning ainukeseks viisiks on materjali käsitlemine läbi puhta parameetria. Selle kaudu on oht kaotada igasugune kontrollitav vorm ja praktiline väärtus.

Skaleerimisel tekitaks keerukust ka materjali dokumenteerimine ja ladustamine. Iga digitaalne representatsioon peab mingil kujul jääma seotuks reaalse elemendiga, et ehitamisel oleks konkreetne detail ülesleitav.

Infohulk, mida selline materjal endas kannab on igasuguseks mõistlikuks töötlemiseks lihtsalt liiga suur. Vaja on meetodit, mis lubaks neist mõelda lihtsamal ja selgemal viisil, ilma puitu ennast prussiks või planguks standardiseerimata.

11. N. Bruscia jt. Nemagari Crafting – Utilizing Bent-root Timber with Mixed-Reality Fabrication. – AIA/ACSA Intersections Research Conference: Resilient Futures. 2022, lk 164-169, https://www.acsa-arch.org/proceedings/Fall%20Conference%20Proceedings/ACSA.FALL.22/ACSA.FALL.22.21.pdf (vaadatud 8. IV 2026). lk 164-166



Illustratsioon 8. Torinosu skeem



Illustratsioon 9. Torinosu



Illustratsioon 10. Torinosu ehitamine liitreaalsuse abil

1.2.3 Case study: The Forest Datum

Projektis The Forest Datum on avastatud leidlik viis kaootilisest seeriast standardse loogika leidmiseks. Kasutatud on vaid hargnevaid oksi, mille topoloogiline muster on küll sarnane, kuid iga elemendi täpne kuju on siiski erinev.

Lahenduseks on lihtne loogika, mille abil on võimalik igat oksa õige nurga alt lõigates saavutada identsete omadustega elemendid. Kui oks hargneb suure nurga all, lõigatakse harud ära hargnemispunktile lähedal, kui oks hargneb väiksema nurga all, nihkub lõikejoon kaugemale. Selle tulemuseks on oksad, mis küll on kõik eri kujuga, kuid mille otspunktid on samas asukohas. Seega on erinevatest looduslikest vormidest saadud täielikult standardsed ehituselemendid, mille abil fermina toimiv sild ehitada.[12]

Selline lähenemine lihtsustab materjali vormi osaliselt, kuid säilitab sellele olulised füüsilised omadused ning rakendab neid efektiivselt. Kavala rakise abil, mis aitab oksi lõikamiseks õigesti paigutada, on kaotatud vajadus 3D skaneerimise järele. Elementide ühtemoodi funktsionaalsuse saavutamine kaotab ka vajaduse keerulise dokumentatsiooni ja ladustamise jaoks, mis üldiselt suure loomuliku materjali hulgaga kaasneks.

Seega on võimalik leida lahendusi, mis säilitavad puidu loomulikke väärtusi, kuid leiavad neile standardsema otstarbe. See ei tähenda, et kõik elemendid tuleb taandada ühte ja sama funktsiooni täitma, kuid puidu üldist ruumilist ülesehitust analüüsides on võimalik erinevaid korduvaid mustreid grupeerida ning leida nende kasutamiseks sobilikud tüpoloogiad.

Selline lähenemine lubaks efektiivselt rakendada puidu loomulike sisejõude ning säilitada iseloomulik looduslik esteetika ja käegakatsutavus. Samas on võimalik kogu projekteerimise ja ehitamise protsessis teha materjali kohta üldistusi ilma, et oleks vajadust iga elemendi detailidega liigselt arvestada. Puitelementide rakendamine peaks lähtuma võimalikult lihtsast süsteemist, mis pakub palju paindlikkust nii erinevate elementide valikuga kui ka struktuuri reaalse funktsioneerimise ja kasutatavusega.

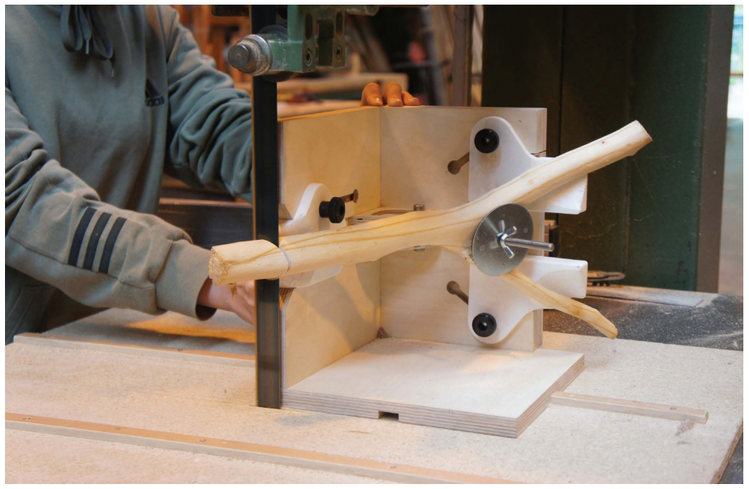
12. R. S. Aouf, AA Design & Make students devise simple way to build with tree forks. – dezeen, 29. IX 2025, https://www.dezeen.com/2025/09/29/aa-design-make-tree-forks-architecture/ (vaadatud 8. IV 2026).



Illustratsioon 11. Loodusest korduva geomeetria leidmine



Illustratsioon 12. The Forest Datum



Illustratsioon 13. Elementide standardseks lõikamise rakis



Illustratsioon 14. Standardsetest elementidest struktuur

1.3 Puidu topoloogiline analüüs

1.3.1 Loomuliku puidu väärtused

Puidu looduslik vorm, mida tänapäeva ehituses peetakse ületamist vajavaks takistuseks, võib tegelikult pakkuda õigesti kasutades palju võimalusi. Juured ja harud, mis tänapäeval on ehitusest välistatud, on ajalooliselt aidanud lahendada struktuuride kõige keerulisemaid detaile, kasutades ära puidu loomulikke omadusi ja tugevust. Loodusega kooskõlas ehitamine on tänapäeval kasutusel pigem hüüdlausena, kuid kunagi oli see ellujäämiseks hädavajalik.[13]

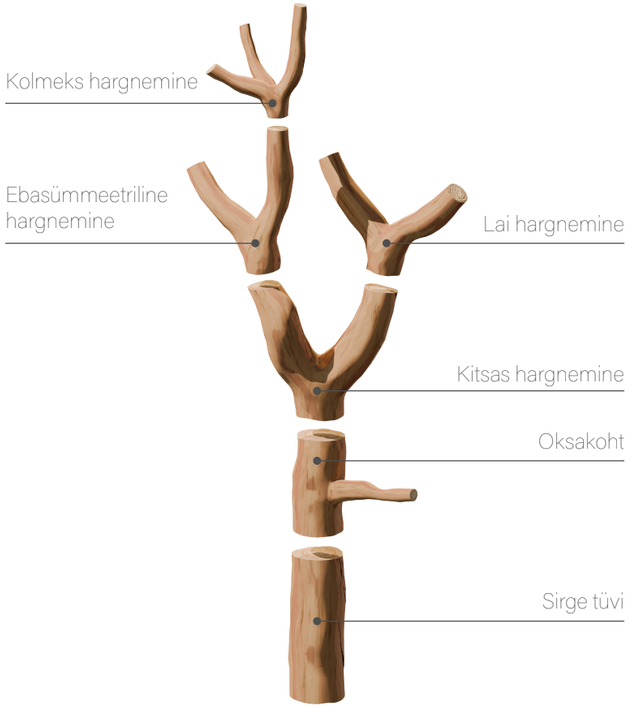
Loomuliku puidu kasutamisel on ka esteetiline väärtus, mis seob loodavat objekti tuntavalt loodusega. Liimpuit on küll suuremas osas looduslik materjal, kuid visuaalselt see tihti ruumi kasutajani ei jõua. Kuigi läänemaailmas on töötlemata puidu kasutamine suures osas välja surnud kunst, siis näiteks Jaapanis on see endiselt au sees. Korrapäratud palgid jäetakse tihti siseruumis eksponeerituks ning ebatavalisi vorme hinnatakse sedavõrd, et vahel suunatakse puid tahtlikult kõverana kasvama.[14]

Liimpuiduks töötlemine eemaldab puidult ka selle loomuliku anisotroopia – füüsikaliste omaduste erinevuse sõltuvalt vaatlemise ja kasutamise suunast. Seda koheldakse defektina, mis ei luba materjali kasutamist standardiseerida, kuid kui materjali loomupäraselt kasutada, on anisotroopsus hoopis tugevus. Ühe homogeense materjali asemel saab puitu kohelda laia kogumina erinevate spetsiifiliste omaduste ja funktsioonidega tüpoloogiatest.[15]

13. K. Zwerger, Wood and Wood Joints.., lk 42

14. K. Zwerger, Wood and Wood Joints.., lk 14-16

15. B. Brownell, Unprocessed Potential: Can Raw Trees Replace Engineered Timber? – Architect, 12. VI 2025, https://www.architectmagazine.com/technology/unprocessed-potential-can-raw-trees-replace-engineered-timber_o (vaadatud 8. IV 2026).



Illustratsioon 15. Puu levinumad loomulikud topoloogilised elemendid

1.3.2 Puidu mikrostruktuur

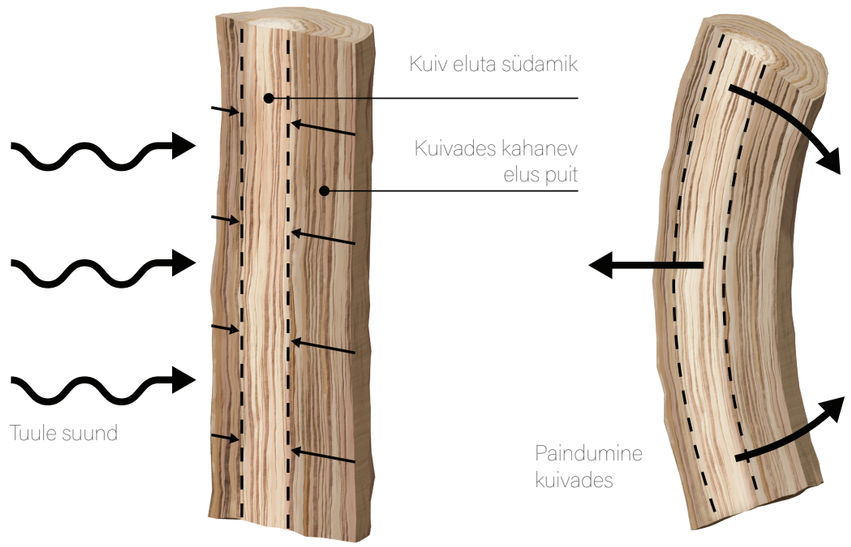
Puidu käsitlemine bioloogilise organismina standardse ehitusmaterjali asemel avab selle kasutamiseks uusi võimalusi ning taastab unustatud ehitusviise. Kõige olulisemaks faktoriks, millega arvestada, on puidu rakkudest tekkiv kiuline struktuur, mille kõige väiksemad eripärad on mikroskoopilised ning on evolutsiooniliselt optimeerunud puu stabiilsuse ja organismi toimimise tagamiseks[16]. Need samad omadused väljenduvad ka puitu ehitusmaterjalina kasutades. Kiudude jätkuvus tagab puu tervikliku tugevuse – ehituslikult tekib puidu kõige nõrgem punkt saagimiskohta, kus kiud on katkestatud ja puit ei toimi enam tervikliku loodusliku struktuurina.

Puidu rakud on torujad, lisaks mehhaanilisele tugevusele on nende eesmärgiks ka transportida vett. Raku välispind peab vett hästi, kuid puitu saagides rakud lõhutakse, mis muudab vedelikuvahetuse oluliselt kiiremaks. Toores palk kuivab otstest kiiremini ning võib seetõttu lõhestuda, kuiv puit hakkab otsest vett sisse imama ja võib mädaneda. Alternatiivne lähenemine on puitu töödelda ristikiudu kirve või muu käsitööriistaga. Sellisel viisil töödeldud pind on vähem ühtlane, kuid ka vähem tundlik niiskusele.[17]

Puidu bioloogiline ülesehitus on tundlik ka keskkonnale ja kasvutingimustele. Näiteks kui puu kasvab lagedal alal ning on ühest küljest avatud tugevamatele tuultele, on puu bioloogiliselt programmeeritud kasvama laiupidi kiiremini tuule eest varjus oleval küljel. Tüve südamik on seetõttu tsentrist eemal - lähemal tuulepoolsele küljele, andes puule vastupidavuse tugevatele tuultele. Puidu südamik on kuiv bioloogiliselt eluta materjal, seega puud maha võttes ja kuivatades kahaneb tuulest eemal olnud külg oluliselt rohkem ja palk paindub. Olles kasvutingimustest teadlik ja seda ehituses arvesse võttes, on selliseid palke kasutatud eelpingestatud talana.[16]

16. L. Allner jt. Conceptual Joining: Wood Structures from Detail to Utopia. Viin: Birkhauser, 2022. lk 22

17. K. Zwerger, Wood and Wood Joints.., lk 26



Illustratsioon 16. Tuulele avatud puu paindumine kuivades

1.3.3 Harude potentsiaal

Puuharu on morfoloogiline struktuur, mis tekib tüve või oksa bifurkatsioonist ehk kaheks sarnase diameetriga haruks jagunemisel. Arborismis ja ehituses peetakse tihti haru puu kõige nõrgemaks ja ohtlikumaks kohaks, kuid tegelikkuses ei pruugi see alati tõele vastata. Harud jagunevad mitmeks eri tüübiks, mida arvesse võttes on võimalik tuvastada hargnemisi, mis peidavad endas kogu puu kõige tugevamat struktuuri, mis on rohkem kui võimeline toetama kogu laia puukrooni.[18] Kui puu sirgetes osades kasvavad kiud üldiselt omavahel paralleelselt, siis puu hargnemiskohta risti läbi lõigates võib näha kahe haru vahel tihedat risti läbi põimunud kiudude võrgustikku, mis on võimeline vastu võtma koormuseid palju kolmemõõtmelisemalt kui puu tüvi[19]. Mida enam haru puu põhiteljest eemale kaldub, seda vertikaalselt ovaalsemaks selle lõige muutub, võimendades seeläbi puu konsoolseid omadusi[20]. Puud tervikuna vaadates võib bifurkatsioonikohta kohelda kui looduslikult optimeeritud struktuurset liitepunkti, kus jõud on katkestusteta tüvele üle kantud[21].

Ajalooliselt on ehituses ära kasutatud hargnevaid palke näiteks Põhja-Saksamaal nii postide kui taladena. Võrreldes sirge palgiga annab lisaks tekkiv kolmas toetuspunkt hoonele oluliselt rohkem jäikust.[22]

Puu haru on kõrge ehitusliku potentsiaaliga element, mis on tänapäevasest ehitusest kõrvale jäetud. Tegemist on keerulisema vormiga kui levinud tööstuslik puit, kuid analüüsides on selle omadusi siiski võimalik lihtsustatult arvuliselt määratleda. Seetõttu tegelebki edasine töö harudele kõige optimaalsema kasutuse leidmisega, arvestaks puidu loomulikke omadusi ning lubades neil tugevustel arhitektuuris rakendust leida.

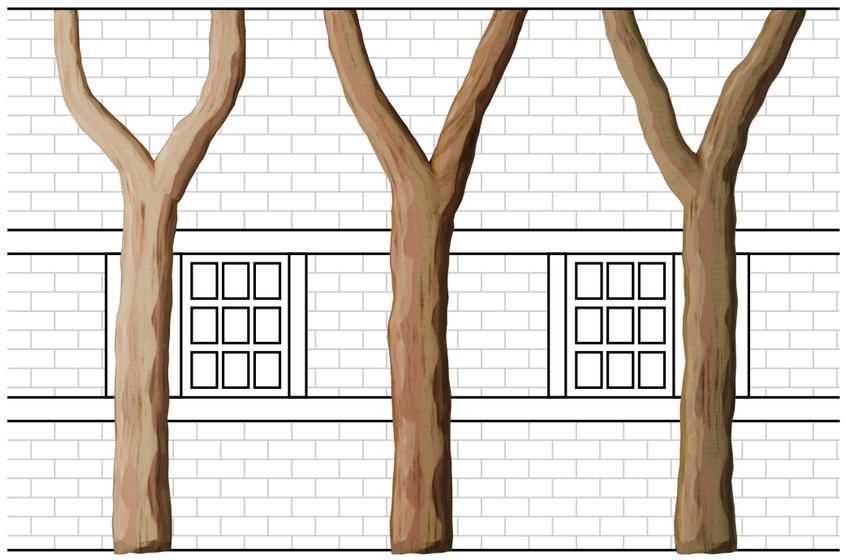
18. C. Drénou jt. Demystifying Tree Forks: Vices and Virtues of Forks in Arboriculture. – Journal of Botany Research 2020, vol 3, issue 1, lk 100-113, https://www.researchgate.net/publication/346234075_Demystifying_Tree_Forks_Vices_and_Virtues_of_Forks_in_Arboriculture (vaadatud 8. IV 2026). lk 100-101

19. B. Brownell, Unprocessed Potential

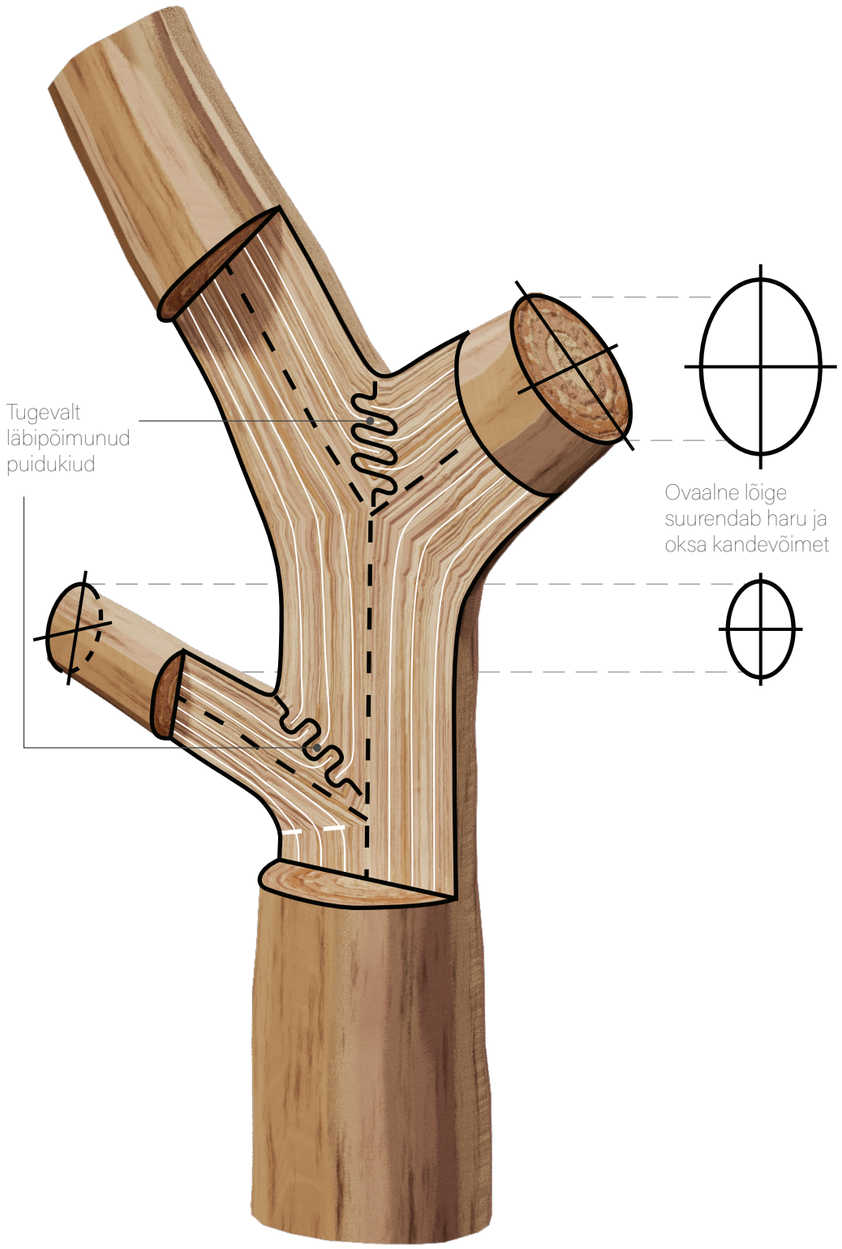
20. Z. Mollica, M. Self, Tree Fork Truss.., lk 207

21. L. Allner jt. Conceptual Joining.., lk 132

22. K. Zwerger, Wood and Wood Joints.., lk 50



Illustratsioon 17. Hargnevast puidust postid Põhja-Saksamaal



Illustratsioon 18. Puu hargnemiskoha sisemine struktuur

1.3.4 Harude tüübid

Puutüve hargnemist jaotatakse neljaks tüübiks, mis on visuaalselt eristatavad ning annavad vihjeid ka struktuursete omaduste kohta[23].

Põhiharu (*main fork*) tekib üldiselt puu peamise kasvutsükli lõpus ning tähistab tüve lõppu. Enamiku puuliikide puhul kasvavad alumised oksad peamiselt horisontaalselt, tüve kõrgusesse kasvades hakkavad oksad aina ülespoole kalduma. Kui kasv jõuab sinnamaale, kus peaaegu vertikaalsetel okstel on oht hakata omavahel ristuma, lõpetab tüvi sirgelt kasvamise ning hargneb kaheks. Sellega algab puu kasvus järgmine periood ning oksad hakkavad taas kasvama horisontaalselt kuni taaskord ruum otsa saab ning harud peavad omakorda hargnema. Põhiharu tekitab rekursiivse mustri ning jagab puu kasvuea perioodideks – iga perioodiga vertikaalne kasv aeglustub ning kasv laiusesse suureneb, et puu massi toestada. Põhiharud tekivad peamiselt lehtpuudes, kuid ka mõnedes okaspuu liikides.[23]

23. C. Drénou jt. Demystifying Tree Forks.., lk 104-105



Illustratsioon 19. Põhiharu



Illustratsioon 20. Korduv haru

Korduv haru (*recurrent fork*) annab noortele puudele paindlikkuse otsida valgust ja takistustest mööda pääseda. Kui tüve kasvamine ei ole mingist punktist edasi edukas lõpetab see kasvamise ning tüve vastutused antakse edasi lähimale oksale. Oks pöördub ajapikku vertikaalsemaks ning võtab üle suure osa puu ressurssidest, et kasvada kiiresti nii pikkusesse kui laiusesse. Korduv haru on kõige levinum troopiliste puude seas.[23]

24. C. Drénou jt. Demystifying Tree Forks.., lk 101-105

Ooteharu (*standby fork*) juhtub kui puul on valgust või muid ressursse ajutiselt vähe. Tüvi hargneb kaheks horisontaalseks haruks, et säästa kõrgusesse kasvamiseks kuluvaid ressursse ning suurendada fotosünteesi pinda. Olukorra paranedes jätkab puu vertikaalset kasvu, tihti tüvest uue haru kasvatamisega.[24]



Illustratsioon 21. Ooteharu



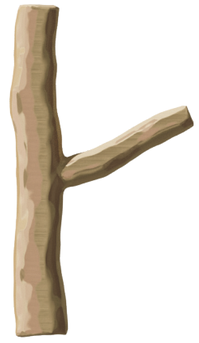
Illustratsioon 22. Juhuslik haru

Juhuslik haru (*accidental fork*) tekib kui peamine haru saab vigastada. Sellisel juhul võtab mõni teine tugevam haru tüve rolli üle või kasvatab vigastatud punktist välja ühe või mitu uut peamist haru. Juhusliku haru puhul võib tüves tekkida sissekasvanud koor, mis tekitab materjalis mehhaanilise nõrkuse, kuid vahel suudab puu vigastuse ümber paksu paisunud koha kasvatada, mis kompenseerib nõrkust ning võib lõpuks olla tugevam kui enne vigastust.[24]

25. L. Allner jt. Conceptual Joining.., lk 31

Lisaks puu peamistele hargnemistele on ehituslik potentsiaal ka oksakohtadel, kus sirgest tüvest kasvab ühele küljele oks. Käesoleva uurimustöö raames käsitletakse ka oksakohti harudena, kuid bioloogilises ja morfoloogilises mõttes on tüvest oksa kasvamine täiesti erinev struktuur bifurkatsioonist[25]. Puu standardseks palgiks töötlemisel tekitab oksakoht tüve üldiselt sirgjoonelises kiustikus moonutusi, mis palki nõrgestavad. Iga oksakoht vähendab palgi ehituslikku kvaliteeti. Ent terviklikul loomulikul kujul on tegemist tugeva konsoolse sõlmpunktiga.[23] Oksakoha puidu tihedus on suurem kui ülejäänud tüves ning ka rakukestade tselluloosist ülesehitus on erinev, muutes liitekoha veel tugevamaks. Ka oksa enda keskmine tihedus (0,95 g/cm^3) on suurem kui tüve oma (0,45 g/cm^3) andes okstele rohkem vastupidavust paindele, mis looduses on vajalik tuule ja lumekoormuse talumiseks[26].

26. L. Allner jt. Conceptual Joining.., lk 32-35

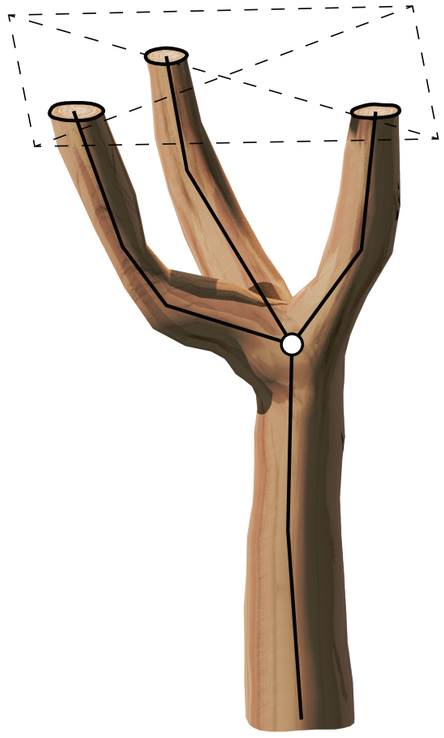


Illustratsioon 23. Oksakoht

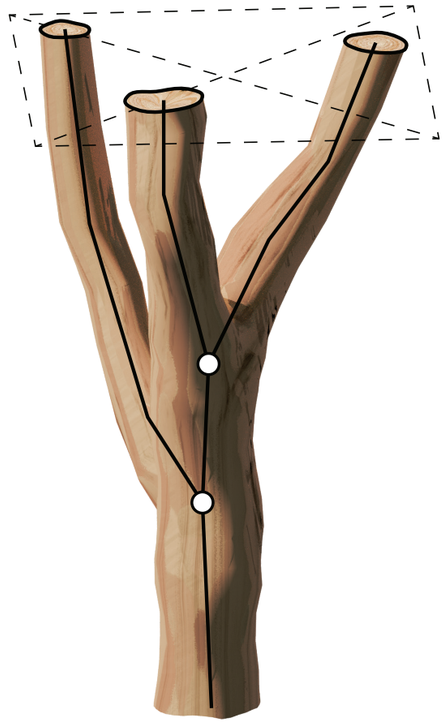
Ehituses kasutamiseks on kõige sobilikumaks bifurkatsiooni tüübiks põhiharud. Nendes jagunevad harudele rakendatud jõud tüvele kõige võrdsemalt ning puidu kiuline struktuur on kõige jäigem. Ka juhuslikel harude rakendamine on võimalik, kuid nende puhul on vaja igat olukorda kriitiliselt analüüsida, et kandevõimele adekvaatne hinnang anda. Lisaks saab kasutusele võtta ka oksakohad tugevate konsoolsete elementidena, kuid tuleb arvesse võtta okste jämedust ja vanust.

Puutüvede topoloogiat uurides selgub, et lisaks kaheks hargnemisele on võimalik kasutusel võtta ka kolmeks hargnemist. Looduses, kus puud kasvavad tihedalt koos on puu ühes punktis kolmeks hargnemine pigem haruldane nähtus, kuid linnakeskkonnas, kus puudel on palju ruumi, ei teki sama tihedat konkurentsi kui metsas. Seetõttu tekib puudel hargnemisi rohkem ning võivad kasvada kodominantsed tüved. Kodominantseks nimetatakse puu haru, mille läbimõõt on peatüve omast vähemalt 1/3. Linnapuudel on levinud probleemiks selliste harude liigne hulk, mille mass võib osutuda puu jaoks liiga suureks ning oksad võivad murduda. Teistes olukordades võib olla puu ebaloomulikult tihe hargnemine soositud ka teadliku kärpimise poolt, mille abil suunatakse puud tihenema, et rohkem varju pakkuda. Seega võib linnakeskkonnas leida kolmeks hargnevaid puid oluliselt tihemini kui looduses.[27] Lisaks ühes punktis kolmeks hargnemisele annavad struktuurselt samalaadse funktsionaalsuse ka puud, kus kaks kaheks hargnemise punkti on üksteisele lähestikku ning ühes horisontaalses pinnas harusid läbi lõigates on võimalik saavutada kolm ülemist otspunkti.

27. The Importance of Structural Pruning in Urban Environments. – Independent Tree Service, Inc. https://independenttreeservice.com/general/the-importance-of-structural-pruning-in-urban-environments/ (vaadatud 8. IV 2026)



Illustratsioon 24. Ühes punktis kolmeks hargnemise tasapindne lõikamine



Illustratsioon 25. Kahes lähestikkuses punktis kaheks hargnemise tasapindne lõikamine

1.4 Materjalivaliku kriteeriumid

1.4.1 Lehtpuude potentsiaal

Tänapäeval on ehituses üldiselt levinud pigem okaspuude kui lehtpuude kasutus. Okaspuud moodustavad kõikidest Eesti puudest 64%, mände on 43% ja kuuski 21%. Nende sirgem tüvi ja üldiselt ühtlasem sisemine struktuur muudab need lehtpuudega võrreldes sobilikumaks nii palkide, plankude kui ka liimpuidu tootmiseks[28]. Okaspuud on oma vaigusisalduse tõttu ka välitingimustele ja mädanemisele vastupidavamad[29].

Lehtpuud on oma füüsikaliste omaduste poolest küll tugevad, kuid ebaühtlase kuju tõttu enamasti kasutusel pigem mööbli või põrandalaudadena. Sellest tulenevalt hinnatakse lehtpuid pigem esteetilistel alustel kui tugevuse järgi.[28] Lehtpuude kõvadus muudab ka selle saagimise ja puurimise raskemaks. Suuremas pildis on kliimasoojenemise tõenäoline tagajärg, et kogu maailma kontekstis nihkub okaspuude leviala põhjapoole ning muutub majanduslikult vähem otstarbekaks, soodustades seeläbi lehtpuude kasutuselevõttu ka ehituses[30].

Käesolevas uurimistöös keskendutakse peamiselt lehtpuudele, et väärtustada ressurssi, mis hetkel ehituses olulist kasutust ei leia. Loomuliku vormi ja omaduste rakendamine saaks toimida ka okaspuude puhul, kuid kuna neid on üldiselt sirgete tüvede tõttu lihtne rakendada ka tavaehituses, on olulisem leida uus meetod lehtpuude jaoks. Ka lehtpuude kõvadusest tulenevat töötlemise keerukust on võimalik oluliselt vähendada kui materjali töödelda minimaalselt ning selle tugevus lubaks kandestruktuuride ristlõikeid okaspuudega võrreldes oluliselt vähendada[31].

28. J. S. Jensen, Breeding of Broadleaves in a Nordic Perspective. – Baltic Forestry 2000, vol. 6, no. 2(11), lk 67-77, https://balticforestry.lammc.lt/bf/PDF_Articles/2000-6%5B2%5D/Breeding%20of%20Broadleaves%20in%20a%20Nordic%20perspective.pdf (vaadatud 8. IV 2026). lk 68

29. T. Vabamäe, Outlook on mechanical wood processing in Estonia. - Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 2014, https://jukuri.luke.fi/server/api/core/bitstreams/d3544c4c-ceb9-4e4f-99ff-d3e129931a09/content (vaadatud 8. IV 2026). l

30. L. Allner jt. Conceptual Joining.., lk 15

31. L. Allner jt. Conceptual Joining.., lk 72

1.4.2 Koostöö raietega

Puidu kõige hinnatumaks osaks tavakontekstis on sirge tüvi, mida saab rakendada ehituses või tootmises väärtusliku toormaterjalina. Kuid märkimisväärse osa kõikide raiutud puude massist moodustavad ka ebakorrapärased tüved, hargnemiskohad ja oksad - vähem väärtuslik materjal, mis leiab kasutust puitlaastplaatidena, puitkiudplaatidena, küttepuudena või paberitööstuses.[32]

Leides viise neid ebastandardseid puitelemente ehituses kasutusele võtta ilma täielikult ümber töötlemata tekitab sellele materjalile lisaväärtust nii ehitamise kui ka raie poole pealt. Arhitektil või ehitajal oleks võimalusel kasulik eelistada loomulikku puitu, sest puuduvad töötlemise kulud ning materjal on väiksema ökoloogilise jalajäljega. Ka raiet läbi viivatel ettevõtetel oleks kasumlikum ebastandardne puit suunata võimalikult väheste vaheetappidega otse ehitusse.

Loomuliku puidu rakendamine ehituses ei püüa asendada praegust puidutööstust ega ka sellega konkureerida. Tegemist oleks praeguse tööstuse täiendava lisafunktsiooniga, kus raie ja ehitus saavad olla teatud olukordades tihedas koostöös ning vähendada ülejääke ja säästa materjali.

32. S. D. Sofuoglu jt. A Survey for Determination of Wastage Rates at Massive Wood Materials Processing. - Wood Research 57 (2): 2012, lk 297-308, https://www.woodresearch.sk/wr/201202/12.pdf (vaadatud 23. IV 2026).

33. Raielubade andmekogu – Tallinn, https://www.tallinn.ee/et/teenused/raieluba (vaadatud 8. IV 2026).

1.4.3 Linnapuud ehitusmaterjalina

Üheks väherakendatud ressursiks on linnades kasvavad puud. Tallinna linna raielubade analüüsist tuleb välja, et aastal 2025 anti välja 2370 raieluba. Neist 27% moodustavad tõenäoliselt ehituseks sobilikud puud, millest peamiseks on ehitusalused raied ja hooldusraied. Ülejäänud raielubadest suurem osa on sanitaarraied ja kahjustatud puud. Need puud võivad olla ehituseks sobimatud, kuid see sõltub kahjustuse ulatusest. Näiteks kuivanud puu võib ehituseks olla sobilik kui see veel mädanenud ei ole ning ka mädanemine võib olla lokaalne ja ei muuda tingimata tervet puud kasutuskõlbmatuks.[33]

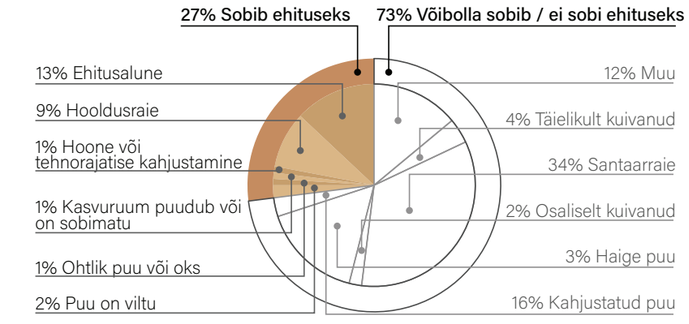
Jättes välja kasutuskõlbmatud puud ning võttes arvesse iga liigi kaupa keskmiselt mitu puud ühe raieloaga maha võetakse, on tulemuseks Tallinnas aastal 2025 raiutud ligikaudu 3900 puud[33], millest suurem osa leiab hetkel kasutust vaid küttepuuna.

Liigikaupa vaadates sobivad käesoleva projekti jaoks kõige paremini puuliigid, kus hargnemist esineb tihti. Vaatluste põhjal on kõige sobilikuma kujuga tamm, hobukastan, jalakas, pärn, vaher ja saar. Ka kask hargneb tihti, kuid selle harude vaheline nurk on enamasti liiga väike, et tugevat konsoolset ühendust tekitada. Sobilikest liikidest raiutakse kõige enam vahtraid (406 tükki) ja jalakaid (279 tükki), arvestatavas koguses on ka saarepuid (116 tükki).[33]

		Raielubasid aastal 2025	Raiutud puid aastas	Keskmine läbimõõt (cm)	Tugevaid hargnemisi
Lehtpuud	Tamm	31	40	53	jah
	Pöök	2	2	50	ei
	Hobukastan	47	56	57	jah
	Haab	67	174	40	ei
	Pappel	40	92	70	jah
	Jalakas	199	279	48	jah
	Pärn	49	74	48	jah
	Vaher	168	406	39	jah
	Saar	68	116	38	jah
	Kask	440	572	32	ei
Lehtpuud kokku		**1112**	**1811**		
Okaspuud	Mänd	571	1713	28	ei
	Kuusk	193	386	27	ei
Okaspuud kokku		**764**	**2099**		
Kõik puud kokku		**1876**	**3910**		

Projektiks kõige sobilikumad liigid

Illustratsioon 26. Tallinna raiete tabel



Illustratsioon 27. Tallinna raiete põhjused

2 Rakendus

2.1 Vormiotsingud: Topoloogiast tüpoloogiaks

2.1.1 Katsetused läbi maketeerimise

Esimeseks katseks oli Tallinnas elus puude 3D skaneerimine fotogrammeetria abil. Fotogrammeetria on tänapäeval kõigile kättesaadav tehnoloogia, mille abil on võimalik mudeleid luua tavalise telefonikaameraga. Käesolevas projektis on iga mudel loodud 150 eri nurga alt tehtud foto põhjal. Puude skaneerimine leidis aset talvel, et lehed tüve ja oksi ei varjaks.

Saadud 3D mudelid andsid edasi puude alumise osa üldist vormi, kuid kuna kõik fotod olid tehtud silmakõrguselt, jäid kõrgemal olevate harude mõned detailid peitu ning tekkivad mudelid olid kohati lünklikud ja ebatäpsed. Täpsemat tulemust oleks võimalik saavutada drooni abil skaneerides. Siiski andsid puude mudelid lihtsustatud ülevaate sellest, milliseid ja kui palju ehituslikke elemente linnapuudest saada võiks. Kasutades väiksemaid hargnemisi, kus haru laius on umbes 1,5 meetrit sai ühest puust keskmiselt neli elementi, suuremaid üle kahe meetri laiusid harusid oli üldiselt võimalik saada kas üks või kaks tükki.



Illustratsioon 28. 3D skaneeritud puude haruelemendid



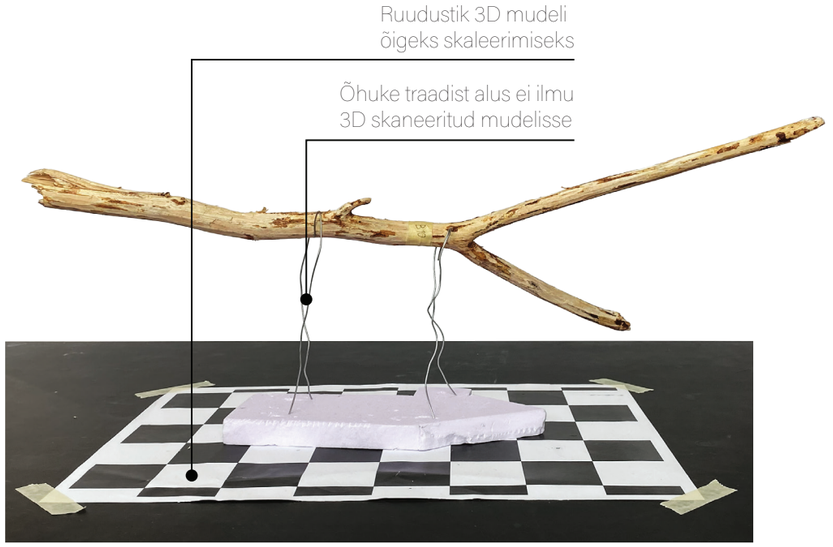
Illustratsioon 29. 3D skaneeritud puud

Elus puid skaneerides jäid kõik katsetused digitaalseks ning ei olnud võimalik ühtegi vormiideed füüsiliselt testida. Seetõttu pöördus fookus väiksemate okste poole, mis oleksid oma topoloogialt analoogsed puu tüve hargnemisele. Neid Merimetsast ja Kõrvemaalt kogutud oksi oli võimalik kasutada nii füüsiliste maketikatsetuste jaoks kui ka digitaalselt suuremaks skaleerida nii, et need näitlikult asendaksid tüve hargnevaid elemente.

Okste 3D skaneerimisel oli oluline elemendid õhku tõsta, et fotod kirjeldaksid neid iga külje alt. Selle jaoks sai ehitatud oksi toetav traadist alus. Traat oli piisavalt õhuke, et 3D mudelis mitte kajastuda. Esimeste katsetega oli probleemiks ka okste digitaalne skaala – fotogrammeetria suudab imiteerida suhteliselt täpset geomeetriat, kuid ei ole võimeline hindama objektide reaalset suurust. Selle jaoks sai okste taustale paigutatud kindlate mõõtudega prinditud maleruudustik, mille järgi oli lihtne digitaalses mudelis oksad õigesti skaleerida.



Illustratsioon 30. Okste kogumine



Illustratsioon 31. Okste 3D skaneerimine fotogrammeetria abil



Illustratsioon 32. 3D skaneerimise tulemus



Illustratsioon 33. Kogutud oksad

Selleks, et puidu orgaanilist kuju töötlemata kujul standardsemate ehitusmaterjalidega kombineerida, peavad teised elemendid kopeerima puidu vormi, et tekitada täpne liitekoht. Seda võimaldaksid näiteks 3D prinditud või CNC freesitud ühenduskohad.

Väikesel skaalal maketeerides kerkis esimese küsimusena fotogrammeetrilise mudeli ja 3D printimise täpsus. Mõlemas protsessis tekivad mõõtevead - millise tolerantsiga arvestama peab?

Selleks mudeldati kahe oksa vahele ühenduslüli, mille pind ühtis okste negatiivse vormiga. Okste 3D mudel on lihtsustus, mis ei kanna endas puidu pinna igat detaili, seetõttu peab vahelüli jätma ruumi nendeks ebatäpsusteks.

Mõningate erinevate tolerantsidega katsete järel õnnestus 3D printida vahelüli, mis puidu vormiga täpselt kokku sobitus ning näitas, et fotogrammeetria mõõteviga ja 3D printimise täpsus klapib kokku täpsusega alla 0,5 millimeetri.

Katse näitas, et loomuliku kujuga puitu on 3D prinditud või ka CNC freesitud vahelülide abil võimalik kombineerida standardsemate ehitusmeetoditega, mis avab orgaanilise materjali ehituses kasutamiseks mitmeid võimalusi.



Illustratsioon 34. Makett



Illustratsioon 35. Makett

Järgmine katse tegeles okstest kandva struktuuri loomisega, kus 3D prinditud tükid on täitematerjali rollis. Idee oli, et oksad toetuvad üksteise hargnemispunktidele ning 3D prinditud plastikust element aitab digitaalses mudelis loodus paigutuse füüsilisele taasloomisele. Kuid skaneeritud elementidega digitaalne töötamine osutus arvatust keerulisemaks. Käsitsi katsetades oli lihtne leida okstest mõistlik struktuur, kuid 3D mudelis, kus pinnad üksteisega lõikuda saavad ning elementide puutepunkti on raske hinnata, ei olnud võimalik sellist struktuuri täpselt ehitada.

Lahenduseks oli Grasshopperi programmis parameetrilise evolutsioonisüsteemi loomine, mis hindas okste lähimate punktide kaugust ning kattuvaid osasid ning neid iteratiivselt optimeeris. Selle tulemusel oli saadud struktuuris alusel võimalik mudeldada ja 3D printida vajalikud vahelülid. Selgus siiski, et puutepindadel põhineva struktuuri loomine digitaalsete vahenditega on problemaatiline. 3D prinditud vormidega sobitumiseks tuli oksi oluliselt painutada, mis reaalses ehituses ei oleks mõistlik lahendus. Paar nädalat peale maketi valmimist olid oksad kuivamise tõttu ka omakorda moondunud ning üks neist murdus. See näitas, et puitu ei ole võimalik kohelda 100% täpse staatilise materjalina, vaid on vaja leida mõistlik lihtsustus selle kasutamiseks, mis lubaks teatud piirini paindeid ja suuremat tolerantsi.

Katsete suurimaks takistuseks osutus reaalse materjali ja digitaalsete elementide ühendamine ühte disainiprotsessi. Oksi käes hoides oli lihtne kiirelt katsetada vormiideid, kuid sellega edasi töötamiseks tuleb need kanda üle ka digitaalsesse mudelisse. Meie inimlikud tajud füüsilises ruumis lubavad ebakorrapäraseid elemente paremini mõista ja tunnetuslikult leida ratsionaalseid viise neid kombineerida, kuid need meetodid ei tõlgendu hästi abstraktsesse digitaalsesse maailma, kust puuduvad materjali tahkus, gravitatsioon ning kahe silma sügavustaju.

Okstest digitaalset lihtsustust – füüsiline vorm tuleb tõlgendada matemaatilisemaks mustriks, mis digitaalseks töötlemiseks sobilikum on. Seejärel on vaja nende kasutamiseks kindlat reeglistikku, mis lubaks arhitekti idee saavutamiseks rakendada digitaalsemaid meetodeid. Eesmärgiks on luua protsess, kus inimene saab määrata ligikaudse vormi, kuid reaalsete elementide täpne paigutus leitakse läbi parameetrilise lähenemise, mis suudab puidu suurt andmehulka arvesse võtta



Illustratsioon 36. Makett

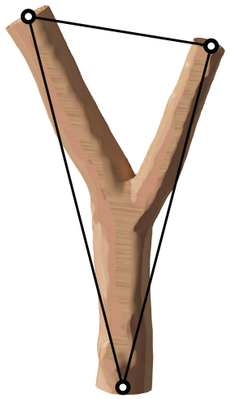
2.1.2 Vormi lihtsustamine

Loomulike elementide kasutusele võtmine arhitektuuris vajab neist ratsionaalset lihtsustust – inimlikud tajud, mis lubavad meil ruumis keerulisi vorme käsitleda, ei toimi ekraani vahendusel sama hästi. Digitaalses ruumis otse 3D skaneeritud puitelementide kasutamine on esiteks andmemahu poolest koormav ning teiseks ei ole selliste vormidega töötamine intuitiivne. Lihtsustamine lubaks leida sobilikke funktsioone ilma esialgu elementide liigselt detailset vormi arvesse võtmata.

Lihtsustamise esimeseks sammuks oli Grasshopperi abil programmi loomine, mis genereeriks okste detailse mesh mudeli põhjal telgjooned ja ristlõiked. Seeläbi säilivad kõik loodusliku elemendi olulised parameetrid, kuid uue abstraktsema lihtsustusega on kergem katsetusi teha. Originaalne mesh, telgjooned ja ristlõiked jäävad kõik omavahel seotuks, lubades modelleerimiseks kasutada lihtsustust, kuid lõplikus mudelis asendada need tagasi originaalse detailse mesh-iga.



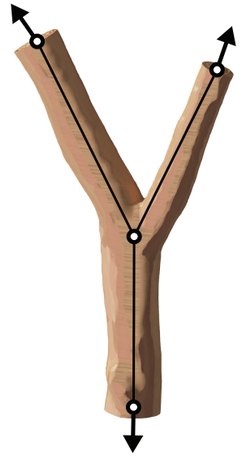
Illustratsioon 37. Lihtsustamine telgjooneks ja ristlõigeteks



Illustratsioon 38. Lihtsustamine kolmeks otspunktiks

Selline lihtsustus töötas manuaalsete katsetuste jaoks hästi, kuid struktureerituma parameetrilise süsteemi jaoks osutus ka see infohulk liiga mahukaks ning tekkis vajadus veelgi suurema abstraktsioonastme järele. Kõige suurem võimalik lihtsustus on arvestada ainult hargneva puitelemendi otspunktidega, mis seejärel teiste elementidega ühenduspunktidena toimiksid. Elementi defineerib ainult kolm punkti, mis muudab võimalikuks selle planaarsena kohtlemise. Planaarne vaade lubab katsetusi teha kiirelt ja mugavalt, määrates juba ette konkreetsed liitepunktid.

Kuigi planaarsed katsetused andsid hea võimaluse vormiotsinguteks, läheb selles lihtsustuses kaduma osa puitelemendi olulist kolmemõõtmelist infot, mis on ruumis vaatlemiseks vajalik. Järgmine lihtsustus on detailse telgjoone ja kolme punkti lihtsustuse vaheline variant. Määratud on kolm harude otspunkti ning keskel asuv hargnemispunkt, mis kokku annavad Y-kujulise abstraktse kujutise oksast. Elemente otsapidi ühendades võib oluliseks osutuda ka haru otsa täpne suund kolmemõõtmelises ruumis, mis ei pruugi täpselt ühtida eelnevate punktide poolt määratud haru üldise suunaga. Seetõttu on vajalik ka igale harule määrata haru otsmise osa järgi suunavektor. Seega on võimalik hargnevat elementi lihtsustatult kujutada ilma olulist ruumilist infot kaotamata kolme telgjoone (ehk nelja punkti) ja kolme vektori kaudu.



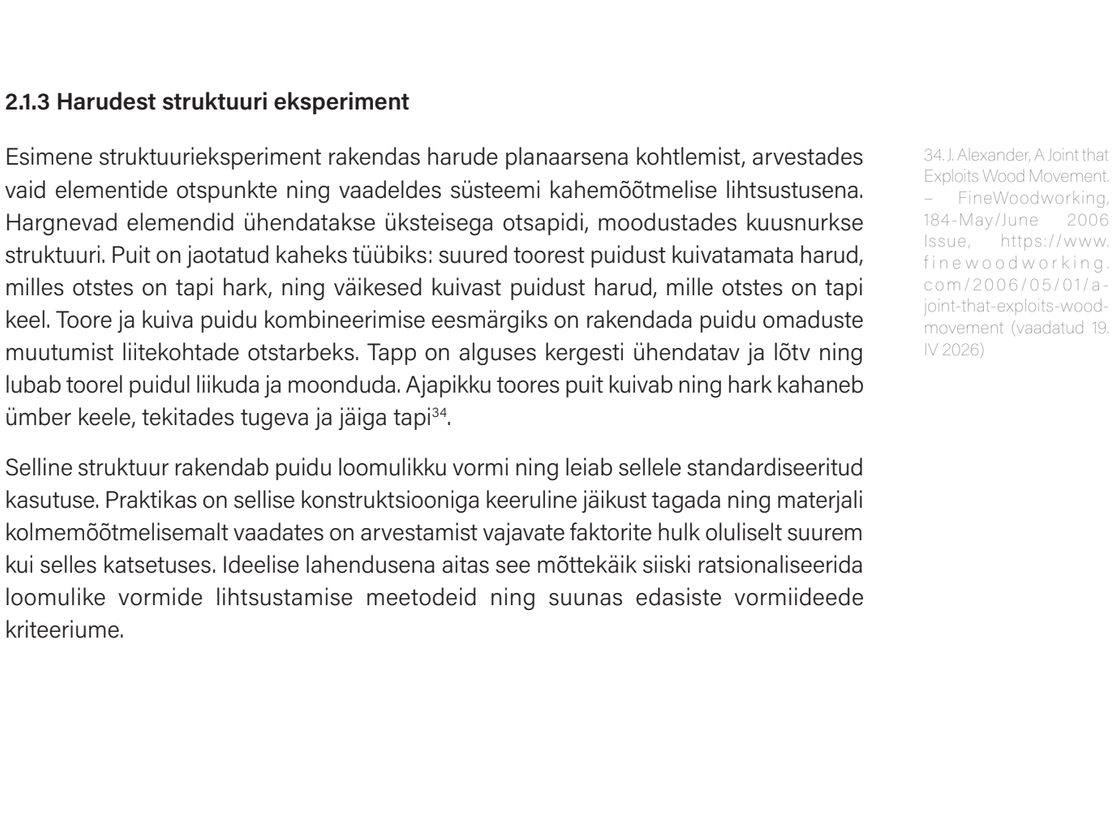
Illustratsioon 39. Lihtsustamine telgedeks ja otste suunavektoriteks

2.1.3 Harudest struktuuri eksperiment

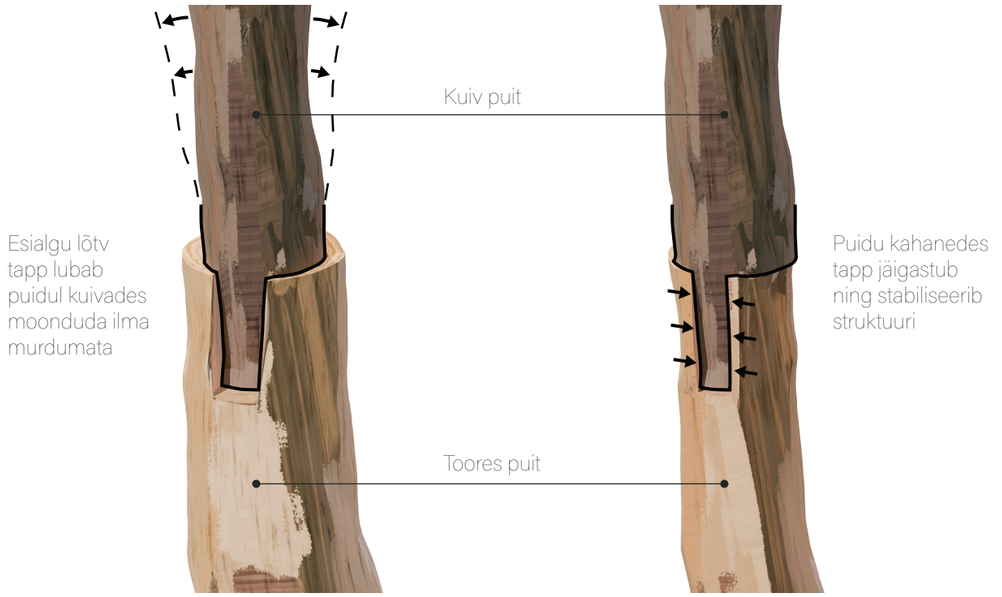
Esimene struktuurieksperiment rakendas harude planaarsena kohtlemist, arvestades vaid elementide otspunkte ning vaadeldes süsteemi kahemõõtmelise lihtsustusena. Hargnevad elemendid ühendatakse üksteisega otsapidi, moodustades kuusnurkse struktuuri. Puit on jaotatud kaheks tüübiks: suured toorest puidust kuivatamata harud, milles otstes on tapi hark, ning väikesed kuivast puidust harud, mille otstes on tapi keel. Toore ja kuiva puidu kombineerimise eesmärgiks on rakendada puidu omaduste muutumist liitekohtade otstarbeks. Tapp on alguses kergesti ühendatav ja lõtv ning lubab toorel puidul liikuda ja moonduda. Ajapikku toores puit kuivab ning hark kahaneb ümber keele, tekitades tugeva ja jäiga tapi[34].

Selline struktuur rakendab puidu loomulikku vormi ning leiab sellele standardiseeritud kasutuse. Praktikas on sellise konstruktsiooniga keeruline jäikust tagada ning materjali kolmemõõtmelisemalt vaadates on arvestamist vajavate faktorite hulk oluliselt suurem kui selles katsetuses. Ideelise lahendusena aitas see mõttekäik siiski ratsionaliseerida loomulike vormide lihtsustamise meetodeid ning suunas edasiste vormiideede kriteeriume.

34. J. Alexander, A Joint that Exploits Wood Movement. – FineWoodworking, 184-May/June 2006 Issue, https://www.finewoodworking.com/2006/05/01/a-joint-that-exploits-wood-movement (vaadatud 19. IV 2026)



Illustratsioon 40. Makett



Illustratsioon 41. Ajapikku kahanevad ja jäigastuvad tapid

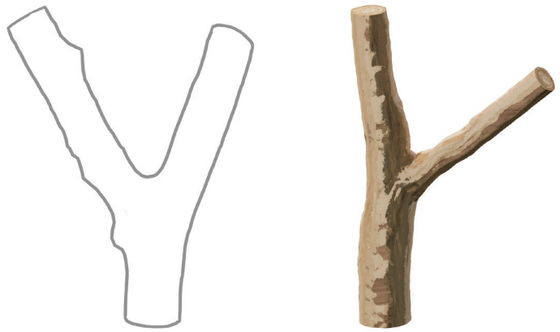


Illustratsioon 42 Harudest kuusnurkne struktuurieksperiment

2.1.4 Orgaaniline Vierendeeli tala

Kogutud ebastandardsed puitelemendid jaotuvad suures pildis kaheks tüübiks: harud ja oksakohad.

Oksakoha puhul on esialgsete katsetuste jaoks koheldud tüve osa sirgena, mis lubab elemente vaadelda planaarsetena. Eeldusel, et kättesaadav element on igast otsast pikem kui reaalses konstruktsioonis vaja, võib harude pikkused lõigata vastavalt vajadusele, seega on ainsaks elemendist tulenevaks oluliseks muutujaks oksa nurk tüve suhtes.



Illustratsioon 43. Tala rakendab oksakohaga elemente

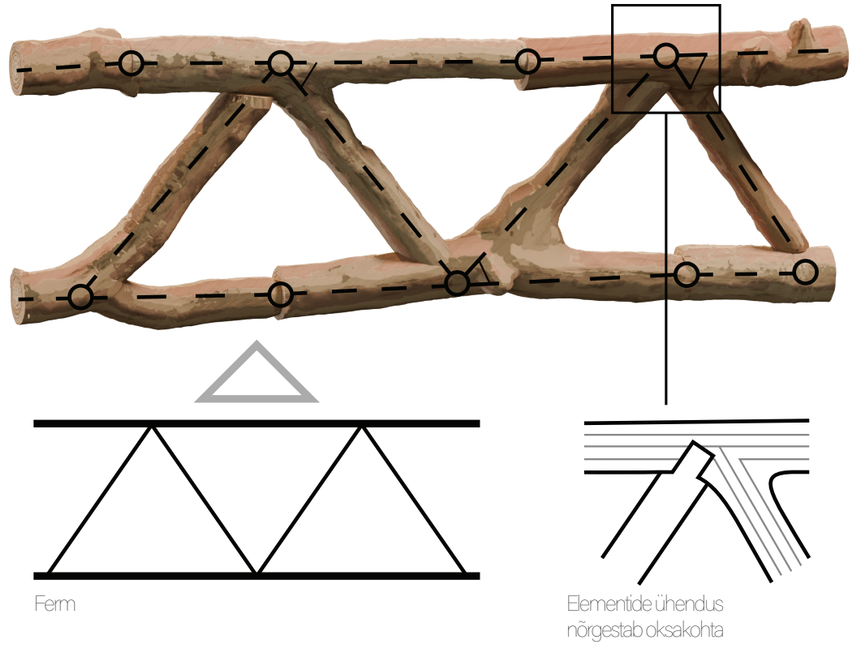
Vormikatsetustest kõige ratsionaalsemaks ja loomulikele hargnemistele kõige sobilikumaks lahenduseks osutus teraskonstruktsioonidest inspireeritud struktuur, mis jääb tavalise terasfermi ja Vierendeeli tala vahele. Fermile annab tugevuse kolmnurkne struktuur, mis ei nõua liitepunktidelt jäikust. See nõuab ühes punktis nelja varda kohtumist. Puitu kasutades tähendaks see, et iga hargnemiskoht peab vastu võtma veel ühe varda täpselt hargnemise punktis, kuid see nõrgestaks harus olevat kiudude struktuuri liiga palju.

Vierendeeli tala ühendab kahte horisontaalset vööd vertikaalsete varrastega. Tala tugevus ei tulene üldisest struktuuri skeemist, vaid liitekohtade jäikusest.[35] See lähenemine sobib hästi ka puidule, rakendades tüve ja oksa vahelist tugevat kiustikku jäiga liitekohana. Tüvega täiesti risti kasvavaid oksi esineb puudes siiski harva. Seega laenab struktuur tavalistelt fermidelt diagonaalsete vahevarraste skeemi ning Vierendeeli talalt jäikade ühenduste kasutamise eesmärgil, et mitu vahevarrast ei peaks ühes punktis kohtuma.

35. R. D. Pearson, Design of Vierendeel Trusses. - Missouri S&T Library and Learning Resources. 1959, https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5536/ (vaadatud 10. IV 2026).



Illustratsioon 44. Oksakoha loomulike tugevuste rakendamine struktuuris



Illustratsioon 45. Fermi ja Vierendeeli tala võrdlus orgaanilises puitstruktuuris

Puu fraktaalse struktuuri tõttu on hargnevaid elemente võimalik leida igas erinevas skaalas. Tüve alumisest osast hargnevat jämedat oksakohta kasutades on võimalik luua mitme meetrise läbimõõduga ferme, ainult hargnevaid oksi kasutades võivad fermid jääda paarikümne sentimeetri laiuseks. Puidu esteetilise väärtustamise eesmärgil käsitlen edaspidi peamiselt suuremaid ferme, mis saaksid ka visuaalselt olla oluline osa arhitektuursest ruumist. Vierendeeli talade läbimõõt jääb vahemikku 3,5 kuni 4 meetrit, muutes need tervet korrust läbivateks õhulisteks kandestruktuurideks, mis integreeruvad hoone funktsionaalsusega. Niimoodi on võimalik defineerida alasid, eristades ruume nii füüsiliselt või mõtteliselt.

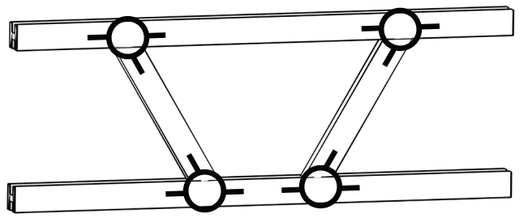
Elementide tüved ühendatakse üksteisega lineaarselt kaheks vööks sellisel viisil, et oksad on suunatud alati teise vöö poole. Selline lähenemine pakub harudele kasutuse skaalas veel lisa mänguruumi läbi kahe erineva elementide ühendamise skeemi. Väiksema tala saamiseks kinnituvad oksad otse teise vöö tüvede külge. Suurema tala puhul asetsevad vööd üksteisest kaugemal ning kahe vöö oksad on omavahel ühendatud otsapidi.

Terasfermi puhul koheldakse igat varrast jäigana ning struktuuri kõige nõrgemaks ja ohtlikumaks kohaks on kolme varda kohtumispunkt vöö ja diagonaali ühenduspunktis. Puidu puhul on üldine mõtteviis erinev – puidu kiudude loomulik tugevus, eriti hargnemis- või oksakohas tagab teatud piirini jäikuse. Nõrgem koht tekib siis kui puidu kiud katkestatakse ehk siis erinevate elementide liitepunktis. Seega võib puidust Vierendeeli tala puhul igat hargnevat elementi kohelda jäigana ning probleemsed kohad tekivad sirgete varraste keskel, kus elemendid ühenduvad.[36] See põhimõte suunab kasutama pigem tala tüüpi, kus elemendid ühenduvad ainult otsapidi.

Hargneva puidu kasutamine nihutab fermi problemaatika kolme varda liitumispunktist kahe liitumispunkti, mis on oluliselt lihtsamini lahendatav probleem. Tänapäeval ülejäägina koheldud puitelemendi loomulik tugevus ja omadused kannavad endas lahendust fermi kõige keerulisema osa jaoks.[36]

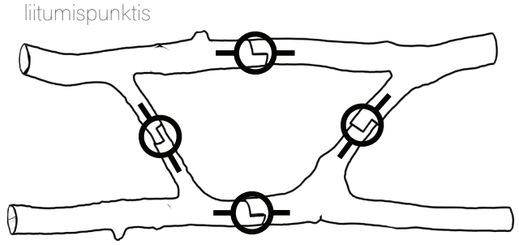
Puitelementide ühendamise loogika võimaldab kaootiliste algelementide suurele hulgale ja keerukusele läheneda astmeliselt. Esimene etapp on puiduharud panna paari oksa kaldenurga järgi ning seejärel on võimalik paarid kombineerida erinevate pikkustega taladeks. Elementide läbimõõdu, puiduliigi ja geomeetria järgi on võimalik hinnata kombineeritud struktuuri kandevõimet. See võimaldab valminud Vierendeeli tala kohelda kindla tugevusega ja peaaegu standardse elemendina. Järgmises faasis, kus talad suuremaks struktuuriks kombineeritakse, ei ole enam vajadust iga erineva algse puitelemendi vormidega arvestada, vaid võib tala kohelda tervikuna

36. A. Orlinski, veebikonsultatsioon autoriga, 10. II 2026. Märkmed autori valduses.

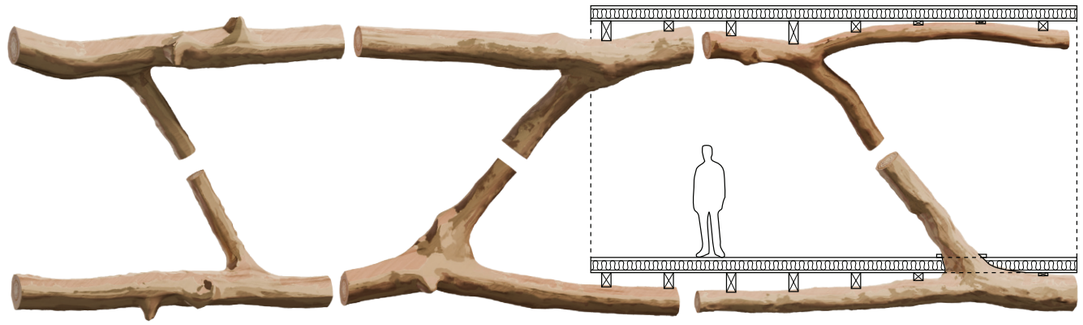


Kõige nõrgem koht
kolme elemendi
liitumispunktis

Kõige nõrgem koht
kahe elemendi
liitumispunktis

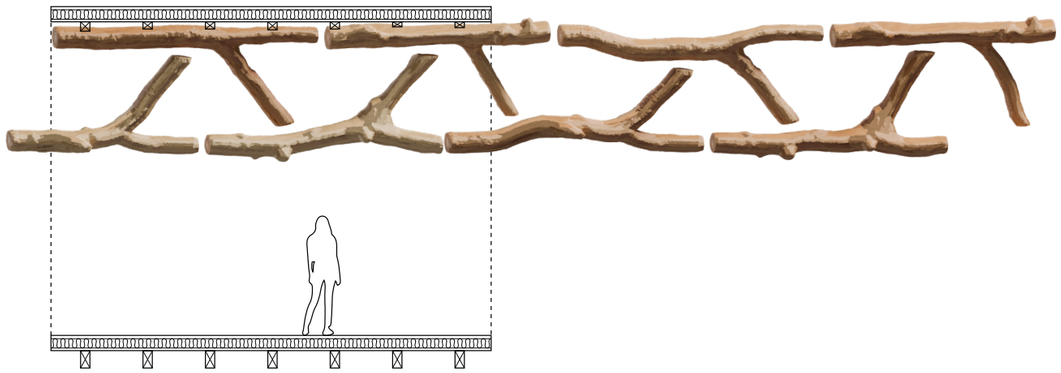


Illustratsioon 46. Fermi problemaatika nihe



Suur tervet korrust
läbiv orgaaniline tala

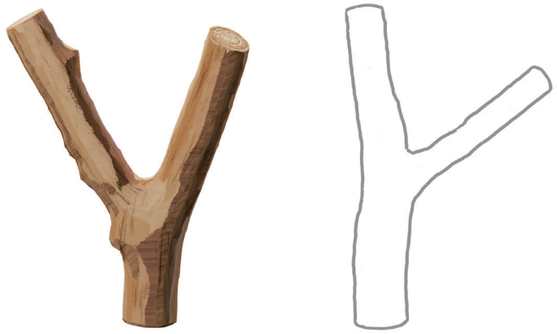
Väike vahelae konstruktsioonina
toimiv orgaaniline tala



Illustratsioon 47. Orgaaniline Vierendeeli tala

2.1.5 Orgaaniline post

Puidu tüve kõige loomupärasem kasutus ehituses on post. Puu on oma kasvuga saavutanud tugevuse toetada oma latva ning pidada vastu tugevatele tuultele. Tüve hargnemisel tekkiv konsool, mis toetab okste raskust ka lumekoormusega, saab sama funktsiooni täita ka ehituses.

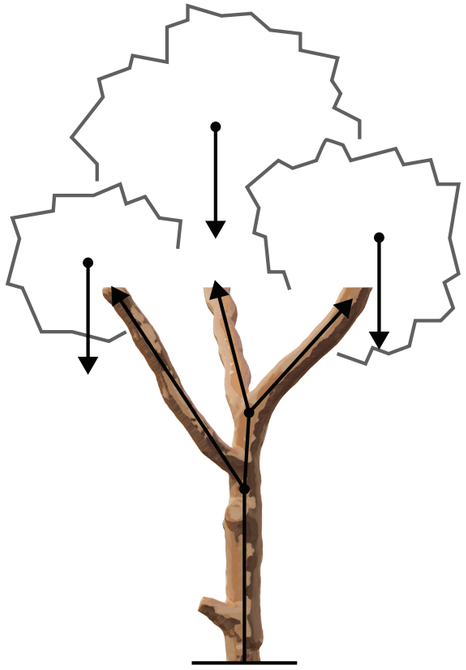


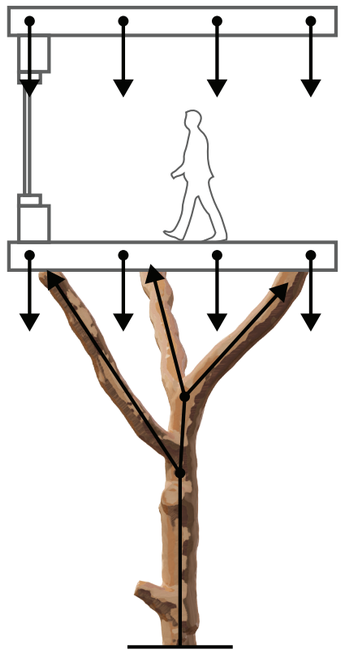
Illustratsioon 48. Tala rakendab tüve hargnemisi

Ajaloolises Jaapani ehituses jõudis puidu loomuliku funktsionaalsuse väärtustamine ja ehituse jaoks rakendamine sinna maale, et poste valides võeti arvesse ka puu kasvukohta ja -tingimusi. Näiteks ühest suurest palgist poste välja lõigates leidis puu tuulepoolne külg kasutust ka hoone tuulepoolses küljes. See lubas puu bioloogilist mikrostruktuuri maksimaalselt ära kasutada ning tekitada jätkuvus puu loomuliku arengu ja arhitektuuri vahel.[37]

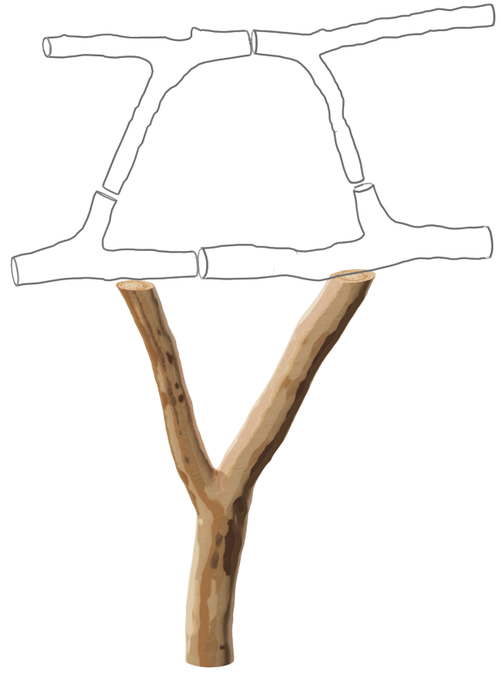
Võttes kasutusele hargneva tüve kolm või enam otspunkti saab postil talade struktuurile stabiilsust pakkuda mitmes teljes. Kaheharuline tüvi sobib hästi toetama tala keskpunkti luues nii kandevõime kui ka tekitades fermiga kahes punktis kohtudes tasakaalu. Keerulisem koht tekib mitme tala ühenduspunktis. Siin saavad rakendust leida kolmeks hargnevad tüved, mis lubavad oma toetuspunktidega tekitada kolme fermi ühenduspunkti.

37. L. Allner jt. Conceptual Joining.., lk 91-92

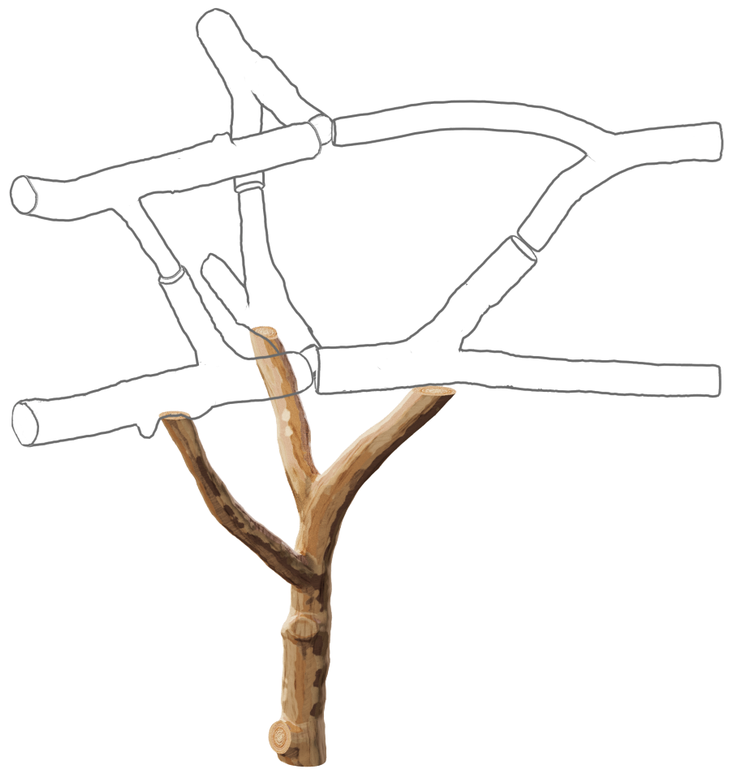




Illustratsioon 49. Loomupärane rakendus puutüvele



Illustratsioon 50. Kaheharuline post toetamas tala keskelt



Illustratsioon 51. Kolmeharuline post toetamas kolme tala liitepunkti

2.1.6 Tapid

Puitelementide otsapidi ühendamiseks on erinevaid variante, millest suur osa kasutab terasliiteid ja/või liimimist. Materjali loomulike omaduste väärtustamise eesmärgil on käesolevas uurimistöös keskendutud liimivabadele puidutappidele, mida vajadusel on elementide välja vahetamise või taaskasutamise eesmärgil lihtne lahti monteerida. Kuid analoogseid lahendusi pakuksid ka tänapäeval standardsemat puidu ühendamise meetodid.

Levinuim tapp puidu pikkupidi ühendamiseks on järkliide, mis maksimeerib kahe elemendi puutepinna ja jõuülekande olukorras, kus ühe elemendi pikkus ei ole struktuuri jaoks piisav. Tala liitekohad peavad eri punktides taluma nii survet kui pinget ning teatud olukordades ka väikest painet, kõige sobilikumaks järktapiks sellise olukorra joaks on *Stop-Splayed Scarf* tapp, mida kasutati juba Vana-Rooma sillaehituses ning arendati edasi Itaalia renessansi ajal. Kuigi tegemist on tugeva tapiga, tuleb seda kasutada struktuuri kõige vähem pingestatud punktis, sest selline tapp tagab ainult 28% läbi lõikamata tala või palgi kandevõimest.[38]

Jaapani puitehituses on sarnane tapp tuntud *ne-tsugi* nime all ning on kasutusel peamiselt postide mädanenud osade välja vahetamiseks. Hoone struktuur toestatakse posti kõrvalt enne mädanenud osa välja lõikamist ning saetakse vastavaks järktapiks. Võrreldes sama funktsiooni jaoks sobiliku keeltapiga on *ne-tsugi* tapp lihtsama geomeetriaga, mis võimaldab seda objektil kohapeal postist välja saagida. Tapi teiseks tugevuseks on selle lihtne monteerimine – posti uut osa on võimalik paika panna mitmest suunast ning ühendus muutub jäigaks alles tapi keskele kiilu lisamisega. Kiil muudab lihtsaks ka ühenduse vajadusel lahti monteerimise.[39]

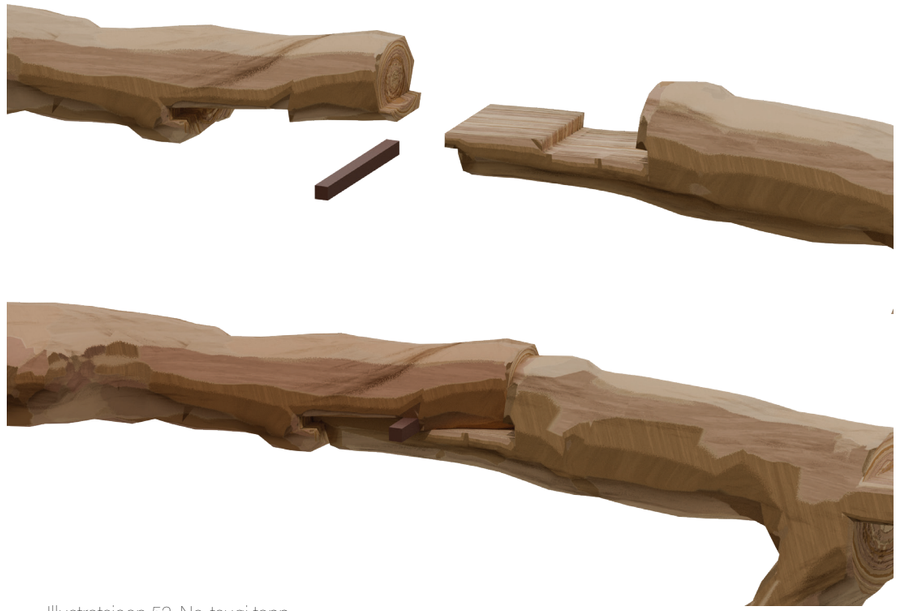
Ne-tsugi tapi paindlikkus sobib hästi ka keerulise kujuga loomulike puitelementide jaoks. Ainult ühest kindlast suunast ühendatavad tapid tekitaks struktuuri ehitamisel piiranguid. Ne-tsugi tapp annab vabaduse tala elemente kokku lükata nii otsapidi kui ka külje pealt ning kohendada paigutust kuni kiilu lisamiseni.

Vierendeeli taladest suurema struktuuri ehitamine vajab vähemalt kolme tala otsapidi ühendamist. Siin tuleb kasuks kolmesuunaline harktapp. Sellise ühenduse muudab keerukaks see, et kõik elemendid tuleb kokku lükata korraga, kuid tapp tasub ennast ära kinnitades kolme elemendi puhul neist igaühe mõlema teise külge. Selleks on iga lüli küljes nii tapi hark kui ka keel ning lõplikult stabiliseeritakse ühendus tüüblite abil.[40]

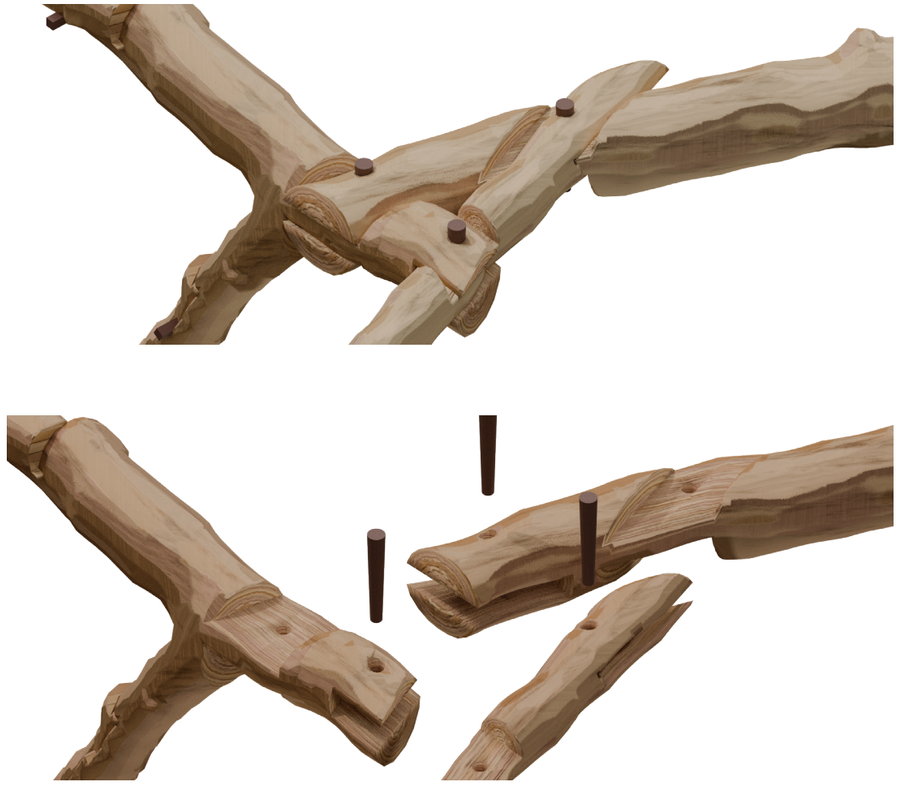
38. A. Karolak jt. Historical scarf and splice carpentry joints: state of the art. – Heritage Science 2020, https://www.nature.com/articles/s40494-020-00448-2 (vaadatud 8. IV 2026).

39. J. Billing, Ne-tsugi – Big Sand Woodworking, 16. III 2021, https://www.bigsandwoodworking.com/根継ぎ-ne-tsugi/ (vaadatud 8. IV 2026).

40. Three Way Bridle Joint. – 3x3Custom. https://www.3x3custom.com/tutorials/three-way-bridle-joint (vaadatud 17.IV.2026)



Illustratsioon 52. Ne-tsugi tapp



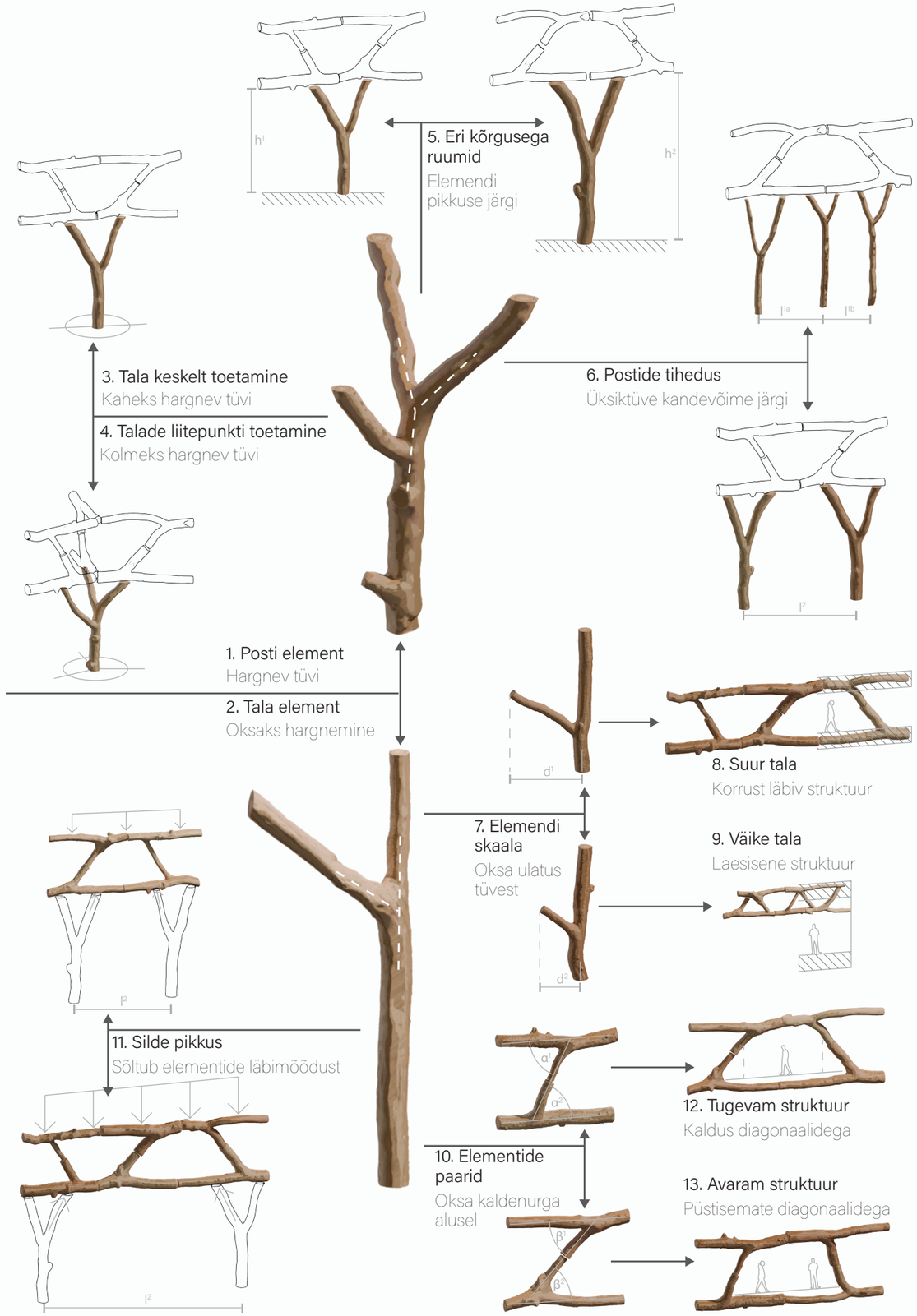
Illustratsioon 53. Kolmesuunaline harktapp

2.1.7 Topoloogiline jaotus

Selline lähenemine võimaldab luua skemaatilise juhendi, mille abil looduslikult vormid oma topoloogia alusel erinevatesse struktuursetesse tüpoloogiatesse jaotada. Esialgse poolituse saab teha hargnevateks tüvedeks, millest saavad postid (1), ning oksaks hargnemisteks, millest saavad Vierendeeli talade elemendid (2).

Postielemendid jagunevad edasi sõltuvalt harude arvust. Kaheharuline tüvi sobib toetama tala keskpunkti või kahe tala kohtumiskohta (3). Tüvi, mis hargneb kolmeks või hargneb kaks korda kaheks haruks viisil, et kolm tekkinud haru on võimalik ühes tasapinnas läbi lõigata, toimib kolme tala toetuspunktina (4). Tüve pikkuse järgi sorteerides saavad postid olla tugedeks eri kõrgusega ruumides (5). Tüve läbimõõdu järgi on hinnatav kandevõime – nõrgemad postid peavad täitma ruumi tihedamalt või toestama kergemaid masse, tugevamad postid suudavad kanda suuremaid koormusi ning paigutuda hõredamalt (6).

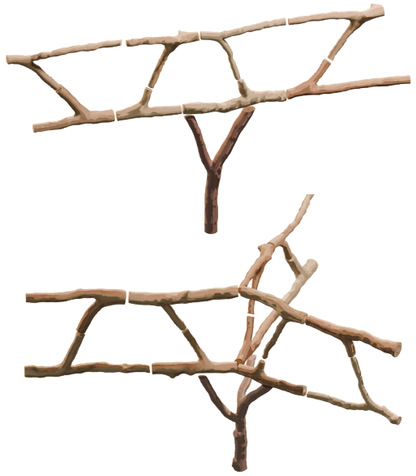
Vierendeeli tala elementide puhul on oluline see kui kaugele oks tüve tsentrist ulatub – oksa ulatus moodustab ligikaudu pool tala läbimõõdust (7). See võimaldab luua ferme mitmes eri skaalas, suuremad talad võivad olla tervet korrust läbivaks siseruumi osana toimivad struktuurid (8) ning väiksemad talad saavad toimida tavapärasemate vahelagedesse või katustesse mahtuvate kandestruktuuridena (9). Enne tervikliku tala kokku monteerimist on vaja elemendid panna paaridesse, kus mõlema oksa kaldenurk on ligikaudu sama. Nende paaride tüved moodustavad talas kohakuti asuva ülemise ja alumise vöö ning oksad ühenduvad vööde vaheliseks diagonaaliks (10). Valminud talad saab taaskord jaotada erinevateks kandevõimeteks ja sillete pikkusteks arvestades puidu läbimõõtu (11). Ruumi funktsionaalsuse osas on oluline ka diagonaalide kaldenurk – mida enam diagonaal kaldus on, seda tugevam on struktuur (12), kuid väikese kaldega peaaegu vertikaalsete diagonaalide vahele tekkiv ruum on lihtsamini kasutatav ja avatum (13). Paigutusel tuleb arvesse võtta ja võrrelda hoone eri alade kandevõime ja ruumi avatud kasutatavuse vajadusi.



Illustratsioon 54. Puidu topoloogia alusel rakendamise skeem

2.2 Elementide kombineerimine struktuuriks

2.2.1 Rakustruktuur



Illustratsioon 55. Postide ja talade ruumiline ühik

Kaks peamist ehituslikku elementi, milleks on hargnevad postid ja orgaanilised fermid, on omavahel tihedalt seotud. Kahemõõtmelises lõikes vaadates tundub lahendus selge – post toetab oma konsoolsete omadustega harude abil kahe tala ühenduspunkti, andes seeläbi fermide kõige nõrgemale punktile lisajäikust. Selleks, et tala kolmemõõtmeliselt kandvat struktuuri saada tuleb tekitada minimaalselt kolme fermi kohtumispunkte, kus tulevad abiks kolmeharulised postid. Probleem tekib sellest, et posti okste hargnemise suund tüve suhtes on igal postielemendil erinev ning seetõttu hakkavad postid määrama ka fermide hargnemiste suunda.

Katsena mängiti läbi puhtalt postide loomulikust hargnemisest tulenev vormiloogika ilma arhitektuurselt sekkumata, et leida loomulikele elementidele kõige orgaanilisemalt sobilik ruumiline struktuur.

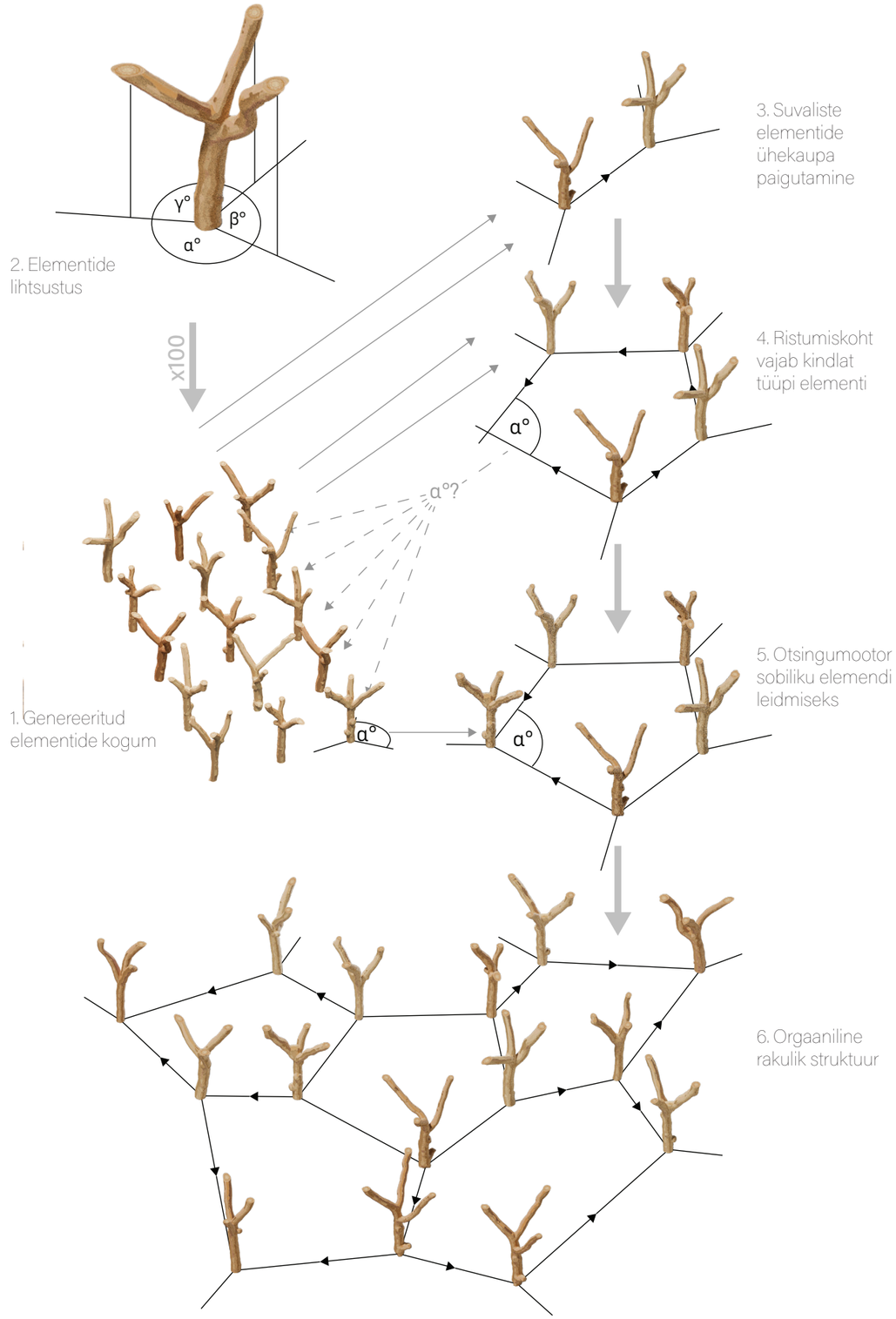
Sellel eesmärgil programmeeriti Grasshopperis simuleerimiskeskkond, mis genereeris 100 suvalises kolmes suunas hargnevat postipuud, mille abil struktuuri katsetada (1). Iga post määrab sellest punktist hargneva kolme tala suuna (2), seejärel saab paigutada igale fermile järgmise suvaliselt valitud hargneva posti (3). Peale paari posti ja fermi paigutamist tekib olukord, kus fermid hakkavad ristuma. Ristumispunkt saab uue posti asukohaks - ent selles olukorras ei saa enam suvaliselt hargnevat elementi valida, sest talade ristumisel on konkreetne nurk(4).

Talade poolt määratud konkreetse nurga lahendamiseks loodi lihtne otsingumootori, mis lubab 100 genereeritud puu seast leida kõige sobilikuma hargnemise nurgaga elemendi (5). See kui täpselt antud element fermide nurgaga sobitub, sõltub postipuude valimi suurusest. Katse näitas, et 100 puu seast valides jääb nurga veamäär alla 0,75° ning ka 50 elemendi seast on võimalik leida sobilik vaid 1,50° tolerantsiga. Sellises suurusjärgus vigu on võimalik korrigeerida tappide täpse paigutusega.

Lastes sellel kolmeks hargneval struktuuril edasi kasvada tekib võrgustik, mis meenutab Voronoi mustrit (6). Voronoi on looduses levinud vormiloogikal põhinev geomeetriline süsteem, mis on nähtav näiteks rakkude või vahumullide struktuuris, kus tekib kõige optimaalsem ja väiksema pindmise materjali kuluga ruumiloogika, mis jaotab süsteemis rõhud ühtlaselt. Ka läbi inseneri pilgu vaadates kujutab voronoi süsteem endast staatiliselt optimeeritud võrgustikku, mis jaotab endas pingeid ja surveid ühtlaselt ning on võimeline vastu võtma suuri koormusi.[41]

Katse näitas, et hargnevaid poste ja ferme ühekaupa paigutades sellisel viisil, et iga element on määratud eelmiste poolt, on võimalik lasta looduslikel vormidel endil genereerida rakustruktuur, mis on ka staatiliselt vastupidav.

41. E. Friedrich. The Voronoi Diagram in Structural Optimisation. – The Bartlett School of Graduate Studies - University College London 2008, https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/14631/1/14631.pdf (vaadatud 8. IV 2026). lk 2



Illustratsioon 56. Postide hargnemisest tekkiv orgaaniline ruumistruktuur

Saavutatud struktuur kannab endas looduslikku mustrit, arvestab iga elemendi eripäradega ning toimib seejuures ka usaldusväärse kandesüsteemina. Ent inimlikust perspektiivist siiski kaootilisest rakustruktuurist on funktsionaalse ruumini suur hüpe. Vaja on meetodit, mille abil genereeritavaid mustreid teatud piirini kontrollida ja suunata, et oleks võimalik tulemus ühendada arhitektuurse visiooniga – looduslik parameetria peab lähtuma ruumivajadustest.

Postide ja talade rakulikust struktuurist tuleb mõelda kui ruumiühikutest. Umbes nagu Jaapani ehituses on kõik mõõdud paika pandud tatami mattide suuruse järgi ning arhitektuurne mõtlemine tuleb paigutada sellest tulenevasse raamistikku[42]. Käesolevas töös on see protsess kahesuunaline – arhitektil peab olema võimalik rakustruktuuri suunata, kuid loomulikest elementidest tulenevat vormi ei ole võimalik täpselt ette ennustada, seega peab arhitekt ka peale struktuuri tekkimist oma plaane sellesse süsteemi sobitama. Seega lineaarse arhitektuuriprotsessi asemel, kus plaan muutub sujuvalt aina täpsemaks, tuleb loomulikust puidust hoone loomisel rakendada pigem iteratiivset info ringlusel põhinevat protsessi. Arhitekt mõjutab loomulikku vormi ja loomulik vorm mõjutab arhitekti tööd ning seejärel protsess kordub kuni sobiliku tulemuse saavutamiseni.

42. K. Zwerger, Wood and Wood Joints.., lk 61



Illustratsioon 57. Rakustruktuur



Illustratsioon 58. Orgaaniline puitstruktuur

2.2.2 Parameetriline planeerimine ja tolerants

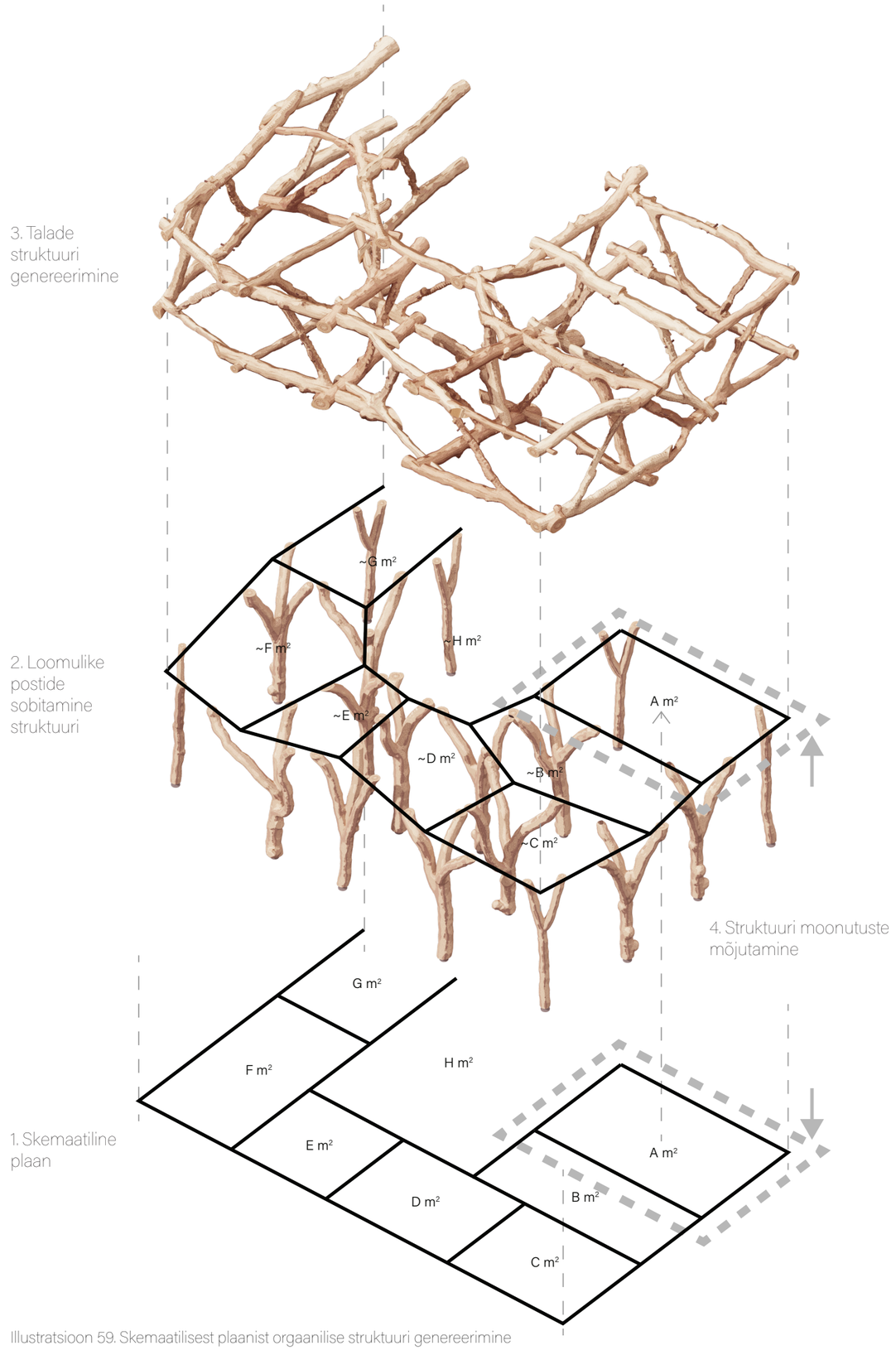
Sellise töömeetodi katsetamiseks on loodud Grasshopperi programmi abil parameetriline tööriistakast planeerimise erinevate etappide jaoks. Eesmärk oli välja töötada meetod, mille abil arhitekt saab luua lihtsustatud skemaatilisi plaane ning reaalajas näha ja mõjutada selle põhjal genereeritud loomulikest elementidest vastet. Magistritöö raames loodud tööriistakast ei simuleeri küll täpselt läbi iga struktuuri loomise etappi, kuid imiteerib loomuliku materjaliga töötamise meetodeid ning demonstreerib elementide rakendamise põhimõtteid.

Arhitekt määrab korruseplaanidena üldise skemaatilise ruumide ja funktsioonide jaotuse. Intuitiivse ja harjumuspärasest võimalikult vähe erineva tööviisi saavutamiseks on võimalik, kuid mitte kohustuslik, luua esialgseid plaane ortogonaalsete lihtsustustena. See võimaldab algusest peale läbi mõelda ruumide ligikaudsed pindalad ja ühendused. Skemaatiliste alade piirid määravad struktuuri ligikaudse paigutuse. Postide ja talade asukoht ei tähenda tingimata reaalseid füüsilisi piire, kuid tekitab siiski mõttelisi alade definitsioone, mida on oluline algusest peale silmas pidada. (1)

Paralleelselt esialgse plaani loomisega valib Grasshopperi süsteem iga skemaatilise struktuuri ristumispunkti jaoks kõige sobilikuma hargnemise suunaga posti elemendi (2) ning genereerib selle põhjal talade rakulaadse struktuuri (3). Rakustruktuur kajastub reaalajas plaanidel ning võimaldab arhitektil ruumidiagrammi kohendada genereeritud tulemust nähes.

Iga posti paigutus sõltub eelmiste määratud suundadest, seega paigutuvad need struktuuri ühekaupa. See tähendab, et esimestes sõlmpunktides konkreetseid hargnevaid poste määrates on elementide valik oluliselt suurem kui viimastel sõlmpunktidel, milleni jõudes on suur osa materjali juba ära kasutatud. Iga sõlmpunkti jaoks valitakse kõige sobilikumate okste suundadega post ning sellest tulenevalt leiab süsteem esimeste punktide jaoks palju täpsema vaste kui viimaste. Ehk siis seal, kus programm tööd alustab on arhitekti määratud skeemi moonutused suhteliselt väikesed ning viimased elemendid, mis vastavad skeemi ootustele vähem, moonutavad struktuuri oluliselt rohkem Voronoi mustri sarnaseks.

Seda moondumiste järkjärgulist kasvu on võimalik ära kasutada määrates prioriteete teadlikult. Alad, kus funktsionaalsus või arhitekti visioon nõuavad täpselt paika pandud lahendust, saab defineerida kõrgemaks prioriteediks. Grasshopperi süsteem genereerib need alad esimesena ja paigutab sinna elemendid, mis moonutavad määratud struktuuri minimaalselt. (4) Moonutuste täpne suurus sõltub puitelementide valimi suurusest.

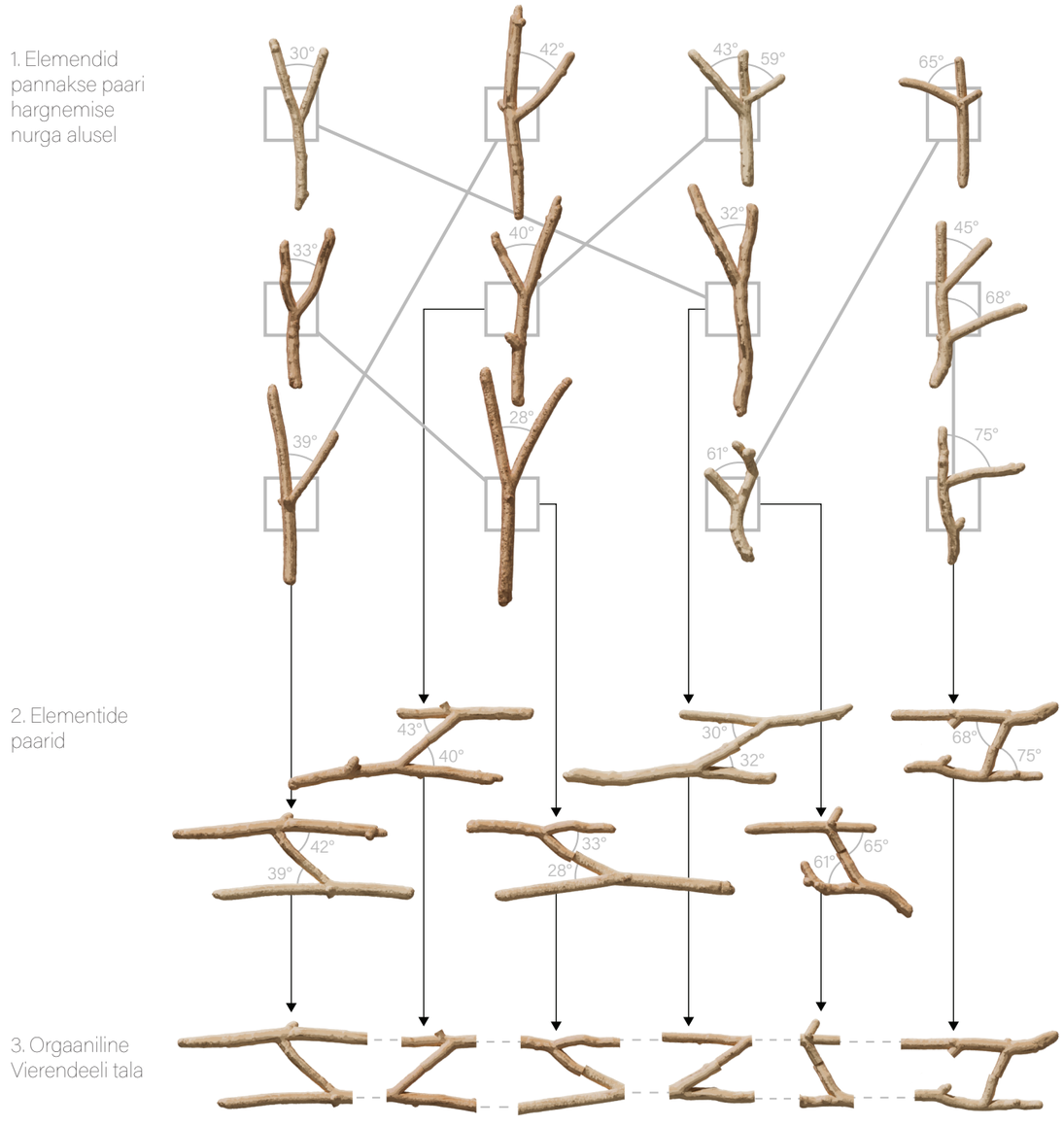


Illustratsioon 59. Skemaatilisest plaanist orgaanilise struktuuri genereerimine

Seejärel defineerides ka korruste kõrgused on võimalik genereeritud struktuur muuta mudeliks, kus kajastub ruumi iseloom koos kõikide puitelementidega. Projektis nõutatavate elementide suure hulga tõttu on magistritöö raames selles katses tegemist digitaalselt genereeritud suvaliste hargnevate elementidega, kuid analoogselt oleks võimalik käsitleda ka päriselt 3D skaneeritud ja dokumenteeritud suurt puitelementide valimit.

Loomuliku ja vähetöödeldud puidu kasutamisel on suureks erinevuseks tavalisest arhitektuuri ja ehitamise protsessist tolerants. Kui tavaehituses peetakse valminud hoone aktsepteeritavaks hälbeks arhitektuursest plaanist ühte sentimeetrist siis loomulikku puitu kasutades tuleb mõtlemine ümber häälestada selliselt, et kogu arhitektuuriprotsessi läbides on arvestatav tolerants esialgsest skeemist ligi meeter. See nõuab, et arhitekt loobuks täielikust kontrollist tulemuse üle ja laseks ka looduslikel vormidel ja mustritel protsessi osaliselt suunata. Selline mõtteviis on muutunud tänapäeval võõraks, kuid ajalooliselt on vernakulaarses arhitektuuris materjali loomuliku vormiga arvestamine olnud alati oluline ja määrav osa ehitistest.

Selle tulemuseks on uut moodi lähenemine ehitamisele, kus arhitekt saab esialgu ainult üldistatud plaani luua, mis annaks ettekujutuse vajalikust materjalihulgast. Sellele järgneb puidu kogumine ja digitaliseerimine. Alles seejärel saab materjali arvesse võttes detailsemaid mudeleid luua, mis kombineerib arhitekti visiooni reaalse puidu täpsete omaduste rakendamisest tekkinud moonutustega. Puit on orgaaniline materjal, mis reageerib oma keskkonnale ja ühenduses olevate elementide jõududele. Seetõttu ei ole planeerimine ühekordne protsess – iga etapi tulemus tuleb taaskord digitaliseerida, tekitades iteratiivse suhtluse arhitekti töö ja füüsilise teostuse vahel.



Illustratsioon 60. Tala elementide paari panemise süsteem

2.3 Loomulikust puidust hoone prototüüp

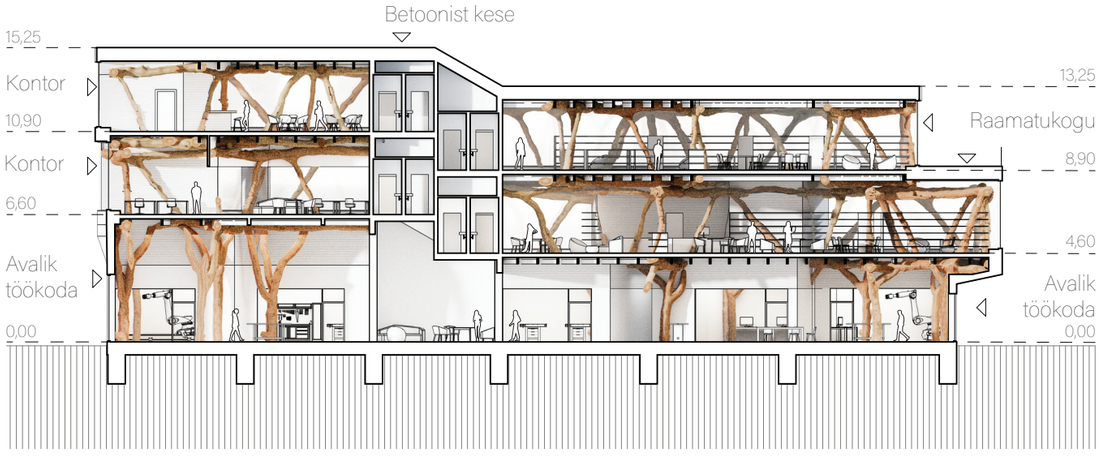
2.3.1 Orgaanilise puitstruktuuri võimalused

Loomulikest puitelementidest orgaaniline struktuur on ruumi osana toimiv kandekonstruktsioon, mis võimaldab enda ümber ehitada erinevaid kestasid ja funktsioone. Sellise ehitise jaoks on kõige olulisem asukoha lähedusest saadav tooraine, seega peab projekteerimine juba algusest peale olema seotud puiduallikaga, olgu selleks linnapuit või metsaraiete ülejäägid. See tekitab piiranguid nii ajaliselt kui asukoha mõttes ehk tavapraktika, kus hoonet projekteeritakse enne materjalile mõtlemist, siin ei toimi. Lähenemine peaks olema selline, et sel hetkel kui raietest üle jääv materjal saadavaks muutub, avaneb ka võimalus materjalihulgale vastavas skaalas ehitise rajamiseks.

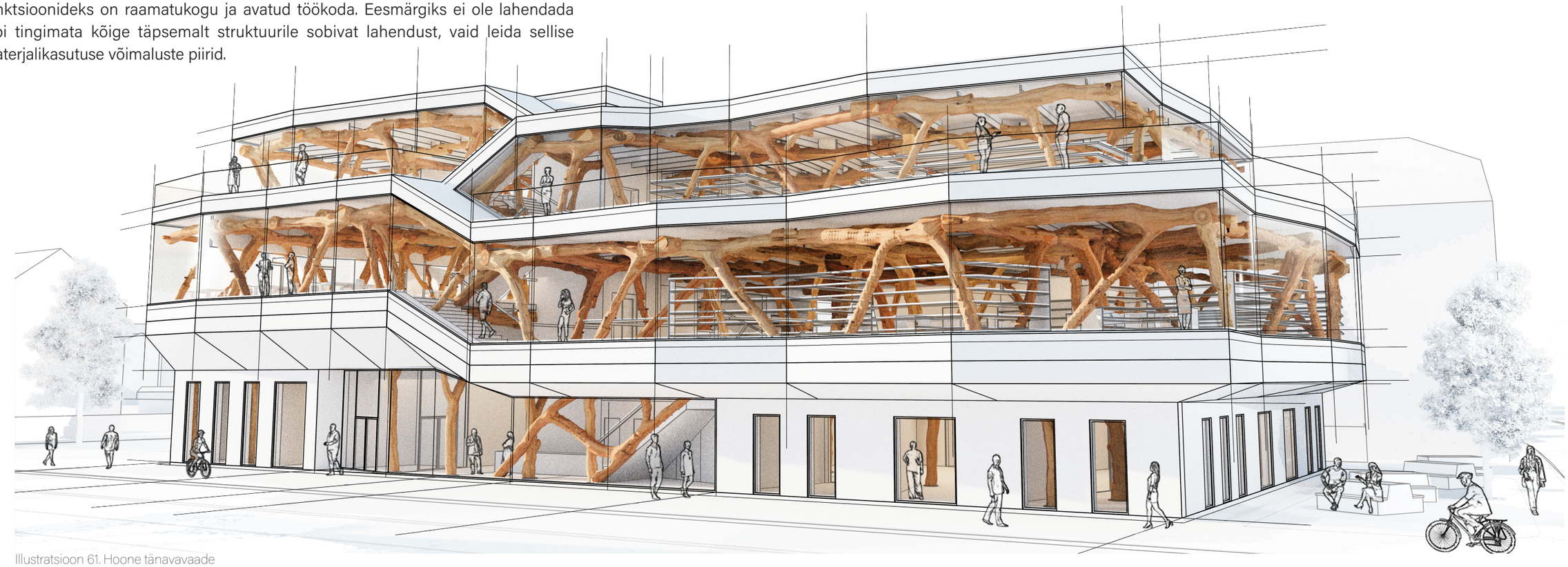
Funktsiooni osas on sellisele materjali kõige lihtsam kasutus lühiajaliste varjualuste ja avatud väikeehitiste näol, kus orgaanilisele struktuurile ainsaks lisatavaks elemendiks on katus. Puidu ilmale avatuks jätmine sunnib kriitilisemalt suhtuma ka valitud puidu liikidesse ja omadustesse ning arvestama kogu struktuuris suuremate moondumistega.

Hoone sisemise kandestruktuurina kasutades, on puit ilmastiku eest kaitstud, kuid orgaaniliste elementide kombineerimine standardsete ehitusvõtetega vajab detailset tehnilist arendustööd. Loomuliku puitkonstruktsiooni sildevõime ei ole samal tasemel kui betooni, terase või töödeldud puidu oma, mistõttu on kõige sobilikumaks tihedaid eraldusi vajavad funktsioonid või paindlikku planeerimist võimaldavad ruumid.

Käesolevas projektis kombitakse orgaanilise puitstruktuuri kasutamise kõige ekstreemsemat kasutust – suuremahuline avalik hoone, mille täpsemateks funktsioonideks on raamatukogu ja avatud töökoda. Eesmärgiks ei ole lahendada läbi tingimata kõige täpsemalt struktuurile sobivat lahendust, vaid leida sellise materjalikasutuse võimaluste piirid.



Illustratsioon 62. Lõige



Illustratsioon 61. Hoone tänavavaade

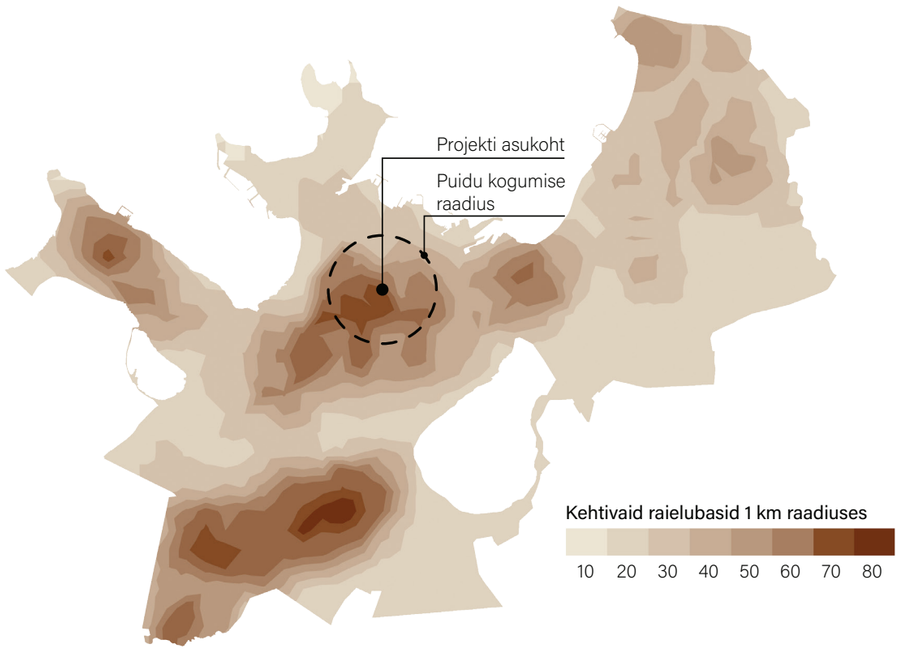
2.3.2 Projekti asukoht

Ebastandardse puidu ja linnapuude ehituses rakendamine lubab väärtustada materjali, mida tavaehitus kasutamata jätab. Ent sellisel materjalil on raske võistelda oluliselt suuremate tavapäraste puidutööstuse väljakujunenud tarneahelatega, kus raie, kuivatamine, töötlemine ja transport on maksimaalselt optimeeritud. Võrreldes metsaraiega, kus kogu materjal pärineb ühest kohast, on raiutavad linnapuud hajutatud üle suure ala, seega oleks ka linnapuude transpordikulu ja süsinikujalajälg selle külje alt vaadates suurem. Kuid siin tasub arvestada, et enamus raiutud linnapuid juba niikuinii transporditakse raie asukohast ära kas edasiseks kasutamiseks küttepuudena või utiliseerimiseks[43]. Seega suures pildis vajaliku transpordi hulk ei kasvaks, vaid oleks lihtsalt teise asukohta suunatud.

Loomuliku puidu kasutamisel on oluline lähtuda konkreetse asukoha pakutavatest võimalustest. Kõige ökonoomsem on selliseid meetodeid rakendada asukohtades, kus on ette näha lähiümbruses tihedamat puude raiet, mida oleks võimalik teostada koostöös linna raielubade väljastamisega. Käesoleva projektiga seonduvate raiete asukohtade analüüsi aluseks on aasta 2026 jaanuaris kehtivad raieload. Need puud on lubade vaatlemise ajal veel püsti, kuid raiutakse aasta jooksul, andes aega vajalike tarneahelate planeerimiseks. Raietegevuse süstematiseerimine lubaks läheduses asuvaid raieid komplekteerida üheks protsessiks ning transpordikulu veelgi vähendada.

Käesoleva projekti raames planeeritava näidishoone asukohaks on Paldiski maantee ja Ristiku tänava ristil asuv krunt aadressiga Paldiski mnt 30 / Ristiku tn 1. Asukoha valikul oli määravaks linnaruumiline potentsiaal, mis lubab näidishoonet laiale publikule eksponeerida, ning kehtivate raielubade kaart. Kaart hõlmab küll kõiki raie põhjuseid, millest mõned ehitamiseks sobilikud ei pruugi olla, kuid annab siiski pildi raiete üldistest asukohtadest ja hajutusest. Valitud asukoha ümbruses on Tallinnas hetkel kehtivaid lehtpuude raielubasid kõige tihedamalt ning seega on materjali transpordikulu kõige madalam.

43. Langetatud puude äravedu. – Puulangetamine, https://www.puulangetamine.ee/langetatud-puude-aravedu (vaadatud 10. IV 2026).

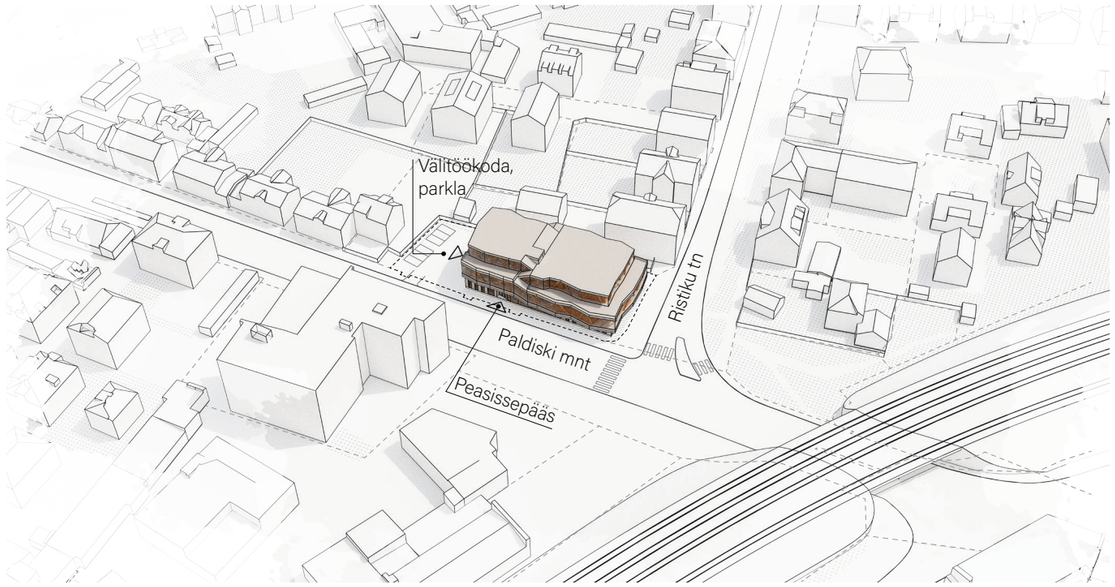


Illustratsioon 63. Tallinna raielubade kaart

Asukoht jääb Pelgulinna ja Kristiine piirile, mis on mõlemad tugeva kogukonnatunnetusega linnaosad. See võimaldab raamatukogul toimida aktiivse kogukonnakeskusena ja linnaosasid ühendava avaliku ruumina. Töökoda tekitab suurema raadiusega tõmbepunkti, mille kasutajaskond oleks ülelinnaline, avades hoonet veel laiemale publikule.

Hoone linnaruumi paistev unikaalne struktuur muudab selle oluliseks osaks linnaruumist. Ühest küljest suhestub puidust ehitis Pelgulinna puithoonetega, kuid mahult on dialoogis üle tee oleva Mayeri ärikvartaliga. Märgatavust tõstab ka Paldiski maantee suur liiklejate hulk. Hoone paistab ka Paldiski maanteed ületavate rongide aknast, tekitades visuaalse tõmbepunkti rongiga Tallinna jõudes.

Näidisprojekt kasutab 42 loomulikku posti ja 305 hargnevat fermielementi. Fermielemente on teatud olukordades võimalik saada ühest puust ka mitu, kuid arvestades, et iga element on erinevast puust pärit, rakendab projekt 347 puud. Eeldusel, et terve aasta vältel raiutud puude hajutuse muster on sarnane hetkel kehtivatele raielubadele ning projekti jaoks kogutakse puid aasta aega, on võimalik välja arvutada vajalik raadius projekti asukohast, et need 347 puud kätte saada. Tulemuseks on, et sellise projekti ehitamiseks tuleb koguda puid ainult 1400 meetri raadiusest. Siinkohal tasub märkida, et tegemist on Tallinna kõige tihedamalt raiutavate lehtpuude alaga ning teistes linnaosades peaks samas skaalas ehitatava hoone jaoks materjali kogumise raadius olema mõnevõrra suurem.



Illustratsioon 64. Asendiplaan

2.3.3 Hoone funktsioon

Funktsiooni valimise lähtepunktiks oli, et tegemist peaks olema avaliku hoonega eesmärgiga projekti uusi ideid võimalikult laiale ringile eksponeerida ning luua tugev aluspind loomuliku puidu kasutusviiside edasiseks arenguks. Tegemist on kogukonnahoonega, mille peamiseks funktsiooniks on raamatukogu, mis suudab hoone tavapärasest tihedamat struktuuri hästi ära kasutada ning muuta puidust Vierendeeli talad osaks siseruumist.

Hoone lisafunktsiooniks on esimesel korrusel asuv interdistsiplinaarne töökoda, mis sarnaselt projektile lubaks kombineerida levinumaid käsitöömaterjale digitootmistehnoloogiatega nagu 3D skaneerimine, 3D printimine ja CNC freesimine. Kui tavapärastes töökodades jaotuvad ruumid materjalipõhiselt, nagu näiteks puutöökoda ja metallitöökoda, siis käesolevas projektis oli eesmärgiks soodustada interdistsiplinaarsemat lähenemist. Seetõttu on planeerinud väiksemaid spetsiifilise funktsiooni põhiseid ruume, mida ühendab avar *assembly*-ala, kus eri materjale ja tehnoloogiaid kombineerida.

Raamatukogu läbib sujuvalt teist ja kolmandat korrust ning suudab puitstruktuuri orgaanilist vormi enda kasuks tööle panna ühendades kandestruktuuri ruumi kasutamisega. Korruseid läbivad puidust Vierendeeli talad mõjuvad ruumis eri kaldenurkadega postidena. Planeerimise protsessis oli oluline struktuuri paigutust vaadelda koos funktsionaalsusega. Hoone Voronoi-lik muster tekitab võimaluse loomuliku sopistuse loomiseks, lubades raamatukogu lugemis- ja tööalasid mõtteliselt eraldada, jättes suurema ruumi siiski tervikuna toimivaks. Rohkem kaldus puidust talade elemendid on kasutusel suuremat kandevõimet vajavates kohtades ning pakuvad tugevamat ruumilist eraldust. Avarust nõudvatesse aladesse paigutuvad püstiste okstega fermid, mis nii füüsiliselt kui visuaalselt ei eralda, vaid tekitavad jätkuva ruumi.

Hoones teisel korrusel on ka kontoriruumid, mis on suunatud peamiselt töökoda kasutavatele väikeettevõtetele, pakkudes kohapeal asuvaid ajutisi töö- ja kohtumisruume. Siin tekib võimalus puitstruktuuri dubleerida klaasist vaheseintega, muutes talade visuaalsed ruumijaotused füüsilisteks piirideks. Kontoriruumid on eraldatud 3D prinditud betoonist õhuliste seinaelementidega, mis sobituvad täpselt puitstruktuuri tühimikesse tuues seeläbi välja digitaalsete vahendite abil loomuliku puidu ja tänapäevaste ehitusmeetodite kombinatsiooni.

Hoonet läbides on viimaseks sihtkohaks kolmandal korrusel asuv avara terrassiga kohvik. Puitstruktuuri korruseid läbivad oksad tekitavad metsaliku tunde, luues linnavaate taustal tiheda hubase ruumi.

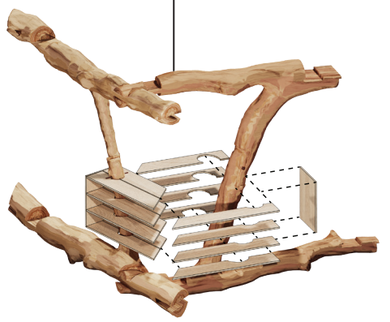
Puidust postid ja Vierendeeli talad on nähtavad nii linnaruumist kui ka iga korruse siseruumidest. Kõik puidu loomulikud korrapäratused on vaadeldavad ning ka tappe ja teisi struktuuri ühenduskohti ei ole varjatud. See annab hoone mistahes osas viibides tunnetuse kogu mahu orgaanilisest tervikust, kus puit ei ole lihtsalt kandekonstruktsioon, vaid oluline ja määrav osa tajutavast ruumist. See lubab hoone kasutajal otsesemalt suhestuda nii loomuliku materjali, ehitusmeetodite kui ka kogu struktuuriga suuremas pildis.



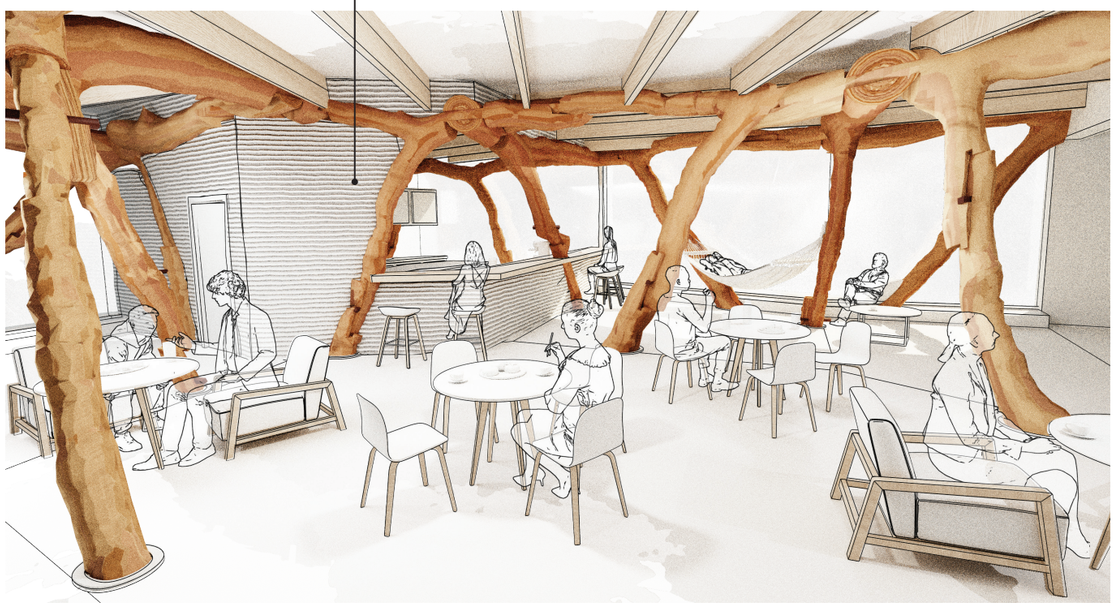
Illustratsioon 65. Raamatukogu sisevaade



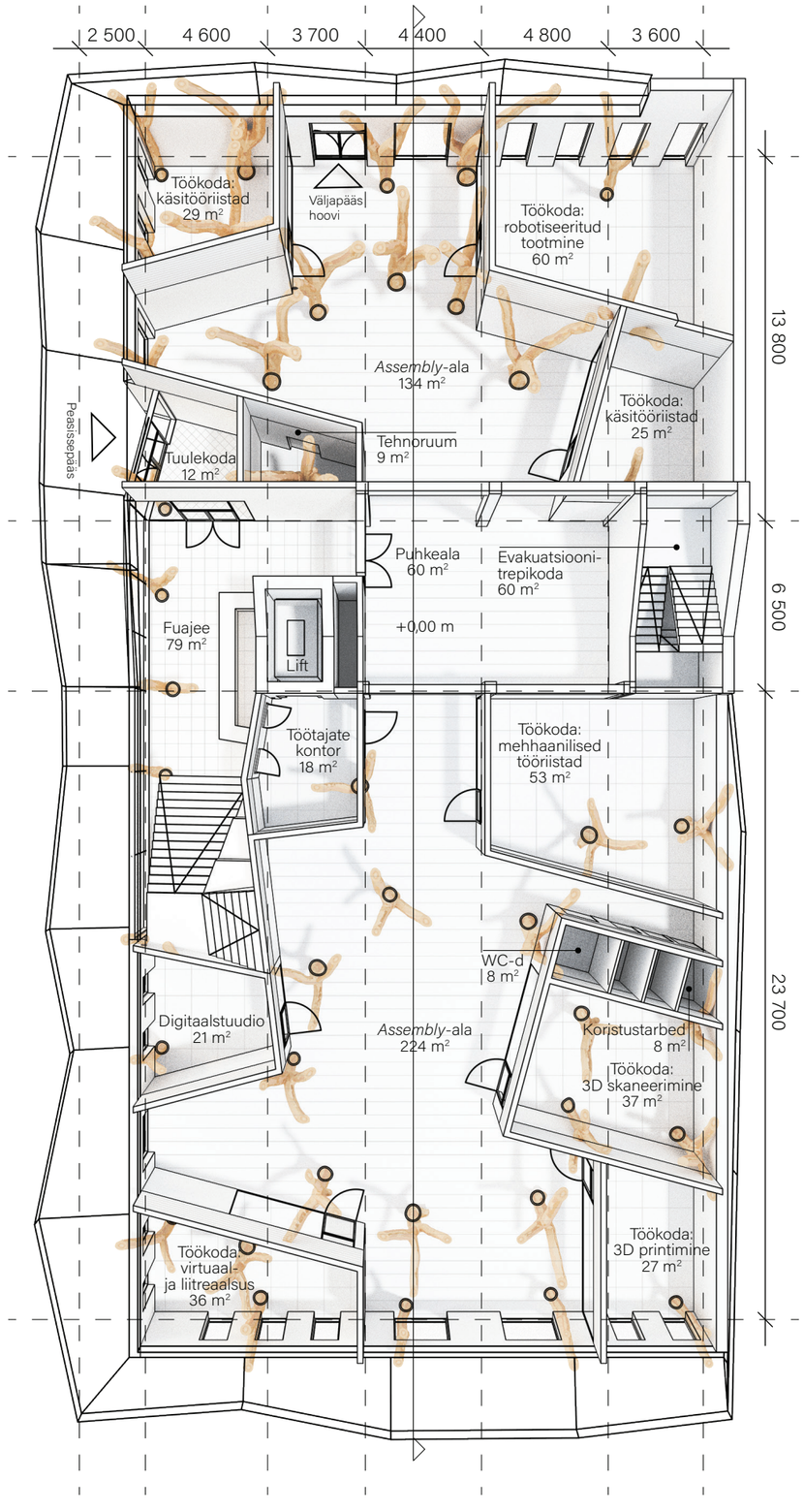
Illustratsioon 67. 3D prinditud vaheseinad



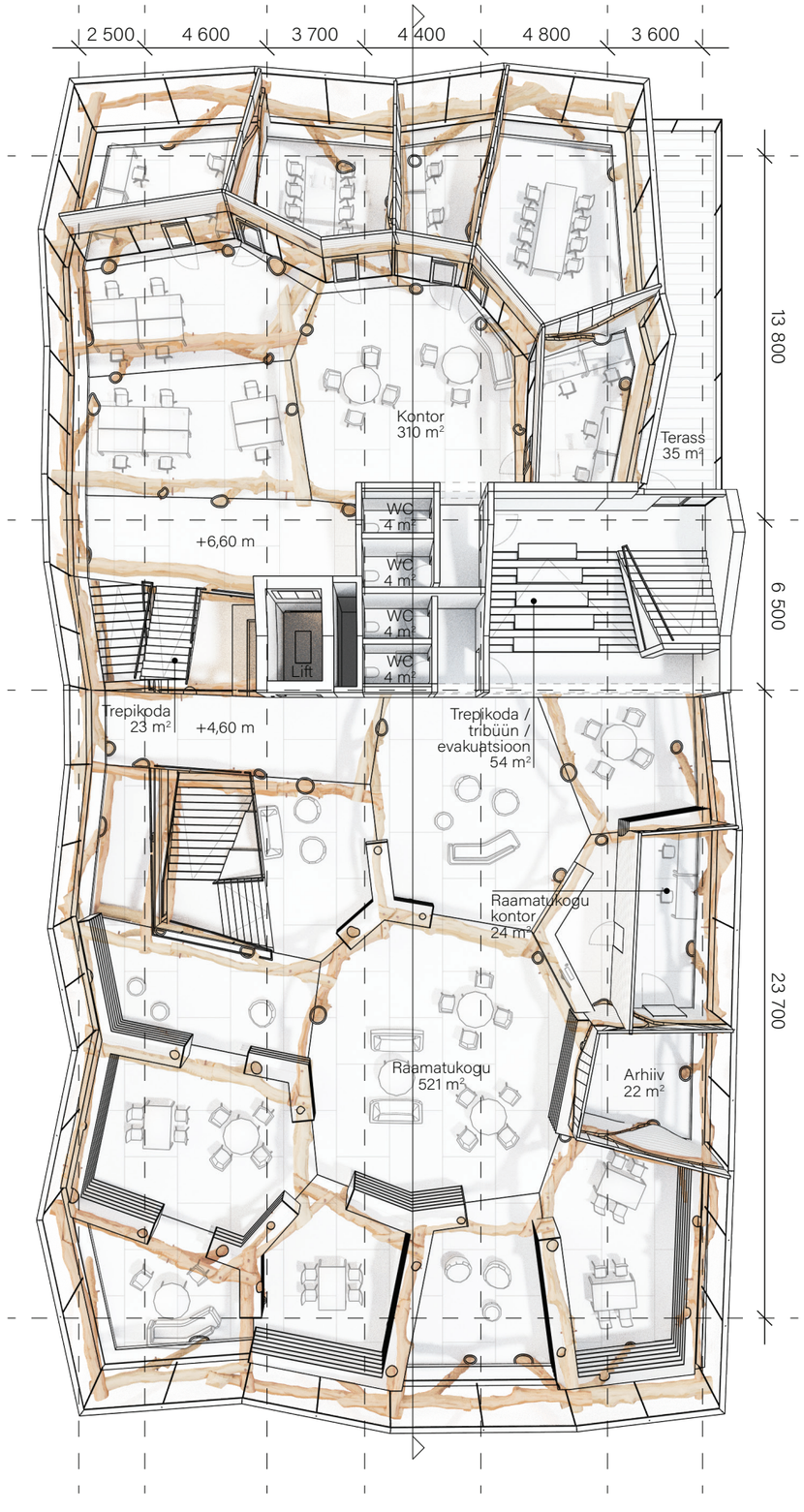
Illustratsioon 68. Orgaanilise puiduga integreeritud mööbel



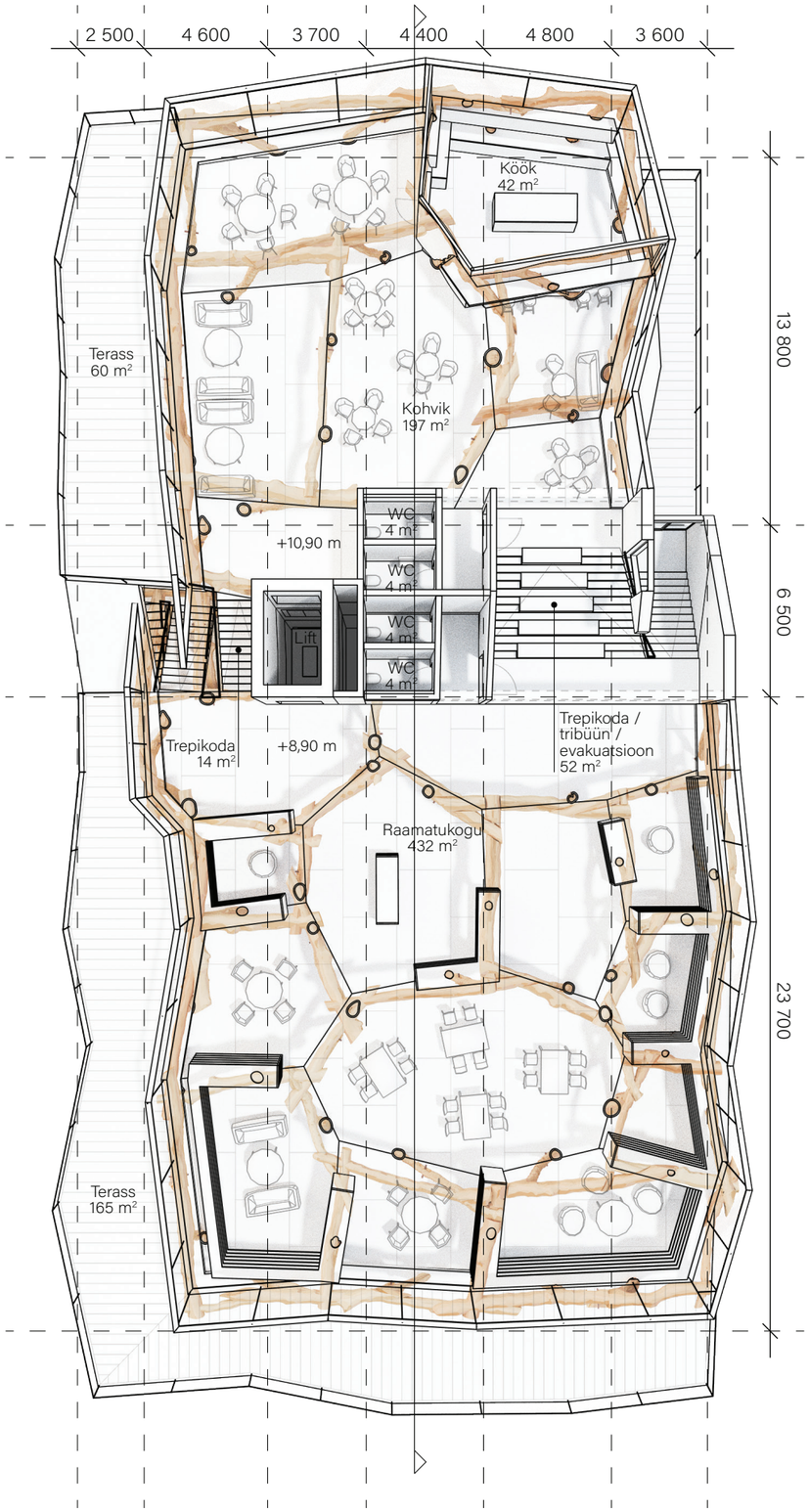
Illustratsioon 66. Kohviku sisevaade



Illustratsioon 69. Esimese korruse plaan



Illustratsioon 70. Teise korruse plaan



Illustratsioon 71. Kolmanda korruse plaan



Illustratsioon 72. Fuajee sisevaade

2.3.4 Ehitusobjektil töötamine

Edasise tarneahela laienemise vältimiseks peab kogu puidu töötlemise protsess leidma aset otse ehitusobjektil – ehitusplats saab toimida ajutise ladustamisala ja töökojana. Esimeseks sammuks on puidu kuivatamine. Otse objektil tegutsemine välistab tööstuslike puidukuivatusahjude kasutamise, kuid kättesaadavaks alternatiiviks on päikesekuivatid. Tegemist on kiiresti ehitatavate ajutiste konstruktsioonidega, mis kaetakse kile või pleksiklaasiga ning on kergesti järgmistele ehitusobjektidele transporditavad. Temperatuuri ja niiskuse reguleerimiseks kasutatakse lihtsat automatiseeritud ventilatsioonisüsteemi. Sellisel viisil kuivatamine võtab kauem aega kui tööstusliku kuivatusahju abil, kuid võrreldes vabas õhus kuivatamisega läbi terve aasta või pikemalt, on päikesekuivatis kuivatamine pigem nädalate küsimus. Täpne kuivatamisaeg sõltub puude liigist ja läbimõõtudest.[44]

Peale puidu kuivamist on järgmiseks sammuks materjali 3D skaneerimine, digitaalne analüüs ja modelleerimine ning seejärel 3D mudeli alusel tappide freesimine. Sellised protsessid vajavad objektil kohapeal asuvat töökoda. Sõltuvalt hoone funktsioonist on selleks kaks erinevat lahendust. Tegemist võib olla objektilt objektile transporditavate kompaktsete konteinertöökodadega, sarnaselt Gilles Retsini startupile AUAR, kus arendati välja robootilised mikrotöökojad, mis ehitusobjektil kohapeal elemente toota saaksid[45]. Kuid käesolevas projektis on puidu töötlemise töökojad planeeritud esimesena ehitatava osana valmivast hoonest.

See tähendab, et paralleelselt puidu kuivatamisega ehitatakse valmis standardsete ehitusmeetodite abil hoone esimese korruse ruumid, millest tulevikus saavad töökojad. Selleks hetkeks ei ole puidu 3D skaneerimine veel toimunud ehk struktuuri täpset vormi ei ole veel samuti teada. Seetõttu peab töökodade korrus olema planeeritud paindlikult, et arvestada hiljem ehitatava puitstruktuuri loomulikest elementidest tuleneva ettearvamatusega.

Esimese korruse valmides hakkavad ehitusobjektil olevad ruumid tööle 3D skaneerimise ja tappide CNC freesimise töökodadena. Terve hoone valmides võivad töökodade funktsioonid mõnevõrra muutuda, sest kaob vajadus niivõrd suurte elementidega töötamiseks kui ehituse käigus, kuid töökodades jaoks sobilikud ruumid ja vajalik tehnovõrgustik on juba olemas.

44. E. M. Wengert, D. A. Meyer, Solar Kiln Plans. - Oregon Wood Innovation Center, https://owic.oregonstate.edu/solarkiln/plans.htm (vaadatud 10. IV 2026).

45. A. Herzog, "Sustainable construction needs to be fully automated": Gilles Retsin leads visiting studio at D-ARCH. - ETHzürich, 12. VIII 2024, https://arch.ethz.ch/en/news-und-veranstaltungen/news-kanal/2024/08/automated-architecture-gilles-retsin-leads-visiting-studio-at-eth.html (vaadatud 23. IV 2026).

46. M Fabing, Wood Identification Systems. – WTP-Project Blog, 3. III 2021, https://wtp-project.com/blog/wood-identification-systems (vaadatud 19. IV 2026).

47. What is LiDAR?. – Artec 3D. https://www.artec3d.com/learning-center/what-is-lidar (vaadatud 19. IV 2026).

48. Five-Axis CNC Woodworking Lathe for Turning and Milling. – Catek CNC, https://www.catekcnc.com/products/multifunctional-cnc-wood-lathe/5-axis-7-in-1-cnc-wood-lathe.html (vaadatud 19. IV 2026).

49. N. Bruscia jt. Nemagari Crafting

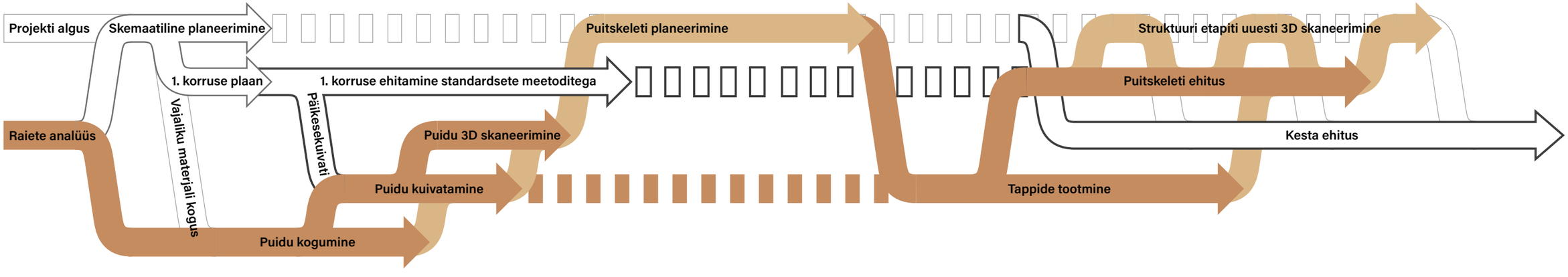
50. TAB 2019 Steampunk Pavilion. – Studio Igor Pantic, 2019, https://www.igorpantic.net/work/steampunk-pavilion (vaadatud 19. IV 2026).

51. Helsinki Central Library Roof and Facade Elements. – Timbeco. https://timbeco.ee/en/portfolio/helsinki-central-library/ (vaadatud 19. IV 2026).

Elemente 3D skaneerides ja CNC freesides on oluline nende täpne dokumenteerimine. Siinkohal on abiks RFID kiibid. Tänapäeval kasutatakse neid puidu tarneahelate jälgimiseks - kiip sisestatakse tooresse palki, mis lubab hiljem iga elementi leida ja materjali esialgset allikat tuvastada[46]. Käesolevas projektis sisestataks RFID kiibid paralleelselt 3D skaneerimisega, et siduda digitaalsed mudelid füüsiliste elementidega. Struktuuri mudeli valmides on kiipide alusel iga konkreetne tükk kergesti leitav.

Käesolevas magistritöös on 3D skaneerimiseks kasutatud fotogrammeetriat selle lihtsuse ja kättesaadavuse tõttu, kuid ehituses oleks kõige praktilisemaks lähenemiseks LIDARi abil skaneerimine. See annab täpsema ja õiges skaalas mudeli oluliselt kiiremini.[47] Peale digitaalset töötlemist ja struktuuri välja arendamist realiseeritakse tapid CNC freesides. Kuigi tappide geomeetria on suhteliselt lihtne, tuleb need lõigata spetsiifiliste nurkade all võttes arvesse ka orgaanilise puitelemendi paigutamise võimalusi – see vajaks vähemalt viieteljelist CNC freesi[48] või robotfreesi. Elementide kombineerimiseks suuremateks struktuurideks on abiks liitreaalsuse kasutamine, mille abil on võimalik näha konstruktsiooni digitaalset mudelit kohakuti reaalsete tükkidega. Sellist lähenemist on kasutatud *case study*-na mainitud Torinosu projektis, kus puitu saeti liitreaalsusprillides nähtava mudeli järgi[49] ning ka 2019 Tallinna Arhitektuuribiennaali raames valminud Steampunk nimelise installatsiooni ehitamiseks, kus puitu painutati ja paigutati käsitsi läbi liitreaalsuse vaadates[50].

Loomulikust puidust terviklikku hoone konstruktsiooni ehitades tekib paratamatult moonutusi – kuigi digitaalne mudel kasutab reaalsete elementide 3D mudeleid, hakkavad need elemendid üksteist mõjutades painduma ja moonduma viisil, mida ei ole võimalik täpselt ennustada. Reaalsus ei vasta enam täpsele plaanile. Sarnane probleem tekkis Helsingis asuva Oodi raamatukogu ehitamisel. Keerulises struktuuris tekkis ettearvamatuid moondumisi, mis katuse ehitamiseni jõudes tekitas märkimisväärse erinevuse BIM mudelist. Selle lahendamiseks 3D skaneeriti valminud struktuur, et saada hoonest uuendatud mudel, mille alusel katuse ehitamist planeerida.[51] Ka käesolev projekt vajaks sarnast lähenemist – puitstruktuur tuleb peale iga korruse valmimist uuesti 3D skaneerida, et saada järgmisteks etappideks täpselt reaalsust kajastav mudel.



Illustratsioon 73. Loomulikust puidust hoone planeerimise ja ehitamise ajatelg

1. Betoonist kese

2. Puidu ja betooni ühendus

3 3D prinditud vaheseinad

4. Puitstruktuuri korruste ühendamine

5. Konsoolne korrus

6. Läbipaindevältimine

Põrandakate
Sammumüra matt
OSB plaat
Heliisolatsioon
Laeplaat
Puidu järgi lõigatud hammastega tala

Illustratsioon 74. Hoone struktuuri detailid

1. Betoonist kese

Hoonet keskelt läbi lõikavas betoonist mahus asuvad kommunikatsioonid ja vertikaalsed ühendused. Raamatukogu korruseid ühendav avar trepikoda on tuletõkkekardinatega eraldatav ning toimib evakuatsiooniteena.

2. Puidu ja betooni ühendus

Puidust skelett on ankurdatud betooni külge demonstreerides orgaaniliste vormi kombineerimise võimalusi standardsete ehitusmeetoditega.

3. 3D prinditud vaheseinad

3D prinditud vaheseinaelemente on võimalik toota täpselt puitstruktuuri vormi järgi.

4. Puitstruktuuri korruste ühendamine

Läbipainde ja murdumise vältimiseks peavad korrustevahelised koormused võimalikult otseselt üle kanduma. See tähendab, et nii post-tala kui ka tala-tala ühendamisel peavad posti harude ja tala diagonaalide ühenduspunktid kohakuti või lähestikku olema,

5. Konsoolne korrus

Avarama tänavaruumi loomiseks on esimene korrus tagasiastega, tekitades konsoolse teise korruse. Konsool on lahendatud pikema üleulatuva orgaanilise tala abil. Kolmas korrus on esimesest veel suurema tagasiastega, olles seeläbi konsoolsele talale vastukaaluks.

6. Läbipainde vältimine

Suurte koormuste all on orgaaniliste Vierendeeli talade ülemistel vöödel oht horisontaalselt painduda. Selle välistamiseks on vahelae struktuur planeeritud vöödele külgedelt stabiliseerivat survet avaldama.

3 Arengusuunad

Projekti eesmärgiks oli tõestada, et tänapäeval kättesaadavad tehnoloogiad peidavad endas võimalust taaskord looduslikke materjale rohkem arvesse võtta. Selline lähenemine käitub ökonoomsemalt loodusvaradega, kuid samas ei nõua tingimata, et me oma praeguseid standardeid ohverdaks. Selle asemel pakutakse välja viise kuidas tuvastada looduslike materjalide rakendamata võimalusi, mis muudaksid tulevikus ehitamist lihtsamaks.

Projekt keskendub hargnevale puidule, kuid sarnane mõtteviis on erinevates skaalades laiendatav ka puu teistele palju keerulisematele vormidele. Avardades silmapiiri veelgi enam ei pea piirduma ka ainult puiduga. Eesmärgiks on standardiseeritud lihtsusest edasi liikumine. Kui suudame oma mõtlemise ja tööriistad arendada piisavalt paindlikuks, on võimalik luua meetodeid mis iganes ebastandardsete elementidega töötamiseks, olgu see puit, kivi, taaskasutatavad ehitusjäägid või midagi hoopis muud.

Rakendada sellist meetodit esimest korda tänapäevases keskkonnas oleks kindlasti keeruline, kallis ja katsumusterohke ettevõtmine. Paljude teiste probleemsete kohtade hulgas ei sobitu projekt praegustesse ehitusmeetoditesse ja -standarditesse ning selle struktuuri staatiliste omaduste arvutamiseks ei ole täpseid tööriistu olemas. Kuid on lootus, et tõestades selle lähenemise potentsiaali on võimalik soodustada sellega tegelevate tehnoloogiate edasist arengut kuni punktini, kus suudetakse loodusliku materjali väärtusi rakendada enda kasuks viisil, mis ei vaja enam tohutuid töötlemise ja tootmise võrgustikke vähendades drastiliselt ka ehituse jalajälge. Iga asukoha kohalik materjal võib olla piisav mistahes eesmärgi jaoks, kui suudame leida kõige intelligentsema viisi see materjal enda kasuks tööle panna oma maksimaalse potentsiaaliga.

Kokkuvõte

Magistritöö eesmärgiks on olnud leida rakendus ebastandardsele loomulikule puidule, mida tänapäevane puidutööstus kohtleb vähemväärtusliku ülejäägina. Tuginedes ajaloolistele vernakulaarsetele ehitusmeetoditele ja puidu topoloogilise vormi uurimisele on välja töötatud meetod, mis rakendab digitaalset tootmistehnoloogiat, et lahendada vähetöödeldud looduslike elementidega kaasnev geomeetriline keerukus. See avab võimaluse rakendada puidu bioloogiliselt arenenud sisemisi potentsiaale arhitektuuris, pakkudes materjalisäästlikku alternatiivi keeruliste struktuuride lahendamiseks.

Projekti keskmeks on hargnevad puitelemendid, mida võib pidada puu kõige füüsiliselt tugevamaks vormiks, kuid mille pakutavaid võimalusi hetkel ei väärtustata. Neid elemente on käsitletud parameetriliste lihtsustuste abil, mis lubavad suure varieeruvusastmega vormi kohelda poolenisti standardsete elementide seeriana. Seeläbi on hargnevast puidust kombineeritud postide ja fermide struktuur, mis puidu loomulikke staatilisi tugevusi optimaalselt rakendab ning loodusliku sisemise loogika alusel uut tüüpi ruumi loob.

Struktuuri testimiseks on Tallinnasse kavandatud avalike töökodadega raamatukoguhoone, mis kompab loomuliku puidu ehitusliku ja arhitektuurse kasutamise võimaluste maksimaalseid piire. Hoone rakendab toorainena linnasiseselt raiutavaid puid, mille raie toimuks projektist sõltumata, kuid praegustesse tööstusahelatesse sobimatuse tõttu hetkel olulist otstarvet ei leia. Käsitletud on kogu ehitamise protsessi nii füüsiliselt ehitusobjektil töötamise osas kui ka selleks vaja minevate digitaalsete tööriistade arendamise näol. Sellest tuleneb uut tüüpi suhtumine arhitektuuri protsessi, kus inimlik visioon peab olema vastastikuses koostöös looduslike vormide omadustega. Tulemuseks on hoone, mis mitte ainult ei rakenda puidu ülejääke optimaalse struktuuri saavutamiseks, vaid ka eksponeerib materjali osana oma esteetikast ja ruumikogemusest.

Resümee

Vernakulaarset ehitust defineerib madala energiakuluga kohaliku ja töötlemata loodusliku materjali kasutamine. Sellise materjali ettearvamatud vormid kannavad endas kõrget keerukust, mis ei luba neil ehitusviisidel industriaalsete lahendustega konkureerida. Näiteks on ajalooliselt rakendatud nii puidu harusid, oksi kui ka juuri täitma spetsiifilisi funktsioone, kuid meetodid, kus konkreetne leitud element peab täitma konkreetset funktsiooni, ei skaleeru tänapäevaste vajaduste jaoks hästi.

Industriaalne lähenemine on pakkunud viise neid loomulikke materjale standardseteks töödelda. See on võimaldanud ehitamisel suuremat lihtsust ning lubanud lahendada erinevaid olukordi ilma materjali konkreetseid looduslike omadusi arvesse võtmata. Kuid selle hinnaks on olnud järjepidevalt kasvav materjali töötlemiseks vajalik energiakulu. Paradoksaalselt on loodusliku materjali loomulike potentsiaalide ära kasutamine vähem jätkusuutlikuks muutunud kui selle ümber töötlemine millekski uueks.

Väljapakutav lahendus on loodusliku materjali keerukuse ja tehnoloogilise standardiseerimise seose ümber mõtestamine. Parameetrilised süsteemid, 3D skaneerimine, 3D printimine ja CNC freesimine võimaldavad luua otsesema seose füüsilise ja digitaalse maailma vahel, mis avab uusi uksi. Selle asemel, et rakendada tehnoloogiat materjali enda lihtsustamiseks, on meil võimalus rakendada digitaalseid meetodeid, et materjali loomulikku keerukust mõista ja sellega tegeleda.

Projekti eesmärgiks on arhitektuuris rakendada vähetöödeldud ebastandardset puitu digitaalsete tootmismeetodite abil.

Fookuseks on puidu varjatud loomulike potentsiaalide rakendamine ehituses. Seda on võimalik saavutada võttes kasutusele puu hargnevad elemendid, mida tänapäevane metsatööstus näeb väheväärtusliku ülejäägina, kuid mineviku ehitajad on osanud hinnata selle bioloogiliselt arenenud struktuurset väärtust kasutades selle omadusi keerukates olukordades parima lahenduse leidmiseks.

Magistriprojektis on töötatud välja meetod, mille abil looduslikest kaootilistest elementidest leida standardsetena võetavaid seeriaid hargnevaid puitelemente. Nende abil on loodud terasfermidest ja Vierendeeli taladest inspireeritud struktuur, mis kannab endas loodusliku orgaanilisust, kuid allub siiski inimlikule ratsionaalsele loogikale. Puidu kasutamine analoogselt selle bioloogilistele tugevustele näitab, et selle loomulikud potentsiaalid suudavad täita samu rolle, mille jaoks tänapäeval materjale mitmekordselt ümber töötleme.

Selline ehitamisviis võtab arvesse iga puu hargnemise topoloogilisi eripärasid. See tähendab, et materjal ei allu täielikult arhitekti tahmistele ning kogu projekteerimise protsess tuleb ümber mõtestada. Selle jaoks on tegeletud parameetriliste tööriistade välja töötamisega, mis võimaldaksid luua funktsionaalseid plaane ning paralleelselt võtta arvesse, kuidas loomulikud elemendid seda mõjutaksid ja selle tekkimist suunaksid. See tekitab fundamentaalse muutuse arhitektuuri loomises, kus ehituse arvestatav tolerants suurel skaalal ei ole enam sentimeeter, vaid meeter.

Metodoloogia testimiseks on loodud uus raamatukoguhoone, mis kasutab kohalikku rakenduseta toormaterjali – Tallinna linnas maha võetavad puud. Eesmärgiks on olnud tõestada, et need orgaanilised vormid, mille üle arhitektil täielikku kontrolli olla ei saa, suudavad luua funktsionaalse ja linnaruumis toimiva terviku ning et loomuliku puidu bioloogilise potentsiaali õigesti ja sihipäraselt kasutamine suudab säästlikul viisil asendada tööstuslikult standardiseeritud materjale.

Abstract

Vernacular construction is defined by the use of low-energy local and only lightly processed natural materials. The unpredictable forms of such materials carry high complexity, which prevents these building methods from competing with current industrial solutions. For example, historically, wood branches, forking elements, and roots have been applied to fulfill specific functions, but methods where a specific natural element must perform a specific function do not scale well to contemporary demands.

The prevailing industrial approach has provided ways to process these natural materials into standardized building elements. This has offered greater simplicity in construction and allowed solving various situations without considering the specific natural properties of the material. However, the cost has been a consistently growing energy expenditure required for material processing. Paradoxically, exploiting the intrinsic potentials of natural materials has become less sustainable than processing them into something new.

My proposed solution is to reframe the relationship of the complexity of natural materials and technological standardization. Parametric systems, 3D scanning, 3D printing, and CNC milling enable creating a more direct connection between the physical and digital spaces and opening new possibilities through this. Instead of applying technology to simplify the material itself, we have the opportunity to use digital methods to understand and deal with the material's natural complexity.

The goal of this project is to utilize minimally processed non-standard wood in architecture by using digital production and fabrication methods.

The focus is on utilizing the hidden natural potentials of wood in construction. This can be achieved by employing the forking elements of trees, which the modern forestry industry views as low-value waste, but past builders knew how to appreciate them for their biologically evolved structural functions.

In this project, a method has been developed to treat natural seemingly chaotic wood as a semi-standard series of forking elements. Using these, a spatial system inspired by trusses and Vierendeel structures has been created, which carries natural organicity but still submits to human rational logic. Using wood analogously to its biological strengths demonstrates that its natural potentials can fulfill the same roles for which we today repeatedly reprocess materials.

This construction method accounts for the topological peculiarities of each tree. This means the material does not fully submit to the architect's will, and the entire design process must be rethought. For this purpose, parametric tools have been developed that allow creating functional plans while simultaneously accounting for how natural elements would affect and direct them. This creates a fundamental change in architectural approach, where the acceptable large scale tolerance in construction is no longer a centimeter, but a meter.

To test the methodology, a new library building has been designed, using local raw material that is currently without any valuable purpose - trees felled in the city of Tallinn. The goal has been to prove that these organic forms, over which the architect cannot have full control, can create a functional part of urban landscapes, and that correctly and purposefully utilizing the biological potential of natural wood can sustainably replace industrially standardized materials.

Allikad

Raamatud

L. Allner jt. Conceptual Joining: Wood Structures from Detail to Utopia. Viin: Birkhauser, 2022.

K. Durham, Viking Longship. Oxford: Osprey Publishing, 2002.

J. B. Hilling, The Wooden Architecture of Northern Europe: From the Viking Era to the 20th Century. London: Lund Humphries Publishers Ltd, 2022.

J. Stevens, R. Nelson, Digital Vernacular: Architectural Principles, Tools, and Processes, New York: Routledge, 2015

K. Zwerger, Wood and Wood Joints: Building Traditions of Europe, Japan and China. Basel: Birkhäuser, 2000

Publitseeritud materjal

J. Alexander, A Joint that Exploits Wood Movement. – FineWoodworking, 184-May/June 2006 Issue, https://www.finewoodworking.com/2006/05/01/a-joint-that-exploits-wood-movement (vaadatud 19. IV 2026).

R. S. Aouf, AA Design & Make students devise simple way to build with tree forks. – dezeen, 29. IX 2025, https://www.dezeen.com/2025/09/29/aa-design-make-tree-forks-architecture/ (vaadatud 8. IV 2026).

J. Billing, Ne-tsugi – Big Sand Woodworking, 16. III 2021, https://www.bigsandwoodworking.com/根継ぎ-ne-tsugi/ (vaadatud 8. IV 2026).

B. Brownell, Unprocessed Potential: Can Raw Trees Replace Engineered Timber? – Architect, 12. VI 2025, https://www.architectmagazine.com/technology/unprocessed-potential-can-raw-trees-replace-engineered-timber_o (vaadatud 8. IV 2026).

N. Bruscia jt. Nemagari Crafting – Utilizing Bent-root Timber with Mixed-Reality Fabrication. – AIA/ACSA Intersections Research Conference: Resilient Futures. 2022, lk 164-169, https://www.acsa-arch.org/proceedings/Fall%20Conference%20Proceedings/ACSA.FALL.22/ACSA.FALL.22.21.pdf (vaadatud 8. IV 2026).

P. Devadass jt. Robotic Fabrication of Non-Standard Material. - Generative Robotics. Toim S. Ahlquist. 2016, lk 206-213, https://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia16_206.pdf (vaadatud 8. IV 2026).

C. Drénou jt. Demystifying Tree Forks: Vices and Virtues of Forks in Arboriculture. – Journal of Botany Research 2020, vol 3, issue 1, lk 100-113, https://www.researchgate.net/publication/346234075_Demystifying_Tree_Forks_Vices_and_Virtues_of_Forks_in_Arboriculture (vaadatud 8. IV 2026).

M. Fabing, Wood Identification Systems. – WTP-Project Blog, 3. III 2021, https://wtp-project.com/blog/wood-identification-systems (vaadatud 19. IV 2026).

Five-Axis CNC Woodworking Lathe for Turning and Milling. – Catek CNC, https://www.catekcnc.com/products/multifunctional-cnc-wood-lathe/5-axis-7-in-1-cnc-wood-lathe.html (vaadatud 19. IV 2026).

E. Friedrich. The Voronoi Diagram in Structural Optimisation. – The Bartlett School of Graduate Studies - University College London 2008, https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/14631/1/14631.pdf (vaadatud 8. IV 2026).

Helsinki Central Library Roof and Facade Elements. – Timbeco. https://timbeco.ee/en/portfolio/helsinki-central-library/ (vaadatud 19. IV 2026).

A. Herzog, "Sustainable construction needs to be fully automated": Gilles Retsin leads visiting studio at D-ARCH. - ETHzürich, 12. VIII 2024, https://arch.ethz.ch/en/news-und-veranstaltungen/news-kanal/2024/08/automated-architecture-gilles-retsin-leads-visiting-studio-at-eth.html (vaadatud 23. IV 2026).

J. S. Jensen, Breeding of Broadleaves in a Nordic Perspective. – Baltic Forestry 2000, vol. 6, no. 2(11), lk 67-77, https://balticforestry.lammc.lt/bf/PDF_Articles/2000-6%5B2%5D/Breeding%20of%20Broadleaves%20in%20a%20Nordic%20perspective.pdf (vaadatud 8. IV 2026).

A. Karolak jt. Historical scarf and splice carpentry joints: state of the art. – Heritage Science 2020, https://www.nature.com/articles/s40494-020-00448-2 (vaadatud 8. IV 2026).

Langetatud puude äravedu. – Puulangetamine, https://www.puulangetamine.ee/langetatud-puude-aravedu (vaadatud 10. IV 2026).

Z. Mollica, M. Self, Tree Fork Truss: Geometric Strategies for Exploiting Inherent Material Form. - Advances in Architectural Geometry 2016. Toim S. Adriaenssens jt. Zürich, 2017, lk 138-153, https://zacharymolli.ca/assets/download/Mollica-Self-AAG-Tree-Fork-Truss.pdf (vaadatud 8. IV 2026).

R. D. Pearson, Design of Vierendeel Trusses. - Missouri S&T Library and Learning Resources. 1959, https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5536/ (vaadatud 10. IV 2026).

Raielubade andmekogu – Tallinn, https://www.tallinn.ee/et/teenused/raieluba (vaadatud 8. IV 2026).

S. D. Sofuoglu jt. A Survey for Determination of Wastage Rates at Massive Wood Materials Processing. - Wood Research 57 (2): 2012, lk 297-308, https://www.woodresearch.sk/wr/201202/12.pdf (vaadatud 23. IV 2026).

TAB 2019 Steampunk Pavilion. – Studio Igor Pantic, 2019, https://www.igorpantic.net/work/steampunk-pavilion (vaadatud 19. IV 2026).

The Importance of Structural Pruning in Urban Environments. – Independent Tree Service, Inc. https://independenttreeservice.com/general/the-importance-of-structural-pruning-in-urban-environments/ (vaadatud 8. IV 2026).

Three Way Bridle Joint. – 3x3Custom. https://www.3x3custom.com/tutorials/three-way-bridle-joint (vaadatud 17.IV.2026)

T. Vabamäe, Outlook on mechanical wood processing in Estonia. - Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 2014, https://jukuri.luke.fi/server/api/core/bitstreams/d3544c4c-ceb9-4e4f-99ff-d3e129931a09/content (vaadatud 8. IV 2026).

E. M. Wengert, D. A. Meyer, Solar Kiln Plans. - Oregon Wood Innovation Center, https://owic.oregonstate.edu/solarkiln/plans.htm (vaadatud 10. IV 2026).

What is LiDAR?. – Artec 3D. https://www.artec3d.com/learning-center/what-is-lidar (vaadatud 19. IV 2026).

Suulised allikad

A. Orlinski, veebikonsultatsioon autoriga, 10. II 2026. Märkmed autori valduses.

Illustratsioonid

Illustratsioon 1. Kuritsy sarikad, autori joonis allika põhjal, J. B. Hilling, The Wooden Architecture of Northern Europe: From the Viking Era to the 20th Century. London: Lund Humphries Publishers Ltd, 2022. lk 69

Illustratsioon 2. Ebastandardse puidu kasutamine viikingilaevade ehituses, autori joonis allika põhjal, H. S. Vial de Clairbois, l'Encyclopédie méthodique Marine, Paris: 1783

Illustratsioon 3. Puidu omaduste homogeniseerimine, autori joonis

Illustratsioon 4. Energiakulu ja keerukuse suhe, autori joonis

Illustratsioon 5. Woodchip Barn struktuuri skeem, autori joonis foto põhjal, foto: Valerie Bennett, Woodchip Barn. - Xylotek, https://www.xylotek.co.uk/projects/woodchip-barn (vaadatud 22. IV 2026).

Illustratsioon 6. Woodchip Barn struktuur, foto: Valerie Bennett, Woodchip Barn. - Xylotek, https://www.xylotek.co.uk/projects/woodchip-barn (vaadatud 22. IV 2026).

Illustratsioon 7. Woodchip Barn ehitus, foto: Valerie Bennett, Wood Chip Barn. - Xylotek, https://www.xylotek.co.uk/projects/woodchip-barn (vaadatud 22. IV 2026).

Illustratsioon 8. Torinosu skeem, autori joonis foto põhjal, foto: Gottingham, Torinosu. – Aki-Hamada, 2020, https://aki-hamada.com/projects/torinosu/ (vaadatud 22. IV 2026).

Illustratsioon 9. Torinosu, foto: Gottingham, Torinosu. – Aki-Hamada, 2020, https://aki-hamada.com/projects/torinosu/ (vaadatud 22. IV 2026).

Illustratsioon 10. Torinosu ehitamine liitreaalsuse abil, autori töödeldud foto, Using 3D Scanning And AR To Bring Out The Beauty Of Naturally Curved Logs. – FabCafe, 29. III 2021, https://fabcafe.com/magazine/using-3d-scanning-and-ar-to-bring-out-the-beauty-of-naturally-curved-logs/ (vaadatud 22. IV 2026).

Illustratsioon 11. Loodusest korduva geomeetria leidmine, autori joonis allika põhjal, AA Design & Make students devise simple way to build with tree forks. – Dezeen, 29. IX 2025, https://www.dezeen.com/2025/09/29/aa-design-make-tree-forks-architecture/ (vaadatud 22. IV 2026).

Illustratsioon 12. The Forest Datum, AA Design & Make students devise simple way to build with tree forks. – Dezeen, 29. IX 2025, https://www.dezeen.com/2025/09/29/aa-design-make-tree-forks-architecture/ (vaadatud 22. IV 2026).

Illustratsioon 13. Elementide standardseks lõikamise rakis, The Forest Datum. – AA Projects Review 2025, https://pr2025.aaschool.ac.uk/programmes/design-make/the-forest-datum (vaadatud 22. IV 2026).

Illustratsioon 14. Standardsetest elementidest struktuur, The Forest Datum. – AA Projects Review 2025, https://pr2025.aaschool.ac.uk/programmes/design-make/the-forest-datum (vaadatud 22. IV 2026).

Illustratsioon 15. Puu levinumad loomulikud topoloogilised elemendid, autori joonis

Illustratsioon 16. Tuulele avatud puu paindumine kuivades, autori joonis

Illustratsioon 17. Hargnevast puidust postid Põhja-Saksamaal, autori joonis allika põhjal, K. Zwerger, Wood and Wood Joints: Building Traditions of Europe, Japan and China. Basel: Birkhäuser, 2000. lk 50

Illustratsioon 18. Puu hargnemiskoha sisemine struktuur, autori joonis

Illustratsioon 19. Põhiharu, autori joonis allika põhjal, C. Drénou jt. Demystifying Tree Forks: Vices and Virtues of Forks in Arboriculture. – Journal of Botany Research 2020, vol 3, issue 1, lk 100-113, https://www.researchgate.net/publication/346234075_Demystifying_Tree_Forks_Vices_and_Virtues_of_Forks_in_Arboriculture (vaadatud 8. IV 2026). lk 109

Illustratsioon 20. Korduv haru, autori joonis allika põhjal, C. Drénou jt. Demystifying Tree Forks: Vices and Virtues of Forks in Arboriculture. – Journal of Botany Research 2020, vol 3, issue 1, lk 100-113, https://www.researchgate.net/publication/346234075_Demystifying_Tree_Forks_Vices_and_Virtues_of_Forks_in_Arboriculture (vaadatud 8. IV 2026). lk 109

Illustratsioon 21. Ooteharu, autori joonis allika põhjal, C. Drénou jt. Demystifying Tree Forks: Vices and Virtues of Forks in Arboriculture. – Journal of Botany Research 2020, vol 3, issue 1, lk 100-113, https://www.researchgate.net/publication/346234075_Demystifying_Tree_Forks_Vices_and_Virtues_of_Forks_in_Arboriculture (vaadatud 8. IV 2026). lk 110

Illustratsioon 22. Juhuslik haru, autori joonis allika põhjal, C. Drénou jt. Demystifying Tree Forks: Vices and Virtues of Forks in Arboriculture. – Journal of Botany Research 2020, vol 3, issue 1, lk 100-113, https://www.researchgate.net/publication/346234075_Demystifying_Tree_Forks_Vices_and_Virtues_of_Forks_in_Arboriculture (vaadatud 8. IV 2026). lk 110

Illustratsioon 23. Oksakoht, autori joonis

Illustratsioon 24. Ühes punktis kolmeks hargnemise tasapindne lõikamine, autori joonis

Illustratsioon 25. Kahes lähestikkuses punktis kaheks hargnemise tasapindne lõikamine, autori joonis

Illustratsioon 26. Tallinna raiete tabel, autori tabel allika info põhjal, Raielubade andmekogu. – Tallinn, https://www.tallinn.ee/et/teenused/raieluba (vaadatud 8. IV 2026).

Illustratsioon 27. Tallinna raiete põhjused, autori tabel allika info põhjal, Raielubade andmekogu. – Tallinn, https://www.tallinn.ee/et/teenused/raieluba (vaadatud 8. IV 2026).

Illustratsioon 28. 3D skaneeritud puude haruelemendid, autori joonis

Illustratsioon 29. 3D skaneeritud puud, autori joonis

Illustratsioon 30. Okste kogumine, foto: Kseniia Darmostuk

Illustratsioon 31. Okste 3D skaneerimine fotogrammeetria abil, autori foto

Illustratsioon 32. 3D skaneerimise tulemus, autori joonis

Illustratsioon 33. Kogutud oksad, autori joonis

Illustratsioon 34. Makett, autori foto

Illustratsioon 35. Makett, autori foto

Illustratsioon 36. Makett, autori foto

Illustratsioon 37. Lihtsustamine telgjooneks ja ristlõigeteks, autori joonis

Illustratsioon 38. Lihtsustamine kolmeks otspunktiks, autori joonis

Illustratsioon 39. Lihtsustamine telgedeks ja otste suunavektoriteks, autori joonis

Illustratsioon 40. Makett, autori foto

Illustratsioon 41. Ajapikku kahanevad ja jäigastuvad tapid, autori joonis

Illustratsioon 42 Harudest kuusnurkne struktuurieksperiment, autori joonis

Illustratsioon 43. Tala rakendab oksakohaga elemente, autori joonis

Illustratsioon 44. Oksakoha loomulike tugevuste rakendamine struktuuris, autori joonis

Illustratsioon 45. Fermi ja Vierendeeli tala võrdlus orgaanilises puitstruktuuris, autori joonis

Illustratsioon 46. Fermi problemaatika nihe, autori joonis

Illustratsioon 47. Orgaaniline Vierendeeli tala, autori joonis

Illustratsioon 48. Tala rakendab tüve harngemisi, autori joonis

Illustratsioon 49. Loomupärane rakendus puutüvele, autori joonis

Illustratsioon 50. Kaheharuline post toetamas tala keskelt, autori joonis

Illustratsioon 51. Kolmeharuline post toetamas kolme tala liitepunkti, autori joonis

Illustratsioon 52. Ne-tsugi tapp, autori joonis

Illustratsioon 53. Kolmesuunaline harktapp, autori joonis

Illustratsioon 54. Puidu topoloogia alusel rakendamise skeem, autori joonis

Illustratsioon 55. Postide ja talade ruumiline ühik, autori joonis

Illustratsioon 56. Postide hargnemisest tekkiv orgaaniline ruumistruktuur, autori joonis

Illustratsioon 57. Rakustruktuur, autori joonis

Illustratsioon 58. Orgaaniline puitstruktuur, autori joonis

Illustratsioon 59. Skemaatilisest plaanist orgaanilise struktuuri genereerimine, autori joonis

Illustratsioon 60. Tala elementide paari panemise süsteem, autori joonis

Illustratsioon 61. Hoone tänavavaade, autori joonis

Illustratsioon 62. Lõige, autori joonis

Illustratsioon 63. Tallinna raielubade kaart, autori joonis allika põhjal, allikas: Raielubade andmekogu. – Tallinn, https://www.tallinn.ee/et/teenused/raieluba (vaadatud 8. IV 2026), infot töödelnud: Kaur Rikkinen

Illustratsioon 64. Asendiplaan, autori joonis

Illustratsioon 65. Raamatukogu sisevaade, autori joonis

Illustratsioon 66. Kohviku sisevaade, autori joonis

Illustratsioon 67. 3D prinditud vaheseinad, autori joonis

Illustratsioon 68. Orgaanilise puiduga integreeritud mööbel, autori joonis

Illustratsioon 69. Esimese korruse plaan, autori joonis

Illustratsioon 70. Teise korruse plaan, autori joonis

Illustratsioon 71. Kolmanda korruse plaan, autori joonis

Illustratsioon 72. Fuajee sisevaade, autori joonis

Illustratsioon 73. Loomulikust puidust hoone planeerimise ja ehitamise ajatelg, autori joonis

Illustratsioon 74. Hoone struktuuri detailid, autori joonis

