



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Heigo Ilves

**CNC-TÖÖTLUSTEGA PUUSEPALIIDETEGA
METSLOOMADE VÄLISTATSIONAARI
PROJEKTEERIMINE JA SÕLMEDE
TUGEVSOMADUSTE UURIMINE**

DESIGNING WILD ANIMALS OUTDOOR ENCLOSURE
MADE WITH CNC MACHINED CARPENTRY JOINTS AND
THEIR STRENGTH INVESTIGATION

Magistritöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: lektor Tõnis Teppand, *MSc*

Tartu 2022

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Heigo Ilves		Õppekava: Maaehitus (382)	
Pealkiri: CNC-tööstlustega puusepaliidetega metsloomade välistatsionaari projekteerimine ja sõlmede tugevusomaduste uurimine			
Lehekülgi: 106	Jooniseid: 62	Tabeleid: 11	Lisasid: 8
Osakond / Õppetool: Metsandus- ja inseneeriainstituut / Maaehituse ja veemajanduse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Tsiviilehitus (T220)			
Juhendaja(d): Tõnis Teppand			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2022			
Viimastel aastatel on ehitustööstuses hakatud ehitatavate hoonete keskkonnamõju vähendamiseks pöörama suuremat tähelepanu loodust säästvate ehitusmaterjalide kasutamisele. Puit on üks sellistest materjalidest, mille kasutamine on taaselustunud tänu keskkonnasäästlikule mõtlemisele ning puittoodete uudsete tehniliste lahenduste ja liidete väljatöötamisele. Lisaks on CNC-töötlemiskeskuste laialdane levik võimaldanud traditsiooniliste puusepaliidete (nt kalasabatapp) uuesti kasutusele võtmist, kuid nende projekteerimise ja arvutamise muudab keeruliseks standardite puudumine. Magistritöö eesmärgiks oli koostada Eesti Maaülikooli Veterinaarmeditsiini ja loomakasvatuse instituudi (edaspidi EMÜ VLI) metsloomade välistatsionaari puitkonstruktsioonide töö- ja tootejoonised varem koostatud eelprojekti alusel. Silmas peeti EMÜ käsutuses olevaid projekteerimistarkvarasid ja riistvara ning seadmeparki koos minimaalse koguse metallist kinnitusvahendite kasutamisega. Lisaks uurida väljavalitud liidete tugevusomadusi ja anda esialgne hinnang kogu hoone keskkonnataluvusele ajas. Välistatsionaari projekteerimisel peeti silmas võimalikult vähest erinevate liidete kasutamist ja nende tehnilise teostamise võimekust ainult EMÜ seadmetega. CNC-töötlemiskeskuse olemasolu võimaldas liidetena kasutada valdavalt traditsioonilisest kalasabatapist edasi arendatud suhteliselt uut kiilukujulist ümardatud kalasabatappi, mis lisaks oma mitmekülgsele töötamisviisile ehk suutlikkusele võtta vastu			

erinevaid sisejõude, on ka kiiresti toodetav. Ühtlasi võib pidada kiilukujulise ümardatud kalasabatapi uudsust ja senist vähest kajastatust põhjuseks, miks otsustati antud töö raames keskenduda just selle liite käitumise uurimisele paindel ja tõmbel. Kuna läbiviidud katsetel toimus koormuse rakendamisel mitmete asjaolude kokkulangevusel tapikeele tapipesast välja libisemine, siis puudub võimalus põhjapanevate järelduste tegemiseks liite eeldatud viisil tööle hakkamise kohta.

Autori hinnangul oleks üheks jätku-uuringu võimaluseks kiilukujuta ning ümarduseta kalasabatapi, aga ka kiilukujulise ümardatud kalasabatapi painde- või tõmbetugevuse katsetamine erinevate geomeetriliste parameetrite muutmisel ja täiendaval fikseerimisel puitnaagli/-naelaga.

Märksõnad: projekteerimine, CNC-töötlemiskeskus, kalasaba, keskkonnasäästlik

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Master’s Thesis	
Author: Heigo Ilves		Curriculum: Rural Engineering	
Title: Designing wild animals outdoor enclosure made with CNC machined carpentry joints and their strength investigation			
Pages: 106	Figures: 62	Tables: 11	Appendixes: 8
Department / Chair: Institute of Forestry and Engineering / Chair of Rural Building and Water Management			
Field of research and (CERC S) code: Civil engineering (T220)			
Supervisors: Lecturer Tõnis Teppand			
Place and date: Tartu 2022			
In recent years, the construction industry has begun to pay more attention to the use of environmentally friendly building materials in order to reduce the environmental impact of buildings under construction. Wood is one of the materials whose use has been revived thanks to environmentally friendly thinking and the development of innovative technical solutions, joints and wood products. In addition, the widespread use of CNC machining centers has allowed the re-use of traditional carpentry joints (eg dovetail), but their design and calculation are complicated by the lack of standards. The purpose of this Master’s thesis was to make working and product drawings of the wild animals outdoor enclosure wooden constructions of the Institute of Veterinary Medicine and Animal Sciences of the Estonian University of Life Sciences on the basis of a preliminary project prepared earlier. The design software, hardware and equipment available to the EMÜ with a minimum quantity of metal parts were considered. In addition, to study the strength properties of the selected joints and to make a preliminary assessment of the environmental sustainability of the entire building. The least possible use of different joints and the ability to perform them technically with EMÜ tools were kept in mind when designing the wild animals outdoor enclosure.			

Availability of a CNC machining center made it possible for most of the joints to use a relatively new wedge-shaped rounded dovetail joint developed from the traditional dovetail, which, due to its versatile way of working (can carry different internal forces), can also be manufactured quickly. At the same time, the novelty of the wedge-shaped rounded dovetail and insufficient coverage so far can be considered the reason why it was decided to focus on the study of the flexural and tensile behavior of wedge-shaped rounded dovetail joint. As a result of a number of coincidences during performed tests when the tenon slipped out of the mortise, it is therefore not possible to draw fundamental conclusions about the expected operation of the joint.

According to the author, one of the possibilities of a further study would be to test the flexural or tensile strength of a dovetail joint without a wedge shape and without rounding, as well as a wedge-shaped rounded dovetail joint with different geometrical parameters and at additional fixing with dowels or nails.

Keywords: Designing, CNC, dovetail, environmentally friendly

SISUKORD

SISSEJUHATUS	7
1. KIRJANDUSE ANALÜÜS.....	10
1.1. Puusepaliited ja nende kasutamine.....	10
1.2. Metsloomade välistatsionaari tüpoloogilised ja ehituslikud nõuded.....	17
1.3. Puitehitise keskkonnataluvuse hindamine.....	19
2. MATERJAL JA METOODIKA	22
2.1. Hoone eskiis	22
2.2. Hoone eelprojekt	23
2.3. Hoone põhiprojekt.....	24
2.4. Koormusarvutused.....	26
2.4.1. Sarika kandevõime kontroll	28
2.4.2. Karkassiposti kandevõime kontroll.....	32
3. PUUSEPALIITED.....	40
3.1. Sobiva tarkvara otsimine	40
3.2. Töös kasutatud puusepaliited	41
3.2.1. Kiilukujulised ümardatud kalasabatapid.....	42
3.2.2. Hammaskaldlukk tapp	44
3.2.3. Puitnaaglitega puit-puiduga liide	45
4. TOOTMINE.....	47
4.1. Materjali sorteerimine ja valimine	47
4.2. Detailide toorikute ettevalmistus.....	47
4.3. CNC-töötlusted.....	48
5. KATSEKEHADE UURIMINE	50
5.1. Katsekehade valmistamine	50
5.2. Liidete katsetamine.....	52
6. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS.....	57
6.1. Painde- ja tõmbekatsete tulemused	57
6.2. Painde- ja tõmbekatsete tulemuste analüüs	61
7. ARUTELU.....	64
8. KOKKUVÕTE	68
KASUTATUD KIRJANDUS	70
LISAD	73
Lisa 1. Röövlindude minimaalsete bokside mõõdud aktiivsuse ja linnuliigi järgi.....	74
Lisa 2. Ehitusseadustiku lisa 1	75
Lisa 3. Hoone eelprojekti joonised.....	76
Lisa 4. Hoone põhiprojekti joonised	81
Lisa 5. Sõlmede põhimõttelised lahendused	86
Lisa 6. Sõlmede realiseeritud lahendused	93
Lisa 7. Painde- ja tõmbekatsete seeriade tulemused	104
Lisa 8. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	106

SISSEJUHATUS

Viimastel aastatel on ehitustööstuses hakatud ehitatavate hoonete keskkonnamõju vähendamiseks pöörama suuremat tähelepanu loodust säästvate ehitusmaterjalide kasutamisele. Puit on üks sellistest materjalidest, mille kasutamine on taaselustunud tänu keskkonnasäästlikule mõtlemisele ning puittoodete uudsete tehniliste lahenduste ja liidete väljatöötamisele (O’Ceallaigh jt 2021).

Tänapäevased teadmised puusepaliidete projekteerimisel, modelleerimisel ja kontrollimisel (Ceraldi jt 2021) arvutitarkvaraga ning mitmeteljelised arvuti teel juhitud töötlemiskeskused (edaspidi *CNC-töötlemiskeskus*) võimaldavad uuesti kasutusele võtta traditsioonilisi lahendusi. Seni on need liited neile omase mahu ja kallihinnalise käsitöö tõttu leidnud kasutust üksnes vanade ja muinsuskaitsete objektide kahjustunud detailide väljavahetamisel ja/või restaureerimisel, kus soovitakse kasutada võimalikult ajastutruusid materjale ja töövõtteid (Arciszewska-Kędzior jt 2015). Üldjuhul ei toimu enam traditsiooniliste puusepaliidete suuremahulisi edasiarendusi, vaid peamiselt katsetatakse eksperimentaalselt või lõplike elementide meetodil töötavate tarkvaradega, kuidas sellised liited erinevate materjalide/kinnitusvahenditega töötavad, mil viisil oleks võimalik olemasolevaid liiteid tugevdada või suurendada nende keskkonnasäästlikust. Küll on aga ümber oma telje pöörlevate lõiketerade kasutuselevõtt võimaldanud traditsioonilisest kalasabatapist edasi arendada universaalse, erinevaid sisejõude vastuvõtva kiilukujulise ümardatud kalasabatapi.

Kuigi CNC-töötlemiskeskuste kasutamine võimaldab hoida kokku aega, siis traditsiooniliste puusepaliidete projekteerimiseks puuduvad enamasti igasugused arvutuseeskirjad. Lõplike elementide tarkvaraga saab virtuaalselt modelleerida ja hinnata traditsiooniliste puusepaliidete vastupidavust, mida varem ei osatud ja milliste kasutamisel on seni lähtutud pigem traditsioonidest ning pärandoskustest. Paralleelselt modelleerimise ja katsetamisega on aga võimalik töötada välja sellised liidete projekteerimise arvutuseeskirjad, mis lubavad jätta kõrvale mahuka katsekehade tootmise ning uurimise. Näiteks on ettevõttel Ingtools arendatud välja suhteliselt uus kiilukujulise ümardatud kalasabatapi projekteerimise ja

põikjõukandevõime kontrollimise tarkvara, mis baseerub Eurokoodeks 5-l, kuid mille puitristlõigete kasutatavad mõõtmed on piiratud seoses arengujärgus olemisega.

Samas on oluline mõista, et üksnes CNC-töötlemiskeskuse ja puusepaliidete projekteerimise tarkvara olemasolu ei taga alati head tulemust. Sealjuures võivad probleeme tekitada ebakõlad tarkvarade omavahelises ühildumises. Kuna CNC-töötlemiskeskuste täpsus ulatub kümnetuhandikeni, siis tuleb tarbetu ja sageli ajakuluka lisatöö vältimiseks panna suurt rõhku nii täpsele ja võimalikult detailsele projekteerimisele kui ka töödeldavate materjalide kalibreeritusele ning kooskõlale projekteeritud ristlõigetega töötlemise ajahetkel.

Lisaks eelpool nimetatule mõeldakse ehitustööstuses keskkonnasäästlikkuse suurendamise all soovi asendada puit-puiduga liidetes terasest kinnitusvahendid ning liimid (O’Loinsigh jt 2021a) puidust kinnitusvahenditega, nt naaglitega. Naaglite näol on tegemist peamiselt puidust või terasest valmistatud ümarate või plaatjate detailidega, mida kasutatakse kas puitelementide omavaheliseks või terasest elementidega ühendamiseks (Veski: 183-187).

Käesolev magistritöö on arenenud lõputööks alates Maaehituse erialal läbitud projekteerimise praktikast, kus tutvustati CNC-puidulaborit ning praktika eesmärgiks oli disainida CNC-töötlemiskeskusega valmistatav töölaud. Õnnestunud praktika järgselt tehti töö autorile ettepanek koostada Eesti Maaülikooli Veterinaarmeditsiini ja loomakasvatuse instituudi (edaspidi *EMÜ VLI*) metsloomade välistatsionaari eskiisid. Eskiiside valmimise järgselt tekkis töö autoril võimalus ka eelprojekti koostamiseks, misjärel otsustati välistatsionaar EMÜ jõududega toota ning püstitada. Sealjuures kaasati hoone ehitamiseks vajaliku rahastuse saamiseks ka Keskkonnainvesteeringute Keskust (edaspidi *KIK*), kuhu esitati vastavasisuline taotlus. KIK-ile esitatud taotluse sisulisel koostamisel käesoleva töö autor ei osalenud.

Kuivõrd EMÜ visiooniks on muuhulgas „roheline ülikool“ olemine, siis sooviti ka metsloomade välistatsionaar ehitada võimalikult väikese ökoloogilise jalajäljega, mis antud töö kontekstis tähendab võimalikult suure hulga puitdetailide kasutamist. Ainult puitmaterjalidest hoone ehitamine eeldab aga suurel hulgal täpsete puusepaliidete kasutamist. Töö autori isiklik huvi puidu ja projekteerimise vastu ning CNC-töötlemiskeskuse olemasolu andis tõuke metsloomade välistatsionaari ehitamise jaoks sobilike puusepaliidete uurimiseks ja püstitatud eesmärgi teostatavuse formuleerimiseks magistritööks.

Eeltoodust tulenevalt on käesoleva magistritöö eesmärgiks koostada EMÜ VLI metsloomade välistatsionaari puitkonstruktsioonide töö- ja tootejoonised varem koostatud eelprojekti alusel. Silmas peeti EMÜ käsutuses olevaid projekteerimistarkvarasid ja riistvara ning seadmeparki koos minimaalse koguse metalldetailide kasutamisega. Lisaks uurida väljavalitud liidete tugevusomadusi ja anda esialgne hinnang kogu hoone keskkonnataluvusele ajas.

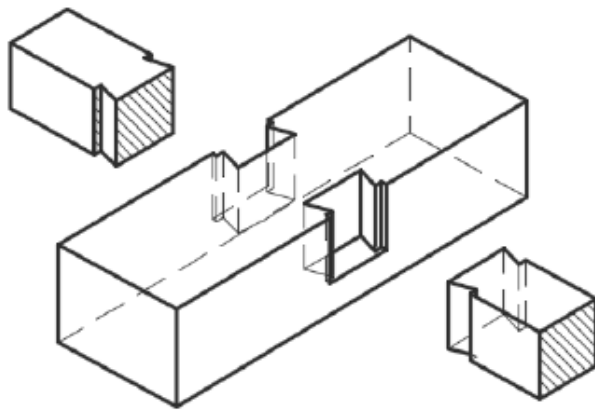
Käesolev magistritöö, mille vormistamiseks on kasutatud APA viitamissüsteemi, koosneb seitsmest peatükist. Töö esimeses peatükis antakse ülevaade puusepaliidete kasutamisest ajaloos ning tänapäeval, tutvustatakse metsloomade välistatsionaari mõistet ja selle tüpoloogilisi ning ehituslikke nõudeid. Lisaks tuuakse välja puitehitise keskkonnataluvust mõjutavad faktorid. Teises peatükis kirjeldatakse metsloomade välistatsionaari projekteerimist eskiisidest tööjoonisteni koos karkassi koormusarvutustega. Töö kolmandas peatükis keskendutakse metsloomade välistatsionaari projekteerimisel kasutatud puusepaliidetele, nende tööpõhimõtetele ning tehtud valiku põhjenduste täpsemale kirjeldamisele. Neljandas peatükis antakse ülevaade metsloomade välistatsionaari tootmise etappidest. Töö viiendas ja kuuendas peatükis kirjeldatakse väljavalitud liidete katsekehade valmistamist ja katsetamist ning tuuakse välja tugevuskatsete tulemused koos analüüsiga. Töö viimases ehk seitsmendas osas asub kogu tööd hõlmav arutelu.

1. KIRJANDUSE ANALÜÜS

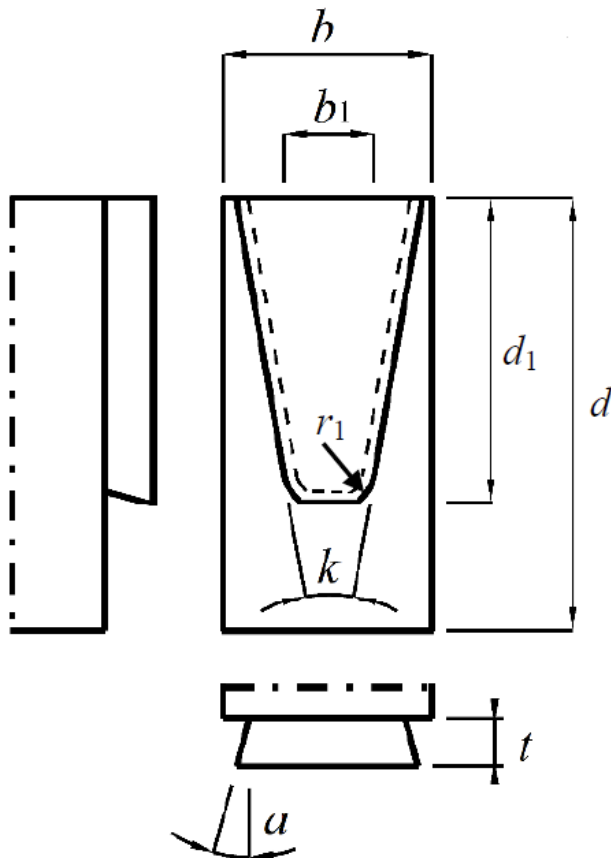
1.1. Puusepaliited ja nende kasutamine

Ajalooliselt on puusepaliiteid nimetatud ka puiduseotisteks. Olenevalt liite valmistamise tehnoloogiast ning peamiste sisejõudude ülekandmise viisist saab puusepaliited jagada raid-, naagel-, tüübel- ja ralgseotisteks. Raidseotisi kasutatakse tänapäeval peamiselt ehitusobjektidel puidu jätkamiseks ja seetõttu peavad need olema võimalikult lihtsad ja kiiresti tehtavad. Raidseotiste fikseerimiseks kasutatakse küll metallist kinnitusvahendeid, kuid peamiste sisejõudude vastuvõtt toimub puitdetaili enda kaudu. Raidseotiste hulka kuuluvad erinevad palkmajade tapid, k.a kalasabatapid (*dovetail joints*) ja hammaskaldlukk (*stop-splayed scarf joint*) tapid. Tänapäeval on keerulised raidseotised metallist kinnitusvahendite laia saadavuse tõttu asendumas üha enam nael-, kruvi- ja poltliidetega, millele on tähelepanu juhtinud juba Arvo Veski (1948) oma käsiraamatus “Puusepa ja laudsepa tööd”. Näiteks leiavad universaalse kalasabatapi asemel rakendust alumiiniumist ja terasest peitkonsoolid ning terasnaaglid ja materjali jätkamiseks kasutatud hammaskaldlukk tapp on asendunud sõrmjätkatud puiduga, ehkki nende tööpõhimõte on erinev.

CNC-töötlemiskeskuste ja käsifreeside laialdane kättesaadavus on toonud endaga kaasa selle, et traditsioonilisest kalasabatapist (vt joonis 1.1.) on edasi arendatud kiilukujulised ümardatud kalasabatapid (*rounded dovetail joints*) (vt joonis 1.2.). Kiilukujulisus tähendab seda, et tapi laius on ühes otsas kitsam kui teises ning ümardatus väljendub valitud raadiusega tapi kitsama otsa tapipõskede omavahelises sujuvas ühendatuses (vt joonis 1.2.). Ümardatud tappide valmistamise tegi võimalikuks ümber oma telje pöörlevate lõiketerade kasutuselevõtt tavaliste lapikpeitlite asemel. Kiilukujuliste ümardatud kalasabatappide näol on tegemist võrdlemisi uute puit-puiduga liidetega, mille kasutamine on kiiresti populaarsust kogunud eeskätt nende universaalsuse ja kiire valmistamise tõttu, olenemata sellest, et puidu anisotroopne ehitus, keerukas pingajaotus ja standardite puudumine raskendab nende projekteerimist (Tannert jt 2010a; 2010b).



Joonis 1.1. Traditsiooniline kalasabatapp (Just 2015).



Joonis 1.2. Kiilukujuline ümardatud kalasabatapp (Tannert 2016: 263).

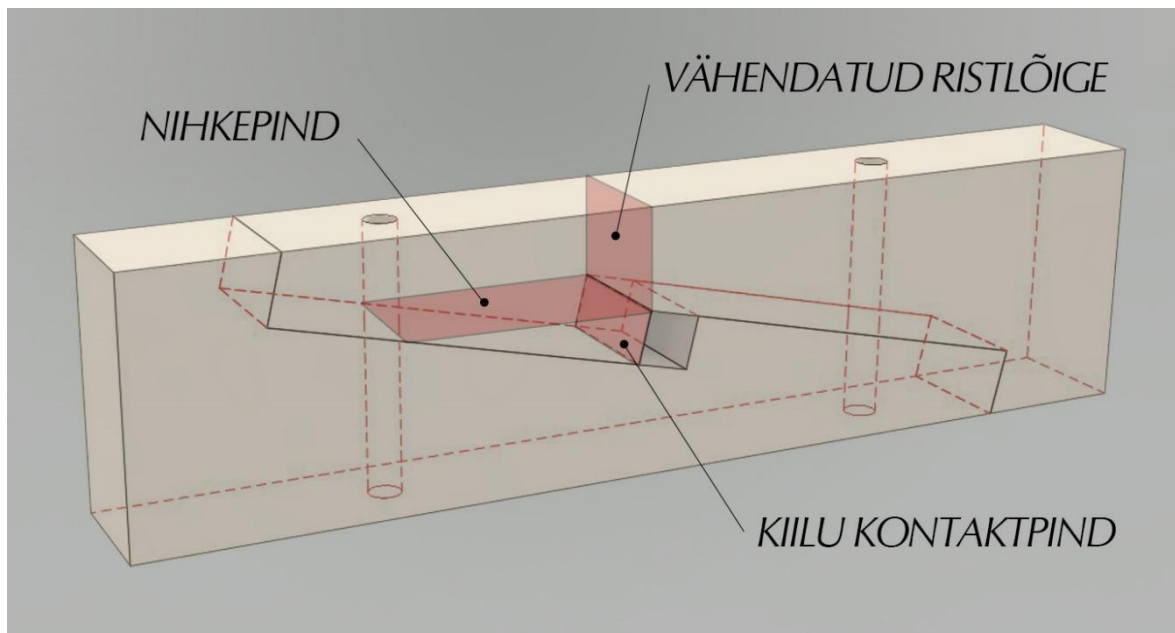
Kiilukujulisi ümardatud kalasabatappe kasutatakse peamiselt põikjõu ülekandmiseks, aga katsetused näitavad, et need tapid töötavad hästi ka tõmbele ja paindele (Tannert jt 2010). Muuhulgas näitavad uurimused, et eelnevalt nimetatud tapi kandevõime ei sõltu sellest, kas tema valmistamiseks on kasutatud käsifreesi või CNC-töötlemiskeskust (Tannert 2016). Lisaks erinevaid sisejõude vastuvõtvale ehk mitmekülgsale töötamisviisile, kasutatakse

kalasabatappe nähtavale jäetud puitkonstruktsioonide korral, kus üldiselt ei soovita kinnitusvahendeid näha.

Eurokoodeks 5 käsitleb küll toel paiknevate sisselõigetega tala otste kontrolli nihkele, kus on arvestatud ristlõike vähendatud kõrgusega, aga autorile teadaolevalt ei käsitleta ametlikes dokumentides traditsioonilise kalasabatapi (vt joonis 1.1) kandevõime kontrolli paindele ja tõmbele. Saksamaal asuv ettevõtte Ingtools on arendanud kiilukujulise ümardatud kalasabatapi arvutamise ja disainimise tarkvara, mis baseerub Eurokoodeks 5-l, ning mis on mõeldud nimetatud liite põikjõukandevõime kontrollimiseks. Kuivõrd tarkvara piirab tapikeelega detaili minimaalseks ristlõikeks 57×120 mm, siis ei saa käesoleva töö raames projekteeritaval metsloomade välistatsionaaril kasutatavat sarikat arvutuslikult kontrollida. Ingtools on saanud oma meetodile Saksamaal *Deutsches Institut für Bautechnik (DIB)* poolt välja antud tehnilise tunnustuse No. Z-9.1-649. Eelnevalt nimetatud dokumendis olevatest valemitest nähtub, et kiilukujulise ümardatud kalasabatapi põikjõukandevõime arvutatakse tapikeele kandevõime ja tapipesa kandevõime võrdlusel. Liite kandevõimeks valitakse väiksem tulemus. Tapikeele kandevõime leitakse modifitseeritud toel sisselõikega ristkülikulise ristlõikega tala valemiga ning tapipesa arvutamisel lähtutakse tõmbel ristikiudu valemist.

Raskesti ligipääsetavatesse kohtadesse puidust kergehitist püstitades võib ette tulla olukordi, kus pikka täispuitmaterjali ei ole võimalik saada või pole otstarbekas transportida ja materjali tuleb jätkata traditsioonilisel viisil. Selleks sobib väga hästi kiilude ja puitnaaglitega tugevdatud hammaskaldlukk tapp (vt joonis 1.3.), mis on kõige tugevam liimi- ja metallist kinnitusvahendite vaba materjali pikijätkamise liide (Branco, Descamps 2015: 35). Mõeldes keskkonnasäästlikkusele on kõik sellise liite komponendid puidust. Lukuks kasutatakse tihti kõvast lehtpuust kiile, mis parandab liidetavate detailide kontaktpindasid. Kuigi selline liide saab väga tugev ning liite tugevdamiseks saab lisada sinna ka puidust naaglid (Arciszewska-Kędzior jt 2015), nagu käesoleva projekteeritud välistatsionaari puhul, siis ei saa see kunagi olema nii tugev, kui liiteta sama ristlõikega detail. Hammaskaldlukk tapp, nagu ka kõik teised sarnased variandid, on arendatud rööplukk tapist eesmärgiga tugevdada liidet. Hammaskaldlukk tapp töötab paremini lõikele, kui rööplukk tapp, sest teravad nurgad puuduvad ja liite tegemiseks on vähem materjali ära lõigatud. Varasemalt läbiviidud katsete tulemustest lähtuvalt on soovitatud tugevdamata hammaskaldlukk tapi paindekandevõime väärtuseks võtta kolmandik terve ristlõike

paindekandevõimest (Branco, Descamps 2015: 45). Sellepärast on mõistlik jätkuvtalana arvutatud talade jätkud planeerida minimaalse paindemomendiga alasse, mis üldiselt on ühe neljandiku kuni ühe kuuendiku kaugusel sillatava ava toest. Ceraldi jt (2021) katsetulemused näitavad, et hammaskaldlukk tappi võib tugevdada nii terasest kui ka kõvast lehtpuust naaglitega. Purunemispildid on tugevdatud ja tugevdamata tappidel samad, aga tugevdatud liite painde-, tõmbe- ja nihketugevus on suurem jõudude ümberjaotumise tõttu liites. Joonisel 1.3. on välja toodud hammaskaldlukk tapi peamised purunemise piirkonnad (Ceraldi jt 2021: 11). Valdavalt purunevad hammaskaldlukk tapid nihkepinnal toimuva purunemise ning kiilu purunemise tõttu, millest viimase tingib kiilu pinnale avalduv survejõud. Vähem puruneb liide vähendatud ristlõikega alas.



Joonis 1.3. Hammaskaldlukk tapp ning selle peamised purunemise piirkonnad (autori tõlge ja joonis) (Ceraldi jt 2021: 3).

Lisaks uute puusepaliidete väljatöötamisele ja traditsiooniliste liidete uuesti kasutuselevõtule otsitakse alternatiivseid lahendusi ka metallist kinnitusvahenditele. Laialdaselt on kasutatud puidust naagleid, mis sobivad pigem põhikonstruktsiooni detailide omavaheliseks fikseerimiseks (ehk mitte sisejõudude ülekandmiseks) ning ühe- või mitmelõikelistesse liidesse. Kuigi on arendatud ja katsetatud ka termomehaaniliselt tugevdatud puidust naagleid (El-Houjeyri jt 2019), siis viimistlusmaterjalide, nagu laudvoodri paigaldamiseks puudus alternatiiv. Eelmisel kümnendil arendati välja ja hakati tootma suruõhupüstoliga lastavaid puitnaelu. Üheks selliseks tootjaks on Beck. Vastavalt *Deutsches Institut für Bautechnik (DIB)* poolt välja antud Saksamaa riiklikule tehnilisele

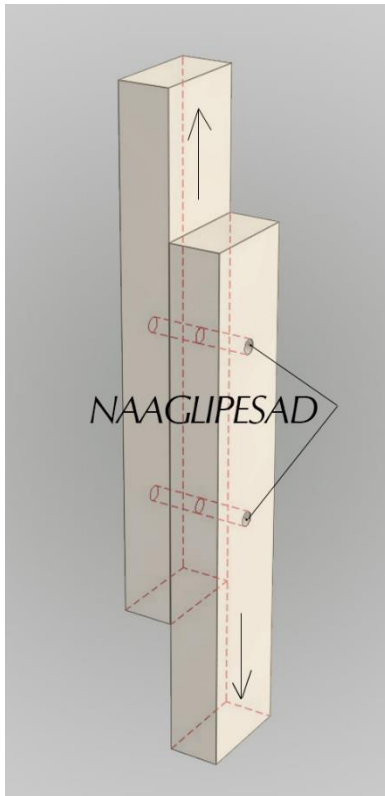
tunnustusele No. Z-9.1-899 on Becki toodetud Lignoloc puidust naelad tüübel või naagel tüüpi kinnitusvahendid, mis on tugevdatud ning sünteetilise vaiguga immutatud ümarnaelad ristlõikega 2,8 - 5,3 mm. Välistatsionaari puhul on kasutatud 3,7 mm ristlõikega ilma peata 60 mm pikkuseid pöögipuidust naelu. Kõnealuseid naelu võib kasutada kandvates, ühelõikelistes ja põikjõuga koormatud sõlmedes, mis on tehtud pehmest puidust või puidupõhiste plaatide ning kipsplaatide kinnitamiseks puitkonstruktsiooni külge. Naela tihedus jääb vahemikku 1,100 kg/m³ - 1,300 kg/m³ ning nende normatiivne paindekandevõime sõltub läbimõõdust, mis on leitav tabelist 1.1. Näiteks 2,8 mm läbimõõduga puitnaela paindekandevõime on 700 Nmm.

Tabel 1.1. Lignolock naelte normatiivne paindekandevõime (autori tõlgitud tekst) (Beck)

Diameeter d mm	2,8	3,7	4,7	5,3
Paindekandevõime $M_{u,k}$ Nmm	700	1400	2250	3560

Naaglite näol on tegemist peamiselt puidust või terasest valmistatud ümarate või plaatjate detailidega, mida on üle maailma kasutatud valdavalt puitkarkassehitistes puidust detailide fikseerimiseks (Shanks jt 2008: 562) või ühelõikeliste (joonis 1.4.) ning kahe- ja enamlõikeliste, valdavalt puit-puiduga või teras puiduga liidetes, kuid nende kasutamine koormust üle kandva detailina on, erinevalt puuseliite tapipõsest, tugevusomadustega piiratud. Kuju järgi saab naagleid liigitada: ümarmaterjalist naagel, torunaagel, tihvtid ja tüüblid, naelad, plaadid ning kruvid (Veski 1948: 183).

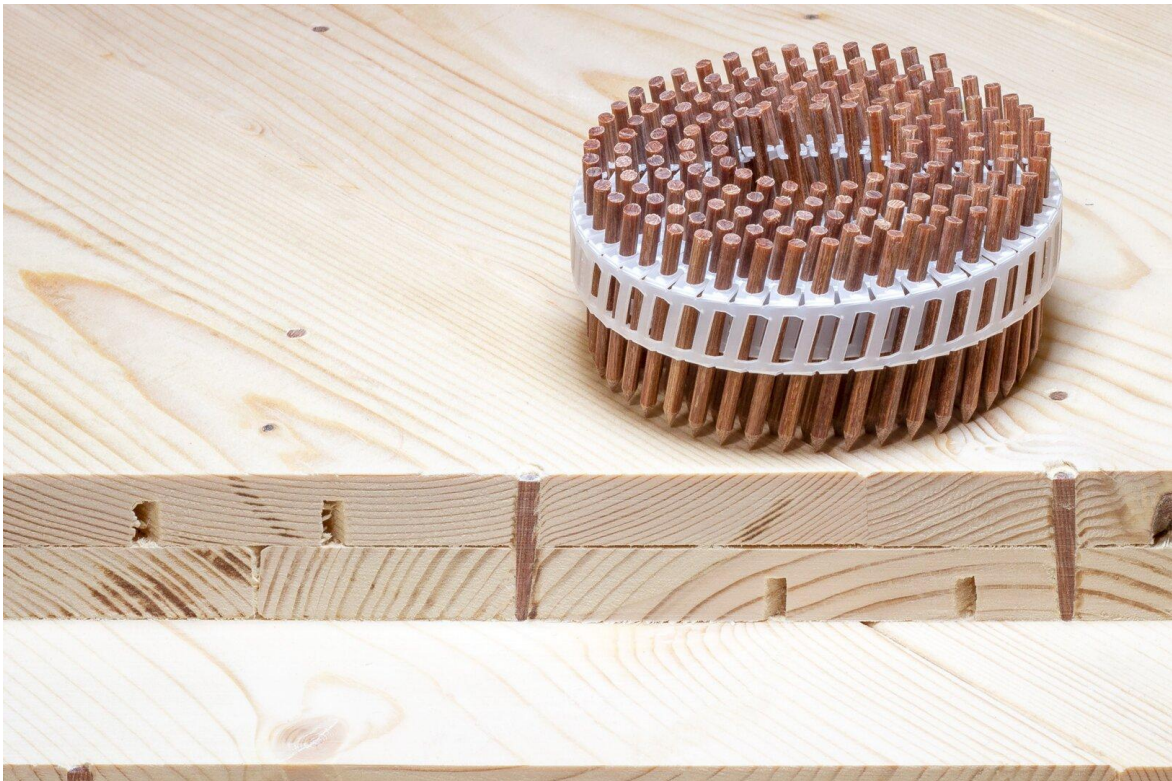
Naagelliited töötavad peamiselt paindele ja lõikele ning sõltuvalt liidetavatest materjalidest ning nende paksustest saab olla mitu erinevat purunemispilti. “Tavaliselt konstrueeritakse naagelliitele mõjuva jõu suund kokku ühendatavate elementide puidukiudude suunaga (muljumispinged naaglilt puidule mõjuvad piki kiudu). Kui aga ühendatavad elemendid lõikuvad nurga all (sõrestike sõlmedes), siis muljub naagel puidu kiude sama nurga all ja liite kandevõime muljumisele (survele risti kiudu) on väiksem” (Just jt 2015: 137). Naagli kandevõime sõltub naagli paindetugevusest ning puidu muljumistugevusest (sealsamas: 137).



Joonis 1.4. Ühelõikeline puitnaagliga puit-puiduga liide (Just jt 2015: 137).

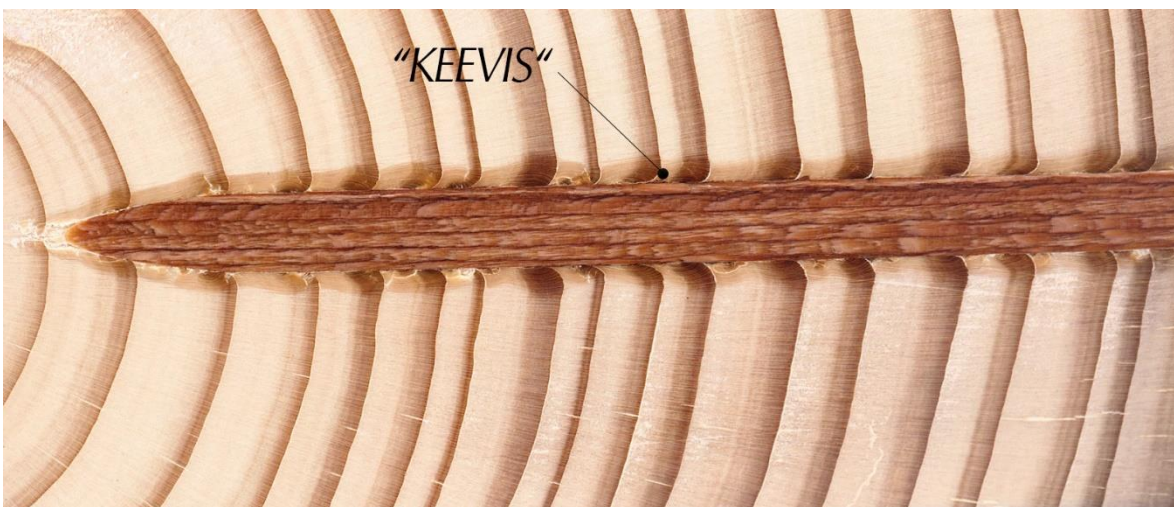
Lõikele ja paindele töötamise kõrval saab puidust naagleid kasutada ka survel, ristikiudu paikneva puitmaterjali survetugevuse suurendamiseks (O’Ceallaigh jt 2021), milleks tänapäeval on peamiselt kasutatud täiskeermega kruve või koormuse suuremale pinnale laiali jaotamiseks terasplaate.

Lisaks keskkonnasäästlikkusele on puidust naelad võrreldes terasest naeltega kerged, ei roosteta ning sobivad puidust konstruktsioonidesse paremini oma samasuguste struktuuriomaduste tõttu. Puitnaelte soojusjuhtivus on 0,64 W/mK, mis tekitab oluliselt väiksema külmasilla, kui terasest naelad (Riggio jt 2016: 1091). Puidust naelad paigaldatakse tehases plastikust lindi külge ja keeratakse rulli (vt joonis 1.5.).



Joonis 1.5. Paigaldamiseks ettevalmistatud puitnaelad (Beck).

Puitnaelad tulistatakse sisse analoogse naelapüssiga nagu terasest naelte puhul. Samas on oluline tuua välja, et puitnaelad on kehvema vastupidavusega, kui terasnaelad (Riggio jt 2016). Puitnaela karedamat pinda on vaja puidu „keevitamiseks“ („*welding*“) ligniini abil. Joonisel 1.6. on näha naela ümber olevat tumedamat „keevitust“. Ligniiniks nimetatakse puidus esinevat liimitaolist ainet, mida võrreldakse ka vanade puusepaliimidega. Vettinult ei ole ligniin nii tugev kui kuivalt. Ligniini ülesandeks on siduda tselluloosikiud tugevaks ja jäigaks puidurakuks (Veski 1948: 15).



Joonis 1.6. Lõige puitnaela „keevitusest“ (Beck).

Tulenevalt naela otsa disainist ning kuumusest, mis tekib hõõrdest naela puidu sisse laskmisel, ligniin sulab ning sel viisil „keevitatakse“ nael ja ümbritsev puit üheks tervikuks, tagades naela suure väljatõmbe takistuse. Kuivõrd naelte „keevitamiseks“ piisab naelapüstolist, siis suurema ristlõike ning pikkusega naaglid keeratakse suurel kiirusel liidetavatesse detailidesse. Lineaarsel keevitusel tõuseb temperatuur 200 – 300 kraadini ning sissekeeramisel ei ületa temperatuur 180 kraadi (Omrani jt 2008: 794). Naaglite purunemise vältimiseks sissekeeramisel kasutatakse toidu- või päevalilleõli (O’Loinsigh jt 2021a: 247, 2021b).

Ralv- ja tüübelliiteid kasutatakse analoogselt raidseotistega järjest vähem. Põhjuseks on vähenenud oskused ning täpsust ja palju aega nõudvad töövõtted. Liimpuidu hea kättesaadavuse tõttu ei ole tarvis toota liittalasid, mille tugevdamiseks on ralvasid ja tüübleid varasemalt peamiselt kasutatud. Ralvad ja tüüblid ise on erinevast materjalist ja erineva kujuga puitkonstruktsioonide vaheelemendid, mis töötavad survele ja vahel ka nihkele, aga nende ülesandeks on ühelt elemendilt teisele nihkejõudude ülekandmine. Tüüblite ja ralvade erinevus seisneb selles, et ralvad on metallist ning tüüblid peamiselt kõvast lehtpuidust. Sõltuvalt tüübli asukohast ja töötamise viisist tehakse tüüblid kiudude suunaga temale mõjuvate jõududega risti, piki või nurga all (Veski 1948: 190). Ühtlasi peab töö autor siinkohal oluliseks eraldi välja tuua, et kuna välistatsionaari projekteerimisel ralv- ja tüübliseotiseid ei kasutata, siis omab eeltoodud lõik üksnes informatiivset tähendust ning edaspidi antud liiteid käesoleva töö raames ei käsitleta.

1.2. Metsloomade välistatsionaari tüpoloogilised ja ehituslikud nõuded

Välistatsionaar on ehitisena mõeldud eelkõige ravialuste metsloomade rehabilitatsiooniks (hoidmiseks, treeninguks ja aklimatiseerumiseks) peale aktiivravi. Ehitis koosneb loomaboksidest ehk piiratud ruumidest, milles metsloomad viibivad ning koridorist/treeningalast, mis kulgeb bokside ees. Välistatsionaaris viibivad loomad on aklimatiseerumise kiirendamiseks eksponeeritud looduslikele tingimustele nagu valgus, temperatuur ja sademed. Lisaks vähendab viibimine looduslikumas keskkonnas metsloomade stressitaset võrreldes kliinikusisese ravistatsionaariga ning minimaliseerib võimalust harjuda liigselt inimeste ja nende poolt loodud mugavustega. Loomabokside ees oleva koridori/treeningala võib ehitada sirge või väikese pöördega. Sirget või liigendatud

treeningala saab kasutada metsloomade liikumistreeninguteks ja koordineerimisharjutusteks. Ühtlasi on sellise treeningala olemasolu eriti vajalik metslindude lennuharjutuste läbiviimiseks (Miller 2012).

Välistatsionaari projekteerimisel võeti aluseks „*Minimum standards for wildlife rehabilitation*“ (Miller 2012). Eelnevalt nimetatud standard annab bokside soovituslikud mõõdud vastavalt meditsiinilisele või nõutava aktiivsuse seisundile, mille järgi jagunevad tasemed keelatuks, piiratuks ja piiramatuks. Aktiivsuse tasemete järgi välja toodud ruumide täpsemad suurused on esitatud lisas 1.

Keelatud aktiivsus tähendab looma hoidmist piisavalt väikeses ruumis, et piirata peaaegu kõik liikumised, samas jättes loomale piisavalt ruumi normaalse erksuse säilitamiseks ning keha, jäsemete ja saba sirutamiseks, kuid välistaks hüppamise, lendamise või jooksmise. Boks peaks olema piisavalt väike, et hõlbustada püüdmist, vähendades seeläbi püüdmisest tingitud stressi ja vigastuste tekkimise võimalust korduval püüdmisel ravi kestvuse ajal.

Piiratud aktiivsus või liikumine on rehabilitatsiooniprotsessi etapp, kus anatoomiline või füsioloogiline probleem on kõrvaldatud ja looma liikumise keelamine ei ole enam vajalik jätkuva ravi tõttu, kuid perioodiline püüdmine ja meditsiiniline ravi võib siiski osutuda vajalikuks. Liikumine on selles etapis tervenemisprotsessi osa. Need boksid peaksid andma võimaluse lühikesteks lendudeks või jooksideks.

Piiramatu aktiivsus tähendab suurte ja keeruliste välipuude või aedikute kasutamist. Need aedikud pakuvad füüsilise ja psühholoogilise seisundi taastamist lindudel pikendatud lendude ning imetajatel jalutuskäikude, jooksmise ja ronimise kaudu. Need aedikud peaksid võimaldama loomadel taastada enda jõudu ja lihastoonust, arendada vastupidavust ja koordineerimist ning kohaneda ümbritsevate ilmastikutingimustega.

Meditsiinilise seisundi kõrval sõltuvad bokside mõõtmed ka loomaliigist, isendi käitumisest, vigastuse olemusest ning ravi ja taastumise spetsiifikast. Ühtlasi on oluline, et toimuks iga looma seisundi regulaarne hindamine, kuna ruumi vajadus võib ajas muutuda.

Loomadest mittesõltuvalt mõjutavad bokside suurust ehitamiseks kasutatavad materjalid, kliimatingimused ja ehitusala. Loomaboksi kuju ei ole reguleeritud ning selle võib disainida vastavalt sellele, milline lahendus parasjagu mõistlikum tundub. Loomade ja lindude jaoks sobivad küll paremini liigendatud, ümmargused ja mitmenurksed ruumid, aga

ehitustehnilises mõttes on lihtsam disainida ja ehitada riskülikukujulisi ruume. Hoone, kui terviku mõttes tuleks kasutada kaheukselise sisenemise lahendust, et vältida loomade juhuslikku välja pääsemist. Üldjuhul tehakse metsloomade hoidmise ruumid puidust või puidupõhisest plaadist, sest kergehitiste püstitamisel on puidu kasutamisel palju eeliseid. Tihti on loomade aklimatiseerumiseks mõeldud hooned ajutised. Neid võib olla vaja ehitada raskesti ligipääsetavatesse kohtadesse ja kiiresti ning selliste hoonete püstitamisel tuleks lähtuda keskkonnasäästlikkusest.

Kuigi metsloomade välistatsioonar on mõeldud kasutamiseks nii loomadele kui ka lindudele, siis EMÜ VLI territooriumile ehitatavas välistatsionaaris hakatakse peamiselt hoidma röövlindude. Lisaks üldnõuetele on "*Minimum standards for wildlife rehabilitation*" standardis (Miller 2012) eraldi välja toodud soovituselised lindude boksidele. Sarnaselt üldnõuetes väljatoodule tuleks ka väliskeskkonnas olevad röövlindude ehitised valmistada puidust või puidupõhistest plaatidest. Katuse katteks võib kasutada väikese silmaga keevisvõrku või võrkaia paneeli, mis on kaetud pvc kattega. Võrgu silm peab olema nii väike, et linna pea ei mahuks sellest läbi. Seinas ei ole soovitatud võrku kasutada. Kui, siis ainult laudvoodri välispinnal lisa turvalisuse tagamiseks. Röövlindude boksidel on oluline, et seal oleks täiesti kinnise ja valgust läbilaskva osaga seinad. Voodrilaua vahed võivad olla maksimaalselt 25 mm. Kinnised ja piiratud valgust läbilaskvad osad on vajalikud selleks, et loomad üksteist ei näeks ning seeläbi oleks võimalik vähendada nende stressitaset. Põrandaks sobivad hästi vett läbilaskvad materjalid nagu liiv, kruus ja veerised. Vältima peaks betooni, hakkepuitu, heina, põhku ja teravate nurkadega killustikku, sest need võivad vigastada jalgu/varbaid.

1.3. Puitehitise keskkonnataluvuse hindamine

Ehitise vastupidavuse tagamiseks ajas arvestatakse ilmakaarte, varjude, tuulele avatuse, hoone terviklikkuse, detailide ja pindade töötusega ning reeglina ehitatakse sellele räästaga katus, paigaldatakse ilmastikus kestav fassaad ja tehakse vihma eest kaitsev kõrge sokkel. Kui eeltoodud punkte ei ole võimalik rakendada või tegemist on ebatraditsioonilist tüüpi ilmastikule avatud ehitisega, siis tuleb võimalikult pika eluea saavutamiseks rakendada teisi meetmeid nagu liidete disainimisel niiskuse ja sademetega arvestamine ning ilmastikule vastupidava puidu kasutamine. Kuna kõikvõimalikud puidu töötlemise viisid mõjutavad

puidu ja vee omavahelist sidet, siis peaks puidust ehitiste püstitamisel kasutama tavapuidu asemel pikema elueaga immutatud või termotöödeldud puitu (Sandberg jt 2017). Lisaks välitingimustele sõltub puitkonstruktsioonide eluiga ka puuliigist, kasvukiirusest (aastarõngaste tihedusest) ning malts- ja lülipuidu osakaalust detaili ristlõikes. Näiteks imavad männi saematerjali otpinnad niiskust kiiremini, kui kuuse vastavad pinnad ja suurema lülipuidu osakaaluga saematerjal aeglasemalt, kui madalama lülipuidu sisaldusega saematerjal (Niklewski, Fredriksson 2021)

Enamus puidutöötlejatest kasutavad puidu töötlemiseks süvaimmutust autoklaavis vaakum- ja survemeetodil. Puitu immutatakse peamiselt soolade vesilahustega, mis koosnevad valdavas enamuses vasesooladest. Varasemalt on kasutatud lisaks vasele ka kroomi ja arseeni (Riistop 2010), millest mõlemad, sarnaselt kreosoodile (kasutati ENSV ajal puidust liiprite jm immutamiseks), keelustati Euroopa Liidus pärast 2004. aasta juunikuud (Reiska 2012: 32). Ühtlasi on järjest suurenenud immutusvahendites kasutatavate ainete keelustamine ning looduslike alternatiivide otsimine toonud endaga kaasa selle, et puidu keskkonnataluvaks töötlemise ühe viisina rakendatakse aina enam immutamise kallimat termotöötlust. Termotöötluste puhul tuleneb puidu vastupidavus ilmastikule ja mädanikele kuumuse ja auruga töötlemisest. Termotöötlus toimub vahemikus 195 – 230 °C ning selle käigus puidu tugevus mõnevõrra väheneb (ehk muutub hapramaks), mistõttu ei tohiks seda kandvates konstruktsioonides kasutada. Välitingimustes võib termotöödeldud puitu paigaldada vaid voodri- ja/või terrassilauaks (Just jt 2015: 59).

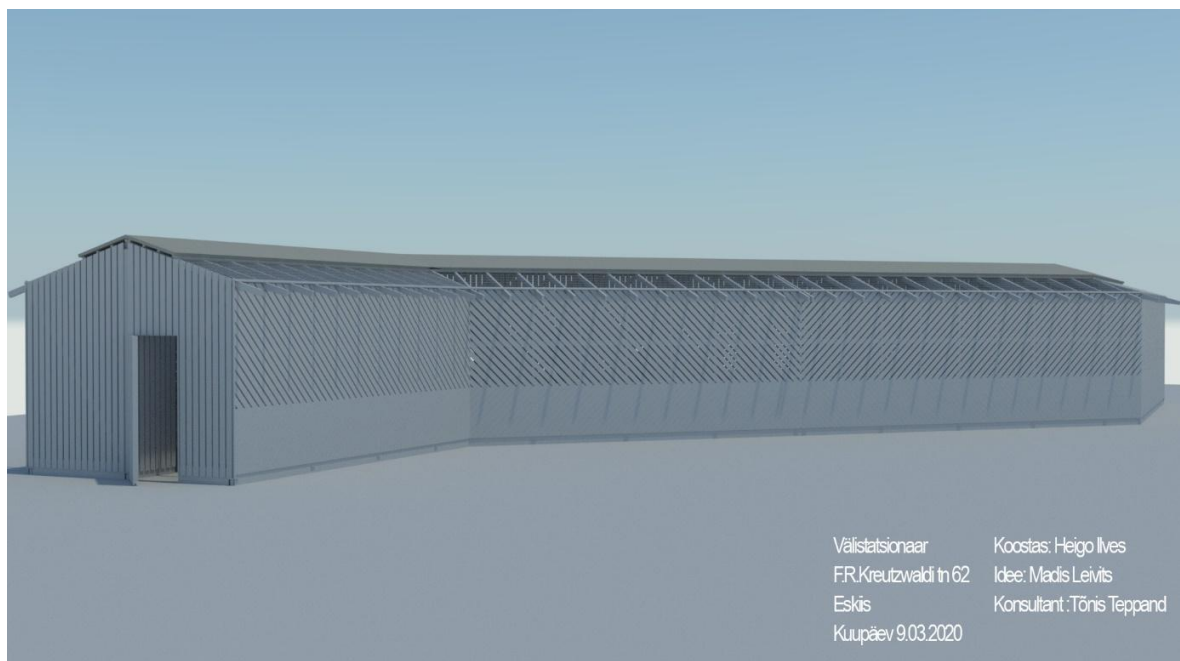
Lisaks sobiliku puitmaterjali kasutamisele on väga oluline pöörata tähelepanu ka liite disainile ja eriti detailide väljavahetatavusele. Seda eelkõige väliskeskkonnas olevatele ehitistele ja nendes kasutatud liidetele, sest terviku tugevus väljendub tema kõige nõrgemas lülis. Läbimõttelamata tehniliste lahendustega liidetes pehkib puit üsna kiiresti ja see nõrgestab kogu konstruktsiooni. Teadupärast purunevad puitkonstruktsioonid liidete lähedalt, sest puit-puiduga liited ja kontaktpinnad kipuvad niiskust kinni hoidma, muutes need omakorda tundlikuks puidu mädanemist tekitavatele seentele (Fredriksson 2013: 30). Üldiselt võivad hakata mõned puitu lagundavad seened kasvama juba siis, kui puidus on kaalu järgi vähemalt 20% niiskust. Niiskuse ülempiiriks, kus seened hävivad on 60% ning soodsaimaks vahemikuks 25-30% (Veski 1948: 43). Eeldatakse, et kontaktpinnad püsivad pärast vihma pikalt niiskunud, sest otsene õhu juurdepääs on takistatud. Vesi, mis on selliselt

liitesse imbunud, ei saa liite pinnalt kuivada, vaid jaotub seal piirkonnas ringi (Fredriksson, Niklewski 2019: 3).

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Hoone eskiis

Välistatsionaari eskiisid (vt joonis 2.1.) on koostatud 2020. aasta kevadel koostöös Madis Leivitsi ning Tõnis Teppandiga.



Joonis 2.1. Hoone eskiis.

Lähteülesanne oli koostatud Madis Leivitsi poolt ning tehnilise poole konsultandiks oli Tõnis Teppand. Madis Leivits kasutas lähteülesande sõnastamisel oma eelnevaid kogemusi röövlindude ravimisel ning standardit “*Minimum standards for wildlife rehabilitation*” (Miller 2012). Kuna EMÜ-l on olemas sisestatsionaar, mille ruumide suurus jääb eelnevalt nimetatud standardis toodud keelatud ja piiratud aktiivsuse ruumide suuruste vahele, siis välistatsionaari puhul oli eesmärgiks vähemalt piiratud aktiivsusega lindude ruumide suurus.

2.2. Hoone eelprojekt

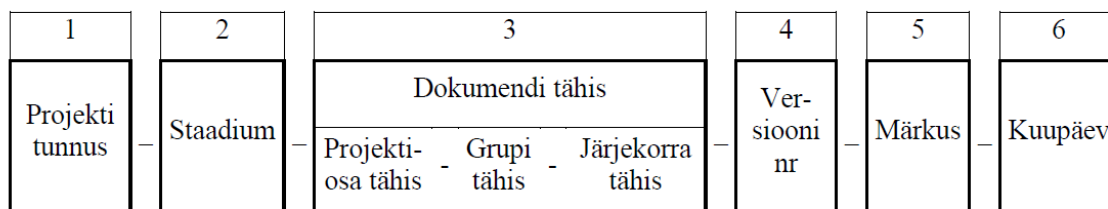
Kinnitatud eskiisidele koostati 2020. aasta sügisel eelprojekt ning töö- ja tootejooniste ettevalmistamisega alustati 2021. aasta kevadel. Eelprojekti koostamise käigus selgus, et seoses detailplaneeringu piirangutega (krundi kogu lubatud ehitisealune pind on ära kasutatud) Kreutzwaldi tn 62 kinnistul ei saa eskiise saajaprotsendiliselt realiseerida, misjärel muudeti hoone projekteerimine ja ehitamine kaheetapiliseks. Esimese etapi mahuks ehitisealuse pindala järgi jäi 59,9 m² ning hoone kõrguseks 3,8 m ehk mahtus ajutise ehitise jaoks kehtestatud gabariitidesse (ehitisealune pind 60,0 m²; max H = 5,0 m) ning loa ehitamiseks sai mitteamule ehitusteatis ja ehitusprojektiga vastavalt Ehitusseadustiku lisale 1 (vt lisa 2). Ülejäänud ehitise üldised tehnilised andmed on välja toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Ehitise üldised tehnilised andmed (Ehitusregister, edaspidi *EHR*)

Ehitisealune pind (m ²)	59,9
Maapealse osa alune pind (m ²)	59,9
Maapealsete korruste arv	1
Maa-aluste korruste arv	0
Absoluutne kõrgus (m)	-
Kõrgus (m)	3,8
Pikkus (m)	13,8
Laius (m)	8,4
Sügavus (m)	0
Suletud netopind (m ²)	52,5
Köetav pind (m ²)	0
Maht (m ³)	209
Maapealse osa maht (m ³)	209
Üldkasutatav pind (m ²)	0
Tehnopind (m ²)	0

Eelprojekti koostamise üheks osaks on projekti kausta vormistamine vastavalt Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi (edaspidi *MKM*) poolt välja antud ehitusprojekti dokumentide digitaalse vormistamise nõuetele ehitusloa elektroonilisel taotlemisel (MKM 2015). Ehitusprojektide menetlemise kiirendamiseks ja seoses digitaalsele menetlusele üleminekuga on EHR-is alates 2015. aastast kasutusel automaatne kontrollsüsteem, mille ülesandeks on kontrollida esitatud projekti failide vormistuse korrektsust. Lisaks sisestab taotluse esitaja ise kogu projektiga seotud informatsiooni, mis vähendab oluliselt

ehitusnõunike töökoormust, kiirendab menetlust ning erinevate ametkondadega kooskõlastamist. Projekti kausta koostamisel peab olema väga täpne, sest failide nimede koostamiseks on oma reegel, sealjuures ei saa kasutada täpitähti ning tühikud ja muud sümbolid on keelatud. Projekti faili nime moodustamise reegel on toodud joonisel 2.2.



Joonis 2.2. Projekti faili nime moodustamise reegel (MKM 2015).

Vastavalt joonisel 2.2. esitatud reeglile on nt välistatsionaari põhiplaani nimetus projektis EP0120_EP_AR-5-01_pohiplaan.pdf. Eelprojekti koostamise osas tuleb eraldi välja tuua, et projekti koostajaks ei ole mitte arhitektuuribüroo, vaid EMÜ maaehituse õppekava tudeng (ehk käesoleva töö autor) ning vastutavaks spetsialistiks on sama ülikooli lektor ja volitatud ehitusinsener Tõnis Teppand. Eelprojekti joonised on toodud välja lisas 3.

2.3. Hoone põhiprojekt

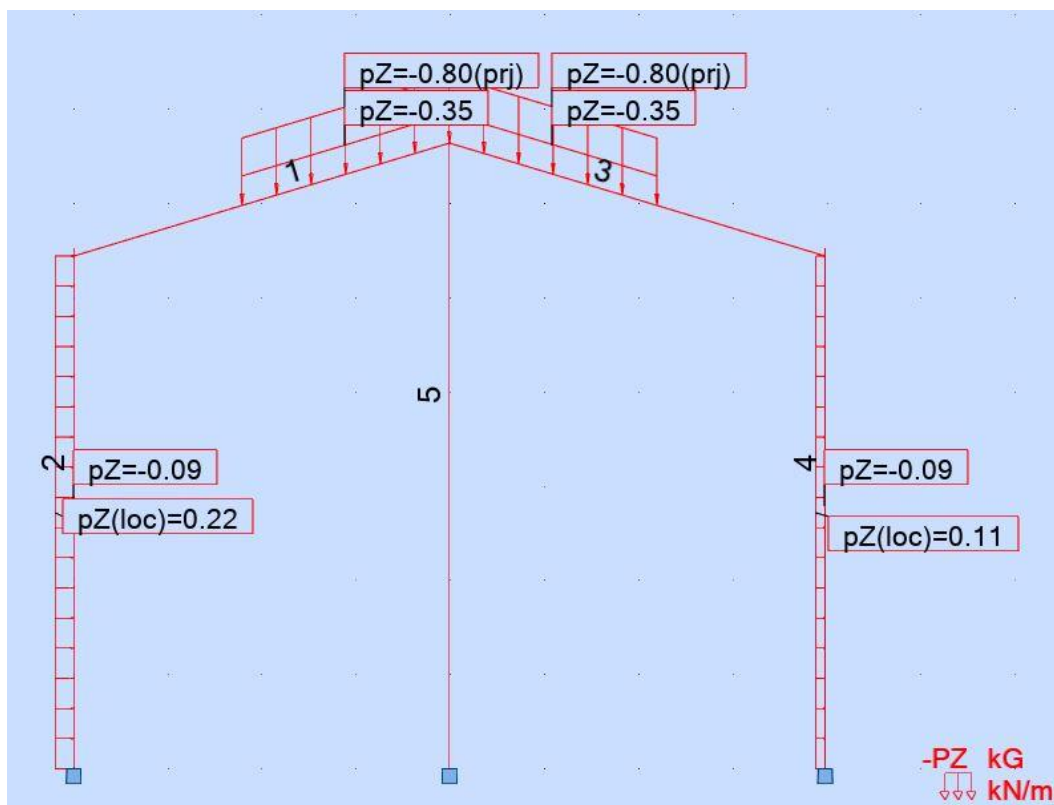
Põhiprojekti staadiumis on edasi arendatud eskiiside ideed ning täpsustatud konstruktiivseid lahendusi ning detaile. Peamised pidepunktid töö arendamisel olid:

- 1) kasutatakse ehitustehniliselt loogilisi ja lihtsaid lahendusi (püstitamisel üldiselt detailide järjekord ebaoluline, v.a mõnel üksikul juhul);
- 2) lindudele ja loomadele tagatakse aklimatiseerumise aegne turvalisus (boksides välditakse väljaulatuvaid ja teravaid nurki ning detaile);
- 3) tagatud oleks personali ligipääs ning kasutusmugavus (piisavalt suured avad käruga ligipääsemiseks; välisustel sarjastatud võtmed; sõelmete alused kaablikõrid perspektiivsete valgustite elektritoite ja/või kaamera ning valvesüsteemide jaoks);
- 4) keskkonnasäästlikkus (puit-puiduga liidete maksimaalne kasutus).

Tööjooniste tegemise aluseks on põhiprojekti staadiumis teostatud tugevusarvutused ja puitkarkassi dimensioneerimine. Tööprojekti joonised on esitatud lisas 4. Kuna

traditsioonilised puit-puiduga liited vajavad suuremat ristlõiget liite ära mahutamiseks, kui polt- või puit-terasega liited, siis võib eeldada, et ristlõiked on üledimensioneeritud. Selle väljaselgitamiseks on teostatud ühe karkassiposti ja ühe sarika kandevõime kontroll. Hoone karkassipostid on meetrise sammuga ja siseseinad on iga kahe meetri tagant ehk nendes seintes olevad karkassipostid on horisontaalselt kahest suunast toetatud. Arvutuse tegemiseks on valitud bokside vahel olev välisseina karkassipost, kuna nõtkepikkust ei saa sel juhul kahes suunas vähendada, ning kuigi siseseina karkassipost on koormatud rohkem, siis puudub seal horisontaalne koormus tuule puudumise tõttu. Seega ei teki siseseina karkassipostis samaaegset pikijõudu ning paindemomenti. Hoone sarikad on 0,666 m sammuga.

Karkassi üldjäikus perimeetril on tagatud momenti ülekandvate kiilukujuliste ümardatud kalasabatappide ja diagonaalselt naelutatud voodrilaua abil. Hoone keskel olevate raamide jäikus on tagatud samuti kiilukujuliste ümardatud kalasabatappide ja bokside vahelistele seintele vertikaalselt naelutatud voodrilaua abil. Vastavalt eeldusele, mille kohaselt toimub momentide ülekandmine kiilukujuliste ümardatud kalasabatappide kaudu, kasutatakse koormusskeemis jäikasad tugesid (vt joonis 2.3.).



Joonis 2.3. Raami koormusskeem.

Sellise koormusskeemi abil saab teada, kui suured momendid tekivad varraste otstesse. Analoogselt eeltoodule on tehtud liigendtugedega raami kontrollarvutus, mida küll töös eraldi ei kajastata, kuid mille tulemusi kasutatakse võrdluseks sarika ja karkassiposti arvutuste lõpus. Voodrilaua naelutamiseks on arvestatud tugevdatud pöögipuidust naeltega, mille tootjaks on Beck.

2.4. Koormusarvutused

Arvutustes esitatud alalis- ja muutuvkoormused on määratud kasutades asjakohaseid standardeid (EVS-EN 1991-1 osa 1, 3 ja 4). Saadud koormused on sisestatud tarkvarasse Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021, mida on kasutatud sisejõudude leidmiseks ja karkassi stabiilsuse kontrollimiseks. Meeles tuleb pidada, et põhikonstruktsioonide omakaalud lisab programm automaatselt, aga tabelis 2.2. ja 2.3. on need lisaks välja toodud. Koormuskombinatsioonid on lastud määrata tarkvara poolt automaatselt.

Tabel 2.2. Katuse omakaal

Kihi nimetus	Kihi paksus (m)	Mahukaal γ (kN/m ³)	Normatiivne koormus (kN/m ²)
Katusekivi	-	-	0,5
Roovitis $50 \times 50, s = 0,333$ m	0,05	3,1	0,023
Sarikad $50 \times 100, s = 0,666$ m	0,1	3,1	0,023
		Kokku	0,546

Tabel 2.3. Välisseina omakaal

Kihi nimetus	Kihi paksus (m)	Mahukaal γ (kN/m ³)	Normatiivne koormus (kN/m ²)
Roovitis $50 \times 100, s = 0,85$ m	0,05	3,1	0,018
Voodrilaud	0,022	3,1	0,068
		Kokku	0,086

Lumekoormuse arvutus

Katuse lumekoormuse normsuurus arvutatakse valemiga 2.1 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$s = \mu_i \cdot s_k, \quad (2.1)$$

kus μ_i – lumekoormuse kujutegur;

s_k – normatiivne lumekoormuse maapinnal (kN/m^2).

Lumekoormuse normsuurus maapinnal on $s_k = 1,5 kN/m^2$ ja lumekoormuse kujutegur 17 kraadise kaldega katuse puhul $\mu_1 = 0,8$.

Normatiivne lumekoormus katusele leitakse vastavalt valemile 2.1:

$$s = 0,8 \cdot 1,5 = 1,2 kN/m^2$$

Tuulekoormuse arvutus

Tulenevalt hõredast katusest tuulekoormust katusele ei arvestata ning arvesse võetakse ainult seinale avalduv tuulekoormus. Konstruktsiooni välispindadele mõjuv tuulerõhk arvutatakse valemiga 2.2 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$w_e = q_p(z_e) \cdot C_{pe} \quad (2.2)$$

kus $q_p(z_e)$ – kiirusrõhk;

(z_e) – arvutuskõrgus;

C_{pe} – välisrõhutegur.

Tuule kiirusrõhk kolmanda maastikutüübi puhul arvutatakse valemiga 2.3 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$q_p = 12,81 \cdot \ln^2 \cdot \frac{z}{0,3} + 89,64 \cdot \ln \cdot \frac{z}{0,3}, \quad (2.3)$$

kus z – arvutuskõrgus meetrites.

Tippkiirusrõhk q_p vastavalt valemile 2.3:

$$q_p = 12,81 \cdot \ln^2 \cdot \frac{3,6}{0,3} + 89,64 \cdot \ln \cdot \frac{3,6}{0,3} = 0,302 kN/m^2$$

Ristkülikpõhiplaaniga hoone seinte tuulerõhutegurid leitakse tsoonide kaupa sõltuvalt hoone kõrguse ja laiuse vahelisest suhtest h/d kasutades EVS-EN 1991-1-4:2005+NA:2007 Tabel 7.1. (vt tabel 2.4.) Projekteeritud hoone puhul tuule mõjumisel pikemale küljele on suhteks $h/d = 3,6/7,5 = 0,48$. Hoone pikemaks küljeks on võetud esi- ja tagakülje keskmine. Seintele mõjuv normatiivne suruv tuulerõhk risti hoonet tsoonis D vastavalt valemile 2.2 on

$$w_e = q_p(z_e) \cdot C_{pe} = 0,302 \cdot 0,731 = 0,221 \text{ kN/m}^2$$

ning imev tuulerõhk tsoonis E on

$$w_e = q_p(z_e) \cdot C_{pe} = 0,302 \cdot (-0,361) = -0,109 \text{ kN/m}^2$$

Tabel 2.4. Ristkülikpõhiplaaniga hoone seinte tuulerõhutegurid (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

Tsoon	D	E
h/d	$C_{pe,10}$	$C_{pe,10}$
1	+0,8	-0,5
0,25	+0,7	-0,3
0,48	+0,731	-0,361

2.4.1. Sarika kandevõime kontroll

Sarika kontroll paindele

Sarika ristlõikeks on sügavimmutatud C16 tugevusklassiga saematerjal ristlõikega 50×100 mm.

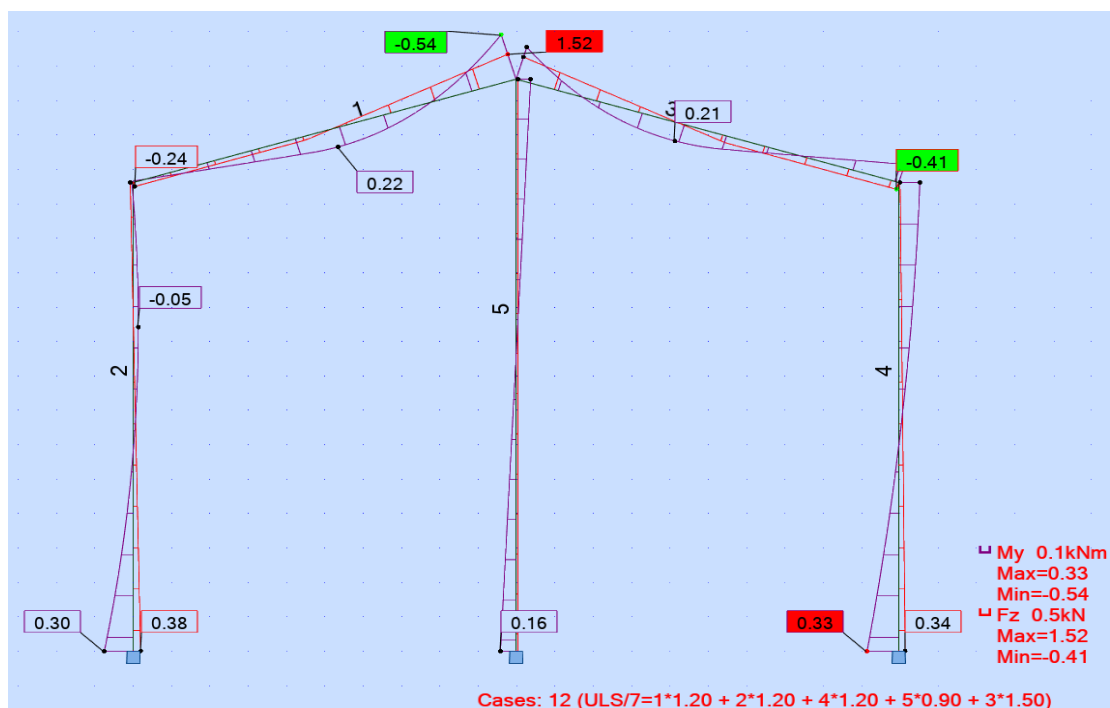
Ristlõike parameetrid

- Ristlõike kõrgus: $h = 100 \text{ mm}$
- Ristlõike laius: $b = 50 \text{ mm}$
- Ristlõike pindala: $A = b \cdot h = 50 \cdot 100 = 5000 \text{ mm}^2$

Saepuit tugevusklassiga C16 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

- Paindetugevus: $f_{m,k} = 16 \text{ N/mm}^2$
- Survetugevus pikikiudu: $f_{c,0,k} = 17 \text{ N/mm}^2$
- Nihketugevus: $f_{v,k} = 3,2 \text{ N/mm}^2$
- Elastsusmoodul 5% väärtus: $E_{0,05} = 5400 \text{ N/mm}^2$
- Tihedus: $\rho_k = 310 \text{ m}^3$

Vastavalt Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021 tarkvarast saadud tulemustele on maksimaalsed sisejõud sarikas paindemomendi puhul 0,54 kNm ja põikjõu puhul 1,52 kN (vt joonis 2.4).



Joonis 2.4. Maksimaalsed sisejõud.

Arvutuslik paindemoment MEd peab rahuldama järgmist tingimust 2.4 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$\frac{\delta_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1, \quad (2.4)$$

kus $\delta_{m,y,d}$ – paindepinge y-telje suhtes;

$f_{m,y,d}$ – arvutuslik paindetugevus.

Arvutuslik paindepinge leitakse valemiga 2.5 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y}, \quad (2.5)$$

kus W_y – ristlõike vastupanumoment y-telje suhtes;

$M_{y,d}$ – paindemomendi arvutusväärtus y-telje suhtes.

Ristlõike vastupanumoment leitakse valemiga 2.6 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (2.6)$$

kus b – ristlõike laius;

h – ristlõike kõrgus.

Sarika arvutuslik paindepinge vastavalt valemile 2.5:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6 \cdot 0,54 \cdot 10^6}{50 \cdot 100^2} = 6,48 \text{ N/mm}^2$$

Arvutuslik paindetugevus on arvutatud valemiga 2.7 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$f_{m,y,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{m,k} \cdot k_h}{\gamma_M}, \quad (2.7)$$

kus γ_M – materjali omaduste varutegur;

K_{mod} – koormuse kestuse ja konstruktsiooni niiskuse mõju arvestav tugevusparameetri modifikatsioonitegur;

k_h – normtugevuse suurendustegur paindel;

$f_{m,k}$ – normatiivne paindetugevus.

Kui koormuskombinatsioon koosneb koormustest, mis kuuluvad erinevatesse kestusklassidesse, siis tuleks k_{mod} väärtus valida lühima kestusklassiga koormuse järgi. Välistatsionaarile mõjuvad koormused kuuluvad alalisse, keskkestvasse ja lühiajalisse klassi. Vastavalt eeltoodud reeglile on kõige lühima kestusklassiga lühiajaline kestusklass ning vastavalt tabelile 2.5 on k_{mod} väärtus 0,70.

Tabel 2.5. Teguri k_{mod} väärtused (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

Kestusklass/ Kasutusklass	Alaline	Pikaajaline	Keskkestev	Lühiajaline	Hetkeline
3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Materjali osavarutegur saepuidu puhul on $\gamma_M = 1,3$. Normtugevuse suurendustegurit k_h kasutatakse saematerjali puhul paindel, kui materjali kõrgus on väiksem kui 150 mm ning mis leitakse valemiga 2.8 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$k_h = \min\{(150/h)^{0,2}; 1,3\}, \quad (2.8)$$

kus h – elemendi kõrgus paindel.

Vastavalt valemile 2.8 on k_h väärtus:

$$k_h = (150/100)^{0,2} = 1,08$$

Arvutuslik paindetugevus vastavalt valemile 2.7:

$$f_{m,y,d} = \frac{0,7 \cdot 16 \cdot 1,08}{1,3} = 9,30 \text{ N/mm}^2 \geq 6,48 \text{ N/mm}^2 \rightarrow OK!$$

Tingimus 2.4 on täidetud ning ristlõike paindekandevõime on tagatud ja kandevõimest on kasutatud $6,48/9,30 \cdot 100 = 69,7\%$. Vastav näitaja Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021 programmis on 71% ning raami liigendtugede korral 69%.

Sarika põikjõukandevõime kontroll

Arvutuslik põikjõud V_{Ed} peab rahuldama tingimust 2.9 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1, \quad (2.9)$$

kus τ_d – arvutuslik nihkepinge;

$f_{v,d}$ – nihketugevuse arvutusväärtus.

Ristkülikristlõike puhul leitakse arvutuslik nihkepinge valemiga (2.10) (viide)

$$\tau_d = \frac{1,5V}{b_{ef} \cdot h}, \quad (2.10)$$

kus V – põikjõud;

b_{ef} – ristlõike efektiivlaius;

h – ristlõike kõrgus.

Vastavalt valemile 2.10 on arvutuslik nihkepinge:

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot 1,52 \cdot 10^3}{50 \cdot 100} = 0,46 \text{ N/mm}^2$$

Arvutuslik nihketugevuse arvutusväärtus on arvutatud valemiga 2.11 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$f_{v,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M}, \quad (2.11)$$

kus $f_{v,k}$ – normatiivne nihketugevus;

γ_M – materjali omaduste varutegur;

K_{mod} – koormuse kestuse ja konstruktsiooni niiskuse mõju arvestav tugevusparameetri modifikatsioonitegur.

Vastavalt valemile 2.11 on arvutuslik nihketugevus:

$$f_{v,d} = \frac{0,7 \cdot 3,2}{1,3} = 1,72 \text{ N/mm}^2 \geq 0,46 \text{ N/mm}^2 \rightarrow OK!$$

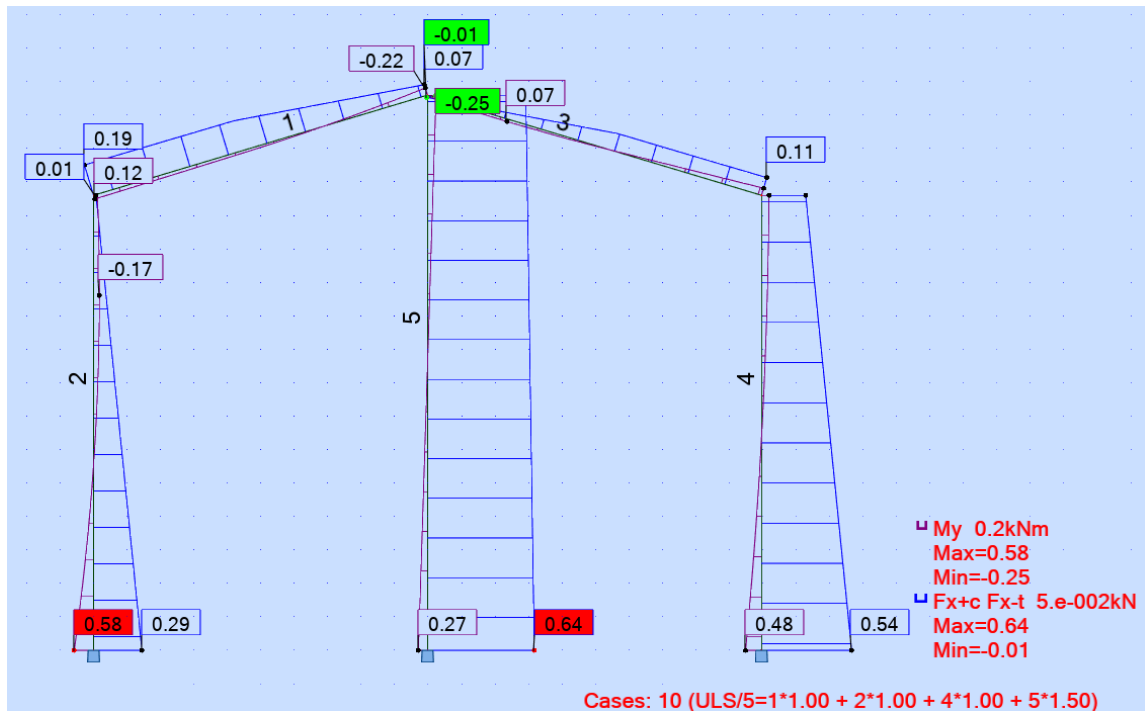
Tingimus 2.9 on täidetud ning ristlõike põikjõukandevõime on tagatud.

2.4.2. Karkassiposti kandevõime kontroll

Karkassipostile mõjuvad koormused katuse omakaalust, seinaga omakaalust ning tuule- ja lumekoormusest. Karkassiposti ristlõikeks on sügavimmutatud C16 tugevusklassiga saematerjal ristlõikega $50 \times 50 \text{ mm}$.

Karkassiposti kandevõime kontroll surve ja painde koosmõjul

Maksimaalne paindemoment $M_{Ed} = 0,58 \text{ kNm}$ ning maksimaalne pikijõud $N_{Ed} = -0,29 \text{ kN}$ (vaata joonis 2.5.).



Joonis 2.5. Maksimaalsed sisejõud.

Ristlõike parameetrid

- Ristlõike kõrgus: $h = 100 \text{ mm}$
- Ristlõike laius: $b = 50 \text{ mm}$
- Ristlõike pindala: $A = b \cdot h = 50 \cdot 100 = 5000 \text{ mm}^2$
- Karkassiposti pikkus: $L = 2,9 \text{ m}$

Saepuit tugevusklassiga C16 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

- Paindetugevus: $f_{m,k} = 16 \text{ N/mm}^2$
- Survetugevus pikikiudu: $f_{c,0,k} = 17 \text{ N/mm}^2$
- Nihketugevus: $f_{v,k} = 3,2 \text{ N/mm}^2$
- Elastsusmoodul 5% väärtus: $E_{0,05} = 5400 \text{ N/mm}^2$
- Tihedus: $\rho_k = 310 \text{ m}^3$

Kuna z-telje ümber painet ei teki ning karkassiposti suhteline saledus $\lambda_{rel} > 0,3$, peab rahuldama nõtkel y-telje suhtes tingimust 2.12 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$\frac{\delta_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\delta_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1, \quad (2.12)$$

ning nõtkel z-telje suhtes tingimust 2.13 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$\frac{\delta_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + km \cdot \frac{\delta_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1, \quad (2.13)$$

kus $f_{c,0,d}$ – pikikiudu survetugevuse arvutusväärtus;

$f_{m,y,d}$ – paindetugevuse arvutusväärtus y-telje suhtes;

kc – nõtketegur mis arvestab ebastabiilsust;

km – tegur, mis arvestab paindepingete ümberjaotust ristlõikes;

täisnurkse ristlõike korral $km=0,7$;

$\delta_{c,0,d}$ – pikikiudu survepinge arvutusväärtus;

$\delta_{m,y,d}$ – paindepinge arvutusväärtus y-telje suhtes.

Pikijõust tingitud survepinge on arvutatud valemiga 2.14 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$\delta_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A}, \quad (2.14)$$

kus A – neto-ristlõikepindala;

N_{Ed} – survejõu arvutusväärtus.

Arvutuslik survepinge vastavalt valemile 2.14:

$$\delta_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{0,29 \cdot 10^3}{5000} = 0,06 \text{ N/mm}^2$$

Ristlõike arvutuslik survetugevus pikikiudu on arvutatud valemiga 2.15 (viide Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M}, \quad (2.15)$$

kus $f_{c,0,k}$ – survetugevuse normväärtus pikikiudu;

k_{mod} – koormuse kestuse ja konstruktsiooni niiskuse mõju arvestav tugevusparameetri modifikatsioonitegur;

γ_M – materjali omaduste varutegur.

Ristlõike arvutuslik survetugevus pikikiudu vastavalt valemile 2.15:

$$f_{c,0,d} = 0,7 \cdot \frac{17}{1,3} = 9,15 \text{ N/mm}^2$$

Arvutuslik paindepinge y-telje suhtes on arvutatud valemiga 2.16 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$\delta_{m,y,d} = \frac{M_{y,Ed}}{W_y}, \quad (2.16)$$

kus $M_{y,d}$ – paindemomendi arvutusväärtus y-telje suhtes;

W_y – ristlõike vastupanumoment y-telje suhtes.

Ristlõike vastupanumoment y-telje suhtes on arvutatud valemiga 2.17 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (2.17)$$

kus b – ristlõike laius;

h – ristlõike kõrgus.

Ristlõike vastupanumoment y-telje suhtes vastavalt valemile 2.17:

$$W_y = \frac{5 \cdot 10^2}{6} = 83,3 \text{ cm}^3$$

Arvutuslik paindepinge vastavalt valemile 2.16:

$$\delta_{m,y,d} = \frac{0,58 \cdot 10^6}{83,3 \cdot 10^3} = 6,96 \text{ N/mm}^2$$

Ristlõike arvutuslik paindetugevus on arvutatud valemiga 2.18 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k} \cdot k_h}{\gamma_M}, \quad (2.18)$$

kus $f_{m,k}$ – paindetugevuse normväärtus;

k_h – ristlõike kõrguse tegur;

k_{mod} – koormuse kestuse ja konstruktsiooni niiskuse mõju arvestav tugevusparameetri modifikatsioonitegur;

γ_M – materjali omaduste varutegur.

Saepuidu ristlõikele, mille kõrgus paindel on väiksem kui 150 mm, võib suurendada normtugevust $f_{m,k}$ teguriga k_h , mis leitakse valemiga 2.19 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014).

$$k_h = \min\{(150/h)^{0,2}; 1,3\}, \quad (2.19)$$

kus h – elemendi kõrgus paindel.

Vastavalt valemile 2.19 on k_h väärtus:

$$k_h = (150/100)^{0,2} = 1,08$$

Ristlõike arvutuslik paindetugevus y-telje suhtes vastavalt valemile 2.18:

$$f_{m,d} = 0,7 \cdot \frac{16 \cdot 1,08}{1,3} = 9,30 \text{ N/mm}^2$$

Varda saledus on arvutatud valemiga 2.20 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014)

$$\lambda = \frac{L_{ef}}{i}, \quad (2.20)$$

kus L_{ef} – varda nõtkepikkus;

i – ristlõike inertsiraadius.

Ristlõike inertsiraadius on arvutatud valemiga 2.21 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014).

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}, \quad (2.21)$$

kus A – ristlõike pindala;

I – ristlõike inertsimoment.

Ristlõike inertsimomendid y- ja z-telje suhtes:

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{5 \cdot 10^3}{12} = 416,7 \text{ cm}^4$$

$$I_z = \frac{h \cdot b^3}{12} = \frac{10 \cdot 5^3}{12} = 104,2 \text{ cm}^4$$

Ristlõike inertsiraadiused vastavalt valemile 2.21:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{416,7}{50}} = 2,89 \text{ cm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{104,2}{50}} = 1,44 \text{ cm}$$

Varda saledused vastavalt valemile 2.20:

$$\lambda_y = \frac{L_{ef}}{i_y} = \frac{2,9 \cdot 0,5}{0,0289} = 50,17$$

$$\lambda_z = \frac{L_{ef}}{i_z} = \frac{1}{0,0144} = 69,44$$

Kuna $\lambda_z > \lambda_y$, siis saab eelduslikult määravaks nõtkes z-telje suhtes ning survele koos paindega peab olema täidetud tingimus 2.13. Lisaks on kontroll tehtud ka tingimusele 2.12.

Ebastabiilsust arvestav nõtketegur k_c nõtkel z-telje ja y-telje suhtes on arvutatud valemiga 2.22 ja 2.23 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014).

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}, \quad (2.22)$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}, \quad (2.23)$$

kus k_c – ebastabiilsustegur;

rel, z – paindele z-telje suhtes vastav suhteline saledus;

rel, y – paindele y-telje suhtes vastav suhteline saledus.

Ebastabiilsustegur k_z ja k_y on arvutatud valemiga 2.24 ja 2.25 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014).

$$k_z = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2], \quad (2.24)$$

$$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2], \quad (2.25)$$

kus β_c – sirgsuse tegur; saepuidu puhul $\beta_c = 0,2$;

$\lambda_{rel,z}$ – paindele z-telje suhtes vastav suhteline saledus;

$\lambda_{rel,y}$ – paindele y-telje suhtes vastav suhteline saledus.

Varda suhteline saledus z- ja y-telje suhtes on arvutatud valemiga 2.26 ja 2.27 (Ehituskonstruktori käsiraamat, 2014).

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}, \quad (2.26)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}, \quad (2.27)$$

kus $E_{0,05}$ – 5% elastsusmoodul pikikiudu;

$f_{c,0,k}$ - survetugevuse normväärtus pikikiudu;

λ_z – paindele z-telje suhtes vastav saledus;

λ_y – paindele y-telje suhtes vastav saledus.

Varda suhteline saledus vastavalt valemile 2.26 ja 2.27:

$$\lambda_{rel,z} = \frac{69,44}{3,14} \cdot \sqrt{\frac{17}{5400}} = 1,24$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{50,17}{3,14} \cdot \sqrt{\frac{17}{5400}} = 0,90$$

Ebastabiilsustegur k_z ja k_y vastavalt valemile 2.24 ja 2.25:

$$k_z = 0,5 \cdot [1 + 0,2 \cdot (1,24 - 0,3) + 1,24^2] = 1,36$$

$$k_y = 0,5 \cdot [1 + 0,2 \cdot (0,9 - 0,3) + 0,9^2] = 0,97$$

Ebastabiilsust arvestav nõtketegur $k_{c,z}$ ja $k_{c,y}$ vastavalt valemile 2.22 ja 2.23:

$$k_{c,z} = \frac{1}{1,36 + \sqrt{1,36^2 - 1,24^2}} = 0,52$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{0,97 + \sqrt{0,97^2 - 0,90^2}} = 0,75$$

Varda stabiilsuskontroll nõtkel z-telje suhtes surve ja painde koosmõjul vastavalt tingimusele 2.13:

$$\frac{0,06}{0,52 \cdot 9,15} + 0,7 \cdot \frac{6,96}{9,30} = 0,536 \leq 1$$

Varda stabiilsuskontroll nõtkel y-telje suhtes surve ja painde koosmõjul vastavalt tingimusele 2.12:

$$\frac{0,06}{0,75 \cdot 9,15} + \frac{6,96}{9,30} = 0,76 \leq 1$$

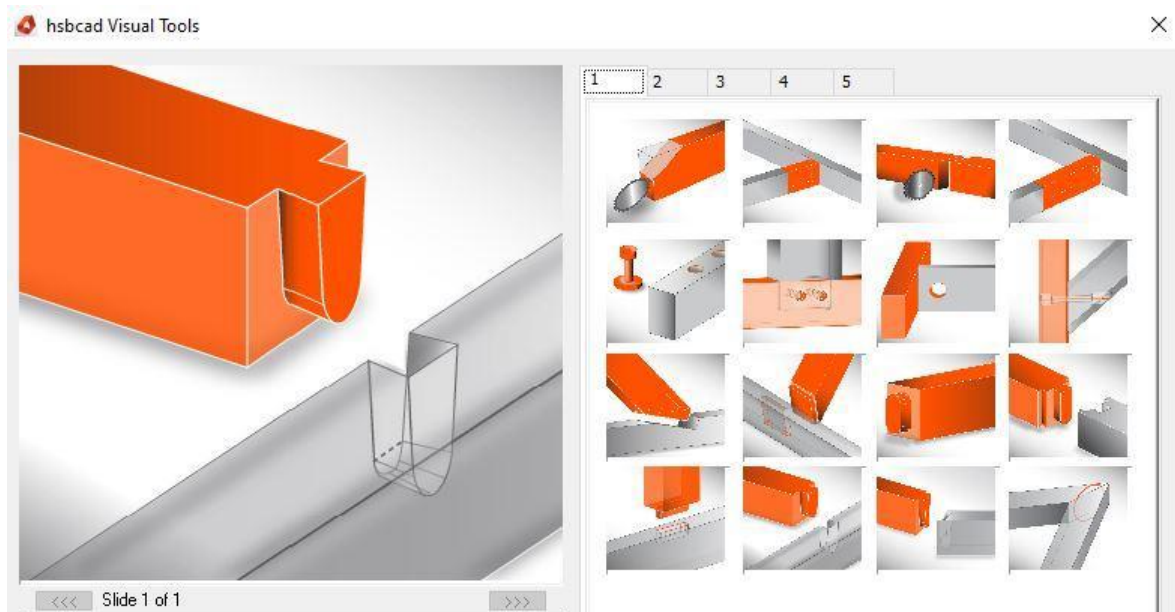
Tingimus 2.12 ja 2.13 on täidetud ning kandevõime paindemomendi ja pikijõu koosmõjul on tagatud 76% ning C16 saematerjalist karkassipost ristlõikega 50 × 100 mm sobib kasutamiseks.

Vastav näitaja Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021 programmis on 75% ning raami liigendtugede korral 41%. Kuigi varda saledus z-telje suhtes oli suurem, siis kontroll näitas, et kandevõime on y-telje suhtes rohkem rakendatud peamiselt tuulest tekkiva paindemomendi tõttu.

3. PUUSEPALIITED

3.1. Sobiva tarkvara otsimine

Ettevalmistus liidete projekteerimiseks kätkes endas tööks sobivate tarkvarade otsimist ja katsetamist. Kokku katsetati kuut erinevat tarkvara: 1) Cadwork; 2) hsbCAD; 3) AutoCAD; 4) TpaCAD; 5) Fusion360; 6) Vertex BD. Eelnevalt nimetatud kuuest tarkvarast osutus sobivaimaks variant, kus liidete koostamiseks on kasutatud hsbCAD'i. Kuigi Cadworks'i ja VertexCAD'i tarkvarad sisaldavad liidete kataloogi, siis võrreldes hsbCAD'ga olid need peamiselt üldehituslikud ja palkmajade liited ning nende parameetrid olid rohkem fikseeritud. Lisaks suuremale paindlikkusele on hsbCAD'i liidete kataloog (vt joonis 3.1.) oluliselt suurem ning sisaldas välistatsionaari projekteerimisel kasutatud peamiseid tappe kiilukujulise ümardatud kalasabatapi, hammaskaldlukkk tapi ja naagelliidete näol. Jooniselt 3.1. on näha, et liidete kataloog on viis lehekülge pikk ning iga liite parameetrid on suures ulatuses muudetavad, k.a toleransi määramise võimalus nt tapipesa ja tapikeele vahel.



Joonis 3.1. HsbCAD i liidete kataloog (kuvatõmmis tarkvarast).

HsbCAD'is koostatud sõlmed konverteeriti 3D-*solid*'iteks¹ ja Fusion360 abil genereeriti kood CNC-pingi jaoks, mis tuli omakorda importida läbi postprotsessori TpaCad'i. Sellisel kolmeetapilisel konverteerimisel tekib aga mitmeid probleeme. Näiteks antud tarkvaralist lahendust iseloomustab vähene paindlikkus, mistõttu ei saa CNC tarkvaraga lihtsalt koodi muuta, vaid selleks tuleb minna tagasi esimese etapi juurde. Lisaks esineb puuduseid ka EMÜ Tehnikainstituudi (kuni 31.12.2021, edaspidi *TI*) poolt kirjutatud postprotsessoril. Ühtlasi võiks olla üks edasise uurimise teemadest, kuidas saada 3D disaini-tarkvarast otse masinkood CNC-töötlemiskeskuse jaoks. Täpsemalt kirjeldatakse CNC-koodidest CNC-töötluste peatükis.

3.2. Töös kasutatud puusepaliited

Kuivõrd välistatsionaari projekteerimisel oli üheks eesmärgiks võimalikult vähene erinevate liidete kasutamine ja nende teostamise tehniline võimekus EMÜ vahenditega, on enamus kasutatud liidetest kiilukujulised ümardatud kalasabatapid. Lisaks eeltoodule on kasutatud ka hammaskaldlukk tappi ning puitnaaglitega puit-puiduga liidet. See teeb erinevate välistatsionaari projekteerimiseks kasutatud liidete tüüpide arvuks kolm.

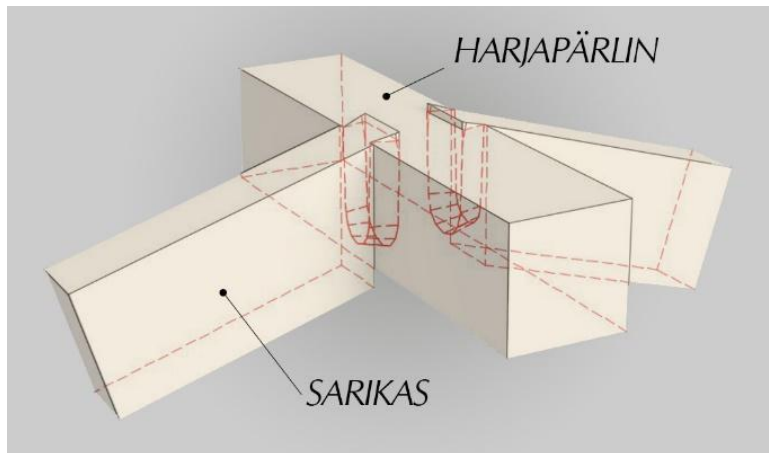
Väikese arvu erinevate sõlmede kõrval lähtuti ka sellest, et võimalikult suur hulk detailidest oleks hiljem vajaduspõhiselt väljavahetatavad, mida kiilukujulised ümardatud kalasabatapid ka võimaldavad. Lisaks välja vahetamisele arvestati ilmastiku ehk ajas kestvusega. Liited ja sõlmed on disainitud nii, et vesi jääks võimalikult vähe detailidele pidama ning ilmastikule vastuvõtlikumad otsad oleksid kaetud. Selleks projekteeriti alumise voodri ülemiste otste kohale tilgamurdjaga karniis või veelaud (vt lisas 4 joonis 4.1 ning lisas 6 joonis 6.9.) ning vertikaalsete kalasaba liidete puhul jäeti tapipesa suunaga allapoole.

CNC-pingil toimunud proovikehade väljafreesimise järgselt analüüsiti nende liitmist, täpsust ning positiivseid ja negatiivseid külgi. Kui liide ei tundunud mõistlik või esines muu puudus, siis disainiti liide ringi. Lisas 5 on näha käsitsi tehtud sõlmede esimesed põhimõttelised lahendused ning lisas 6 reaalselt kasutatud liited.

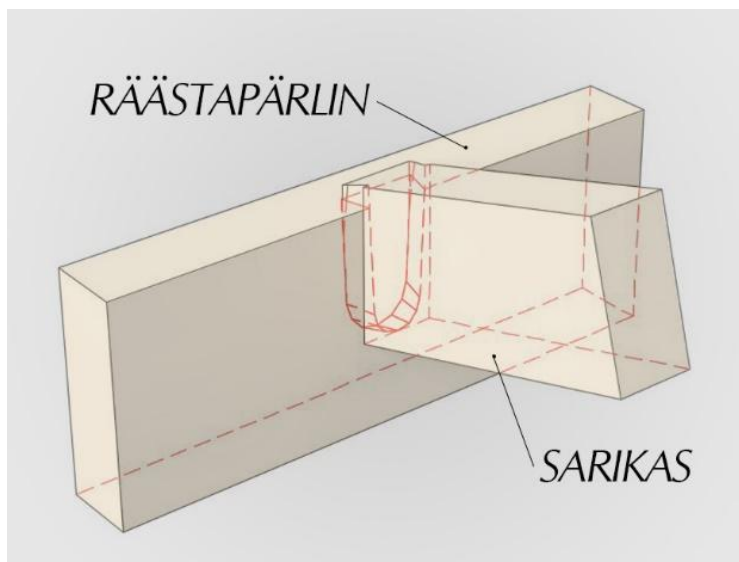
¹ 3D-*solid* – kolmemõõtmeline objekt, mis omab pikkust, laiust ja kõrgust.

3.2.1. Kiilukujulised ümardatud kalasabatapid

Projekteeritud metsloomade välistatsionaari sarikate ja harja- ning räästapärline omavaheliseks ühendamiseks on kasutatud kiilukujulisi ümardatud kalasabatappe (vt joonis 3.2. ja 3.2.). Ühtlasi on tegemist ka nende tappide peamiste kasutuskohadega.

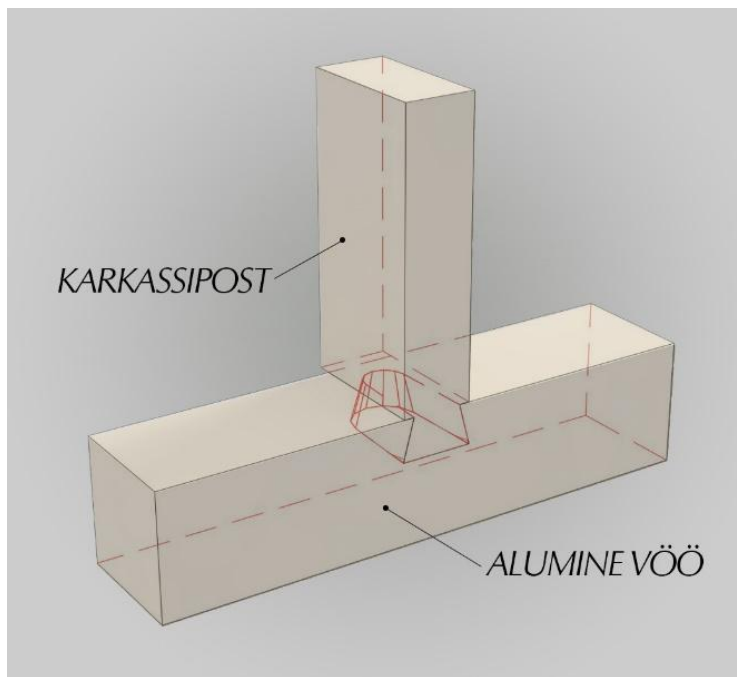


Joonis 3.2. Harjatala ja sarikate sõlm.

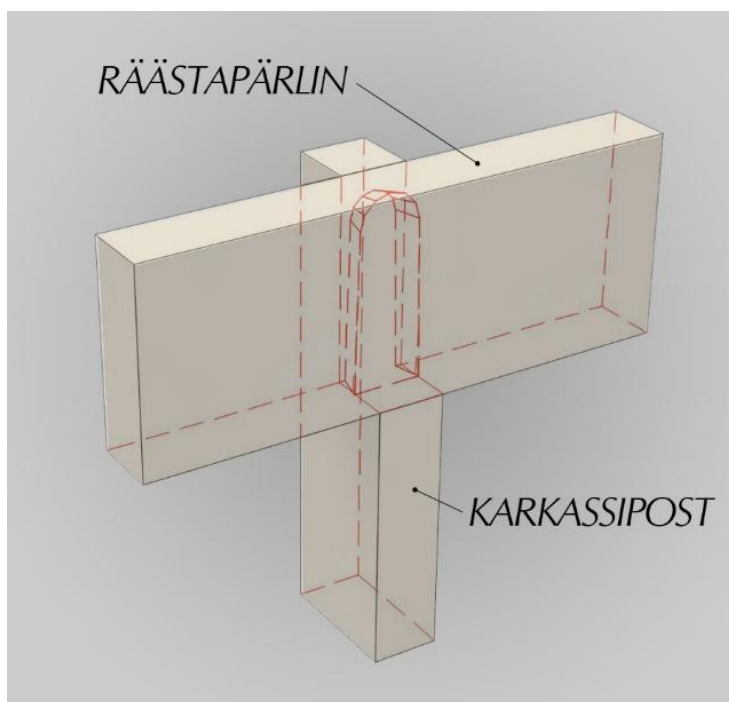


Joonis 3.3. Müürilati ja sarika sõlm.

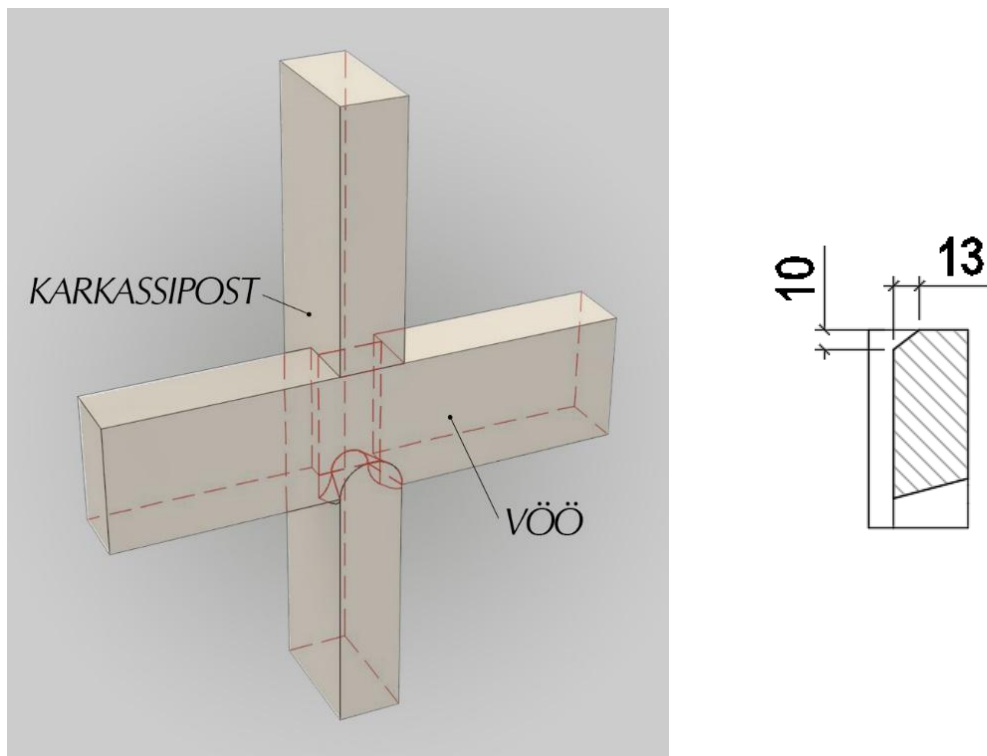
Lisaks eeltoodud asukohtadele on kiilukujulisi ümardatud kalasabatappe projekteeritud välistatsionaari juures kasutatud karkassipostide ja vööde ning silluste ühendamiseks (vt joonis 3.4., 3.5., 3.6.).



Joonis 3.4. Karkassiposti ja alumise vöö sõlm.



Joonis 3.5. Karkassiposti ja räästapärliini sõlm.

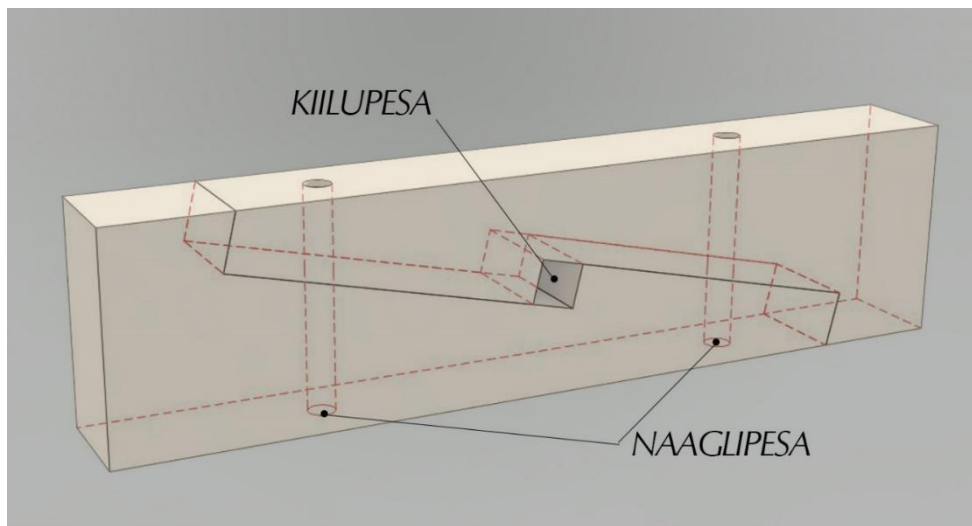


Joonis 3.6. Karkassiposti ja vöö sõlm. Paremal on toodud lõige vööst tapi kohalt.

Joonisel 3.6. näidatud vöö montaažil sissekeeramise lihtsustamiseks karkassiposti küljes olevasse kalasaba tapipessa on vöösse tehtud sisselõige suurusega 10×13 mm. Sisselõiketa lõhuks karkassipost vöö ning puidu pinnale tekkinud kahjustuse tõttu jääks tihe liide saavutamata. Kiilukujulise ümardatud kalasabatapi parameetri valimisel lähtuti olemasolevast seitsmekraadise kaldega kalasabafreesist ning põhimõttest, et pärast töötlust jääks võimalikult palju ristlõiget alles. Sellest tulenevalt on maksimaalne kiilu laius sama, mis ristlõike laius ning kiilu nurk on valitud Ingtools'i tarkvara soovitatud vahemikust 4 – 12 kraadi miinimumilähedane viis kraadi, säästmaks materjali ka tapikeele ümardatud otsas.

3.2.2. Hammaskaldlukk tapp

Hammaskaldlukk tappi kasutatakse peamiselt materjali jätkamiseks. Jätkatavate kehade otstes on identsed ja sümmeetrilised töötlused. Hammaskaldlukk tappi saab jäigastada puitnaaglite ning kiilusoonde paigaldatava kõvast lehtpuidust, näiteks tammest või saarest (välistatsionaari puhul), kiilu abil (vt joonis 3.7.). Välistatsionaari projekteerimisel on kõik saematerjali pikijätkud vöödes ja pärlinites tehtud hammaskaldlukk tapiga.

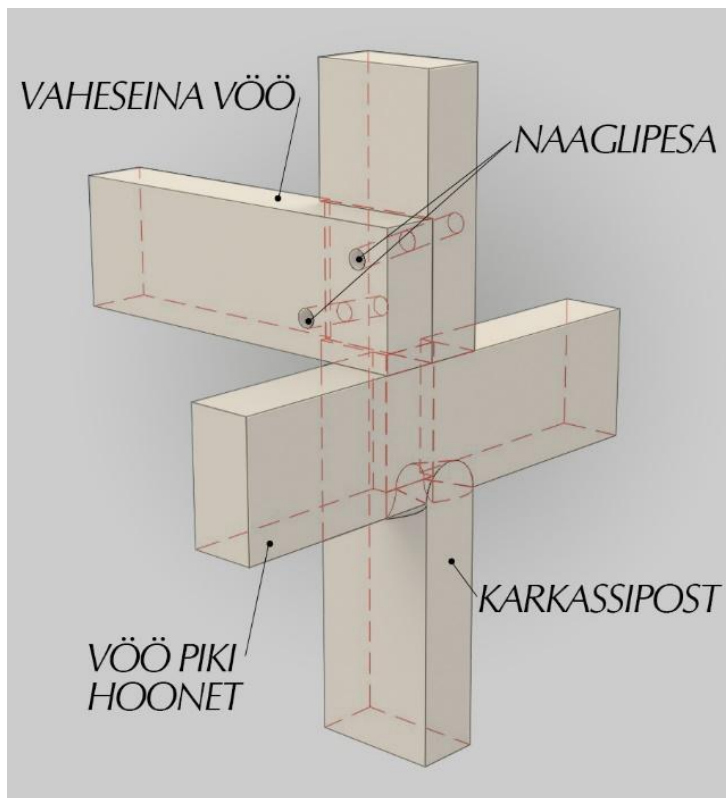


Joonis 3.7. Tugevdatud hammaskaldlukk tapp.

Liite parameetrite aluseks on võetud Arvo Veski (1948: 176) poolt välja toodud suhted, kus kogu töötluse pikkus on kolmekordne ristlõike kõrgus ehk 100 mm kõrge vöö jätku töötluse pikkus on 300 mm ning täisnurkne otsatöötlus asub vöö servast viiendiku kõrguse kaugusel. Samad parameetrid annab hsbCAD liite projekteerimisel vaikimisi.

3.2.3. Puitnaaglitega puit-puiduga liide

Välistatsionaari bokside vaheseinte vööde ja karkassipostide vahel on kasutatud ühelõikelist puitnaaglitega puit-puiduga liidet (vt joonis 3.8.).



Joonis 3.8. Ühelõikeline puitnaaglitega puit-puiduga liide.

Vöödes toetub naagel risti- ning karkassipostis pikikiudu. Kuivõrd bokside vaheseinte vööd toetuvad ka karkassipostis olevatesse tapipesadesse (sügavus 5 mm ehk nn märketapp) ja piki hoonet paiknevatele vöödele, siis naaglite roll antud olukorras on vaid vöö fikseerimine karkassiposti. Eeltoodust tulenevalt on naaglid paigaldatud väikese nurga all (ca 10 kraadi), et vähendada võimalikku naaglite väljatõmmet vöö kõmmeldumise või kõverdumise tõttu.

Ühtlasi on autori silmis oluline eraldi välja tuua, et püstitamiseks kasutatud ainsad metallist kinnitusvahendid on:

- a) sisekuuskantpeaga puidukruvid alusklotsi kinnitamiseks vaivundamendi külge;
- b) kuuskantpeaga puidu kruvipoldid alusvöö kinnitamiseks alusklotside külge.

4. TOOTMINE

4.1. Materjali sorteerimine ja valimine

Metsloomade välistatsionaari ehitamisel kasutati süvaimmutatud saematerjali, millele tugevusklassi ei omistata, kuid mille puhul koormusarvutustes võib aluseks võtta C16 tugevusklassiga materjali omadused. Saematerjali järkamisel selgus, et immutusvahend ei ole tunginud eriti sügavale, mis tuleneb puitmaterjali eelnevast vajaliku niiskussisalduseni kuivatamata jätmisest. Kuna kogu puitmaterjal hoiustati töötlemiseni pakis, siis ei esinenud sellel kõmmeldumust, keerdumust, piki- ja serva kaardumus. Nii tugevussorteerimata kui – sorteeritud materjali kasutamisel on oluline teostada töötlemisele eelnev visuaalne hindamine. Metsloomade välistatsionaari saematerjali sorteerimisel ja järkamisel kaaluti hoolikalt, millist detaili on võimalik antud materjalist valmistada, et tappide ümbrusesse ei jääks oksakohti, lõhesid või teisi rikkeid.

4.2. Detailide toorikute ettevalmistus

Välistatsionaari kandva karkassi materjaliks oli kolmes eri ristlõikes süvaimmutatud kuuse saematerjal, mis osutus väljavalituks pidades silmas vajadust hoida hoone püstitamise eelarveline maksumus võimalikult minimaalsena. Karkassipostide ja sarikate toorikuks oli 50×100 mm, alusvöödeks ning harjatalaks ehk harjapärliks 90×90 mm ning müürilatiks ehk räästapärliks 50×150 mm saematerjal. Pärast materjali tellimist ladustati see kaheks kuuks CNC-puidulabori köetavates ruumides. Ladustamisega sooviti tagada puidu minimaalne niiskussisaldus. Puidu kõmmeldumise ning kõverdumise ja kaardumise vältimiseks kasutati saematerjali paki kokku tõmbamiseks teraslinte. Katsekehade tootmisele eelnenud proovitükkide valmistamisel selgus, et tellitud saematerjali ristlõigete ± 3 mm kõikumiste tõttu muutus kalasabatapi geomeetria ning tapid jäid kas liiga tihked või liiga lõdvad. Proovitükkide tegemisel tuli välja, et isegi tapipesa laiuse muutmine tööradades 0,1 mm võrra võis tähendada, et detailid ei sobinud ideaalselt kokku. Eriti probleemseks osutusid detailid, kus töötused olid kolmes erinevas küljes. Samas oli hoone

jäikuse ja stabiilsuse tagamise seisukohast oluline, et liited oleksid võimalikud täpsed. Sellest tulenevalt mõõdeti enne iga detaili töötlemist tooriku ristlõike kõrgus ja laius ning korrigeeriti ristlõike ebatäiuslikkust töötluste tööradadega. Kui töötluste asetsevad ühel küljel, siis on selline iga detaili ristlõike mõõtmine väga ajamahukas. Töötluste kolmes küljes tegemine eeldab aga väga hea ruumilise mõtlemise oskust, saamaks aru, mis suunas tuleb parameetreid muuta, et oleks võimalik tagada kõikides külgedes olevate töötluste õigsus.

4.3. CNC-töötlustused

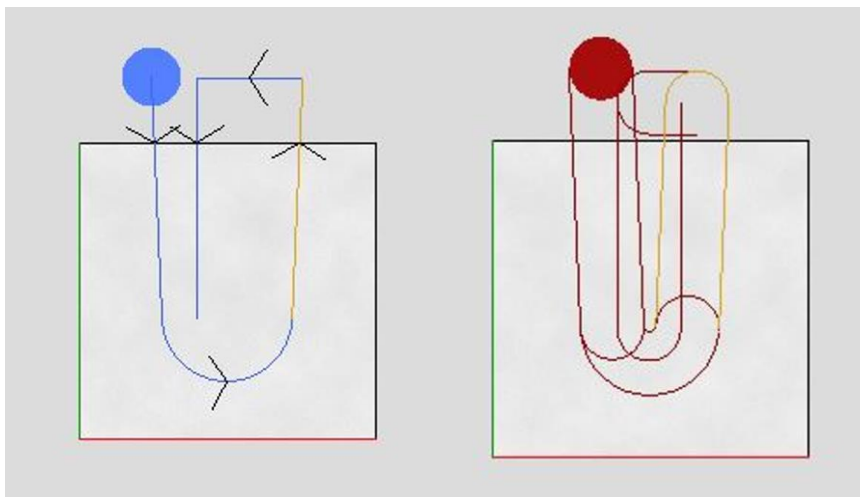
EMÜ Metsandus ja inseneeria instituudil (edaspidi *MI*) on 5-teljeline CNC-töötlemiskeskus Casadei/Busellato Jet Optima T5 XL, mille maksimaalne töölaua suurus on 5260 × 1450 mm ning maksimaalselt saab töödelda 180 mm kõrgust detaili. CNC-töötlemiskeskuse täpsus on kümnetuhandik ning spindli maksimaalne kiirus on 18000 pööret minutis. Erinevate detailide kinnitamiseks on töölaual eri suuruses liigutatavad vaakumpadjad ning suruõhuga töötavad kruustangid ja ümmargused kettakujulised klemmid (*clamps*). Nagu tarkvara peatükis kirjeldatud, siis saab töötluste masinkoodi teha alternatiivsete tarkvaradega ning seejärel CNC-töötlemiskeskusse importida. Samas on võimalik lihtsamad töötlustused valmistada ka TpaCAD'i kasutades otse CNC-töötlemiskeskuses. Töötluste kood on arvude rada, mille järgi töötluskeskus saab aru kus, millega ja mida ta tegema peab. Joonisel 4.1. on näidatud tõmbekatse tapipesaga detaili töötlemise töörajad.

	ABC	ASCII Text			Description
1		SETUP EG0 X21.8997 Y110.0134 Z-20 T1359 DN1 EGL0 MLT0 EMP0 GEO0 NEXT ...	0	0	
2		L01 EG0 X25.1094 Y36.5037 Z-20 DVAR0 DSIDE0	0	0	
3		A01 EG0 X64.4804 Y36.5037 Z-20 EW1 J0.8889 DVAR0 DSIDE0	0	0	
4		L01 EG0 X67.6759 Y109.69 Z-20 DVAR0 DSIDE0	0	0	
5		L01 EG0 X35.605 Y109.69 Z-20 DVAR0 DSIDE0	0	0	
6		L01 EG0 X35.605 Y36.4901 Z-20 DVAR0 DSIDE0	0	0	

Joonis 4.1. Tõmbekatse tapipesaga detaili töörajad.

Jooniselt 4.1. on võimalik näha, et kogu tapipesa töötlus on jagatud väiksemateks tööloikudeks. Parema ülevaate saamiseks CNC-töötlemiskeskuse jaoks loodud koodide tähendusest on kasutatud selgitava näitena joonisel 4.1. toodud tabeli esimest ja neljandat rida. Vaadeldava tabeli esimesel real on esitatud freesi algasendi seadistus koos CNC-töötlemiskeskuse kataloogist valitud eelseadistatud parameetritega freesiteraga, kus kood

T1359 tähistab seitsmekraadist kalasabafreesi ning GEO väljendab võimalust kasutada CNC-töötlemiskeskuse neljandat ja viiendat telge. Ühtlasi kasutati seitsmekraadist kalasabafreesi ka käesoleva töö raames välistatsionaari ja katsekehade tootmiseks. Joonisel 4.2. on näidatud kalasaba tapipesa tööraja graafiliselt esitatud lõik (joonisel tähistatud kollasega), mida on koodina kirjeldatud joonise 4.1. neljandal real, kus L tähendab joontöötlust (*line*), tähised XYZ märgivad töötuse lõppkoordinaate ning Z-20 väljendab tapipesa sügavust.



Joonis 4.2. Kalasaba tapipesa tööraja graafiliselt esitatud lõik. Vasakul töörada, paremal töörada koos freeside kompensatsiooniga ehk äralõigatava materjali asukoht tööraja suhtes.

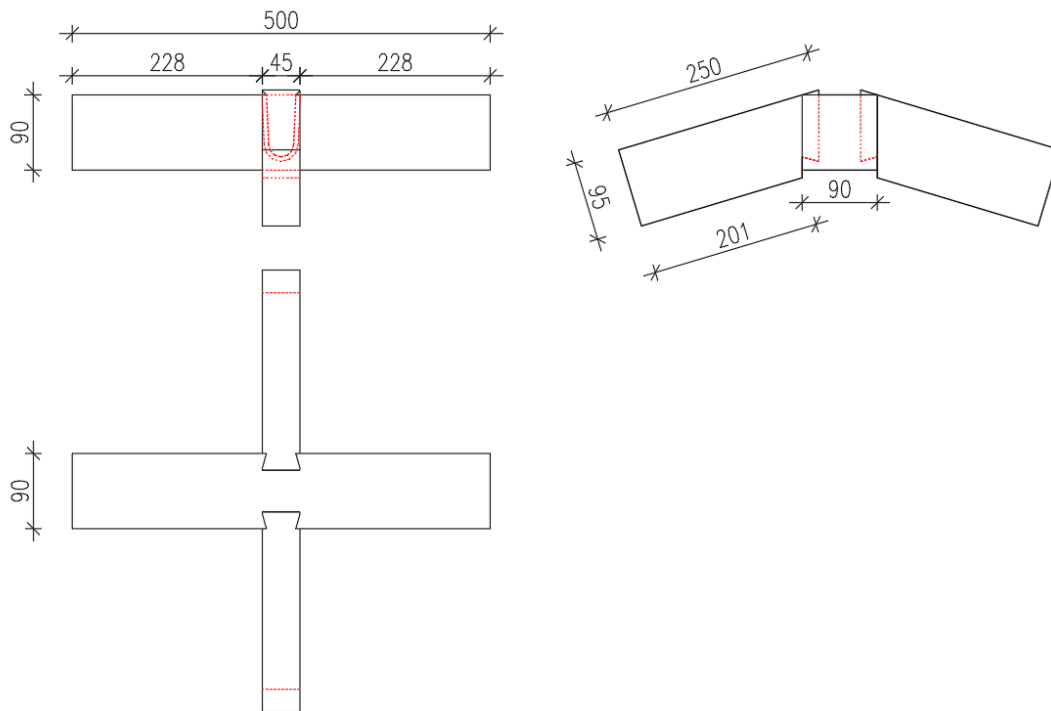
Joonisel 4.2. vasakul on esitatud kogu tapipesa töötuse töörajad freesitera kompensatsioonita ning paremal koos kompensatsiooniga. Antud joonisel näidatud sinine ja punane ring tähistavad 15,8 mm läbimõõduga kasutatud kalasabafreesi. Kompensatsioonita oleks freeside tsentri trajektoor mööda töörada, mille tulemusel saaks tapi pesast liiga palju materjali ära lõigatud. Parempoolse tööraja puhul on kompensatsiooniks kasutatud poolt freeside läbimõõdust, et väljafreesitud tapipesa asuks seespool töörada.

5. KATSEKEHADE UURIMINE

Käesoleva töö raames projekteeritud välistatsionaaris on kasutatud kolme tüüpi puusepaliiteid: 1) kiilukujuline ümardatud kalasabatapp, 2) hammaskaldlukk tapp ning 3) puitnaaglitega puit-puiduga liide. Nagu kirjanduse analüüsis on välja toodud, siis puuduvad standardid, millest väljavalituks osutunud sõlmede ehk töös peamiselt kasutust leidnud puusepaliidete (sh just kiilukujulise ümardatud kalasabatapi) projekteerimisel lähtuda. Kuna hammaskaldlukk tappe ning puitnaaglitega puit-puiduga liiteid on varasemalt rohkem uuritud, kui kiilukujulisi ümardatud kalasabatappe, siis keskendutaksegi antud töö raames just viimaste uurimisele. Peamiselt pakkus töö autorile huvi, kuidas käitub kiilukujuline ümardatud kalasabatapp paindel ning tõmbel, kui kalasaba tapikeelt ei ole kuidagi tapipesasse naagliga täiendavalt fikseeritud. Liidete uurimiseks viidi läbi katsekehade uurimine katsekehade valmistamise ja nendega katsete tegemise kaudu.

5.1. Katsekehade valmistamine

Kiilukujulise ümardatud kalasabatapi paindekandevõime uurimiseks on taastoodetud välistatsionaari tootmise juures kasutatud harjasõlm, kus liituvad sarikad ja harjapärilin. Katsekehasid on kokku tehtud 12. Katsekehad ja kõik ülejäänud välistatsionaari detailid on valmistatud 5-teljelise Casadei/Busellato Jet Optima T5 XL CNC-töötlemiskeskusega. Paindekatsekeha koosneb kolmest detailist: kahest sarikast ja ühest harjapärlinist. Katsekehade jaoks on kasutatud immutamata saematerjali ristlõikega 50×100 ja 100×100 mm, mis on paksusmasinas kalibreeritud ristlõigetele vastavalt 45×95 ja 90×90 mm (vt joonis 5.1.). Jooniselt 5.1. on võimalik näha, et harjapärlini pikkuseks valiti 500 mm ning sarikate pikkuseks 250 mm.

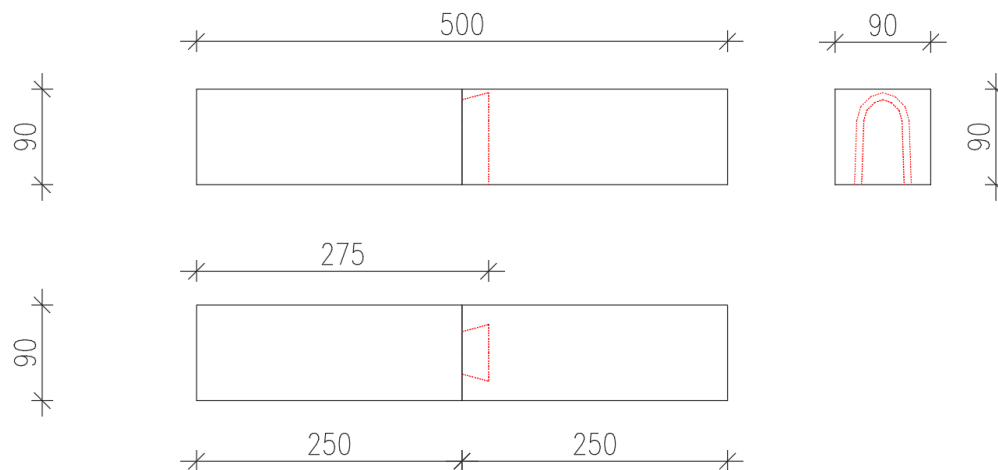


Joonis 5.1. Harjasõlme katsekeha kolmepunkti paindekatse jaoks.

Katsekehade detailide valmistamiseks kasutatud materjal on enne töötluste ja kalibreerimise tegemist seisnud kuu aega staabeldatuna CNC-puidulabori köetavates ruumides. Materjali sellisel viisil hoidmine tagas katsekehadel samasuguse niiskussisalduse, mis oli ühtlasi eelduseks katsete käigus saadud tulemuste omavaheliseks võrdlemiseks. Kuna katsekehade detailid on lühikesed, siis mõlema katsekeha vastavad detailid on valmistatud kahest toorikust (nt on harjatala detailide kogusumma 6 m ehk 12 detaili tegemiseks oli vaja kahte kolmemeetrist toorikut), mis tagab kõikidele detailidele sarnased puidu omadused. Samas on oluline tuua välja, et katsekehade niiskussisaldust ei ole käesoleva töö raames läbiviidud katsekehade uurimisel mõõdetud. Seda eeskätt põhjusel, et liidete katsetamine ei olnud antud töö peamiseks eesmärgiks, vaid katsekehade uurimisega sooviti saada informatsiooni liidete käitumise kohta võimalikeks edasisteks uurimusteks.

Tõmbekatsekehasid on sarnaselt paindekatsekehadega tehtud 12. Tõmbekatse jaoks ei ole kasutatud otseselt välistatsionaari juures rakendatud jätkuliidet põhjusel, et välistatsionaari kõik materjali jätkud tehti hammaskaldlukk tapiga, aga katsega sooviti uurida kiilukujulise ümardatud kalasabatapi käitumist tõmbel, mida kasutati alumiste vööde ja harjapärliini jätkamiseks hoone murdekohas. Tõmbekatse jaoks on kasutatud sama materjali, mis paindekatse harjapärliini detailina, kus 90×90 mm ristlõikega ühe detaili otsa on freesitud

tapikeel ning teise detaili otsa tapipesa. Katsekeha kogupikkuseks on 500 mm, kusjuures tapipesaga detaili pikkuseks on 250 mm ning tapikeelega detaili pikkuseks on 275 mm, millest tapikeele pikkus on 25 mm (vt joonis 5.2.).



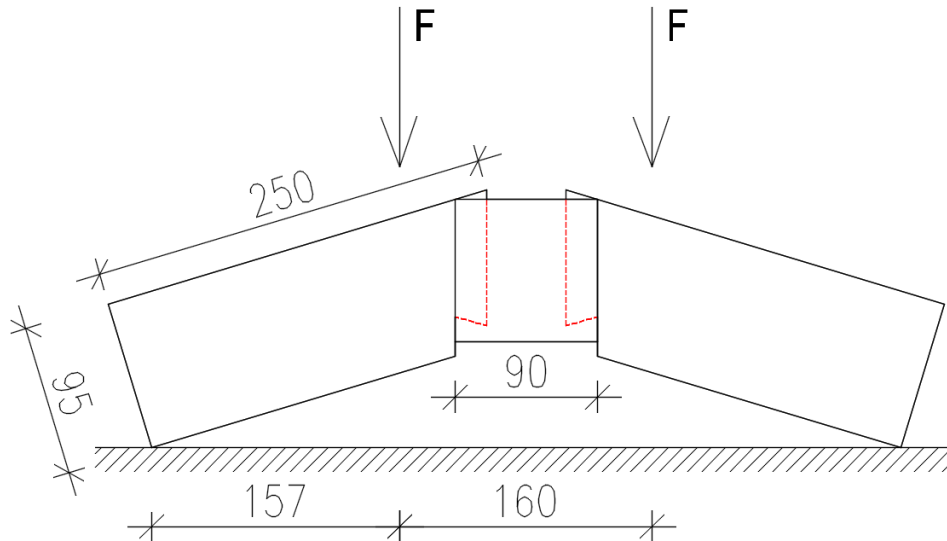
Joonis 5.2. Kiilukujulise ümardatud kalasaba tapiga katsekeha skeem tõmbekatse jaoks.

5.2. Liidete katsetamine

Katsekehade katsetamine viidi läbi EMÜ MI Metsamaja laboris universaalse elektromehaanilise katsemasinaga INSTRON 3369. Katsemasina maksimaalne rakendatav koormus on 50 kN ning minimaalne koormamise kiirus 0,005 mm/min. Katsemasina mõõtmisviga on $\pm 0,5\%$ mõõdetavast väärtusest. Katsete käigus saadavate andmete salvestamiseks kasutatakse *Bluehill 4* tarkvara ning andmete salvestamine toimub 20 korda sekundis.

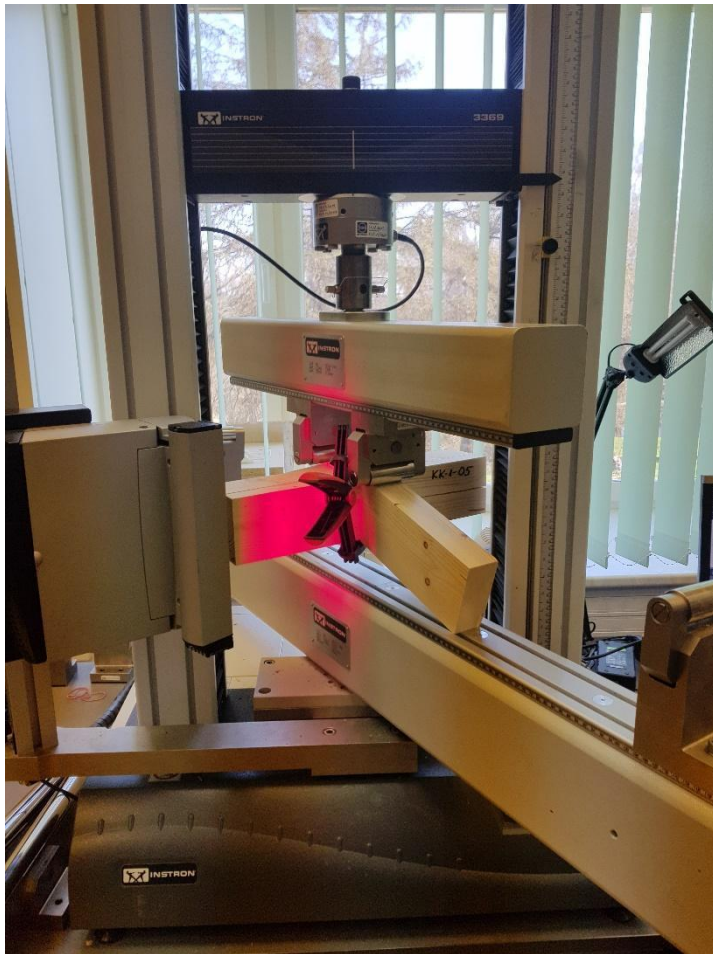
Harjasõlmes oleva kalasabatapi kandevõime kontroll

Katse tegemiseks paigaldati katsekeha sarikad Instroni talale, misjärel katsekeha tsentreeriti ning lähendati paindekatses rullidega tugi sarikateni. Rullikute vaheks oli 160 mm ning sarika kandade vaheks 520 mm (vt joonis 5.3.).



Joonis 5.3. Harjasõlme neljapunkti paindekatse skeem.

Sellisel paigaldatud katsekehaga luuakse sarnane olukord, kus horisontaaljõud (tuul) tahavad raami ühelt küljelt pikali lükata ning momenti ülekandvad kiilukujulised ümardatud kalasabatapid peavad raami püsti hoidma. Eelduslikult läheb katse käigus ühel pool harjapärilinit sarika ülemine osa survesse ja alumine pool tõmbesse ning teisel pool erilisi muutusi ei toimu, andes katse maksimaalse jõu ühe poole kohta. Esimene katse on tehtud koormuse rakendumise kiirusega 1,5 mm/min katse kiiruse hindamiseks ja esmase tulemuse saamiseks. Kuna kiilukujuline ümardatud kalasabatapp hakkas koormuse rakendamisel tapipesast välja tulema, siis otsustati ülejäänud katseteks kalasabatapp näpitsate abil fikseerida (vt joonis 5.4.) eeldusega, et näpitsad aitavad kaasa liite kooshoidmisele kuni tapi enda töösse rakendumiseni.



Joonis 5.4. Paindekatsakeha katseseadme vahel.

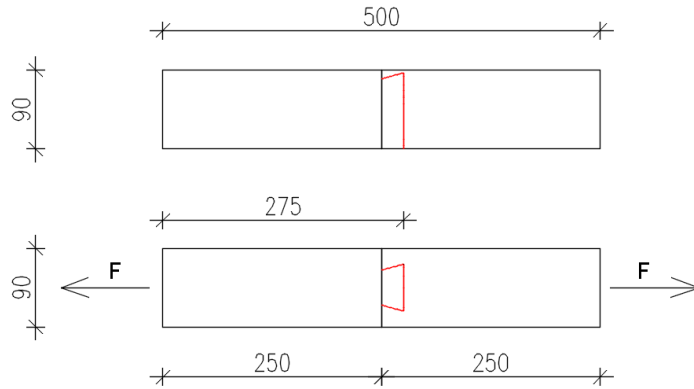
Eelpool kirjeldatule järgnenud katsed tehti koormuse rakendamisel kiirusega 4,5 mm/min, sest esialgne valitud kiirus osutus katse jaoks liiga aeglaseks. Lisaks selgus katsetega paralleelselt toimunud vaatluse käigus, et näpitsate kasutamisel ei olnud oodatud mõju liite paremini tööle aitamisele. Kõik katsekehad on nummerdatud ning pärast igat katset on mõõdetud sarika ja harjapärliini vahelist vahet ning katse käigus tapipesast välja libisemise ulatust.

Vöö jätkamiseks oleva kalasabatapi kandevõime kontroll

Tõmbekatse tegemiseks paigaldati katsekeha katseseadme Instron vahele vertikaalselt postikingast tehtud rakiste abil (vt joonis 5.5.). Tõmbekatse skeem on esitatud joonisel 5.6.

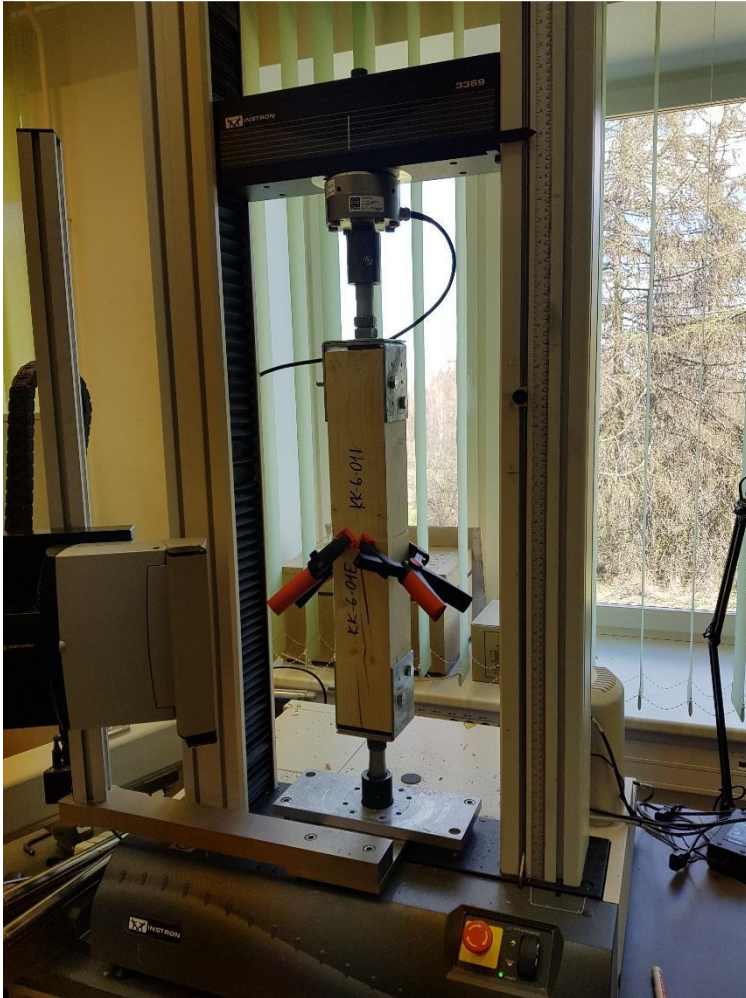


Joonis 5.5. Tõmbekatse rakis.



Joonis 5.6. Tõmbekatse skeem.

Joonisel 5.7. on näha katsekeha asetsemine katseseadmes. Analoogselt paindekatsesele sooviti näpitsatega takistada kiilukujulise ümardatud kalasabatapi tapikeele välja tulekut tapipesast enne katse alustamist.



Joonis 5.7. Katsekeha asetsemine katseseadmes ja näpitsate paigutus.

Tõmbekatse koormuse rakendamise kiiruseks esimesel katsel seati 2 mm/min, mis osutus sobilikuks ka järgnevate katsete jaoks. Kõik katsekehad on nummerdatud ning pärast igat katset on mõõdetud tapikeele ning tapipesa kõige laiemaid mõõte muljumise hindamiseks.

6. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

Katsekehade uurimisega sooviti saada informatsiooni kiilukujulise ümardatud kalasabatapi käitumise kohta paindel ning tõmbel võimalikeks edasisteks uurimusteks. Nii painde- kui ka tõmbekatseteks toodeti mõlemat katsekeha 12 tükki ning mõlemal juhul toimus koormamine EMÜ Metsamajas olevas MI laboris universaalse elektromehaanilise katsemasinaga INSTRON 3369. Paindekatsel oli koormuse rakendamise kiiruseks 4,5 mm/min ning tõmbekatsel 2,0 mm/min. Pärast iga katsekeha koormamist tehti katsekehast foto ning mõõdeti ja dokumenteeriti saadud tulemused.

6.1. Painde- ja tõmbekatsete tulemused

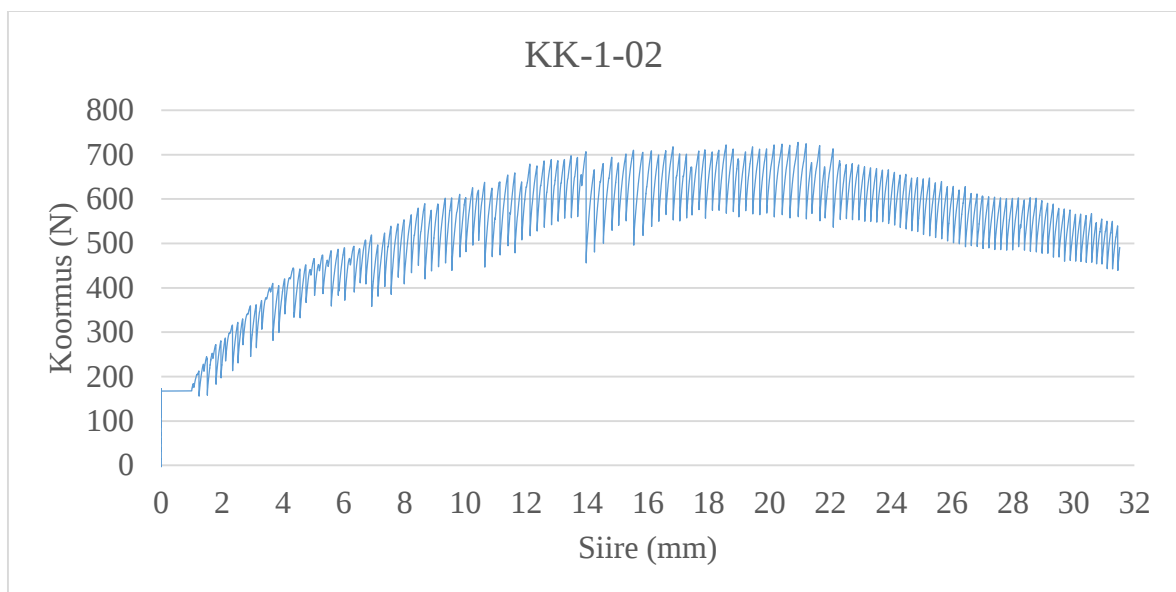
Harjasõlmes oleva kalasabatapi kandevoime kontroll

Paindekatsede statistilised näitajad on välja toodud tabelis 6.1. ning dokumenteeritud mõõtmised on välja toodud lisas 7 asuval joonisel 7.1.

Tabel 6.1. Paindekatsede tulemused

Statistilised näitajad	Kandevoime (N)
Keskmine	834.17
Standardviga	40.05
Mediaan	805.00
Standardhälve	138.73
Min. maks. vahemik	440.00
Minimaalne	640.00
Maksimaalne	1080.00
Usaldustase (95.0%)	88.14

Liidete katsetamise peatükis on välja toodud eelduslik katsekäik ja -tulemus. Kaheksal katsel 12-st läks katse käigus ühel pool harjapärlnit sarika ülemine osa survesse ja alumine pool tõmbesse ning teisel pool erilisi muutusi ei toimunud, andes katse maksimaalse jõu ühe poole kohta. Neljal juhul tõusid mõlemad sarikad võrdselt tapipesast välja. Ühel juhul tekkis tapipesa tõmbes oleva kumera alumise poole juurde lõhe ning kõikidel juhtudel toimus harjapärlni detaili muljumine sarika tapikeele poolt. Paindekatse tüüpiliselt graafikult (vt joonis 6.1.) on võimalik näha katsekeha nr KK-1-02 näitel, et graafik on terve katse vältel sakiline. Ühtlasi oli terve katse vältel enamus graafiku tippude juures kuulda naksumist.



Joonis 6.1. Katsekeha KK-1-02 paindekatse graafik.

Maksimaalne jõud paindekatsetel oli 1080 N ning minimaalne 640 N, mis teeb tulemuste vaheks 1,69 kordse erinevuse. Samas ei saa välja tuua ühte teistest väga erinevat tulemust. Keskmiselt jõudis katsekeha maksimaalse kandevõimeni 257,1 sekundiga, misjärel graafik hakkas sujuvalt langema.

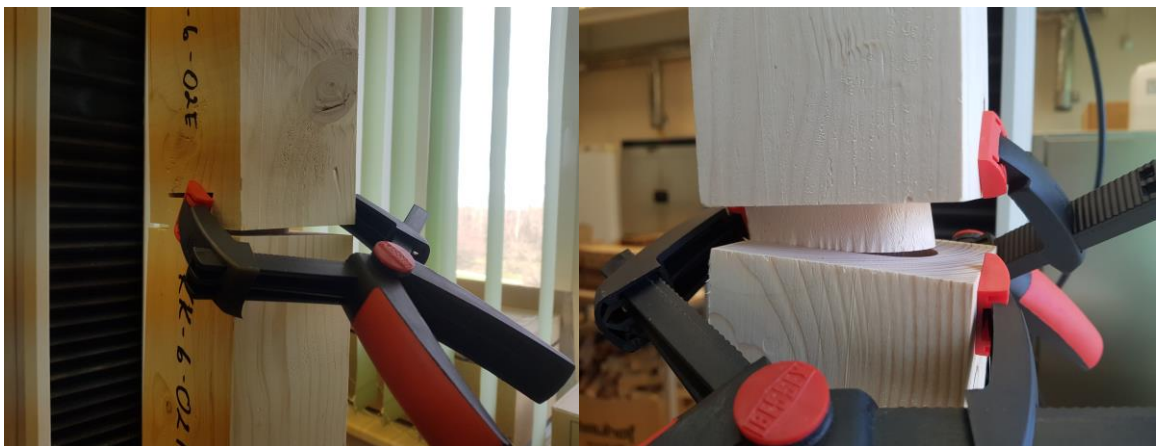
Vöö jätkamiseks oleva kalasabatapi kandevõime kontroll

Tõmbekatse statistilised näitajad on välja toodud tabelis 6.2. ning dokumenteeritud mõõtmised on esitatud lisas 7 asuval joonisel 7.2. Pärast igat katsetust mõõdeti muljumise ulatuse hindamiseks tapikeele ja tapipesa maksimaalsed laiused. Saadud tulemused on esitatud eeltoodud lisas. Katsekeha liitekohale oli paigaldatud näpitsad, et tagada katsekehade koos püsimine enne koormamist. Katse visuaalsel jälgimisel sai selgeks, et need näpitsad katsekehade kandevõimeid kuidagi ei mõjutanud, sest kohe katse alguses tekkis

liite kalasaba ümardatud poolde vahe (vt joonis 6.2.), mis katse jooksul progresseerus koos tapipesast välja libisemisega.

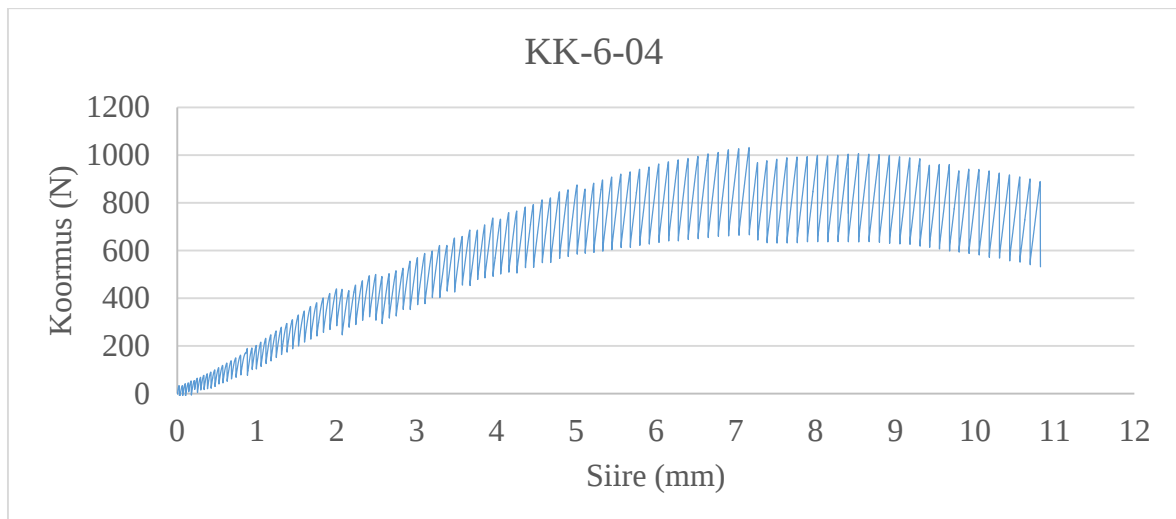
Tabel 6.2. Tõmbekatse tulemused

Statistilised näitajad	Kandevõime (N)
Keskmine	1014.52
Standardviga	65.20
Mediaan	974.39
Standardhälve	225.85
Min. maks. vahemik	792.56
Minimaalne	744.32
Maksimaalne	1536.88
Usaldustase (95.0%)	143.50



Joonis 6.2. Vasakul katsekeha liitekoha vahe katse alguses ja paremal katse lõpus.

Analoogselt paindekatsel oli tõmbekatse graafik (vt joonis 6.3.) sakiline terve katse vältel ning katse jälgimisel kostus enamus graafiku tippude juures naksumine. Tõmbekatse keskmise järgi sobib tüüpilise graafiku kirjeldamiseks kasutada katset KK-6-04.



Joonis 6.3. Katsekeha KK-6-04 tõmbekatses graafik.

Maksimaalne jõud tõmbekatsel oli 1536.88 N ning minimaalne 744.56 N, mis teeb tulemuste vaheks 2,06 kordse erinevuse. Sarnaselt paindekatses ei saa ka tõmbekatsel välja tuua ühte teistest väga erinevat tulemust. Eraldi saab märkida, et pooltel juhtudel ei toimunud ainult tapikeele välja libisemine, vaid tapipesa põhjast tekkis ka pikikiudu lõhe (vt joonis 6.4.).



Joonis 6.4. Katsekeha KK-6-09 lõhe tapipesa põhjas.

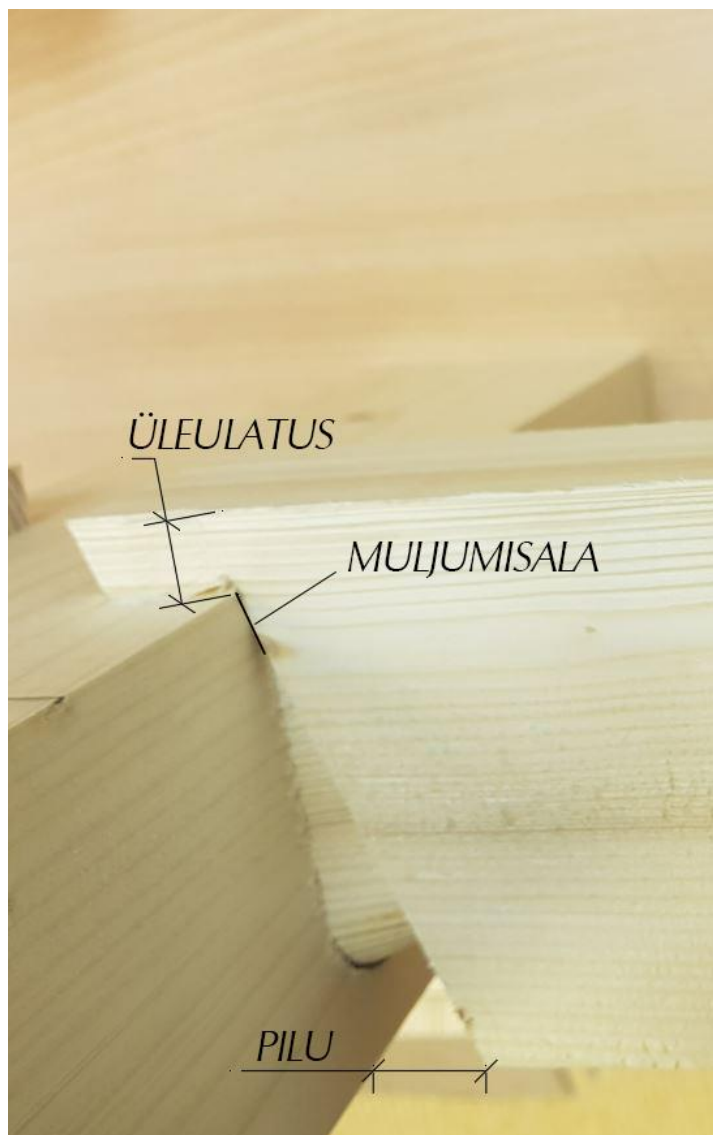
Nagu eelpool toodud, siis lõhe tekkis 12-st katsekehast kuuel, kusjuures viiel oli tapipesast kuni 100 mm kaugusel oksakoht ning ühel juhul oli tapipesaga detail oksavaba.

6.2. Painde- ja tõmbekatsete tulemuste analüüs

Katsetulemustust nähtub, et nii tõmbe- kui paindekatse minimaalsed ja maksimaalsed tulemused erinevad paindekatse puhul 1,69 ning tõmbekatse puhul 2,06 korda. Kuigi tulemuste varieeruvus on suur, siis mahtusid kõik tulemused kolmekordse standardhälbe sisse, seega tulemustes erindeid ei ole ning statistiliste näitajate arvutamisel ühtegi tulemust välja pole jäetud. Tulemuste varieeruvust saab selgitada saematerjali kasutamisega tugevussorteeritud materjali asemel, puidukiudude ja aastarõngaste asetusega liites, liite geomeetria ning töötlemisvahendite ja -võtetega. Katsetamise käigus ei kaotanud ükski liide kandevõimet detailide purunemise läbi, vaid kiilujukujulise ümardatud kalasabatapi tapipesast välja tulemise tõttu, mille tõenäoliselt tingis tapi enda kiilujukuline ehitus. Käesoleva töö autori tehtud paindekatse tulemustega analoogsete tulemusteni on jõudnud ka kinnitusvahenditeta traditsioonilisi kalasabatappe uurinud Chen jt (2016) ning Moradei jt (2018). Chen jt (2016) kinnitusvahendita kuuekraadise kaldega traditsioonilise kalasabatapiga tehtud paindekatse tulemustest selgus, et liiga väike nurk põhjustas tapikeele tapipesast välja keeramise ning Moradei jt (2018) tõid välja, et nende läbiviidud paindekatsel liide küll ei purunenud, kuidas toimus selle märgatav pöördumine. Kasutatud puitmaterjali kõrval mõjutavad katsetulemusi kindlasti ka väljavalitud tapi geomeetrilised parameetrid. Katsekeha detailid on tehtud seitsmekraadise kaldega kalasabafreesiga, sest CNC-puidulaboris oli selline frees olemas ning uue freesitera ostmine ei olnud majanduslikust seisukohast otstarbekas.

HsbCAD võimaldab muuta kõiki kalasabatapi parameetreid peale kalasabatapi nurga, mis mõõtmise järgi on fikseeritud 14 kraadi peale. Soovituslik traditsioonilise kalasabatapi nurk Just (2015) järgi on suhtega kolm ühele, mis teeb nurgaks 18 kraadi ning vastavalt Tannert jt (2010) uurimusele soovitatakse ümara kalasabatapi tegemiseks kasutada 15-kraadist nurka ja tapi kõrguseks $\frac{2}{3}$ ristlõike kõrgusest. Ingtools soovitab kiilujukulise ümardatud kiilujukulise kalasabatapi nurgaks valida 10 – 18 kraadi. Kui tüüpiliste sarikate otstes, mis üldjuhul on 50 mm laiad, kasutada 18-kraadist kalasaba, siis jääks 20 mm kõrge tapikeele korral kõige laiemas kohas alles ainult 37 mm tapikaela. Seitsmekraadise kalde puhul jäi alles 45 mm, mis on võrreldes järsema nurgaga oluline võit liite tugevust arvestades. Kalasabatapi kiilu nurk, mis on tähistatud joonisel 1.2. k-tähega peaks Ingtools tarkvara järgi olema 4 – 12 kraadi. Välistatsionaari ja katsekehade uurimisel kasutati 5-kraadist nurka. HsbCAD selle nurga osas piiranguid ei sea.

Paindekatse mõõtmistulemuste uurimisel saab kinnitada, et tapp libises tapipesast välja, mitte ei purunenud, sest mida suurem oli liite alumises osas vahe, seda rohkem oli tapikeel tapipesast välja liikunud (vt joonis 6.5. ja lisas 7 tabel 7.1.). Lisaks tapikeele väljaliikumisele tapipesast muljus tapikeelega detail oma pikikiulisusega tapipesaga olevat ristikiudu detaili. Muljumisala oli keskmiselt 5 mm laiune ala tapipesa ülemises nurgas (vt joonis 6.5.).



Joonis 6.5. Paindekatse tulemuste dokumenteerimine.

Väljaliikumine ja soovitud viisil mitte tööle hakkamine võib olla tingitud lisaks eeltoodud kiilukujulisusele ka tapikeele seitsmekraadisest nurgast, puidu kiudude ja ka aastarõngaste suunast ning freesitera liikumiskiirusest ja suunast. Tõenäoliselt hakkaks järsema nurgaga kiilukujuline ümardatud kalasabatapp paindel paremini tööle, sest liitel oleks võimalik lihtsamini kinni kiiluda. See aga suurendab tapikeele põskede purunemise riski tõmbel

pikikiudu ja vähendaks tapikaela mõõtu. Puidu kiudude suhtes pärikiudu töötlemise ning teravate tööriistadega jääb töötluse pind väga sile ja libe, mis takistab piisava hõõrdejõu teket. Katse käigus kuulnud naksumine oli tõenäoliselt hõõrdejõu ületamise järgselt liite nihkumise heli. Peamise põhjusena saab välja tuua kinnitusvahendi puudumise liite fikseerimiseks nagu on tehtud välistatsionaari püstitamisel.

Sarnaselt paindekatsele nihkus tapikeel katse käigus tapipesast välja ning selle tulemusel muljuti tapipesa ja tapikeele põskede servmiseid pindasid algmõõdust kuni 1,4 mm. Katsetulemuste uurimisel ei saa välja tuua seaduspära, et kui tapipesa on muljutud rohkem, siis tapikeelt on muljutud vähem ja vastupidi. Tapikeele väljanihkumine tuleneb tõenäoliselt samadest põhjustest, mis esinesid ka paindekatsetel. Mõnel juhul näitavad katsetulemused, et tapikeel on katse käigus kõige laiemast kohast veel laiemaks ning tapipesa veel kitsamaks muutunud. Seda saab selgitada näitega, kus puitu on muljutud tapipesa maksimaalse ava kõrvalt ning muljumise tulemusena on kiud sealt kõrvalt ülesse tõusnud. Terve katse vältel oli kuulda naksumist nagu paindekatse puhul, mis tõenäoliselt oli põhjustatud hõõrdejõu ületamisest tingitud liite nihkumise heli. Katsetulemustest lähtuvalt võiks võrdluse saamiseks edaspidi katsetada kiilukujuta ning ka ümarduseta kalasabatapi tõmbetugevust, aga ka kiilukujulise ümardatud kalasabatapi tõmbetugevust erinevate geomeetriliste parameetrite muutmisega. Kiilukujulisus on just see, mis tagab liite tiheduse ning arvestab ka niiskuse kasvu ja kahanemisega liites läbi tapikeele tapipesas kergitamise või langetamise. Täisnurkselt tehtud liited võivad niiskuse mõjul paisudes rakustruktuuri lõhkuda ning hakata hiljem loksuma.

7. ARUTELU

Magistritöö eesmärgiks oli koostada EMÜ VLI välistatsionaari puitkonstruktsioonide töö- ja tootejoonised varem koostatud eelprojekti alusel. Silmas peeti EMÜ käsutuses olevaid projekteerimistarkvarasid ja riistvara ning seadmeparki koos minimaalse koguse metalldetailide kasutamisega. Lisaks uurida väljavalitud liidete tugevusomadusi ja anda esialgne hinnang kogu hoone keskkonnataluvusele ajas.

Käesoleva töö peamiste probleemidena saab välja tuua puusepaliidete projekteerimise reeglite ning normide puudumise, vajaduse arvestada metsloomade välistatsionaari hoone projekteerimisel ja ehitamisel väliskeskkonna mõjuga, CNC-töötlemiskeskuse jaoks vajalike CNC-koodide tegemise keerukuse ning puitmaterjali ristlõigete suure varieeruvuse.

Valdavalt on kõik traditsioonilised puusepaliited dokumenteeritud ning neid saab valmistada ajalooliselt väljakujunenud ning teatud juhtudel ka varasematest läbiviidud katsetamiste käigus leitud toimivate soovituslike parameetrite järgi. Näiteks on töös hammaskaldlukk tapi projekteerimiseks kasutatud 1948. aastal Arvo Veski poolt kirjutatud pedagoogilist kirjandust „Puusepa- ja laudsepatööd“. Üldjuhul ei toimu enam traditsiooniliste liidete suuremahulisi edasiarenduse, vaid peamiselt katsetatakse eksperimentaalselt või lõplike elementide meetodil töötavate tarkvaradega, kuidas sellised liited erinevate materjalide/kinnitusvahenditega töötavad, mil viisil oleks võimalik olemasolevaid liiteid tugevdada või suurendada nende keskkonnasäästlikust. Kirjanduse analüüsis on välja toodud mitu katset, kus on uuritud hammaskaldlukk tappi erinevast puiduliigist kiiludega (Hirst jt 2008) ning tugevusomadusi ja liite tugevdamise võimalusi metallist kinnitusvahendite asendamisel puidust naaglitega (Ceraldi jt 2010). Eksperimentaalsete katsete tulemused hammaskaldlukk tapiga kinnitavad üldteada tõde, et kõvast lehtpuidust kiilud on endiselt kõige sobilikumad, kuid puitmaterjali anisotroopne ehitus ja keeruline pingejaotus raskendab nende arvutuseeskirjade koostamist. Tulenevalt liite arvutuseeskirjadest kasutatakse turvalist väärtust, mis nt hammaskaldlukk tapi paindekandevõimel on kolmandik terve ristlõike paindekandevõimest.

Sarnaselt hammaskaldlukk tapile on ka puitnaaglitega puit-puiduga liite projekteerimisel lähtunud teada-tuntud ja varem katsetatud võtetest. Kõige keerulisem, aga samas ka kõige lihtsam, oli projekteerida kiilukujulist ümardatud kalasabatappi. Keeruline, sest nimetatud tapi projekteerimiseks ja painde- ning tõmbekandevõime arvutamiseks puuduvad igasugused reeglid. Ja lihtne, sest kasutatud hsbCAD tarkvarasse on kokku kogutud väga palju traditsioonilisi puusepaliiteid, sh kiilukujuline ümardatud kalasabatapp ja hammaskaldlukk tapp. Lisaks on HsbCAD'i arendajad on teinud palju tööd, et erinevate liidete kasutamine oleks projekteerijate jaoks võimalikult lihtne. Sealjuures tuleb valitud ristlõigete alusel tehtud esimeste parameetrite pakkumine tarkvaralt endalt. Käesolevas töös kasutatud kiilukujulise ümardatud kalasabatapi parameetrid valiti hsbCAD'i pakutud geomeetria ja CNC-puidulaboris olemasoleva kalasabafreesi järgi ning lisaks pöörati tähelepanu sellele, et töötlemise käigus eemaldatava materjali osakaal oleks võimalikult minimaalne. Eelnevalt nimetatud liite projekteerimise muudab keeruliseks asjaolu, et tegemist on suhteliselt uue puitliitega, mida on veel vähe kajastatud. Ühtlasi oli vähene kajastatus üheks põhjuseks, miks sooviti antud töö raames uurida just kiilukujulise ümardatud kalasabatapi käitumist paindel ja tõmbel.

CNC-töötlemiskeskuste ja käsifreeside laialdase kättesaadavusega on kiilukujuline ümardatud kalasabatapp muutumas järjest populaarsemaks just seetõttu, et tegemist on universaalse ja kiiresti valmistatava liitega. Populaarsust kinnitab ka asjaolu, et Ingtools on hiljuti välja arendanud nimetatud liite projekteerimise ja põikjõukandevõime kontrollimise tarkvara, mis on koostatud Eurokoodeks 5 baasil. Kuna tegemist on üsna uue tarkvaraga, milles liite projekteerimiseks seatud erinevad parameetrilised piirangud ei sobitunud käesoleva töö raames projekteeritud metsloomade välistatsionaari ristlõigetega, siis puudus võimalus selle tarkvaralise lahenduse kasutamiseks.

Antud töö raames kiilukujulise ümardatud kalasabatapiga läbiviidud katsete tulemustest lähtub, et valitud geomeetria ja lisa kinnitusvahendeid kasutamata ei hakanud liited eeldatud viisil tööle, mis tulenes omakorda mitmest asjaolust. Eelduste kohaselt oleks pidanud tapipõsed üksteise suhtes kinni kiiluma ning rakendatud jõule vastu töötama. Katsekäigu jälgimisel sai selgeks, et kiilukujulised ümardatud kalasabatapid libisevad tapipesast vaikselt välja nii painde- kui ka tõmbekatsel. Peamise põhjusena saab välja tuua kinnitusvahendi puudumise, aga kuna soov oli uurida liidet kinnitusvahendita, siis saab seda puudust pidada ebaoluliseks. Kirjanduse järgi peaks kalasaba ehk kasutatud freesid nurk

olema 10 – 18 kraadi, kuid käesoleva töö raames kasutatud CNC-töötluskeskuses oli võimalik valida selleks ainult seitsmekraadine frees. Tõenäoliselt hakkaks suurema nurgaga freesiga valmistatud liide paremini tööle, kuid siis võivad hoopis puruneda tapipõsed nihkel pikikiudu. Tapi kiilukujulisus on valitud soovituslikust vahemikust peaaegu minimaalne viis kraadi, mis peaks pigem takistama tapikeelel tapipesast välja nihkumist ning samas jätma ristlõikesse alles rohkem materjali.

Üldjuhul tehakse kvaliteetset tööd teravate tööriistadega. Väikese läbimõõduga freesiga saab kasutada kiilukujulise ümardatud kalasabatapi tegemisel maksimaalsel spindli kiirusel, milleks antud töös kasutust leidnud CNC-töötlemiskeskusel on 18000 pööret minutis. Suur kiirus ja terav frees tagab küll ilusa ja sileda töötuse, kuid ei võimalda oma libeduse tõttu piisava hõõrdejõu teket, mis on vajalik tapipõskede omavaheliseks kinni kiilumiseks.

Kuigi hsbCAD'is on suur ja põhjalik puusepaliidete kataloog ning liidete projekteerimine on tehtud lihtsaks, siis tekitab raskusi juba valmis projekteeritud liite CNC-töötlemiskeskusesse saamine. Metsloomade välistatsionaari sõlmede projekteerimine ja paika saamine oli ajamahukas töö, sest lõplike tööradade leidmiseks tuli kasutada mitut tarkvara, millest tegelikult ükski ei olnud saajaprotsendiliselt sobilik antud töö tegemiseks. Lisaks vähendab mitme tarkvara kasutamine kogu tööprotsessi paindlikkust. Kuigi lihtsad töötused saab luua otse CNC-töötlemiskeskuses TpaCad'i abil, siis edaspidisteks keerulisemateks projektideks tuleks tellida hsbCAD'i või mõne muu sobiliku tarkvara külge koodi genereerimise liides ehk postprotsessor. Seda enam, et hsbCAD'is on küll olemas koodi loomise võimekus, kuid puudub tõlge Bussellato jaoks sobilikku keelde.

Tarkvarade omavaheline ühildumatus võimendas ka kalibreerimata materjali kasutamise probleemi. Kui käsifreesil on töötlus ja baaspunkt üldiselt samal küljel ning erisused materjali paksuses töö lõpptulemust ei mõjuta, siis CNC-töötlemiskeskusel asub baaspunkt tooriku all fikseeritud kõrgusel ning sellele paigaldatud tooriku kõrguse erinevus projekteerimisel kasutatud ristlõikest muudab freesitud liite parameetreid, põhjustades tapi liigset tihedust või lõtvust. Tooriku ristlõike erinevusel projekteeritust oli üheks variandiks mõõta käsitsi töödeldava detaili ristlõige ning arvutada ja sisestada CNC-töötlemiskeskusesse uued koordinaadid või teise alternatiivina minna koodi muutmiseks tagasi esimese tarkvara juurde. Mõlemad variandid peaksid olema täpse ja kiire töö tegemise juures välistatud. Kuna aga puitkonstruktsioonide jäikuse tagamiseks on liite täpsusel ja

tihedusel suur roll, siis tuleks CNC-töötlemiskeskuses kasutada kalibreeritud ristlõigetega materjale.

Kiilukujulise ümardatud kalasabatapi uurimise käigus ei jõutud selgusele selle painde- ja tõmbekandevõime osas metsloomade välistatsionaari projekteerimisel kasutatud momenti ülekandvate varraste omavahelistes liidetes. Seega ei saa õigeks pidada eeldust, et täiendavalt jäigastamata karkass töös näidatud koormuste rakendumisel iseseisvalt püsti püsiks. Lisaks kolmele karkassipostile ja kahele sarikale on ehitise jäigastamiseks piki ja risti hoonet lisatud kiilukujuliste ümardatud kalasabatappidega ühendatud vööd ning diagonaalselt paigaldatud voodrilauad, mida arvutustes arvesse ei võeta ning jäikust aitab tagada ka hoone keskel olev 135-kraadine nurk.

Kogu eeltoodud informatsiooni põhjal saab väita, et hoone jäikus ja stabiilsus on tagatud vaatamata kiilukujulise ümardatud kalasabatapi katsekehade uurimustulemustele. Eelneva kontrollimiseks tehti lisaks jääkade tugedegas raami kõrval kontrollarvutus ka liigendugedegas raami kandevõimele. Ootuslikult on liigendugedegas raami vardad suurema kandevõimega, sest varraste otstes puudub samaaegne paindemomendi ning piki- või põikjõu esinemine.

Välikeskkonda projekteeritud ja ehitatud metsloomade välistatsionaari hoone eluea pikendamiseks leidsid rakendamist alljärgnevad meetmed:

- 1) hoone puitosad on maapinnast kõrgemale tõstetud, välja arvatud uste lävepakud (taaskasutatud Ukraina tammest immutatud raudteeliiprid), mis asuvad veerises. Lävepakud on disainitud nii, et neid saaks välja vahetada;
- 2) kandvate konstruktsioonide otsad (ristlõike otsad) ja pealmised küljed (alumistel vöödel) on kaetud tilgamurdjatega varustatud kaldpinnaga veelaudadega või teiste konstruktsioonidega;
- 3)apid on võimalusel disainitud nii, et vesi pääseks liitest välja ja ei jääks liite vahele või peale seisma
- 4) voodrilauad on paigaldatud diagonaalselt ja tuulutusvahedega, mis ei võimalda veel lauale püsima jääda ning laseb konstruktsioonidel tuulduda;
- 5) kasutatud on süvaimmutatud saematerjali.

8. KOKKUVÕTE

Puusepaliiteid on järjepanu kasutatud puidutöötlemise tööriistade ja seadmete kasutuselevõttust tänapäevani. Seoses mitmekesiste ehitusmaterjalide laia kättesaadavuse ning järjest kasvavate tööjõukuludega on aga aeganõudvate traditsiooniliste puusepaliidete kasutamine olnud langustrendis. Viimastel aastatel on ehitustööstuses hakatud ehitatavate hoonete keskkonnamõju vähendamiseks pöörama suuremat tähelepanu loodust säästvate ehitusmaterjalide kasutamisele. Puit on üks sellistest materjalidest, mille kasutamine on taaselustunud tänu keskkonnasäästlikule mõtlemisele ning puittoodete uudsete tehniliste lahenduste ja liidete väljatöötamisele. Lisaks on CNC-töötlemiskeskuste laialdane levik võimaldanud traditsiooniliste puusepaliidete (nt kalasabatapp) uuesti kasutusele võtmist, kuid nende projekteerimise ja arvutamise muudab keeruliseks standardite puudumine.

Magistritöö eesmärgiks oli koostada EMÜ VLI metsloomade välistatsionaari puitkonstruktsioonide töö- ja tootejoonised varem koostatud eelprojekti alusel. Silmas peeti EMÜ käsutuses olevaid projekteerimistarkvarasid ja riistvara ning seadmeparki koos minimaalse koguse metalldetailide kasutamisega. Lisaks uurida väljavalitud liidete tugevusomadusi ja anda esialgne hinnang kogu hoone keskkonnataluvusele ajas.

Välistatsionaari projekteerimisel peeti silmas võimalikult vähest erinevate liidete kasutamist ja nende tehnilise teostamise võimekust EMÜ vahenditega. CNC-töötlemiskeskuse olemasolu võimaldas liidetena kasutada valdavalt traditsioonilisest kalasabatapist edasi arendatud suhteliselt uut kiilukujulist ümardatud kalasabatappi, mis tulenevalt oma mitmekülgsest töötamisviisist ehk suutlikkusest võtta vastu erinevaid sisejõude, on ka kiiresti toodetav. Kirjanduse analüüsist saab välja tuua, et kiilukujulisi ümardatud kalasabatappe kasutatakse peamiselt põikjõu ülekandmiseks, aga katsetused näitavad, et need tapid töötavad hästi ka tõmbele ja paindele. Välistatsionaari karkassi dimensioneerimine tehti eeldusel, et eeltoodud tapid töötavad piisavalt paindele, ning raami saab arvutada jäikade tugedegaga. Kontrolliks tehti raami arvutus ka liigendtugedegaga ning arvutuste tulemuste võrdlemisel saab välja tuua, et mõlemal juhul oli varraste kandevõimed tagatud.

Metsloomade välistatsionaari töö- ja tootejooniste projekteerimiseks sobis kuuest EMÜs saadaval olevast ja katsetatud tarkvarast hsbCAD oma suure puusepaliidete kataloogi pärast, kus olid olemas ka töös kasutatud kiilukujuline ümardatud kalasabatapp, hammaskaldlukk tapp ning puitnaaglitega puit-puiduga liide. Lisaks mahukale kataloogile olid enamus liidete parameetritest suurel määral muudetavad. Kuigi hsbCAD'is on suur ja põhjalik puusepaliidete kataloog ning liidete projekteerimine on tehtud võimalikult lihtsaks, siis esineb raskusi selles valmistatud liite EMÜ CNC-töötlemiskeskusesse saamisel, sest hsbCAD puudub võimekus tööradade CNC-töötlemiskeskuse jaoks sobilikuks tõlkimiseks. Seetõttu tuli valmis tehtud liidet importida ja eksportida läbi mitme tarkvara, mis aga muutis omakorda võimatuks hilisema koodi kohandamise ning muudatuse tegemiseks tuli pöörduda tagasi esimese etapi juurde.

Kiilukujulise ümardatud kalasabatapi uudsus ja senine vähene kajastatust oli peamiseks põhjuseks, miks otsustati antud töö raames keskenduda just selle liite käitumise uurimisele paindel ja tõmbel. Nii metsloomade välistatsionaari kui ka katsekehade projekteerimisel ja valmistamisel kasutati standardite puudumise tõttu hsbCAD'i soovitatud vaikimisi seatud parameetreid, kus kalasaba kiilu nurgaks valiti viis kraadi ning tapi põse nurgaks CNC-puidulaboris oleva kalasabafreesi järgi seitse kraadi. Kuna läbiviidud katsetel toimus koormuse rakendamisel mitmete asjaolude kokkulangevusel tapikeele tapipesast välja libisemine, siis puudub võimalus põhjapanevate järelduste tegemiseks liite eeldatud viisil tööle hakkamise kohta.

Kuna silmas peeti ka keskkonnasäästlikkust ja võimalikult väikese koguse metalli kasutamist, siis nähti voodrilaudade kinnitamiseks ette puidust naelu ning välitingimustes ajas vastupidavuse suurendamiseks leidis kogu hoone puitmaterjalina kasutust süvaimmutatud kuuse saematerjal. Lisaks tõsteti hoone puitosad maapinnast kõrgemale, tapid disainiti valdavalt vett läbilaskvalt ning enamus ristlõigete otsasid kaeti veelaudade või teiste konstruktsioonidega. Ühtlasi saab välja tuua, et ainsad metsloomade välistatsionaaris kasutatud metallist kinnitusvahendid olid kuuskantpeaga puidu kruvipoldid alusraami, alusklotsi ja vaivundamendi omavaheliseks ühendamiseks.

Autori hinnangul oleks üheks jätku-uuringu võimaluseks kiilukujuta ning ümarduseta kalasabatapi, aga ka kiilukujulise ümardatud kalasabatapi painde- või tõmbetugevuse katsetamine erinevate geomeetriliste parameetrite muutmisel ja täiendaval fikseerimisel puitnaagli/-naelaga.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Arciszewska-Kędzior, A., Kunecký, J., Hasníková, H., Sebera, V.** (2015). Lapped scarf joint with inclined faces and wooden dowels: Experimental and numerical analysis. – *Engineering Structures*. Vol. 94, pp. 1–8.
- Beck. (s.a). [veebileht] <https://www.beck-fastening.com/en/products/fasteners/lignoloc-wooden-nails~pc2387> (29.05.2022)
- Branco, J. M., Descamps, T.** (2015). Analysis and strengthening of carpentry joints. – *Construction and Building Materials*. Vol. 97, pp. 34–47.
- Ceraldi, C., D'Ambra, C., Lippiello, M., Sandoli, A., Prota, A.** (2021). Structural behaviour of stop-splayed scarf joint reinforced with timber pegs. – *Construction and Building Materials*. Vol. 269, 121330.
- Chen, C., H Qiu, H., Lu, Y.** (2016). Flexural behaviour of timber dovetail mortise–tenon joints. – *Construction and Building Materials*. Vol. 112, pp. 366–377.
- Ehituskonstrukturi käsiraamat. (2014). /Toim T. Masso. Tallinn: Ehitame kirjastus. 577 lk.
- Ehitusprojekti dokumentide vormistamise nõuded ehitusloa elektroonilisel taotlemisel - juhend (2015). Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. <https://www.mkm.ee/media/347/download> (29.05.2022).
- EhS (2015): Ehitusseadustik. (Jõustumine 1. juuli. – RT, 5. märts 2015). – *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/127042022002> (29.05.2022)
- El-Houjeiri, I., Thi, V. D., Oudjene, M., Khelifa, M., Rogaume, Y., Sotayo, A., Guan, Z.** (2019). Experimental investigations on adhesive free laminated oak timber beams and timber-to-timber joints assembled using thermo-mechanically compressed wood dowels. – *Construction and Building Materials*. Vol. 222, pp. 288–299.
- EVS-EN 1991-1-1:2002/AC:2009.** (2009). Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktioonide koormused. Osa 1-1: Üldkoormused . Mahukaalud, omakaalud, hoonete kasuskoormused
- EVS-EN 1991-1-3:2006/A1:2016.** (2016). Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktioonide koormused. Osa 1-3: Üldkoormused. Lumekoormus. Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 1991-1-4:2005/A1:2010+A1:2010/NA:2010.** (2010). Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktioonide koormused. Osa 1-4: Üldkoormused. Tuulekoormus. Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 1995-1-1:2007.** (2007). Eurokoodeks 5: Puitkonstruktioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. Eesti Standardikeskus.

- EVS-EN 1995-1-1:2007.** (2007). Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreegliid ja reegliid hoonete projekteerimiseks. Eesti standardikeskus.
- EVS-EN 338:2016.** (2016). Ehituspuit. Tugevusklassid. Eesti Standardikeskus.
- Fredriksson, M.** (2013). Moisture conditions in rain exposed wood joints - Experimental methods and laboratory measurements. Division of Building Materials, LTH, Lund University.
- Hirst, E., Brett, A., Thomson, A., Walker, P., Harris, R.** (2008). The structural performance of traditional oak tension & scarf joints. – *Proceedings of the 10th world conference on timber engineering*. Miyazaki, Japan, pp. 2-5.
- Ingtools. (s.a). [veebileht] <https://www.ing-tools.de/en/> (29.05.2022)
- Just, E. J., Õiger, K., Just, A.** (2015). Puit-ja puidupõhised konstruktsioonid. Tallinn: TTÜ kirjastus. 431 lk.
- Moradei, J., Brütting, J., Fivet, C., Sherrow-Groves, N., Wilson, D., Fischer, A., & Ye, J., Cañada, J.** (2018). Structural characterization of traditional moment-resisting timber joinery. – *Proceedings of IASS Annual Symposia*. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). Vol. 2018, No. 20, pp. 1-8.
- Niklewski, J., Fredriksson, M.** (2019). The effects of joints on the moisture behaviour of rain exposed wood: a numerical study with experimental validation. – *Wood Material Science & Engineering*. Vol. 16, No. 1, pp. 1-11.
- O’Ceallaigh, C., Conway, M., Mehra, S., Harte, A. M.** (2021). Numerical Investigation of Reinforcement of Timber Elements in Compression Perpendicular to the Grain using Densified Wood Dowels. – *Construction and Building Materials*. Vol. 288, 122990.
- O’Loinsigh, C., Oudjene, M., Ait-Aider, H., Fanning, P., Pizzi, A., Shotton, E., Meghlat, E. M.** (2012b). Experimental study of timber-to-timber composite beam using welded-through wood dowels. – *Construction and Building Materials*. Vol. 36, pp. 245–250.
- O’Loinsigh, C., Oudjene, M., Shotton, E., Pizzi, A., Fanning, P.** (2012a). Mechanical behaviour and 3D stress analysis of multi-layered wooden beams made with welded-through wood dowels. – *Composite Structures*. Vol. 94, No. 2, pp. 313–321.
- Omrani, P., Masson, E., Pizzi, A., Mansouri, H. R.** (2008). Emission of gases and degradation volatiles from polymeric wood constituents in friction welding of wood dowels. – *Polymer degradation and stability*. Vol. 93, No. 4, pp. 794–799.
- Reiska, R.** (2012). Puidu kaitseimmutus. TTÜ. Puidutöötlemise õppetool. http://www.kk.ttu.ee/puit/Puittoodete_tehnoloogia/Puidu_immutamine.pdf. (29.05.2022)
- Riggio, M., Sandak, J., Sandak, A.** (2016). Densified wooden nails for new timber assemblies and restoration works: A pilot research. – *Construction and Building Materials*. Vol. 102, pp. 1084-1092.
- Riistop, M.** (2010). Puidu immutamine. Puumarket. <https://puumarket.ee/static/files/386.Puidu%20immutamine.pdf>. (29.05.2022).

- Sandberg, D., Kutnar, A., Mantanis, G.** (2017). Wood modification technologies-a review. – *Iforest-Biogeosciences and forestry*. Vol. 10, No. 6, pp. 895.
- Shanks, J. D., Chang, W. S., & Komatsu, K.** (2008). Experimental study on mechanical performance of all-softwood pegged mortice and tenon connections. – *Biosystems engineering*. Vol. 100, No. 4, pp. 562–570.
- Tannert, T.** (2016). Improved performance of reinforced rounded dovetail joints. – *Construction and Building Materials*. Vol. 118, pp. 262-267.
- Tannert, T., Lam, F., Vallée, T.** (2010a). Structural performance of rounded dovetail connections: experimental and numerical investigations. – *European Journal of Wood and Wood Products*. Vol. 69, pp. 471-482.
- Tannert, T., Lam, F., Vallée, T.** (2010b). Strength prediction for rounded dovetail connections considering size effects. – *Journal of engineering mechanics*. Vol. 136, No. 3, pp. 358-366.
- Veski, A.** (1948). Puusepa- ja laudsepatööd. Tallinn: Pedagoogiline Kirjastus. 504 lk.

LISAD

Lisa 1. Röövlindude minimaalsete bokside mõõdud aktiivsuse ja linnuliigi järgi

Table 5: Minimum Housing Guidelines for Raptors

Note: This table is not intended to be used independently; it should be used only in conjunction with the information in Chapter 4, Sections 4.1 and 4.4

Order	Restricted Activity				Limited Activity				Unlimited Activity															
	W	x	L	H	W	x	L	x	H	W	x	L	x	H										
BOOW, BUOW, EASO, ELOW, FEPO, FLOW, NOPO, NSWOW, PRSO, WESO, WHSO	12	in	x	17	in	x	12	in	3	ft	x	6	ft	x	8	ft	8	ft	x	16	ft	x	8	ft
	30	cm	x	43	cm	x	30	cm	0.9	m	x	1.8	m	x	2.4	m	2.4	m	x	4.9	m	x	2.4	m
AMKE, APFA, EUKE, GRHA, HBKI, MERL, MIKI, **NOHO, NHOW, ROHA, SNKI, SSHA, STHA	16	in	x	23	in	x	19	in	6	ft	x	6	ft	x	8	ft	8	ft	x	16	ft	x	8	ft
	41	cm	x	58	cm	x	48	cm	1.8	m	x	1.8	m	x	2.4	m	2.4	m	x	4.9	m	x	2.4	m
BNOW, BWHA, COHA, HWWA, LEOW, RSHA, SEOW, WTKI	20	in	x	27	in	x	22	in	6	ft	x	8	ft	x	8	ft	10	ft	x	30	ft	x	12	ft
	50	cm	x	69	cm	x	56	cm	1.8	m	x	2.4	m	x	2.4	m	3.0	m	x	9.1	m	x	3.7	m
BDOW, CBHA, CRCA, GHOW, HRLH, HRSH, NOGO, NOHA, RLHA, RTHA, SPOW, STKI, SWHA, WTHA, ZTHA	20	in	x	27	in	x	24	in	6	ft	x	8	ft	x	8	ft	10	ft	x	50	ft	x	12	ft
	50	cm	x	69	cm	x	60	cm	1.8	m	x	2.4	m	x	2.4	m	3.0	m	x	15.2	m	x	3.7	m
BAEA, BLVU, FEHA, GGOW, GOEA, GYFA, OSPR, PEFA, PRFA, **SEEA, SNOW, TUVU, **WTEA	3	ft	x	3	ft	x	3	ft	8	ft	x	10	ft	x	8	ft	20	ft	x	100	ft	x	16	ft
	0.9	m	x	0.9	m	x	0.9	m	2.4	m	x	3.0	m	x	2.4	m	6.1	m	x	30.5	m	x	4.9	m

(WxLxH) = Listed in order: Width x Length x Height

* Species are listed using the four letter AOU code (American Ornithologists Union) defined on p. 55

**Indicates that the codes used for these species are not official AOU codes

Joonis 1.1. Röövlindude minimaalsete bokside mõõdud aktiivsuse ja linnuliigi järgi (Miller 2012).

Lisa 2. Ehitusseadustiku lisa 1

Tabel 2.1. Ehitusseadustiku lisa 1. Tabel ehitusteatis, ehitusprojekti ja ehitusloa kohustuslikkuse kohta (**Ehitusseadustik**)

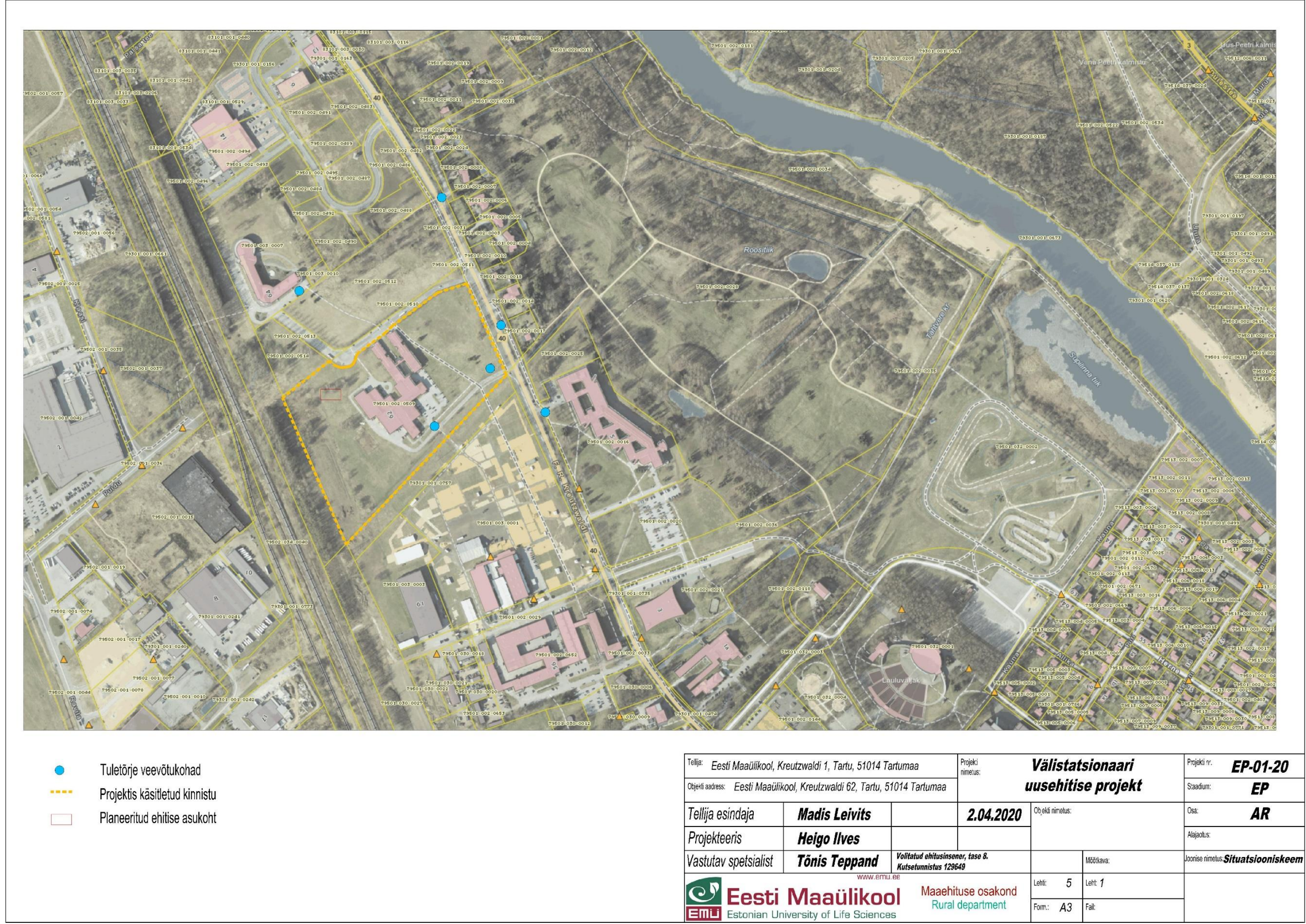
Ehitusseadustik

Lisa 1

Tabel ehitusteatis, ehitusprojekti ja ehitusloa kohustuslikkuse kohta

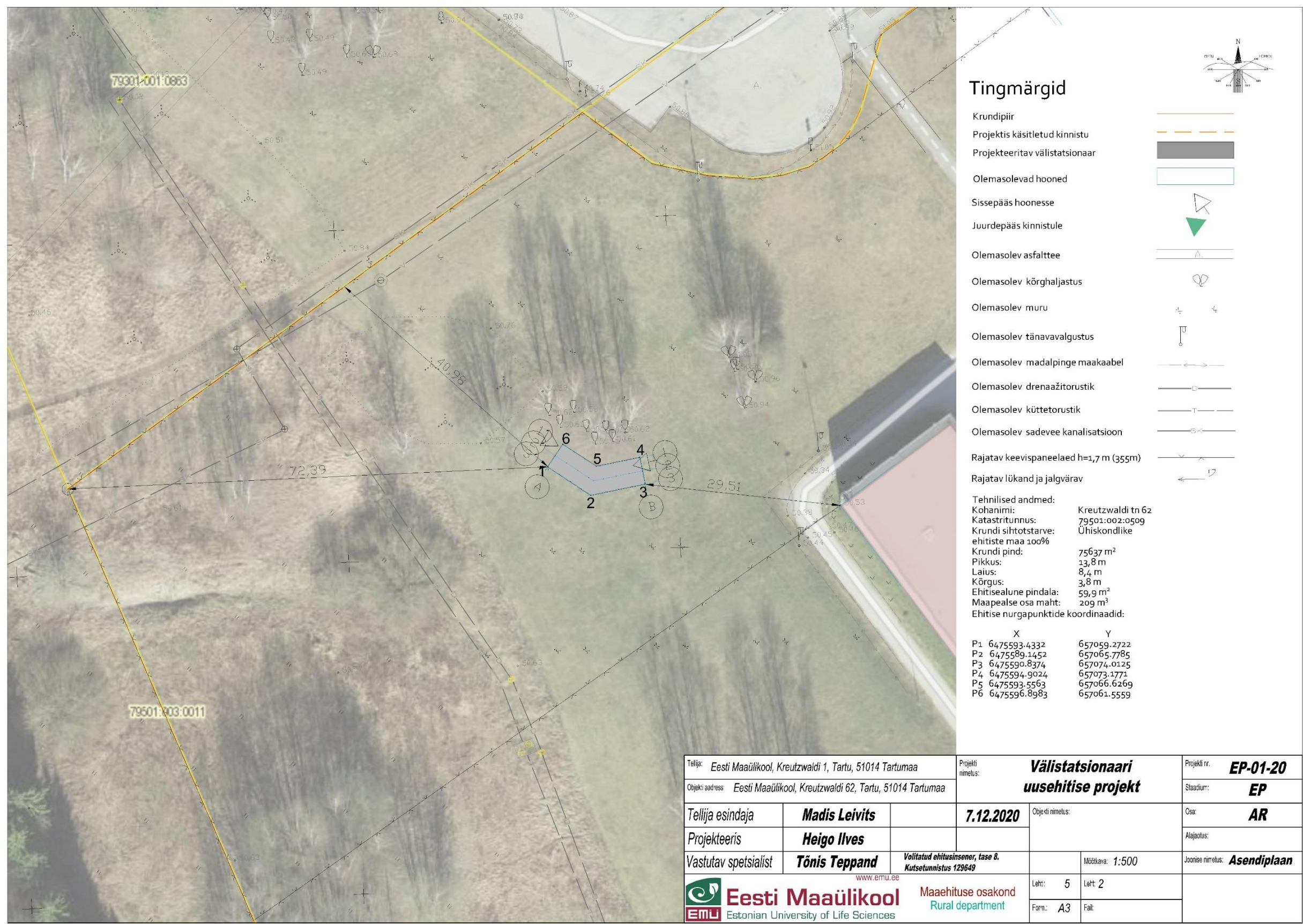
Tegevus Hoone	Püstitamine Rajamine	Ümberehitamine	Laiendamine kuni 33%	Laiendamine üle 33%	Osa asendamine samaväärsega	Lammutamine
Elamu ja selle teenindamiseks vajalik hoone						
Ehitisealuse pinnaga 0–20 m ² ja kuni 5 m kõrge	Puudub	Puudub	Puudub	Puudub	Puudub	Puudub
Ehitisealuse pinnaga 20–60 m ² ja kuni 5 m kõrge	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Ehitusteatis	Ehitusteatis	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Puudub	Ehitusteatis ja ehitusprojekt
Ehitisealuse pinnaga 0–60 m ² ja üle 5 m kõrge	Ehitusluba	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Ehitusluba	Puudub	Ehitusluba
Ehitisealuse pinnaga üle 60 m ²	Ehitusluba	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Ehitusluba	Puudub	Ehitusluba
Mitteelamu						
Ehitisealuse pinnaga 0–20 m ² ja kuni 5 m kõrge	Ehitusteatis	Puudub	Puudub	Ehitusteatis	Puudub	Ehitusteatis
Ehitisealuse pinnaga 20–60 m ² ja kuni 5 m kõrge	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Puudub	Ehitusteatis ja ehitusprojekt
Ehitisealuse pinnaga 0–60 m ² ja üle 5 m kõrge	Ehitusluba	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Ehitusteatis ja ehitusprojekt	Ehitusluba	Puudub	Ehitusluba
Ehitisealuse pinnaga üle 60 m ²	Ehitusluba	Ehitusluba	Ehitusluba	Ehitusluba	Puudub	Ehitusluba

Lisa 3. Hoone eelprojekti joonised

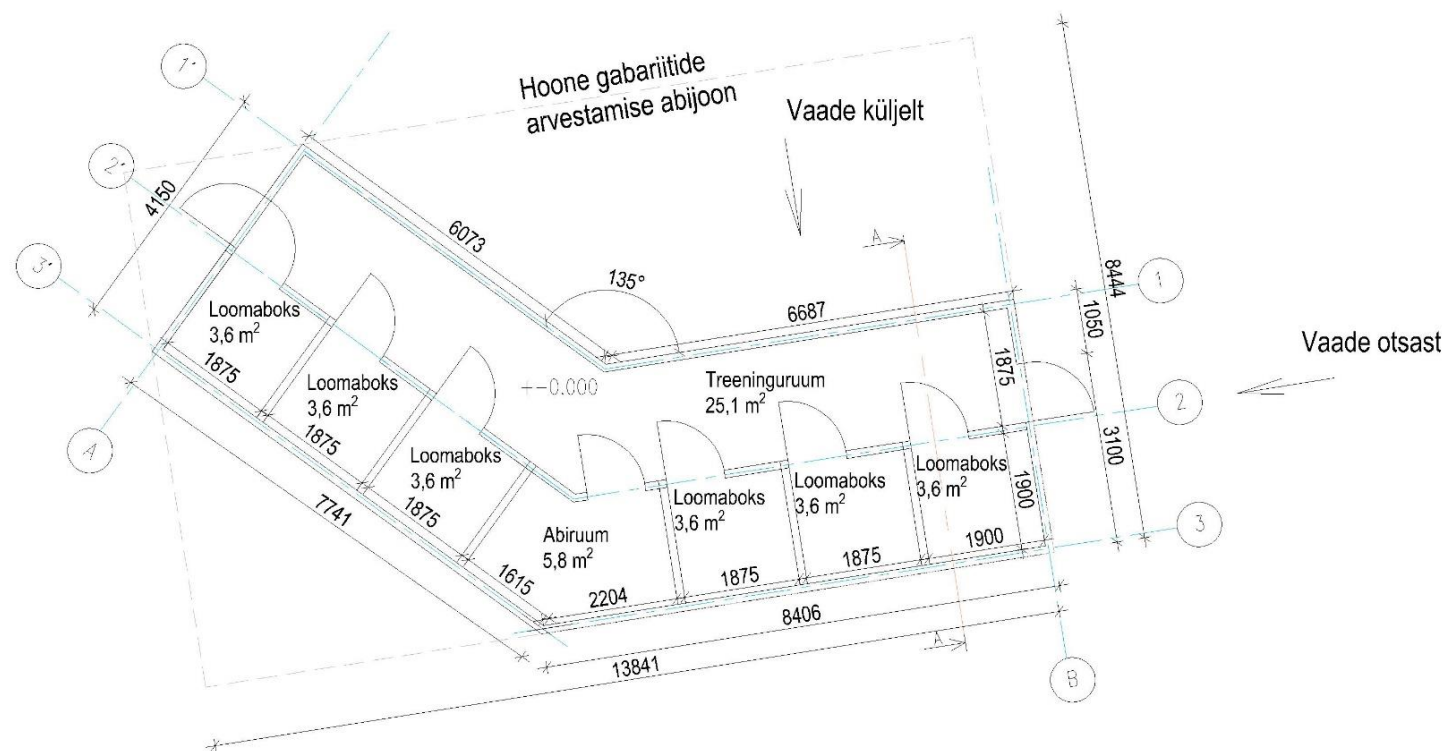


Joonis 3.1. Hoone eelprojekti situatsiooniskeem.

Lisa 3 järg



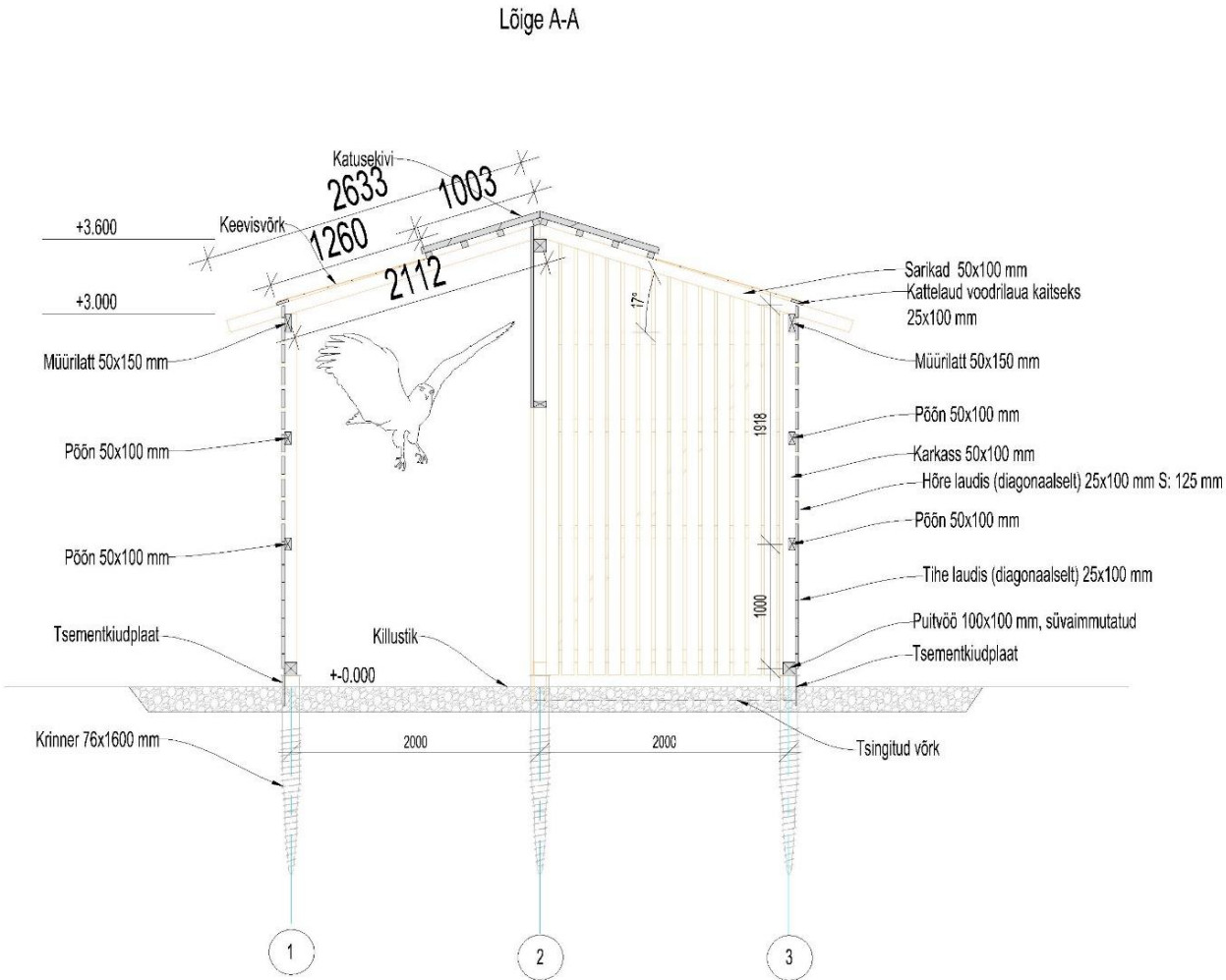
Joonis 3.2. Hoone eelprojekti asendiplaan.



Ehitisealune pind 59,9 m²

Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus:	Välistatsionaari uusehitise projekt		Projekti nr.	EP-01-20
Objekti aadress: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 62, Tartu, 51014 Tartumaa						Staadum:	EP
Tellijä esindaja	Madis Leivits		7.12.2020	Objekti nimetus:		Osa:	AR
Projekteeris	Heigo Ilves					Ajaajutus	
Vastutav spetsialist	Tõnis Teppand	Voitunud ehitusinsener, tase 8. Kutsefunnistus 129649			Mööklava: 1:100	Joonise nimetus: Põhiplaan	
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences				Leht: 5		Leht: 3	
Maaehituse osakond Rural department				Form.: A3		Fail:	

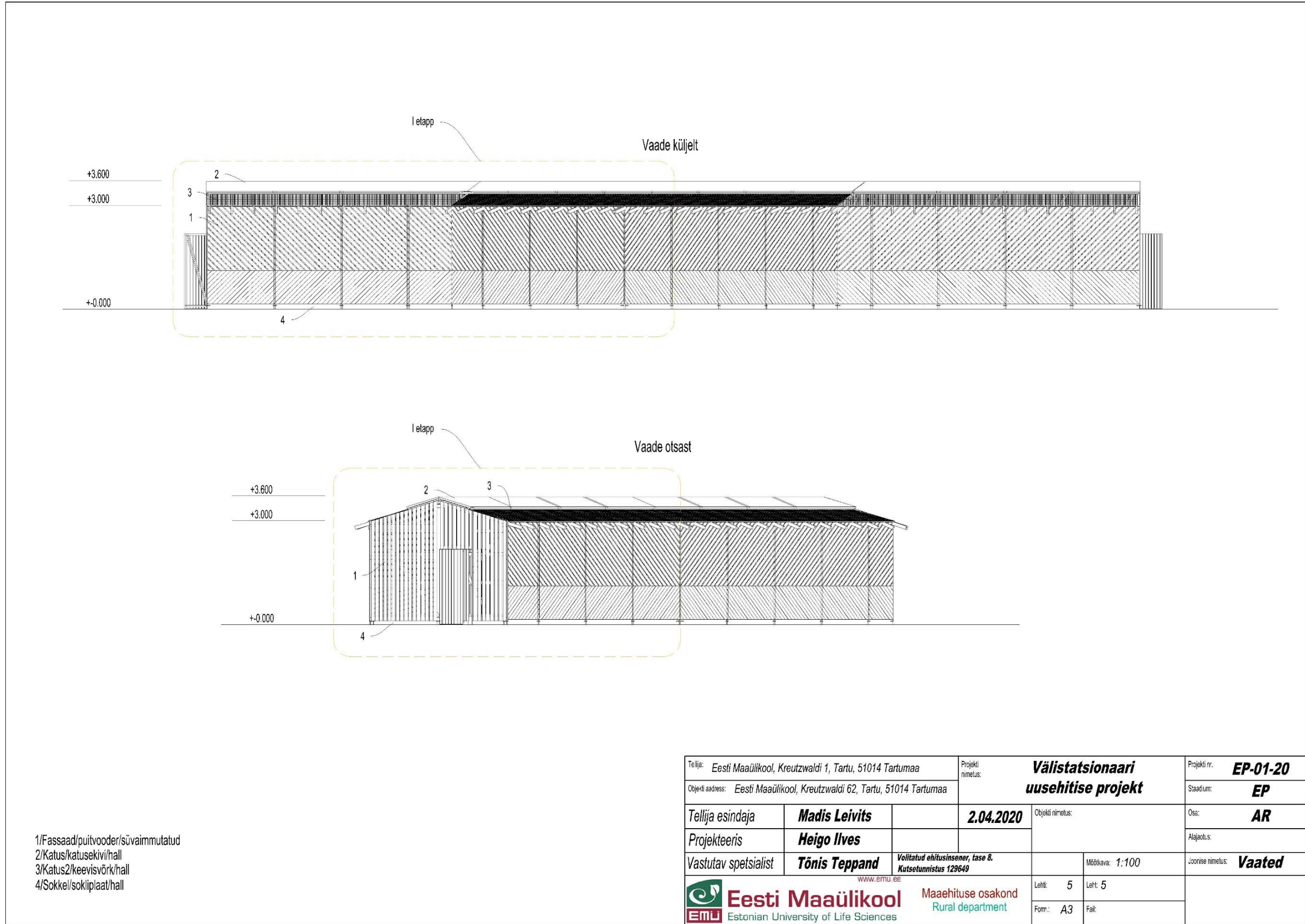
Joonis 3.3. Hoone eelprojekti põhiplaan.



Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa			Projekti nimetus:	Välistatsionaari uusehitise projekt		Projekti nr.	EP-01-20
Objekti aadress: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 62, Tartu, 51014 Tartumaa						Staadium:	EP
Tellijä esindaja	Madis Leivits		2.04.2020	Objekti nimetus:		Osa:	AR
Projekteeris	Heigo Ilves					Alajaotus:	
Vastutav spetsialist	Tõnis Teppand	Volitatud ehitusinsener, tase 8. Kutsetunnistus 129649				Mõõtkava: 1:50	Joonise nimetus:
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences		www.emu.ee Maaehituse osakond Rural department		Lehti:	5	Leht:	4
				Form:	A3	Faht:	

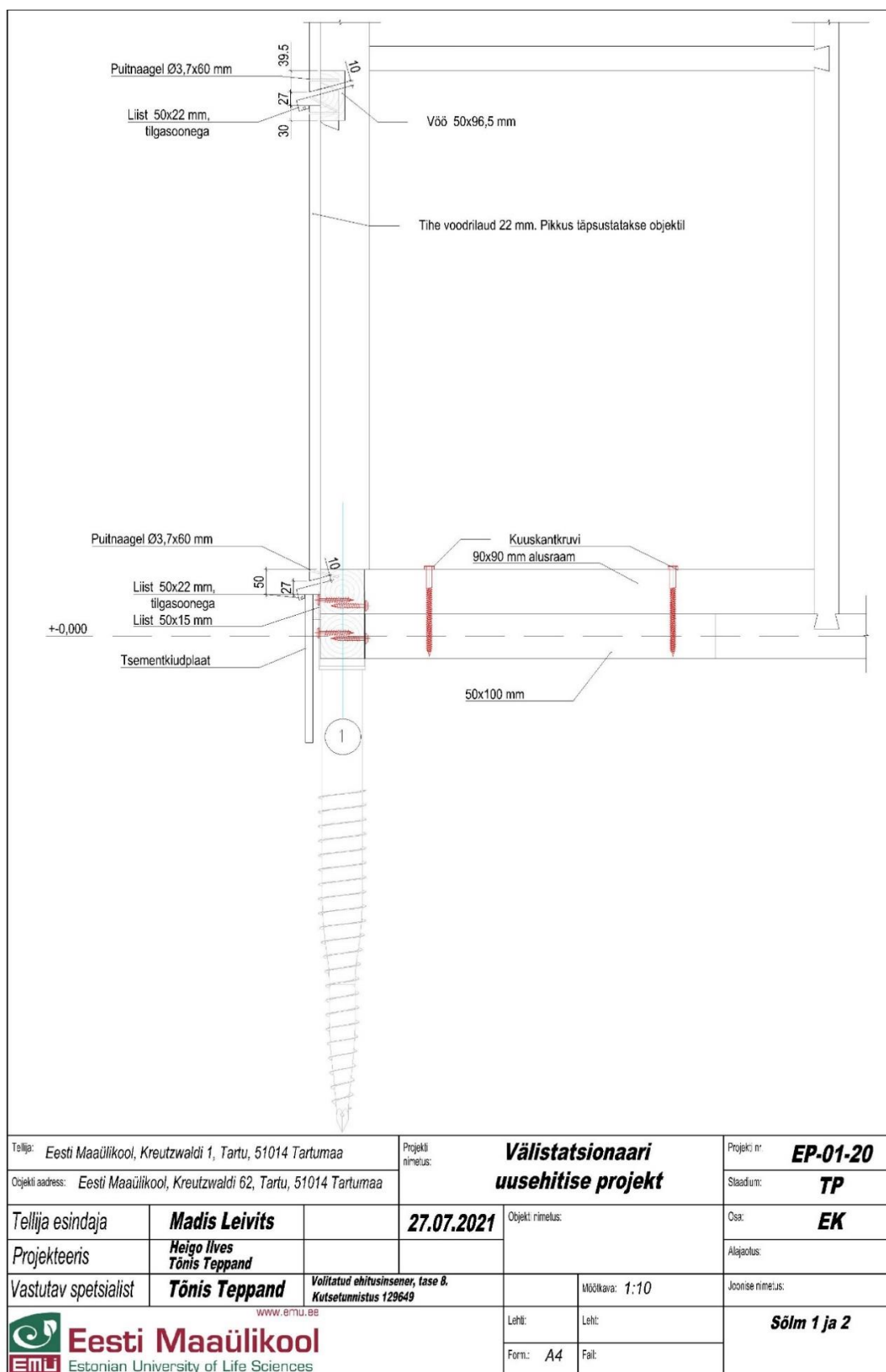
Joonis 3.4. Hoone eelprojekti lõige A-A.

Lisa 3 järg



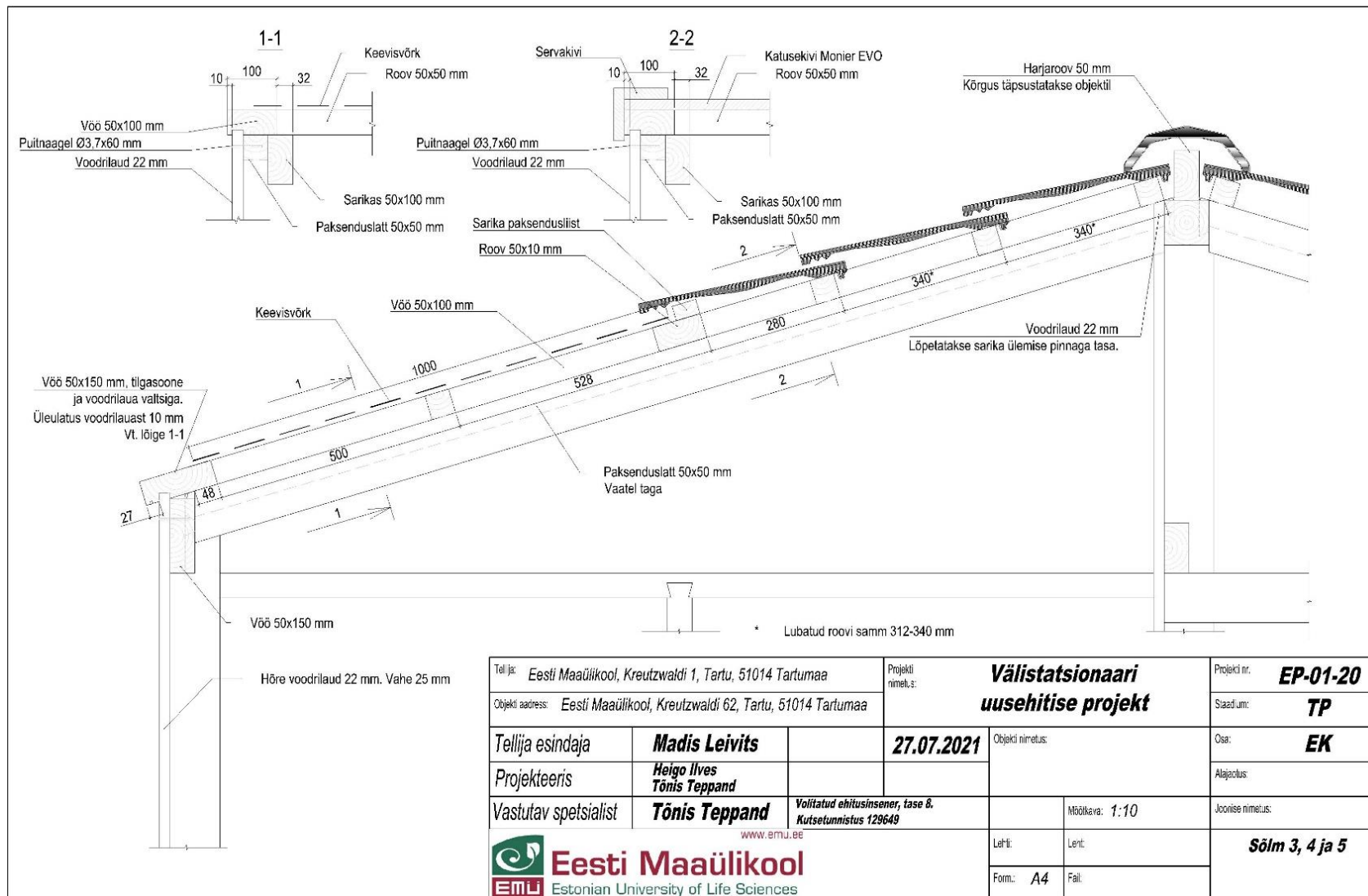
Joonis 3.5. Hoone eelprojekti vaated.

Lisa 4. Hoone põhiprojekti joonised

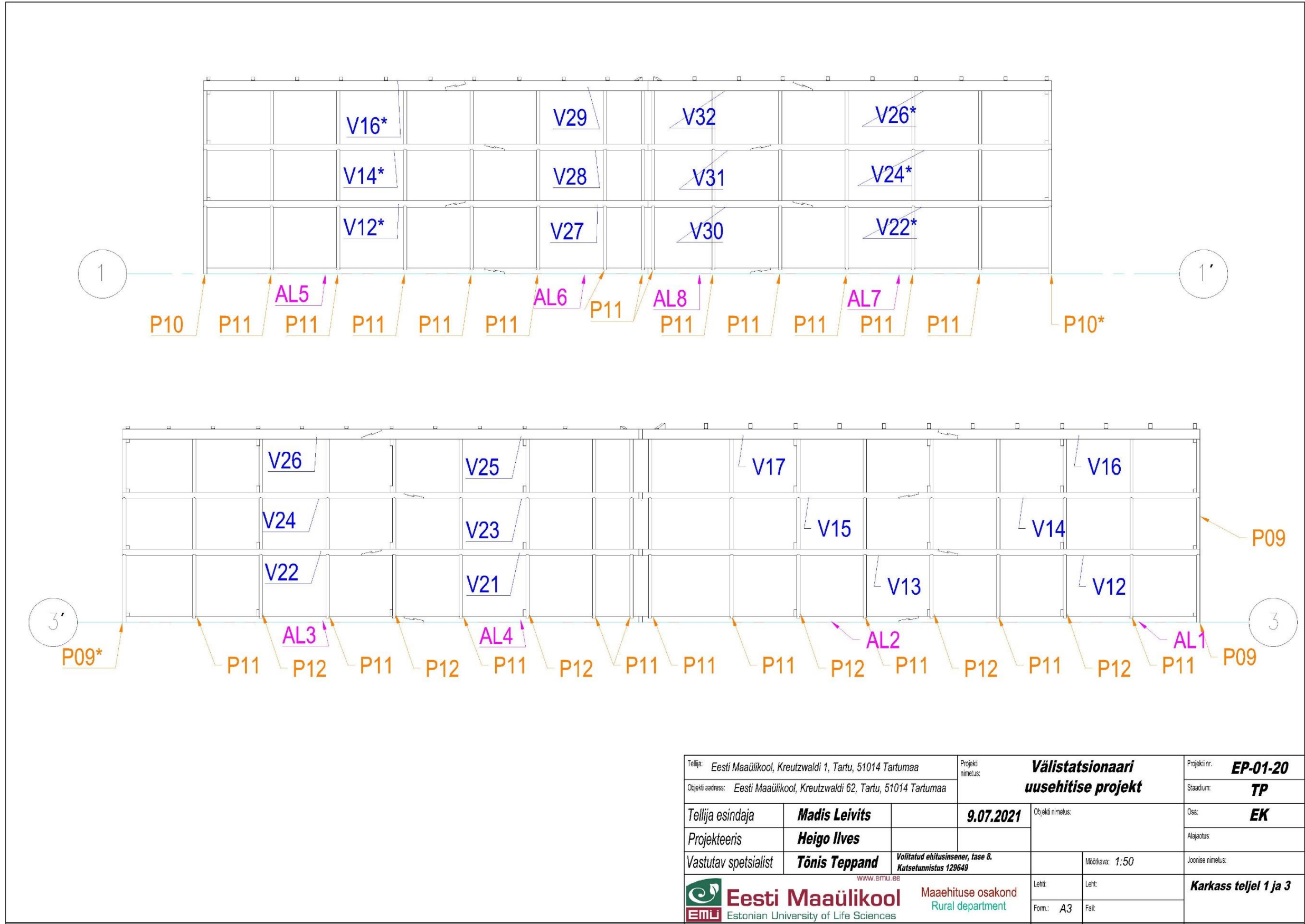


Joonis 4.1. Hoone tööprojekti sõlm 1 ja 2.

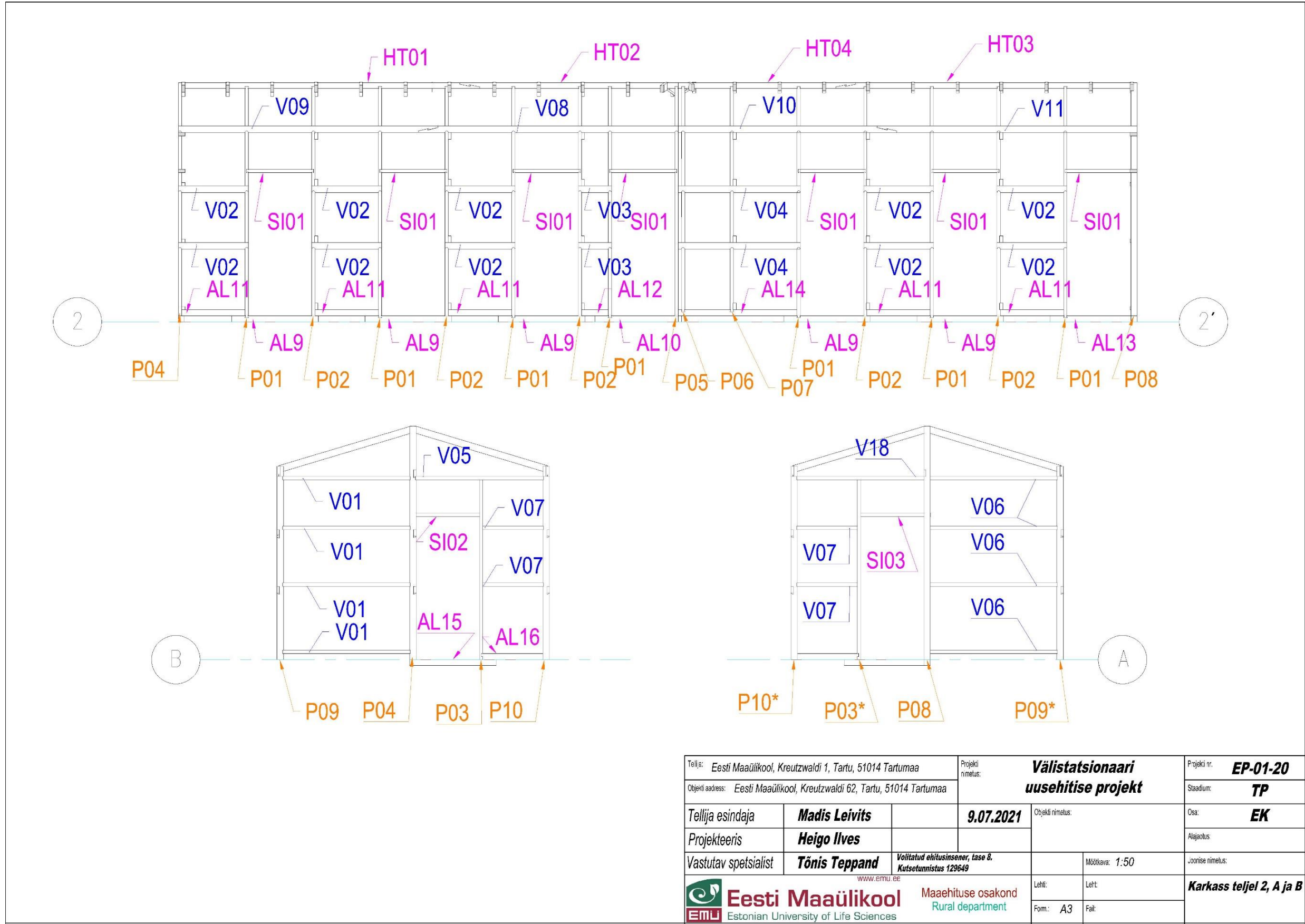
Lisa 4 järg



Joonis 4.2. Hoone tööprojekti sõlm 3, 4 ja 5.



Joonis 4.3. Hoone tööprojekti karkassi joonis teljel 1 ja 3.

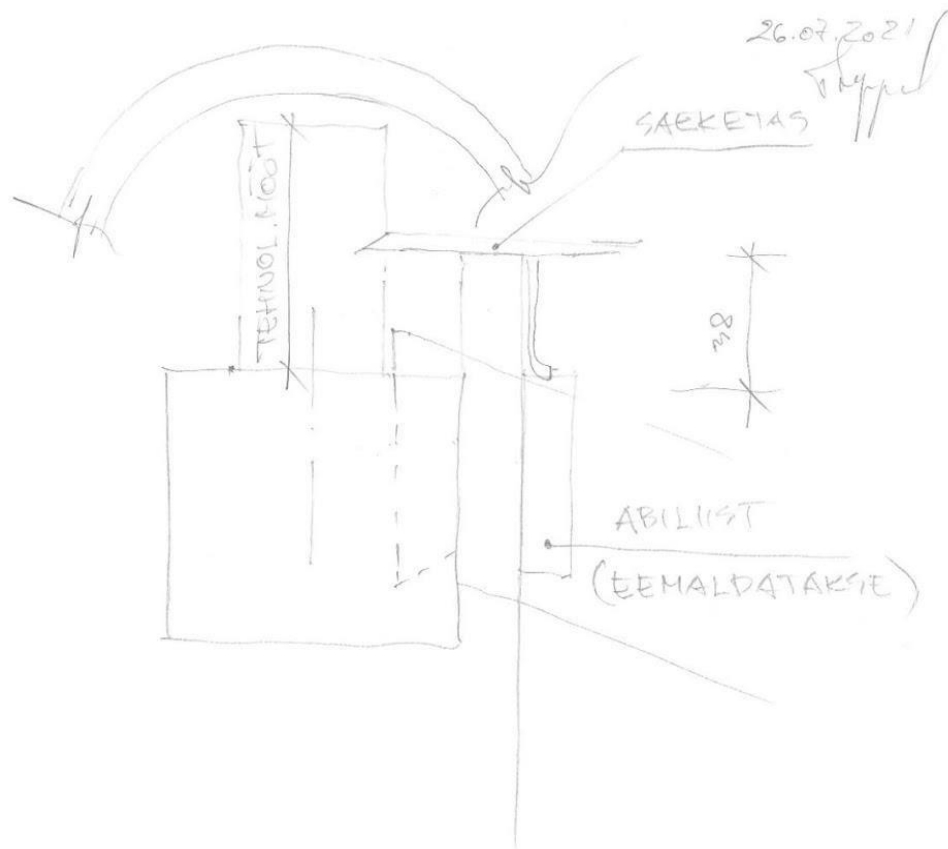


Joonis 4.4. Hoone tööprojekti karkassi joonis teljel 2, A ja B.

Tellis: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu, 51014 Tartumaa		Projekti nimetus:	Välistatsionaari uusehitise projekt	Projekti nr:	EP-01-20
Objekti aadress: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 62, Tartu, 51014 Tartumaa				Stadium:	TP
Tellijä esindaja	Madis Leivits	9.07.2021	Objekti nimetus:	Osa:	EK
Projekteeris	Heigo Ilves			Alajaotus:	
Vastutav spetsialist	Tõnis Teppand	Volitatud ehitusinsener, tase 8. Kutsetunnistus 129649 www.emu.ee	Möötkava: 1:50	Joonise nimetus:	
 Eesti Maaülikool		Maaehituse osakond Rural department	Lehti:	Leht:	Karkass teljel 2, A ja B
Estonian University of Life Sciences			Form.: A3	Fail:	

Joonis 4.5. Kogu projekteeritud hoone karkass 3D-s.

Lisa 5. Sõlmede põhimõttelised lahendused

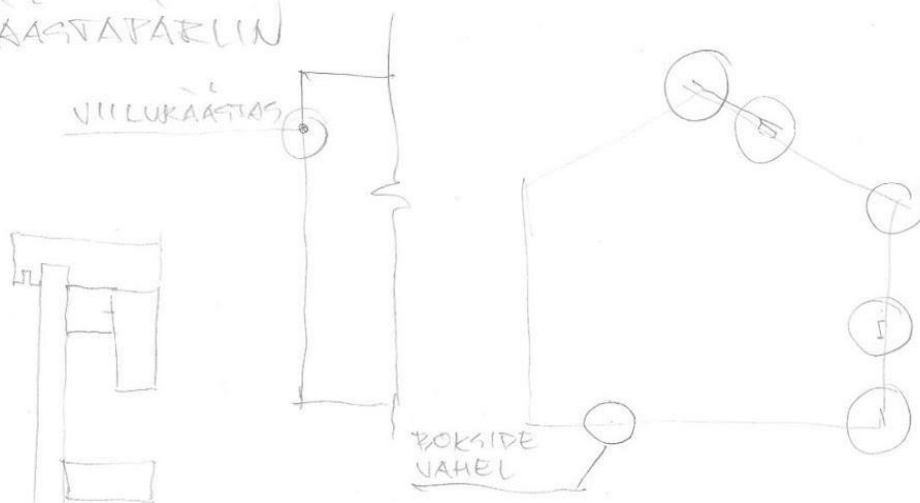


LISAKS:

* KATUSEKIVI ALUMINE KOOL

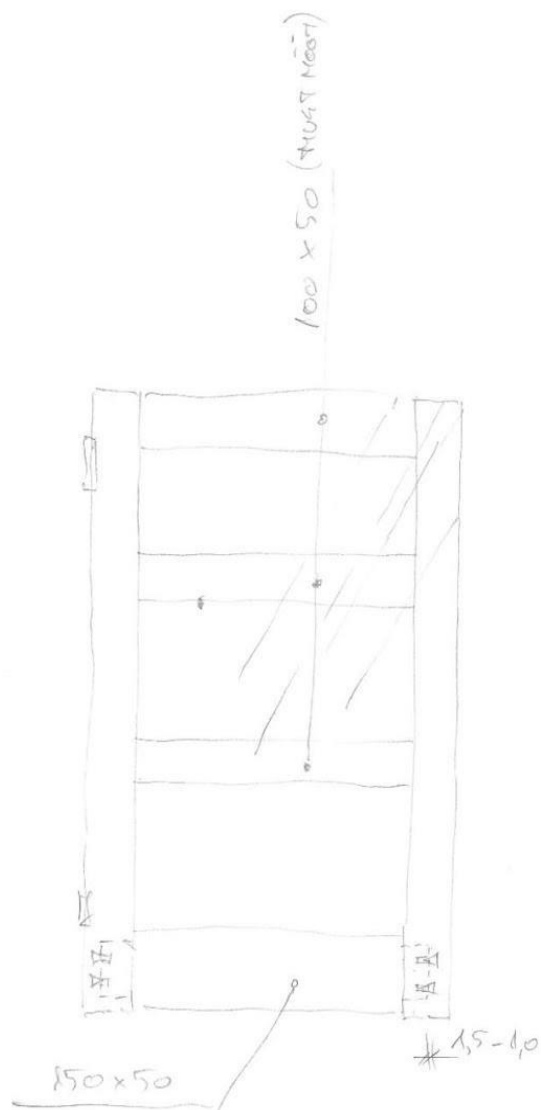
* RÄASTAPÄRLIN

* VILUKÄASTAS



Joonis 5.1. Harjasõlme eskiis (T. Teppand 2021).

Lisa 5 järg



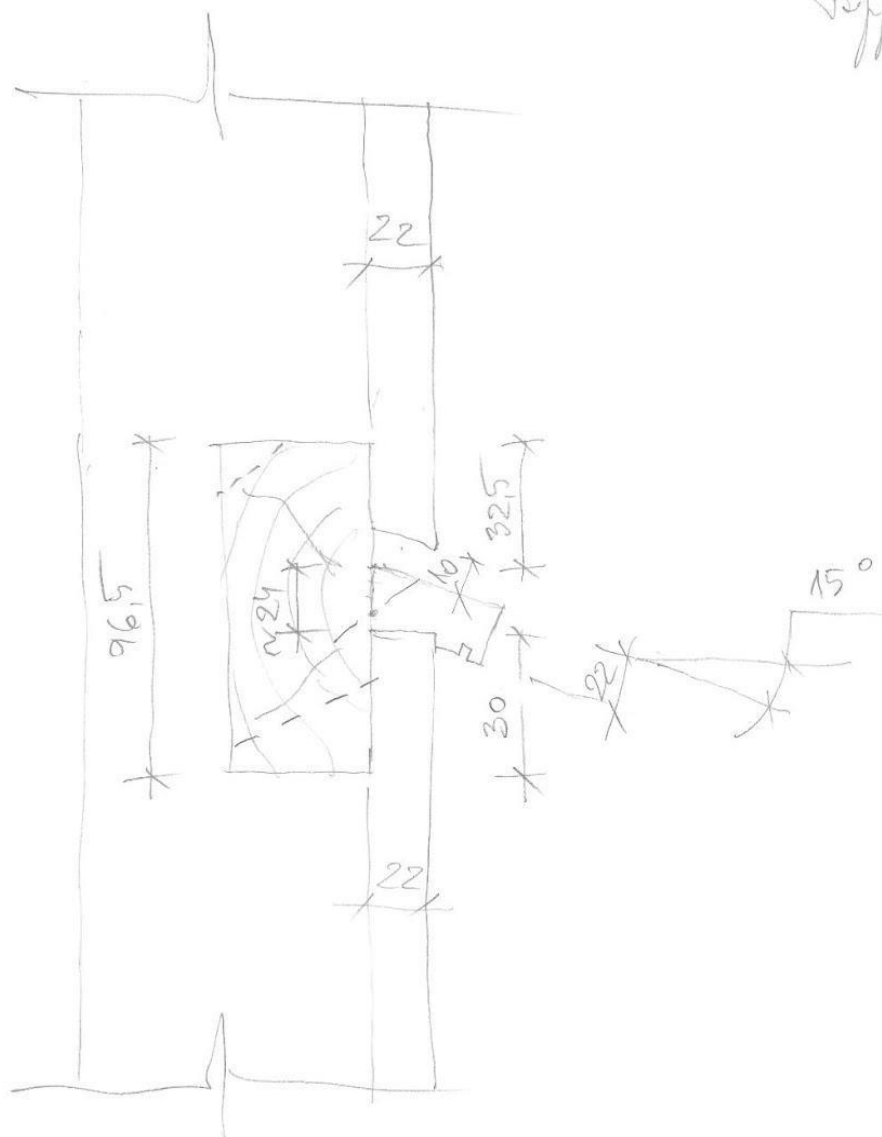
26.07.2021

[Handwritten signature]

Joonis 5.2. Ukse eskiis (T. Teppand 2021).

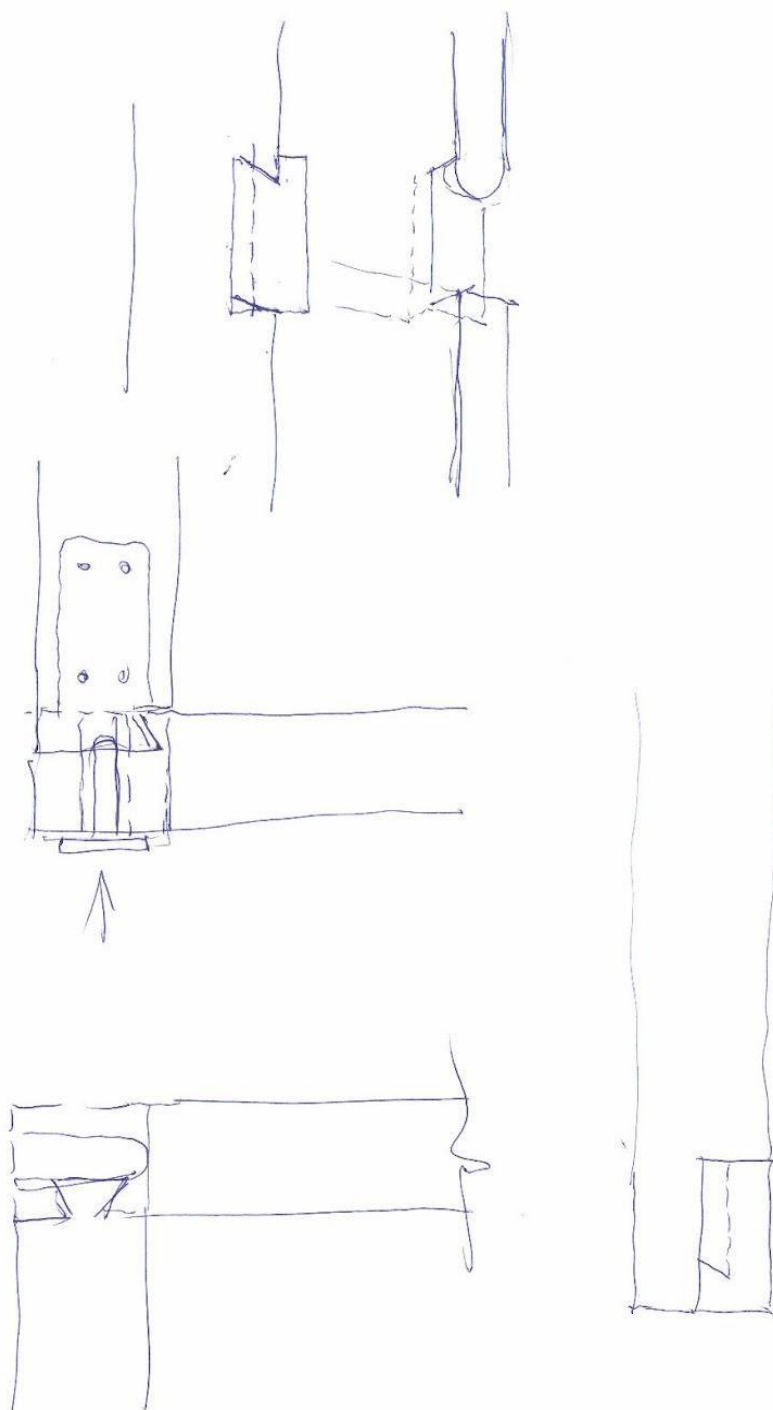
26.07.2021

Seygul

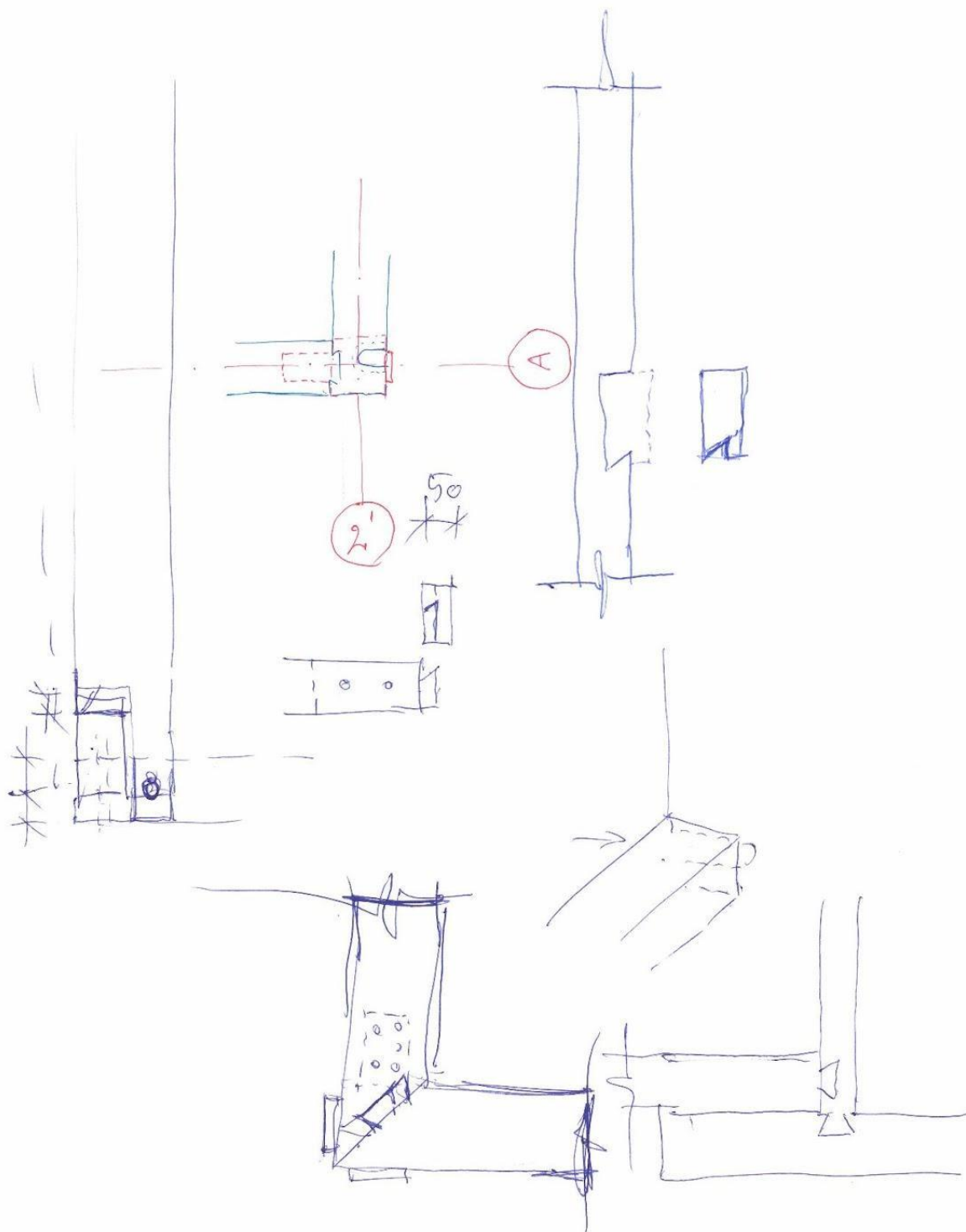


Joonis 5.3. Karkassiposti ja vöö sõlme eskiis (T. Teppand 2021).

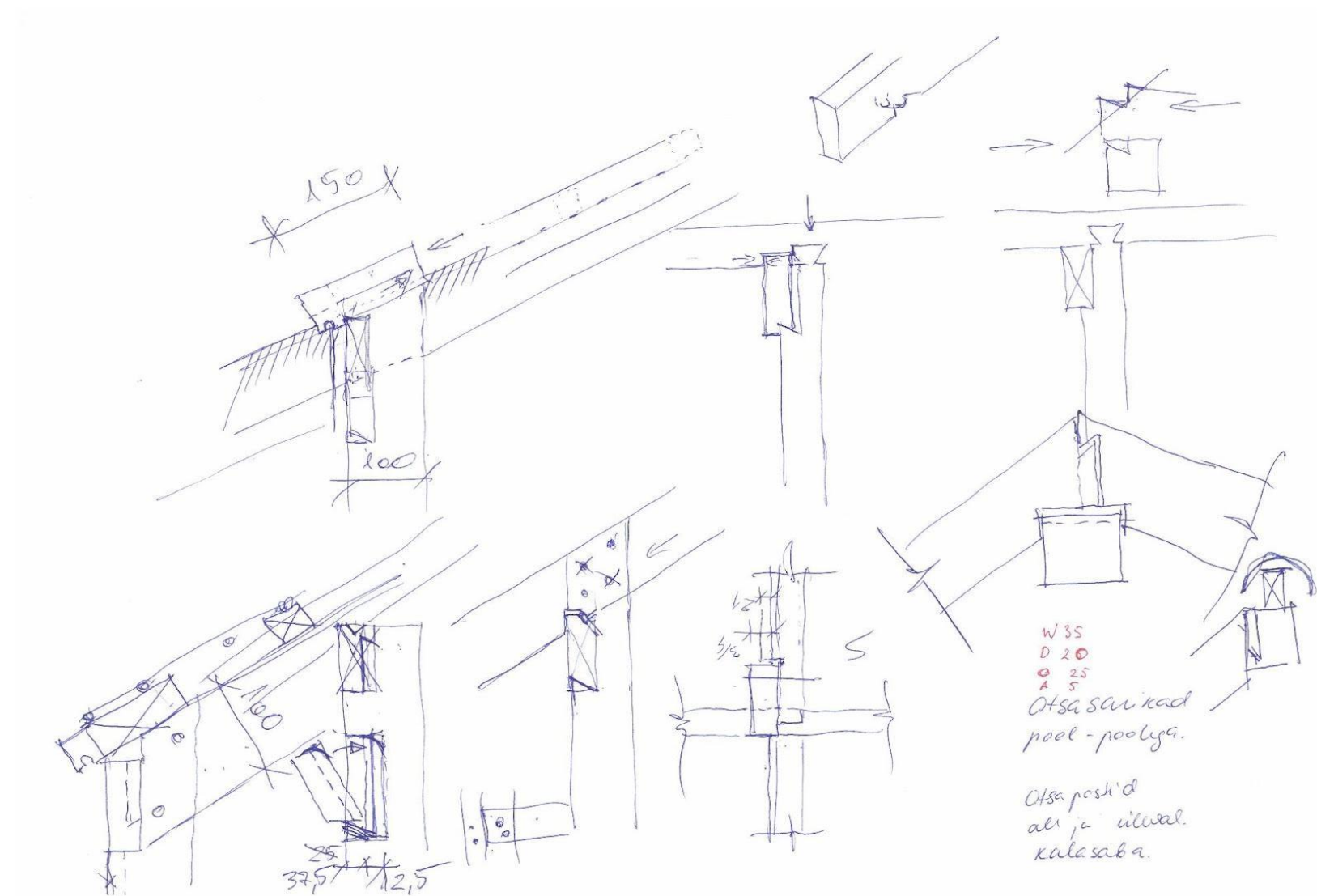
Heavafala



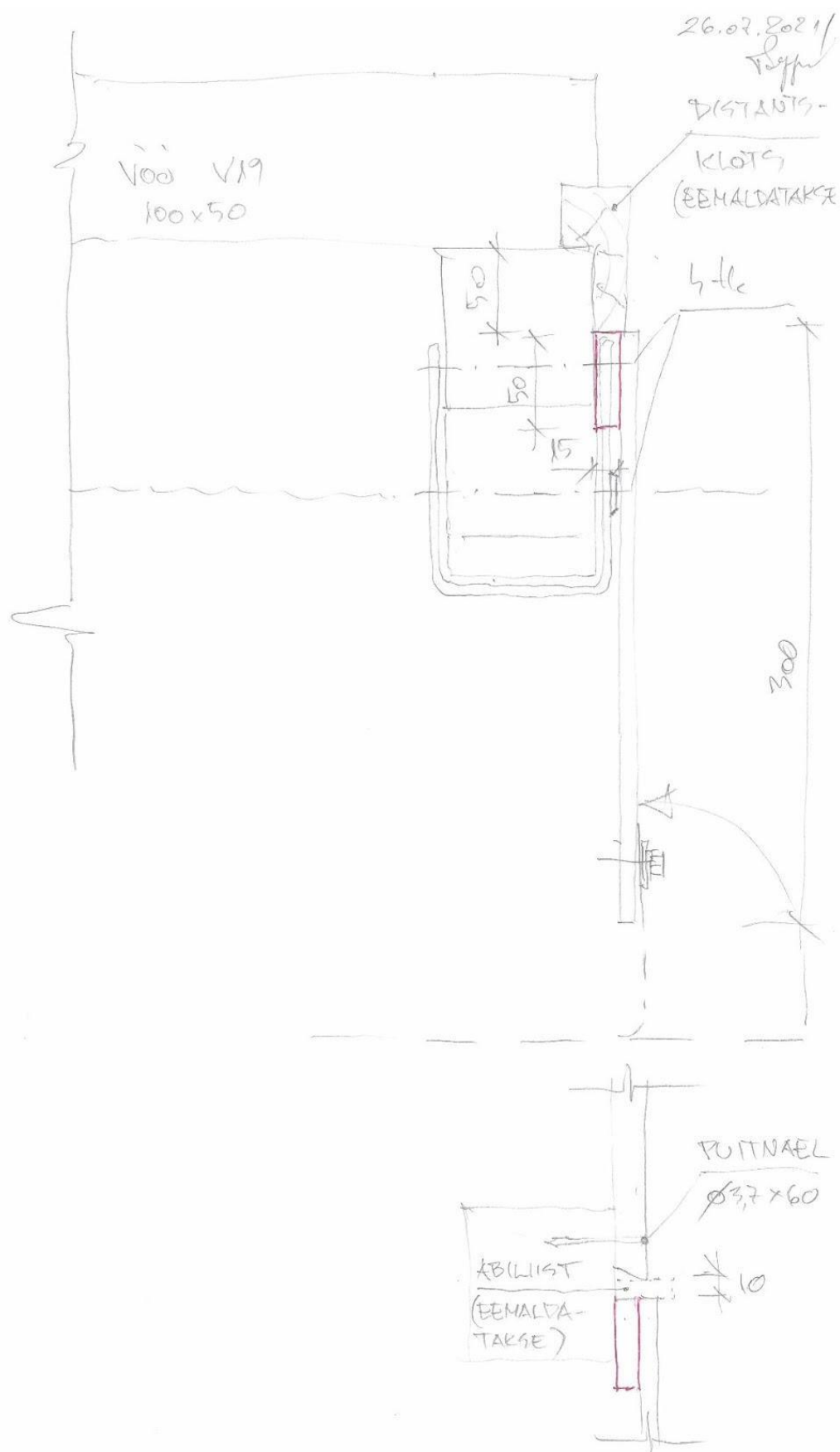
Joonis 5.4. Alusraami ja karkassiposti sõlme eskiis.



Joonis 5.5. Alusraami sõlmede eskiis.



Joonis 5.6. Harja- ja räästasõlme eskiis.



Joonis 5.7. Alusraami, vaia ja tsementkiudplaadi ühendamise eskiis.

Lisa 6. Sõlmede realiseeritud lahendused



Joonis 6.1. Karkassiposti ja vööde liide.

Lisa 6 järg



Joonis 6.2. Karkassiposti ja vöö kalasaba liide.

Lisa 6 järg



Joonis 6.3. Välisvaade nurgast.

Lisa 6 järg



Joonis 6.4. Välisvaade hoonele.

Lisa 6 järg



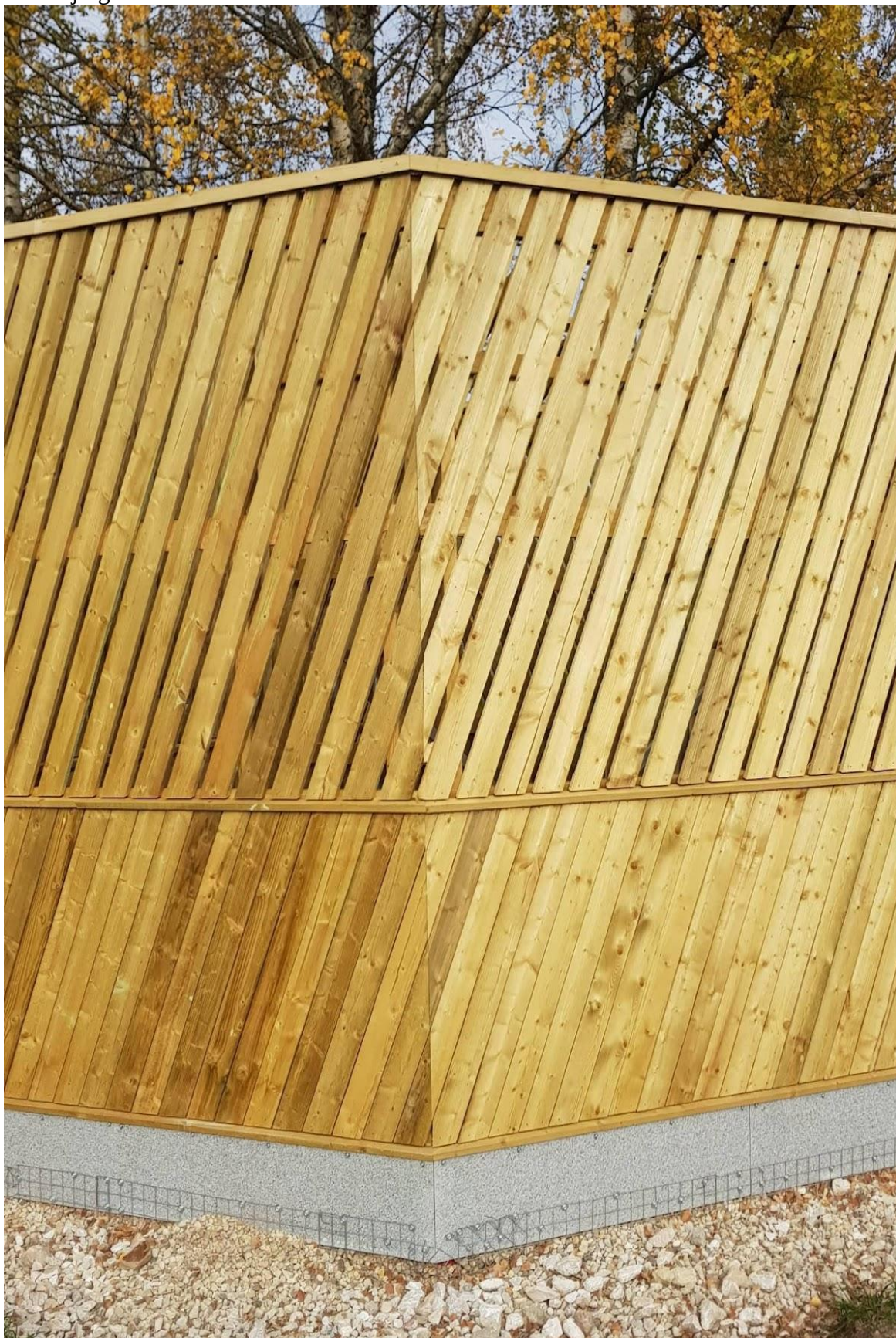
Joonis 6.5. Sisevaade.

Lisa 6 järg



Joonis 6.6. Sisenurga vaade.

Lisa 6 järg



Joonis 6.7. Välisnurga vaade.

Lisa 6 järg



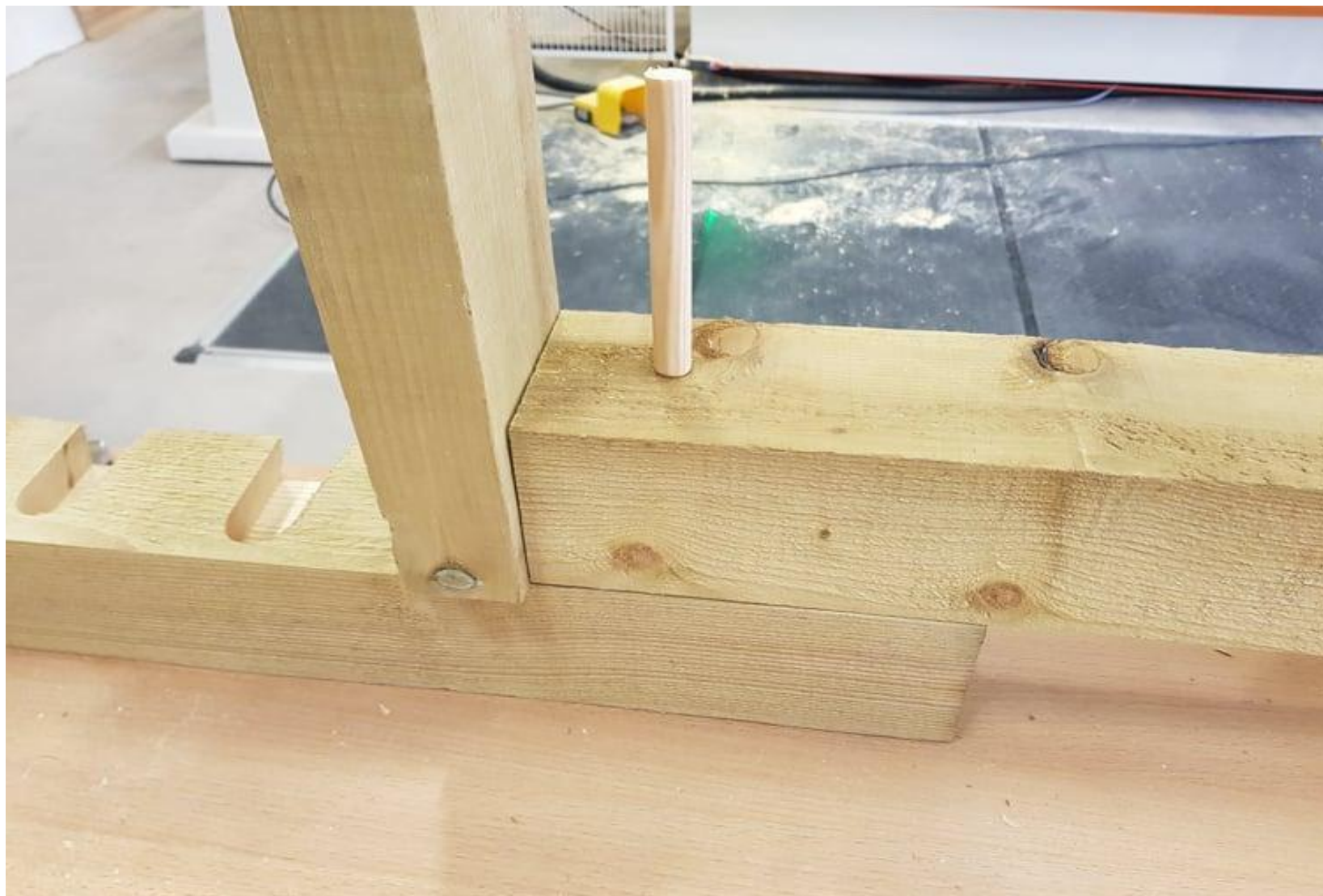
Joonis 6.8. Välisnurga lähivaade.

Lisa 6 järg

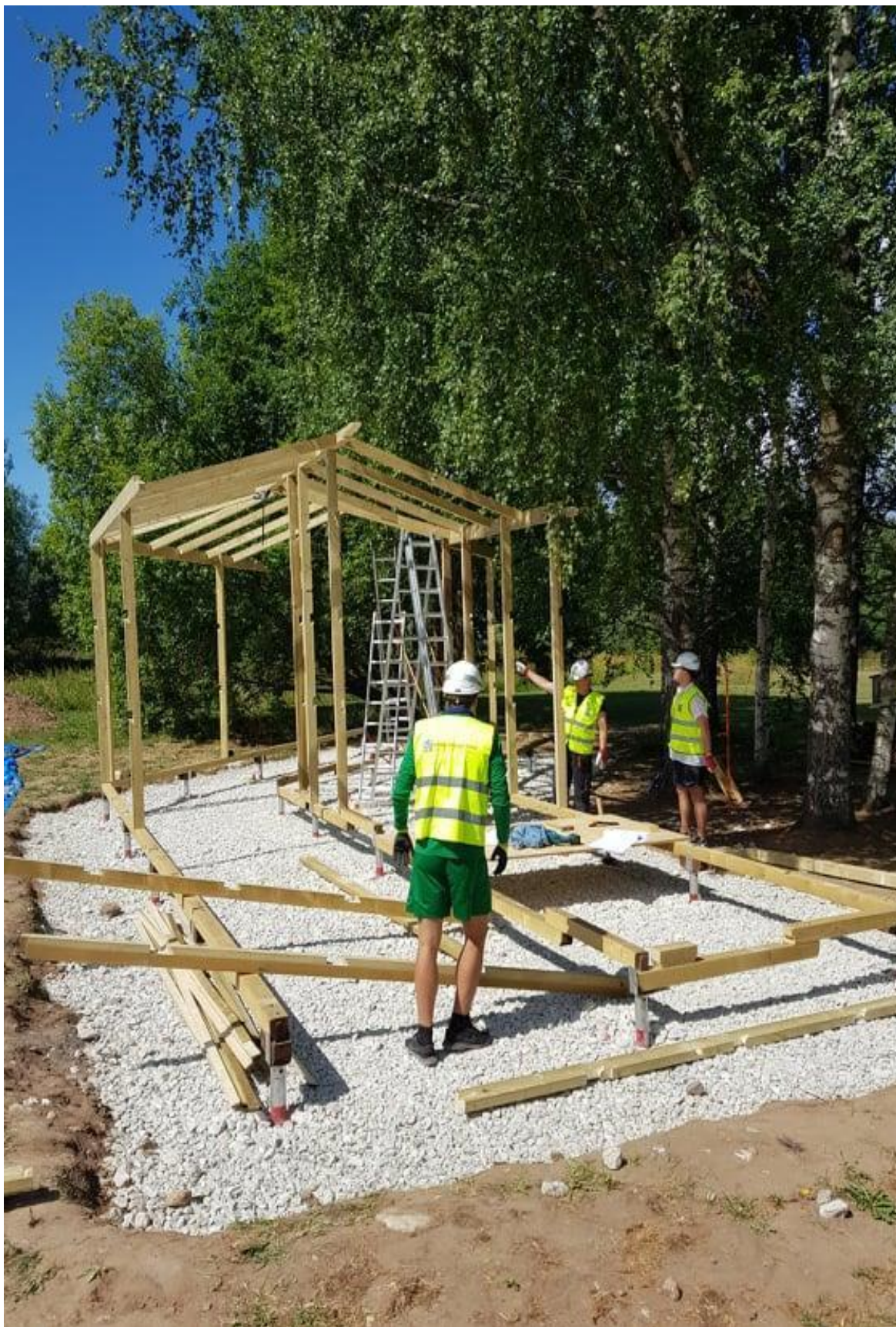


Joonis 6.9. Karkassiposti ja vöö kalasaba liide.

Lisa 6 järg



Joonis 6.10. Proovitükid.



Joonis 6.11. Põhiosa karkassi (v.a osaliselt vööd) püstitamine ajakuluga 4h 10min.

Lisa 7. Painde- ja tõmbekatsete seeriade tulemused

Tabel 7.1. Paindekatse tulemused

Katse	Katsekeha	Pilu laius (mm)	Üleulatus (mm)	Katsekeha	Pilu laius (mm)	Üleulatus (mm)	Maksimaalne jõud (N)	Aeg (s)
KK-1-01	KK-1-01T	15.1	9.47	KK-1-01A	11.1	6.69	730.00	897.32
KK-1-02	KK-1-02T	21.16	10.87	KK-1-02A	6.57	7.76	730.00	279.18
KK-1-03	KK-1-03T	22.24	9.82	KK-1-03A	5.57	7.65	810.00	229.42
KK-1-04	KK-1-04T	5.60	6.87	KK-1-04A	24.79	12.41	740.00	365.22
KK-1-05	KK-1-05T	7.27	7.61	KK-1-05A	18.26	10.35	900.00	286.80
KK-1-06	KK-1-06T	20.90	9.27	KK-1-06A	3.81	6.54	1080.00	227.34
06T poolt läks pesa katki								
KK-1-07	KK-1-07T	22.92	11.12	KK-1-07A	3.17	6.22	890.00	171.68
KK-1-08	KK-1-08T	14.90	9.37	KK-1-08A	12.10	6.79	640.00	304.40
KK-1-09	KK-1-09T	21.14	11.06	KK-1-09A	5.57	7.48	920.00	265.36
KK-1-10	KK-1-10T	5.77	6.67	KK-1-10A	20.91	10.34	800.00	210.94
KK-1-11	KK-1-11T	1.69	5.81	KK-1-11A	25.05	11.39	710.00	178.90
KK-1-12	KK-1-12T	6.90	7.10	KK-1-12A	18.24	9.39	1060.00	308.86
Märkused								

Lisa 7 järg

Tabel 7.2. Tõmbekatse tulemused

Katsekeha	Ava maksimaalne laius (mm)	Katsekeha	Keele maksimaalne laius (mm)	Maksimaalne jõud (N)	Aeg (s)
KK-6-01E	41.24	KK-6-01I	44.71	1178.81	247.38
KK-6-02E	41.79	KK-6-02I	44.89	904.45	225.44
KK-6-03E	40.81	KK-6-03I	44.45	749.18	244.62
KK-6-04E	41.82	KK-6-04I	45.21	1031.93	215.06
KK-6-05E	40.62	KK-6-05I	43.37	1107.77	216.66
KK-6-06E	41.25	KK-6-06I	44.79	1204.01	201.18
KK-6-07E	40.78	KK-6-07I	45.15	841.42	220.04
KK-6-08E	41.29	KK-6-08I	44.46	1536.88	247.04
KK-6-09E	41.38	KK-6-09I	44.88	882.27	189.6
KK-6-10E	42.40	KK-6-10I	44.77	916.84	212.08
KK-6-11E	41.24	KK-6-11I	44.84	1076.40	256.16
KK-6-12E	41.30	KK-6-12I	44.30	744.32	252.22
Enne katset	41.00		45.10		
Märkused					
1) Aeg on antud maksimaalse jõu saavutamiseni.					

Lisa 8. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Heigo Ilves,
sünniaeg 06.05.1988

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö CNC-töötlustega puusepaliidetega metsloomade välistatsionaari projekteerimine ja sõlmede tugevusomaduste uurimine, mille juhendaja on Tõnis Teppand,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, 30.05.2022

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)