

**PUITNAAGLIGA PUIT-PUIDUGA LIITE  
KANDEVÕIME MÄÄRAMINE**

DETERMINATION OF LOAD CAPACITY OF TIMBER JOINTS WITH WOOD PEGS

Üliõpilane: **Mari Aia**

Juhendaja: **Illimar Kalk**

Tartu, 2016

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.  
Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite  
tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt  
pärinevad andmed on viidatud.

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood: 105352 EAEI

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud: ..... (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: ..... (allkiri)

## ABSTRACT

Aia, M. Determination of load capacity of timber joints with wood pegs. Master's thesis. In duplicate. Tartu, 2016. Pages 84, figures 18, tables 14. Estonian.

Although timber joints with wood pegs are historical and used for centuries, there are currently no standardized test or calculation methods for them in Europe.

The objective of present thesis is to develop this test method and compare the results with other calculation methods in order to find the best suiting equations for predicting load capacity. Used test method is based on standard EVS-EN 26891:1999 „Puittarindid. Mehaaniliste kinnitusedetailidega liited. Tugevus- ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused“ and other similar works done abroad. 24 simplified mortise and tenon joints were loaded parallel to grain to failure under compression-induced double shear. Pegs were made of ash tree and oak and were with diameters of 20 mm and 25 mm. The joint details were of spruce and with thicknesses 25-50-25 mm and 50-100-50 mm.

Test results were compared with Eurocode 5 equations for steel pegs, Eurocode 5 equations according to L. Must's master thesis, TFEC 1-2012 equations for wood pegs, Sandberg *et al* equations for wood pegs and equations from L. Allikas and V. Kulbach for oak pegs. The results are in favor of using Sandberg *et al* equations as they gave the most accurate and low-risk predicted load capacity. More tests and further work must be done to take these equations into use.

Keywords: wood peg fasteners, dowel connections, timber construction, load capacity, test method

# SISUKORD

<b>SISSEJUHATUS.....</b>	<b>6</b>
<b>1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....</b>	<b>9</b>
1.1 Puitnaaglitest ja nende ajaloost.....	9
1.2 Puitnaaglitega kinnitatud liidete kasutamise tavad erinevates piirkondades .....	10
1.3 Erinevad naaglitüübid .....	11
1.4 Tööpõhimõtted.....	12
1.5 Purunemisviisid .....	14
1.6 Kinnituselemendi voolavuspiirile vastava paindemomendi normväärtus ja paindetugevuse normväärtus .....	21
1.7 Muljumistugevus ja seda mõjutavad tegurid .....	22
<b>2 TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED .....</b>	<b>35</b>
<b>3 MATERJAL JA METOODIKA.....</b>	<b>36</b>
3.1 Katsemetoodika .....	36
3.2 Katsematerjal .....	40
<b>4. TULEMUSED.....</b>	<b>46</b>
4.1 Katsetulemused.....	46
4.2 Arvutuslikud kandevõimed Eurokoodeks 5 järgi .....	49
4.3 Arvutuslikud kandevõimed TFEC 1-2012 järgi .....	51

4.4	Arvutuslikud kandevõimed Sandberg <i>et al</i> järgi .....	53
4.5	Arvutuslikud kandevõimed tammenaaglite arvutusjuhiste järgi .....	55
<b>5.</b>	<b>ARUTELU .....</b>	<b>57</b>
	<b>KOKKUVÕTE .....</b>	<b>64</b>
	<b>KIRJANDUSE LOETELU .....</b>	<b>66</b>
	<b>LISAD</b>	
Lisa 1	Naagelliide.....	69
Lisa 2	Puitdetailid.....	70
Lisa 3	Katse mõõtmistulemused.....	72

## SISSEJUHATUS

Ehitustraditsiooni hoidmise, arendamise ning mitmekesistamise mõttes on oluline paremini mõista ja kasutada osata ka ajaloolisi ehitusvõtteid, nende hulgas ka puitnaagleid liidetes. Kuigi kaasajal saadakse ehituses ka ilma puitnaagleid kasutamata hakkama, siis restaureerides vanu ehitisi võiks kasutada traditsioonilist puitnaaglit kui autentset kinnititüüpi vanas konstruktsioonis. Kahjuks puuduvad aga hetkel arvutusjuhised, mis annaks projekterijatele kindluse vana ehituskunsti pärandit, puitnaaglit projektides kasutada. Seepärast on oluline välja selgitada puitnaagliga liidete kandevõime arvutusjuhised, et neid saaks vanade hoonete taastamisel, aga miks mitte ka uute projekteerimisel, julgemalt kasutada. Veel on oluline märkida, et hetkel puuduvad ka standardid, mille abil liite kandevõimet katsetada.

USA metallnaaglitega kinnitatud liidete standardi ANSI/AWC NDS mudeli valemid vajavad kasutamiseks empiirilisi seoseid erikaalu ja puitelementide muljumiskandevõimet. Need empiirilised seosed on aga saadud metallnaaglitega tehtud katsetest. Sama diameetriga terasnaaglid on aga puitnaaglitest oluliselt jäigemad ja nii võetakse NDS mudelis arvesse ainult alusmaterjali muljumistugevus. Puitnaaglitega liidetes esineb aga olukord, kus naaglid on ristikiudu surutud ning alusmaterjal naagli poolt muljutud. Seega on vaja leida uued arvutusreeglid, mis võtaksid arvesse metallnaaglitega liitest erinevat olukorda ning puitnaagli ja alusmaterjali koormamist.

Konstruktsioonides on puitnaagleid kasutatud juba sajandeid ja seda puusseppade kogemuste ja hea õnne toel. Tänapäeval vajame aga normeeritud arvutusalusleid, sest kaasaegsed seadeldised nagu kütte- ja jahutussüsteemid, veemahutid ning muu sarnane tähendab, et konstruktsioonile mõjuvad oluliselt suuremad koormused kui varasematel aegadel. Moodsad struktuurid on samuti muutunud geomeetriliselt keerukamateks ning seepärast vajame ökonoomsust ja turvalisust pakkuvaid lahendusi. Nii ei jääks ratsionaalsed ehituslahendused puitnaaglitega puusseppade ja restaureerijate jaoks pretsedentide ja kallite katsetuste taha.

Järjest enam hinnatakse tänapäeval traditsioonilisust ja autentsust. Vanade hoonete restaureerimine on tõusnud taas au sisse ning seda nii meil Euroopas kui ka mujal maailmas.

Käesolev töö võiks olla samm lähemale puitnaaglite kasutuselevõtu levikuga. Teemat on maailmas küll vähe uuritud, kuid näiteks USAs on viimasel paaril aastakümnel erinevates kõrgkoolides ja teadusasutustes aina rohkem sellealaseid artikleid kirjutatud ning katsetusi tehtud. Esimesi samme on puitnaaglitega liidete kandevõime väljaselgitamise jaoks on astunud ka Euroopas ja Eestiski.

Maailmas on tehtud vähe eksperimentaalseid uurimusi puitkarkassi liidete kohta. Üks esimesi püüdeid rakendada moodsaid struktuuranalüüsi-meetodeid traditsioonilistel puitühendustel tegi Brungraber (1985), kes uuris kahe puitraami paindumist horisontaalkoormuse all. Ta leidis, et naagli ja tapipesa purunemised on olulised faktorid. Sandberg *et al* (1996) uurimus puitraamide ühenduste kohta viitas, et naagli purunemine on tihti tappliite purunemise põhjuseks ja peamine põhjus, miks purunevad tõmmatud diagonaaltoed. Kessel ja Augustin (1995) katsetasid kaheksakandilisi puitnaagleid kahelõikeliselt nihkekoormusega. Church ja Tew (1997) uurisid puitnaaglite käitumist puitpuiduga liidetes.

Schmidt ja MacKay (1997) ning Schmidt ja Daniels (1999) on teinud tähelepanuväärseid uurimisi isoleeritud liidete ja naaglite käitumise ja kandevõimet mõjutavate tegurite kohta. [1] Schmidt ja MacKay viisid läbi uurimuse, mille fookuses olid individuaalsed tappliited eesmärgiga välja töötada arvutuslikud väärtused. Nende töö hõlmas naagli kandevõime, painde ja löike katseid ning elusuuruste liiteühenduste testimist, mille tulemustest järeldati, et USA standardi NDS voolavusmudeli valemid ei kajasta täpselt kõiki vaadeldud purunemisviise. Töö tulemusena määratleti purunemisviis  $V_d$ , mis kombineerib paindumise, nihke ja naagli ristikiudu kandevõime. Veel analüüsisid Schmidt ja MacKay purunemisviisi IV mehaanikat ning demonstreerisid, et puitnaagliga ühenduste plastsete liigendite vahe on umbkaudu 4 naagli diameetrit. Selline kaugus aga paigutaks liigendid tüüpiliste mõõtmega tappliite mahust väljapoole. Võib järeldada, et teised purunemisviisid saavad liitele otsustavaks enne purunemisviisi IV arenemist. [2]

Eestis on teadaolevalt antud teemal kirjutatud varasemalt kolm magistritööd. Eesti Maaülikoolis on Liia Mõrd kaitsnud 2012. aastal magistritöö „Puitpuiduga liidete kasutamine ja projekteerimine ehitistes“, kus antakse ülevaade tappliidetest ja nende ajaloost ning erinevate riikide standarditest puitnaaglite kohta võrreldes nende tulemusi konkreetse

näite põhjal. [3] 2013. aastal kaitses Liisi Must Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledžis oma magistritööd „Puidust naaglitega puit-puiduga kahelõikeliste liidete arvutusteooriate analüüs“, kus toodi välja ja analüüsiti erinevaid naagelliiteid käsitlevaid standardeid, katsetati puitnaagleid paindele ning võrreldi tulemuste kokkulangevust. [4] Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži üliõpilane Joosep Järvpõld uuris oma 2014. aasta lõputöös „Puidust naaglitega puit-puiduga liidetes muljumistugevuste määramine katsete abil“ puitnaaglitega kinnitatud liidete muljumistugevust nii naaglil endal kui ka alusmaterjalil. [5]

Käesolev töö keskendub vaid kahelõikelistele puit-puiduga liidetele, mis on kinnitatud puitnaagliga. Kuna liited võivad olla väga keerulised ning kandevõimet mõjutavad paljud tegurid, üritati katsetamisel piirata erinevate parameetrite arvu. Seega teostati katsed vaid koormates puitdetailile pikikiudu. Vaatluse alla võeti kaks puiduliiki, kaks naaglidiametrit ning kaks erinevat puitdetailide paksuste kombinatsiooni. Katsete tulemusi võrreldi seejärel standardi Eurokoodeks 5 metallnaaglitele mõeldud valemitega ning seejuures võeti arvesse ka Liisi Musta töös kajastatud teadmistega. Kuna Eurokoodeks 5 on Euroopas kehtiv standard, oleks selle kasutuselevõtt ka puitnaaglite puhul lihtsam. Samuti võrreldi tulemusi USAs kehtiva puitnaaglite standardiga TFEC 1-2012, sest tegemist on just puitnaagleid käsitleva standardiga. Sandberg *et al* uurimuse valemitega võrreldi katsetulemusi, sest katsemeetod on suuresti antud uurimuse põhjal välja töötatud. Veel võrreldi omavahel raamatust „Puitkonstruktsioonid“ kirjeldatud arvutuseeskirjade ja katsetulemusi, sest tegemist oli ainsa eestikeelsest kirjandusallikast pärit teabega tammenaaglite kandevõimest.

Töö on jagatud viieks suuremaks peatükiks ning töö lõpus on antud kolm lisa. Esimeses osas antakse ülevaade kirjandusest: puitnaaglite kasutamise ajaloost, erinevatest tüüpidest, tööpõhimõtetest ja kandevõime arvutamisest ning purunemisviisidest. Järgnevas peatükis määratakse käesoleva töö eesmärk ja ülesanded. Kolmas peatükk kirjeldab eeskujuks olnud ja väljatöötatud katsemetoodikat. Tulemused, nii arvutuslikud kui katselised, on esitatud neljandas peatükis. Viiendas peatükis võrreldakse arvutuslikult saadud tulemuste kokkulangevust katseliste tulemustega ning analüüsitakse, milline arvutusmeetod on sobivaim realselt kasutuselevõtuks. Lisas 1 on näidatud katseskeem, lisa 2 kujutab katse puitdetailide ja –naaglite tööjooniseid ning lisa 3 esitab tabelis katsetamisel saadud tulemused.

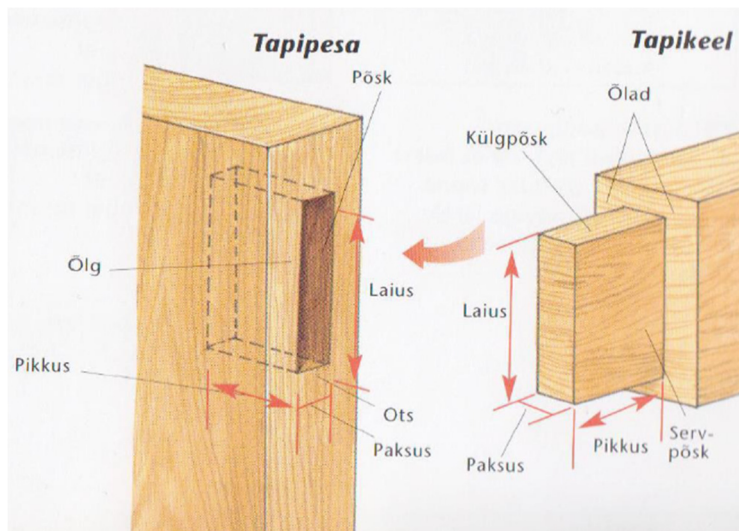


# 1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1 Puitnaaglitest ja nende ajaloost

Naaglikks nimetatakse silindrilist varrast või plaati, mis läbib ühendatavate elementide kokkupuutepinna ja mille eesmärgiks on takistada konstruktsioonidetailide omavahelist nihkumist. Silindriliste naaglite alla liigituvad ümarterasest valmistatud naaglid ja poldid (läbimõõt 12 – 24 mm), naelad (läbimõõt 3 – 8 mm), tammenaaglid (läbimõõt 12 – 30 mm) ja kruvitsaga (läbimõõt 3 – 10 mm) või võtmega (läbimõõt 12 – 20 mm) keeratavad puidukruvid. Plaatnaagleid tehakse tamme- või immutatud kasepuidust, harvem lehtterasest. Puitplaatnaaglite paksus on 12 – 16 mm. [6, lk 109 - 111]

Puitu kasutati ehitusmaterjalina juba kiviajal. Arheoloogilistel väljakaevamistel on leitud puitehitisi isegi mesoliitikumi perioodist. Vanimad tappliited on leitud Egiptuse püramiidide alalt, kus neid kasutati Khufu laeva (2500 aastat eKr) plankude ühendamiseks. Veel on tappühendusi tarvitatud Kesk- ja Ida-Euroopas ning Aasias. Traditsioonilises Hiina ehituskunsti leiub tappühendusi talade, nurksulgude, katuseraamide ja diagonaalide juures. Peidetud tappide puhul ei kasutatud kinnitusvahendeid ega liimi, puidul võimaldati niiskumisel paisuda. Arheoloogilised tõendid Hiinast kinnitavad, et neoliitikumi lõpuks oli tappühendus Hiina ehituskunsti osa. [7, lk 12]



*Joonis 1 Keeltappi osad [8, lk 192]*

Traditsioonilise puitühenduse puhul kasutatakse tihti mõnda varianti erinevatest tappliidetest (vt Joonis 1) koos naaglitega. Sarnaseid ühendusi on kasutatud ka mööbli puhul ja polegi selge, kumma juhu jaoks tappühendus koos naaglitega esimesena välja arenes. Arheoloogid on dateerinud esimesed teadaolevad sellised puitliited umbes ajajärku 200 a eKr nii Kaug-Idas kui Euroopas.

Konstruksioonide tehnoloogia arenes käsikäes metalltööriistade kasutuselevõtu levimisega. 19. sajandil muutusid puitkonstruktsioonid: arvukate saeveskite rajamisega hakati tootma standardiseeritud suurusega väiksemat saematerjali ning raud- ja terasnaelad muutusid odavaks ja levinumaks kui puitnaaglid. [1]

## **1.2 Puitnaaglitega kinnitatud liidete kasutamise tavad erinevates piirkondades**

Kui Ühendkuningriikides kasutatakse konstruktsioonides tammepuitu, siis Ameerikas ja Aasias on levinum okaspuidu kasutamine. Shanks'i ja Walker'i poolt 2005. aastal läbi viidud uuringud on näidanud, et Ühendkuningriikide traditsioonilise geomeetria alusel valmistatud liidetes tekib eelkõige plastne purunemine tõmbele, mitte habras purunemine põhjustatuna lõikejõust tapipesa seinas või tapikeeles. Suurbritannias on levinuimad tammenaaglid läbimõõduga 19,1 mm (0,75 tolli), mida kasutatakse sõlmedes, kus ühendatavate detailide ristlõike mõõtmed jäävad alla 200 – 250 mm (8 – 10 tolli). Sellised on enamike traditsiooniliste, aga ka kaasaegsete elamuehituse konstruktsioonide mõõtmed. Kui kasutatakse suuremaid ristlõikeid ning mõjuvad jõud on suuremad, võetakse kasutusele naaglid läbimõõduga 25,4 mm (1 toll) ja vahel ka suuremad. Naaglite suurused ja liigid on sarnased nii Ameerika, Suurbritannia kui ka Aasia praktikates, kuid kui enamasti on levinud ümmarguse ristlõike kasutamine, siis Jaapanis kasutatakse hoopis kandilisi naagleid.

Suurbritannias spetsifitseeritakse naagleid ava järgi, kuhu see tegelikkuses sobituma peaks. Naagel ise võib olla pisut väiksema diameetriga või hoopis otsast ahenev. Tapikeele pikkus on lühem tapipesa sügavusest. Sellisel juhul kindlustatakse, et tapikeel ei hakka kandma tapipesa põhjas pärast konstruktsiooni kuivamist, mahukahanemist ja tasakaaluniiskuse saavutamist. Tapikeele õlgade kaugus keele otsast, keele paksus ja tapipesa laius on tavaliselt umbes kaks naagli diameetrit. Naagliava kaugus tapipesa seinast on tüüpiliselt 1,5 naagli diameetrit naagli keskmest mõõdetuna. Need mõõdud on oluliselt väiksemad kui

metallkinnititele mõeldud mõõdud standardites BS EN 1996-1 ja BS 5268. Puurauk tehakse Suurbritannias, Ühendriikides ja Aasias tavapäraselt tapikeelde ja –põske 2 – 3 mm omavahel nihkes (ingl *draw bore*). [9] Sellise tehnoloogia eelisteks on liite tihedus, sest naagel hoiab tappi pinge all ning nii välditakse puidu kuivamisel ja kahanemisel tekkida võivaid lõtke. [10] See on liite eelpingestamine, mis ajas kuivamise, mahukahnemise ja voolamise tõttu väheneb. [9, lk 15]

Liite tihe kokkusobivus varieerub piirkonniti ja erinevate meistrite käekirja tõttu. Kaasajal on aga aktsepteeritav tihe liitesobivus pesa ja keele vahel kuni 5 mm vaheni. Shanks'i ja Walker'i liitetiheduse testid demonstreerisid, et ühendustes, kus vahe oli 8 ja 12 mm olid jäikuselt ja tugevuselt märkimisväärselt nõrgemad kui 4 mm vahega ühendused. Ameerikas ja Jaapanis on liidetavad detailid enamasti tihedalt sobituvad. [1]

Eestis avaldatud kirjandusest leiab, et ühendatavatesse elementidesse puuritakse augud, mille läbimõõt on võrdne naagli läbimõõduga. Saetud materjal ei tohi naaglid asuda laua või prussi teljel, sest säsipuidus arenevad kuivamisel kergesti praod. Enamasti asetatakse naaglid kahte pikiritta [6, lk 111] [11, lk 97], palkides on lubatud kasutada ka ühte pikirida [11, lk 97]. Tammenaaglid töötavad sarnaselt terasnaaglitega, kuid sobivad hästi kasutamiseks just tingimustes, kus terasnaaglid võivad korrodeeruda. Suuremate diameetrite tõttu tuleb tammenaaglite puhul arvestada ka suurema ühendatava elemendi ristlõike nõrgestusega. Naaglite puidu niiskus ei tohi olla väiksem kui konstruktsioonis kasutatava puidu oma, sest naagli niiskumisel see paisub ja võib esile kutsuda konstruktsiooni pragunemist. [6, lk 122]

### **1.3 Erinevad naaglitüübid**

Suurbritannias on traditsioonilises ehituses enimkasutatavad kaks naaglitüüpi: lõhestatud ahenev naagel (ingl *cleft tapered peg*) ja läbi rõnga lükatud tüübel (ingl *die driven dowel*). Mõlemat tüüpi tehakse lõhestatud sirgekiulisest tamme lülipuidust. Lõhestusprotsess on otsustava tähtsusega kvaliteedikontrolliks traditsioonilise lõhestatud aheneva naagli puhul, sest puidu vead takistaksid puidu lõhestamist. Valmis lõhestatud naaglimaterjal vestetakse siis liimeistriga kaheksakandiliseks nii, et kiud jääksid terveks. Läbi rõnga lükatud tüübleid valmistatakse ajades puitu läbi teritatud rõnga. Nii saadakse prismaatiline ringikujulise

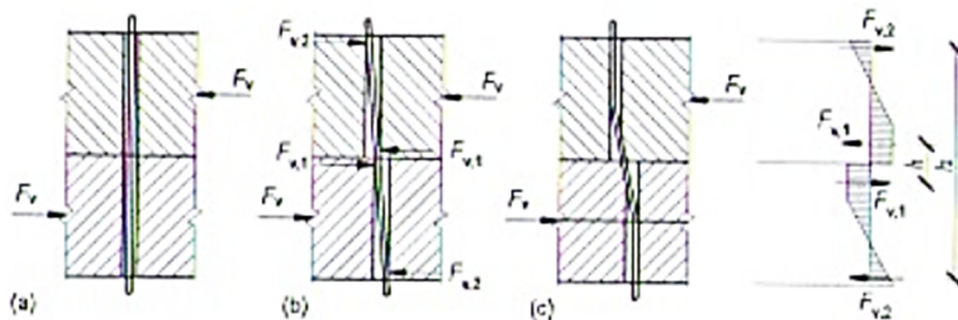
ristlõikega ja jätkuvate puitkiududega naagel. Selliseid kasutatakse liidetes, kus tapikeelde ja –põske naaglite jaoks tehtavate aukude nihe on null või väga väike. Mõlemaid naaglitüüpe kasutatakse õhkuivatatult ligikaudu 12% puidu niiskussisalduse juures.

Kolmas võimalus naaglite valmistamiseks on treipingil tiserikvaliteetsest kuivatikuivast Ameerika valgest tammest naaglite treimine. Treitud naaglitel on lühike terav tipp, vars on konstantse soovitud diameetriga, lõpp aga on tüüpiliselt umbes 50 mm pikkuses 2 – 3 mm suurema diameetriga. Seega moodustub naagli viimasest osast justkui kork, mis ava tihedalt sulgeb. Kuigi selliseid naagleid valmistatakse ka Suurbritannias, on sarnased kinnitid eriti levinud Ameerikas. Kvaliteedikontrolli viiakse treitud naaglite jaoks läbi nende hoolika valmistamisega ning konstruktsioonide ühendamise ajal ehitajate poolt. Üldiselt peetakse treitud naagleid puidutöö austajate poolt lõhestatud naaglitest halvemateks. Tavaliselt ei jälgita naagli kiudude suunda liites, kuid on läbi viidud katseid, mis viitavad, et radiaalselt koormatud naaglid on jäigemad. [1]

#### **1.4 Tööpõhimõtted**

Naagel töötab lõikele ja paindele ning ühenduse kandevõime oleneb esmajoones puidu muljumistugevusest ja naagli paindetugevusest. Kui naaglite omavaheline kaugus on aga liiga väike, võib määravaks saada hoopis puidu nihketugevus. [6]

Naagli tööpõhimõtet liites saab võrrelda talaga elastoplastsel alusel (vt Joonis 2). Vastassuunaliste jõudude mõjudes püüavad liidetavad detailid nihkudes naaglit liitekohas pöörata. Selle tulemusena toetub naagel liidetavate elementide servadele ja hakkab kõverduma (vt Joonis 2b). Kui jõud edasi suureneb, suureneb ka naagli ja naaglipesa kontakt ning puidus tekivad ebahürtlased muljumispinged: elementide servad on rohkem muljutud kui nende keskosa (vt Joonis 2c). Tekivad kahemärgilised pinged, mille resultantjõud moodustavad teineteist tasakaalustavad jõupaarid. Järelikult on naagli pöördumine takistatud. Momendi tasakaalu tingimuse seos  $F_{v,1}l_1 = F_{v,2}l_2$  näitab, et naagli tasakaal tagatakse ainult liidetavate elementide omavahelise nihkumisega paralleelsete pikijõududega. Naagli kandevõime leidmisel puidu muljumistugevuse järgi ei arvestata tavaliselt naagli paindedeformatsioone, arvestatakse puidu elastoplastilist töötamist muljumisele. [7, lk 138]



**Joonis 2** Naagli töötamine liites

Naageliühendused leiavad kasutust näiteks tõmbejätkudes, sõlmedes ja liitalades. Kuna ühe naagli kandevõime on võrdlemisi väike ja ühenduse kandevõime kasvab võrdeliselt naaglite arvuga, koosnebki see tavaliselt mitmest naaglist. Seejuures pole oluline ühenduse pikkus, sest mõjuvad jõud jagunevad naaglite vahel võrdselt. [6] Kandevõime ei kasva siiski lõpmatult, vaid oleneb efektiivsete naelte arvust. Naaglid asetatakse ritta paarisarvuliselt, et vältida üksiku naagli rea sattumist laua keskele, kus võib eeldada prao tekkimist kuivamisest või kaardumisest. [7, lk 137]

Naagelliiteid saab lõikepindade arvu järgi jagada ühe-, kahe- ja mitmelõikelisteks. Samuti saab neid liites mõjuvate jõudude iseloomu järgi jagada sümmeetrilisteks või ebasümmeetrilisteks. Tavaliselt projekteeritakse naagelliites ühendus nii, et mõjuva jõu suund ja puidukiudude suund ühendatavates detailides on samasuunalised. Nii mõjuvad muljumispinged naaglilt puidule piki kiudu. Kõigis sõlmedes pole see aga võimalik ja elemendid lõikuvad hoopis nurga all. Sellisel juhul muljub ka naagel puidukiude sama nurga all ning ühenduse kandevõime on väiksem. Ühenduse arvutamisel võetakse aga aluseks skeem, kus muljumine toimub piki kiudu ning nurga all mõjuvate jõudude jaoks kasutatakse parandustegurit. Parandustegureid kasutatakse ka, et võtta arvesse puidu liiki, niiskussisaldust ja koormuse kestust. [6]

Naageliühenduse kandevõime piirulukord saabub ühel järgnevatest juhtudest:

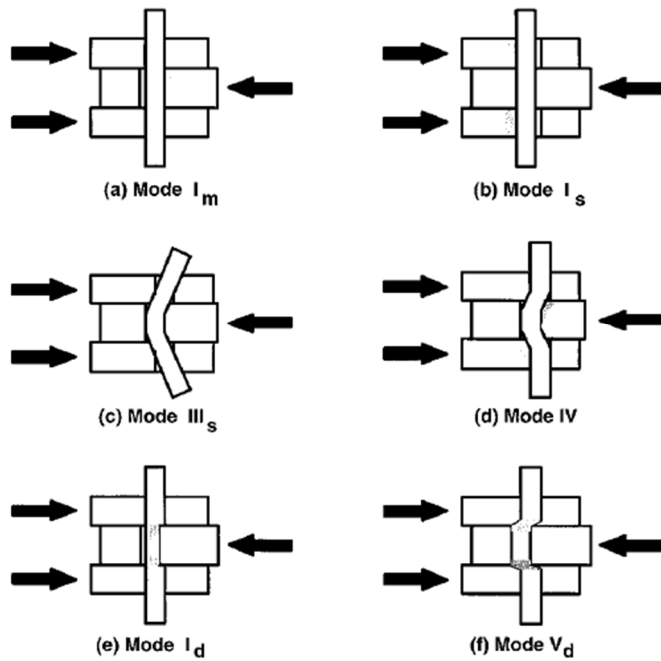
1. ühendatav element puruneb tõmbele naagliga nõrgestatud ristlõikes;
2. ühendatav element puruneb lõikele (nihkele);
3. muljumispinged naagli ja puidu vahel saavutavad puidu muljumistugevuse;

4. paindepinged naaglis saavutavad voolavuspiiri ja naaglis tekib plastne liigend. [7]

## 1.5 Purunemisviisid

K. W. Johansen töötas 1941. aastaks välja teooria ja matemaatilise mudeli, millega kirjeldada puitühenduste tugevust. Antud mudel, European Yield Model (EYM), on rakendatav ühe- ja kahelõikelistele metallkinnititega puitühendustele. Johansen võrdles naagli kandevõimet selle paindetugevusega, et leida üldine liite tugevus. [12, lk 10-11] Nii USAs kui Euroopas on Johanseni voolavusteooria ja EYM kehtivate standardite aluseks. [4] Järgnevalt on töös kõrvutatud Eurokoodeks 5 metallnaaglite arvutusvalemeid, USA standardi ANSI/AWD NDS-2005 metallnaaglite arvutusvalemeid, USA standardi TFEC1-2012 puitnaaglite arvutusvalemeid ning Sandberg *et al* uurimuses esitatud valemeid.

1991. aasta National Design Specification for Wood Construction (NDS) määrab metallkinnitite kandevõime puitliidetes EYM'i järgi. Selle järgi võivad sümmeetrilised kahelõikelised liited puruneda neljal erineval viisil (vt Joonis 3a-d). Järgnevalt ongi purunemisviise lähemalt tutvustatud ja esitatud iga purunemisviisi juurde ka naagli normkandevõime valem ühe nihkepinna kohta. Liite juures saab määravaks vähima väärtusega kandevõime valem.



**Joonis 3** Puitnaaglitega liidete võimalikud purunemisviisid Sandberg et al järgi

Purunemisviisi  $I_m$  (vt Joonis 3a) puhul puruneb keskmine element vastu naaglit. [1]  
Kandevõime valem standardi ANSI/AWD NDS-2005 järgi on kujul:

$$Z_{I_m} = \frac{D \cdot l_m \cdot F_{em}}{R_d}, \text{ kus } R_d = 4,0 \cdot K_\theta. \quad (1)$$

Valemities (1) – (21) kasutatud tähistused on välja toodud järgnevalt:

$Z$  on ühe kahelõikelise naagli kandevõime [lb];

$D$  on kinniti diameeter [in];

$l_m$  on keskmise elemendi paksus [in];

$l_s$  on ühe äärmise elemendi paksus [in];

$F_{em}$  on keskmise elemendi norm-muljumistugevus [psi];

$F_{es}$  on äärmiste elementide norm-muljumistugevus [in];

$F_{yb}$  on kinniti voolavustugevus [psi];

$F_{ed}$  on naagli kandevõime [psi];

$R_d$  on teisendustegur, mis viib Load and Resistance Factor Design süsteemis tehtud arvutused üle Allowable Stress Design süsteemi;

$K_\theta$  on tegur, mis leitakse järgmiselt:

$$K_\theta = 1 + \frac{\theta}{360}, \quad (2)$$

kus  $\theta$  on maksimaalne nurk ( $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ) mõjuvate jõudude ja puidu kiudude vahel;

$k_3$  on abisuurus, mis leitakse valemiga:

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2 \cdot (1 + R_e)}{R_e} + \frac{2 \cdot F_{yb} \cdot (2 + R_e) \cdot D^2}{3 \cdot F_{em} \cdot l_s^2}}, \quad (3)$$

kus  $R_e$  on tapikeele ja –pesa norm-muljumistugevuste suhe, mis arvutatakse järgmiselt:

$$R_e = \frac{F_{em}}{F_{es}}; \quad (4)$$

$F_{yv}$  on naagli löikekandevõime [psi]:

$$F_{yv} = 4850 \cdot G_p \cdot G_t^{0,75}; \quad (5)$$

kus  $G_t$  on tapipesa ja –keele materjali erikaal 0 % niiskuse juures;

$G_p$  on puitnaagli erikaal 0 % niiskuse juures;

$F_{v,Rk}$  on naagli normkandevõime ühe kinnituselemendi ühe nihkepinna kohta [N];

$t_1$  on äärmise puitelemendi vähim paksus või süvistussügavus liites [mm];

$t_2$  on keskmise puitelemendi paksus liites [mm];

$f_{h,i,k}$  on norm-muljumistugevus puitelemendis [N/mm<sup>2</sup>];

$M_{y,Rk}$  on voolavuspiirile vastava paindemomendi normväärtus [Nmm];



$\beta$  on elementide muljumistugevuste suhe, mida arvutatakse valemiga:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}, \quad (6)$$

$F_{ax,Rk}$  on kinnituselemendi teljesuunaline väljatõmbe normkandevõime [N]. [4]

Sandberg *et al* uurimuses on antud purunemisviisi kohta järgmine valem:

$$Z_{I_m} = D l_m F_{em}. \quad (7)$$

Church ja Tew leidsid oma 1997. aastal tehtud uurimuses 25,4 mm valgest tammest naaglite muljumistugevused. Võrreldes väärtusi sama diameetriga terasnaaglite omadega, leidub, et ristikiudu muljumistugevus on puitnaagli puhul väiksem terasnaaglist. Eeldades, et keskmine ja äärmised detailid on samast materjalist, juhtub selline purunemine, kui keskmine element on kitsam kui külgmiste elementide paksuste summa ja naagli läbimõõt on võrdlemisi suur. [1]

Purunemisviis  $I_m$  vastab Eurokoodeksis purunemisviisile (g). Normkandevõime valem ühe kinnituselemendi nihkepinna kohta Eurokoodeksi järgi on järgmine [4]:

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d. \quad (8)$$

Purunemisviis  $I_s$  (vt Joonis 3b) tähendab, et liites annavad järgi külgmiste elementide naagliga kontaktis olevad puidukiud. [1] Kandevõime valem on USA standardite põhjal järgnev [4]:

$$Z_{I_s} = \frac{2 \cdot D \cdot l_s \cdot F_{es}}{R_d}, \text{ kus } R_d = 4,0 \cdot K_\theta \quad (9)$$

Sandberg *et al* uuringu põhjal on valemi kuju järgmine:

$$Z_{I_s} = 2 D l_s F_{es}. \quad (10)$$

Samast materjalist elementide puhul juhtub selline purunemine siis, kui keskmine detail on paksem kui äärmiste detailide paksuste summa ning naagli diameeter on võrdlemisi suur. [1] Eurokoodeksis on purunemisviis tähistatud (h) ja vastav kandevõime valem on järgmine [4]:

$$F_{v,Rk} = 0,5f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d. \quad (11)$$

Purunemisviisi III<sub>s</sub> (vt Joonis 3c) kirjeldatakse juhul, kui kinnitus tekitab üks plastne liigend lõikepinna kohta koos kandevõime kaoga külgmiste detailide puidukiududes. [1] ANSI/AWC NDS-2005 järgi leitakse kandevõime antud purunemisviisi jaoks järgneva valemiga [4]:

$$Z_{III_s} = \frac{2 \cdot k_3 \cdot D \cdot l_s \cdot F_{em}}{(2 + R_e) \cdot R_d}, \text{ kus } R_d = 3,2 \cdot K_\theta \quad (12)$$

Sandberg *et al* järgi leitakse purunemisviisile vastav kandevõime järgmiste valemite abil:

$$Z_{III_s} = \frac{2Dl_s F_{em} F_{es}}{2F_{es} + F_{em}} (\sqrt{Q} - 1), \text{ kus} \quad (13)$$

$$Q = \frac{2(F_{es} + F_{em})}{F_{em}} + \frac{2F_{yb}(2F_{es} + F_{em})D^2}{3F_{em}F_{es}l_s^2} \quad (14)$$

Selline liite kandevõime kadu toimub juhul, kui keskmise detaili paksuse suhe äärmistesse on võrdlemisi suur ja kinniti enda diameeter väike. [1] Eurokoodeksis märgitakse kolmandat purunemisviisi tähisega (j). Kandevõime valem on kujul:

$$F_{v,Rk} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}. \quad (15)$$

Siin ja edaspidi on liige  $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$  köieefekt, mille mõju piiratakse naagelliite korral 0%. Seega pole antud lõputöös vajadust köieefekti käsitleda. [4]

Neljas ja viimane purunemisviis, mis kehtib metallkinnititele, on IV (vt Joonis 2d). Sellisel juhul tekib liites kaks plastset liigendit lõikepinna kohta ning lokaalne kandevõime kadu nii keskmises kui äärmistes detailides nihkepindade läheduses. [1] Kandevõime leitakse USAs kehtiva standardi kohaselt valemiga [4]:

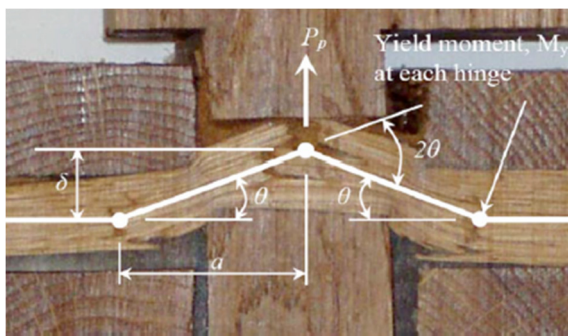
$$Z_{IV} = \frac{2 \cdot D^2}{R_d} \sqrt{\frac{2 \cdot F_{em} \cdot F_{yb}}{3 \cdot (1 + R_e)}}, \text{ kus } R_d = 3,2 \cdot K_\theta \quad (16)$$

Sandberg *et al* järgi saab kandevõime antud purunemisviisi jaoks leida järgnevalt:

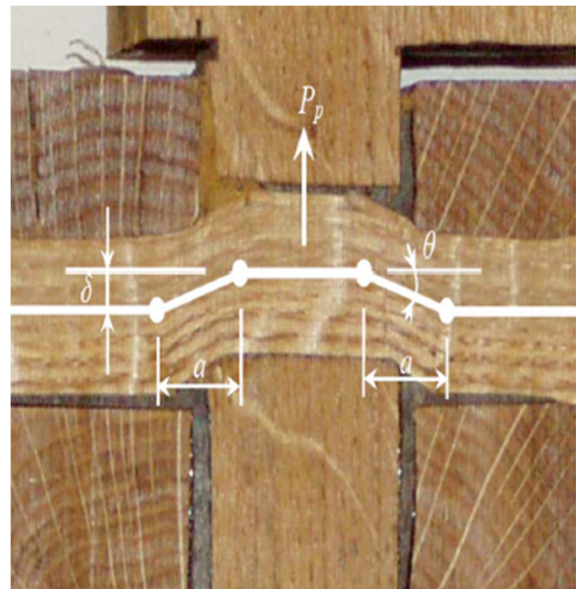
$$Z_{IV} = 2D^2 \sqrt{\frac{2F_{yb}F_{em}F_{es}}{3(F_{es} + F_{em})}}. \quad (17)$$

Purunemisviis IV võib tekkida, kui nii keskmise elemendi paksuse suhe äärmiste paksusesse kui ka kinniti diameeter on mõlemad võrdlemisi väikesed. Purunemisviisidele III<sub>s</sub> ja IV omane plastsete liigendite tekkimine naaglis ei pruugi täielikult kehtida puitnaaglite kohta, kuid sellist käitumist on liidete katsetamisel täheldatud. Naagli tugevus ei oleks kinniti voolavustugevuse parameetrist  $F_{yb}$  nagu terase puhul, vaid naagli purunemistugevuse moodulist. [1] Eurokoodeksis vastab purunemisviis IV tähisele (k). Kandevõime valem on aga järgmine [4]:

$$F_{v,Rk} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}. \quad (18)$$



**Joonis 4** Kolme liigendi moodustumine purunemisel



**Joonis 5** Nelja liigendi moodustumine purunemisel

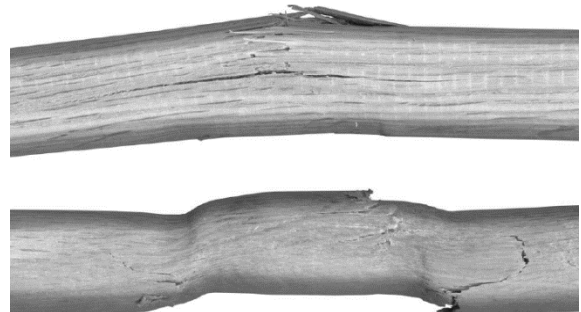
Shanks'i ja Walker'i katsekehad näitavad liigendite tekkimist (vt Joonis 4 ja Joonis 5). Otsast ahenevad naaglid purunevad tavaliselt kolme liigendiga, kus üks on tapikeele keskel ning teised kaks jäävad 2, vahel ka 2,5 naagli diameetri kaugusele. Läbi rõnga lükatud ja treitud naaglitel tekkivad kolm liigendipunkti üksteisest kuni 2,5 naagli diameetri kaugusele.

Prismaatilistel naaglitel arenevad purunemisel sümmeetriliselt neli liigendpunkti, mille vahed on 0,75...1,5 naagli diameetrit. [9]

Terasnaagli asendamine puidust naagliga tähendab, et võimalikuks saavad ka teistsugused purunemisviisid. Esiteks võib tekkida naagli kandevõimele vastav purunemine analoogselt  $I_m$  ja  $I_s$  purunemisviisidele, kuid erinevalt neist puruneb naagel ise kandevõimele (vt Joonis 3e), mitte läbi tapielementide. Võimalus selliseks purunemiseks tekib, kui koormatud ühendatavate detailide muljumistugevus on suurem naagli kandevõimest. Tõendeid sellisest käitumisest on leidnud L. B. Sandberg, W. M. Bulleit, T. L. O’Bryant, J. J. Postlewaite ja J. J. Schaffer („*Experimental investigation of traditional timber connections*“, 1996) oma katsetest punasest tammest naaglitega valgest tammest liites. Purunemisviis on R. J. Schmidt’i ja C. E. Daniels’i poolt nimetatud purunemisviisiks  $I_d$  („*Design considerations for mortise and tenon connections*“, 1999). Kandevõime valem liite Sandberg *et al* järgi on järgmine:

$$Z_{I_d} = \min \left\{ \begin{array}{l} D \cdot l_m \cdot F_{ed} \\ 2 \cdot D \cdot l_s \cdot F_{ed} \end{array} \right. \quad (19)$$

Schmidt ja Daniels (1999) leidsid oma katsetes puitühendustega veel ühe purunemisviisi –  $V_d$ . See on naagli ristikiudu lõikeline purunemine (vt Joonis 3f). Naagli piiratus ja kitsas lõtk külgmiste ja keskmise elemendi vahel on ilmselt põhjuseks, miks toimub just selline kiireloomuline purunemine. [1] Piirseisundi valem on USA puitnaaglitega liite standardis TFEC 1-2012 esitatud järgneval kujul [4]:



**Joonis 6** Üleval naagli paindumisest tekkiv purunemisviis III, all purunemisviis V koos sekundaarse paindumisega.

$$Z_{V_d} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot F_{yv}}{2 \cdot R_d}, R_d = 3,5 \cdot K_\theta \quad (20)$$

Sandberg *et al* uuringus on antud purunemisviisi kandevõime valemil aga kuju

$$Z_{V_d} = 2 \frac{\pi D^2}{4} F_{ev}. \quad (21)$$

Naagli nihkejõud on tüüpilise liite puhul 1,0...1,4 korda suurem konventsionaalsest nihkejõust ja sõltub väga keskmise ja äärmiste elementide vahelistest lõtkudest. Seepärast on liite kandevõime määramiseks oluline ka jäikuskarakteristikute leidmine. Naagliga liite jäikus on tüüpiliselt oluliselt väiksem kui liidetavate elementide teljeline jäikus. Seepärast on traditsioonilise puitraami täpseks analüüsimiseks vajalik ka liite jäikuse arvestamine. W. M. Bulleit, L. B. Sandberg, T. L. O'Bryant, D. A. Weaver, W. E. Pattison ja M. W. Drewek on oma töödes lähenenud sellele probleemile defineerides efektiivse või ekvivalentse kinnitatud naagli pikkuse esindamiseks liidet. Kuigi sellise jäikusmõõdu juures on määravaks naagli deformatsioon, on oodata ka tappliite suuruse ja kiusuuna mõju avaldumist. [1]

Purunemisviis  $V_d$  on segu naagli lõikepurunemisest, paindumisest ja voolamisest ning seda ei tohi pidada puhtakujuliseks puidu ristikiudu purunemiseks. Naaglis ei teki ka klassikalist plastset liigendit, välja arvatud mõningatel üksikudel juhtudel, kus see esineb sekundaarselt pärast lõikumist toimuval voolamisel (vt Joonis 6). [2]

Kui arenema hakkab purunemisviis  $V_d$ , tekkivad üheaegselt mitu lõikelist murdekohta. Lähemal uurimisel on näha mitmeid pikisuunalisi lõikejälgi ümber naagli diameetri. Lõikejälje äärtes on märgata peeneid terviklikke pikisuunalisi puidukiudude, mis on lõigete vahel paindest vääändunud. [2]

## **1.6 Kinnituselemendi voolavuspiirile vastava paindemomendi normväärtus ja paindetugevuse normväärtus**

Liite kandevõime määramisel on tähtis ka kinniti vastupanuvõime paindele. Eurokoodeksi järgi arvestatakse seda voolavuspiirile vastava paindemomendi normväärtusena, USA standardis määratakse aga kinnituselemendi paindetugevust. Johanseni voolavusteooria alusel on naaglis lubatud tekkida vaid elastsetel pingetel, kus voolavuspiirile vastava pingeni jõuavad vaid äärmised kiud. 1957. aastal arendas Meyer Johanseni teooriat edasi ja lubatuks said ka plastsed deformatsioonid.

Maksimaalne elastse staadiumi moment  $M_{el}$  [Nmm] on ringikujulise ristlõike korral järgmine:

$$M_{el} = \sigma_{max,el} \frac{\pi \cdot d^3}{32}, \text{ kus} \quad (22)$$

$\sigma_{max,el}$  on paindepinge [N/mm<sup>2</sup>];

d on naagli diameeter [mm].

USA metallnaaglitega liidete standard lähtub plastse staadiumi maksimaalsest momendist. Kandevõime arvutusvalemid on teisendatud kujule, kus kasutatakse paindetugevust. TFEC 1-2012 standardi järgi leitakse puidust naagli paindetugevus  $F_{yb}$  [psi] järgmiselt:

$$F_{yb} = 24850 \cdot G_p^{1,13}, \text{ kus} \quad (23)$$

$G_p$  on naagli erikaal 0% niiskuse juures. [4]

### 1.7 Muljumistugevus ja seda mõjutavad tegurid

Puidu survetugevuseks piki kiudu niiskussisalduse juures 15% on keskmiselt 350 kg/cm<sup>2</sup>. Survepurunemisel nõtkuvad tugevamad ja jäigemad kiugrupid pehmematesse kevadpuidu kihtidesse. Esinevad suured plastsed deformatsioonid, mida on näha proovikeha pinnas voldistumisena. Habrast purunemist ei teki. [6, lk 14] Puidu tugevus survele ristikiudu  $f_{c,90}$  on tunduvalt väiksem kui pikikiudu  $f_{c,0}$  ning deformatsioonid on nii suured, et proovikeha surutakse kokku. Muljumistugevuseks nimetatakse seepärast tinglikku suurust, mida piiratakse deformatsiooniga.

Puidu muljumistugevus määratakse katsega, kus standardset katsekeha koormatakse ühtlase kiirusega ja iga kindla koormusastme järel leitakse mõõtekellaga deformatsioon  $\Delta l$  mm. Proovi tulemused vormistatakse pinge-deformatsiooni ja pinge-deformatsiooni juurdekasvu graafikutega (vt Joonis 7). Pinge-deformatsiooni juurdekasvu graafikult saadud punkt, kus deformatsioonide lineaarne osa lõppeb ja algab kõverjooneline osa, on kokkuleppeliselt puidu survetugevus ristikiudu. Graafikutelt selgub ka, et muljumistugevus saadakse puidu deformatsiooni põhjal selle töötamisel elastses staadiumis. Seega võib järeldada, et puidu töötamist muljumisele saab otsustada lubatud deformatsioonide järgi ja arvutustugevuseks võetakse proportsionaalsuse piir.

Eurokoodeks 5 järgi on puidu norm-muljumistugevus pikikiudu  $f_{h,0,k}$  [N/mm<sup>2</sup>] leitav valemiga:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k, \text{ kus} \quad (24)$$

$\rho_k$  on puidu normtihedus [ $\text{kg/m}^3$ ];

$d$  on kinnituselemendi diameeter [mm], mis peab olema 6...30 mm.

USA metallnaaglitega puitliite standard ANSI/AWC NDS-2005 annab norm-muljumistugevuse leidmiseks järgmised valemid:

$$F_{e\parallel} = 11200 \cdot G \text{ ja} \quad (25)$$

$$F_{e\perp} = \frac{6100 \cdot G^{1,45}}{\sqrt{D}}, \text{ kus} \quad (26)$$

$F_{e\parallel}$  on norm-muljumistugevus pikikiudu [psi];

$G$  on puidu erikaal 0% niiskuse juures;

$F_{e\perp}$  on norm-muljumistugevus ristikiudu [psi];

$D$  on naagli diameeter [in].

Muljumistugevused on USA puitnaaglitega kinnitatud puitliidete standardi TFEC 1-2012 põhjal leitavad valemitega:

$$F_{e\parallel} = 4770 \cdot G_p^{1,32} \text{ ja} \quad (27)$$

$$F_{e\perp} = 4900 \cdot G_p \cdot G_t^{0,50}, \text{ kus} \quad (28)$$

$G_p$  on puitnaagli erikaal 0 % niiskuse juures;

$G_t$  on tapipesa ja –keele materjali erikaal 0 % niiskuse juures. [4]

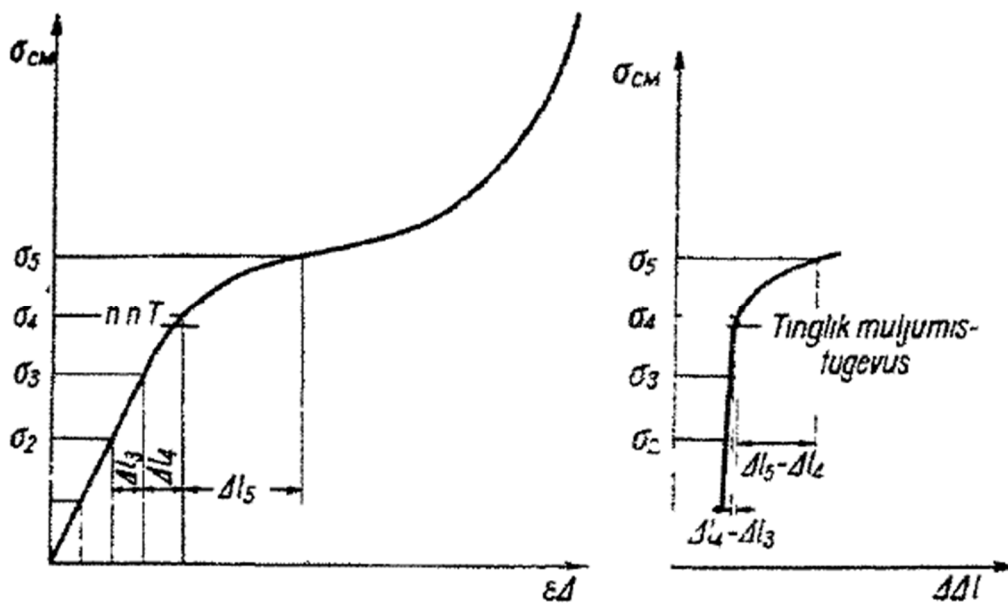
Sandberg *et al* kasutas oma uurimustöös naagli enda muljumistugevuse  $F_{ed}$  [MPa] leidmiseks valemid

$$F_{ed} = 39,0 \cdot G_{12}^{2,04}, \text{ kus} \quad (29)$$

$G_{12}$  on puitnaagli erikaal 12 % niiskuse juures.

Liisi Must on oma magistritöös valemeid (24) – (28) uurinud ja leidnud, et need erinevad olulisel määral katsetoodika ja katsetulemuse analüüsimise võtete tõttu. Selgus, et väikeste diameetrite korral on Euroopa ja USA standardite tulemused küllaltki sarnased, kuid suuremate diameetrite korral on muljumistugevuste normväärtused märkimisväärselt erinevad. Sellest järeldub, et USA standardi valemeid ei saa Euroopa süsteemi üle võtta. [4]

Joosep Järvpõllu magistritöö kinnitas, et pikikiudu koormamisel hakkab puitnaagel muljuma enne alusmaterjali ja ristikiudu koormamisel muljuvad mõlemad. Pikikiudu koormamisel on otsustavaks teguriks puitnaagli tihedus, sest kinnitit surutakse ristikiudu, alusmaterjali aga pikikiudu. Kuna metall on puidust oluliselt tugevam, sõltub muljumistugevus alusmaterjalist. [5]

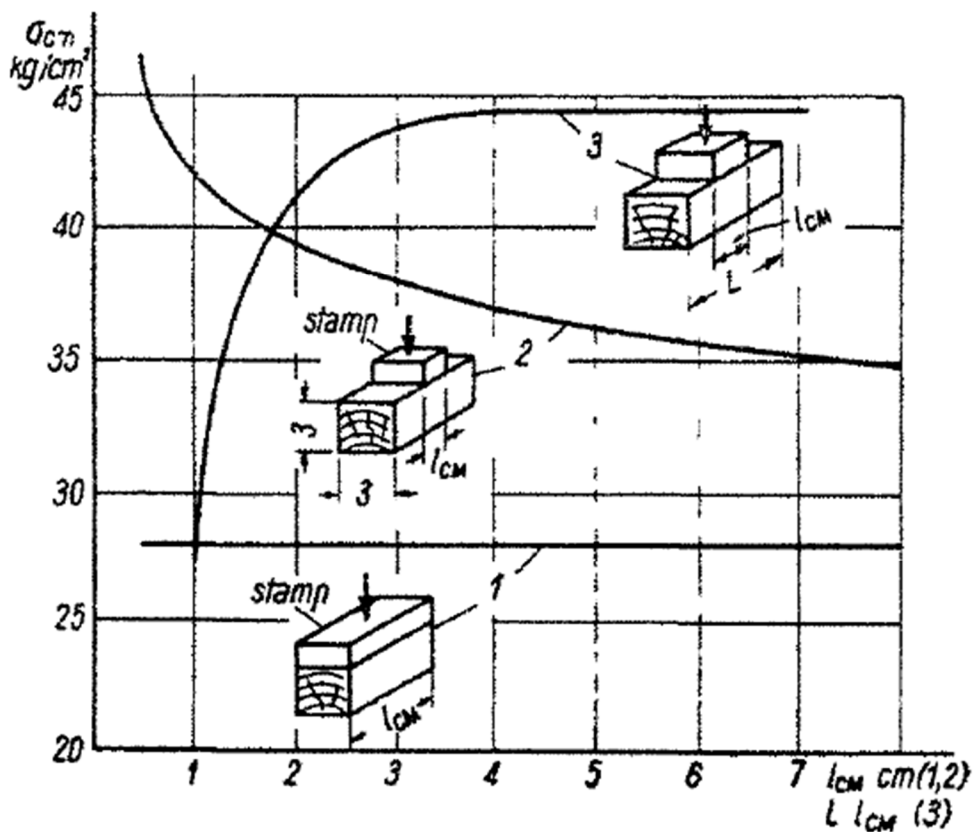


**Joonis 7** Pinge-deformatsiooni (vasakul) ja pinge-deformatsiooni juurdekasvu (paremal) graafikud

Puidu survetugevust ristikiudu ja deformatsioonide suurust mõjutab muljutava pinna ja kogu pinna suhe (vt Joonis 8). Mida väiksem see on, seda suurem on muljumistugevus (vrd Joonis 8 graafikuid 1 ja 2). Koormatud pinna all oleva materjali põikdeformatsioonid on kõrval oleva koormamata puidu poolt tõkestatud. Selliselt kujuneb välja lokaalne ruumiline



pingeolukord, milles materjal näitab suuremat tugevust. Koormamisel ristikiudu on oluline elemendi vaba otsa pikkus puidukiudude suunas, sest vaba otsa suurenemisega puidu tugevus ristikiudu suureneb (vt Joonis 8 graafik 3). Suurenemine ei toimu aga lõpmatult. Konstruktiivselt on nõutav, et vaba otsa pikkus oleks võrdne või suurem suruva elemendi kõrgusega. Standard EVS-EN 1995-1-1 järgi arvestatakse seda survetugevuse leidmisel teguri  $k_{c,90}$  kasutamiseega. Tegur arvestab koormuse konfiguratsiooni, lõhestumisvõimalust ja survedeformatsioone. Lühikese koormuse puhul võib muljumistugevus suurened.



**Joonis 8** Muljumistugevuse ja deformatsioonide suuruste sõltuvus muljutava pinna ja kogu pinna suhtest

Puidu muljumistugevus kiudude suhtes nurga  $\alpha$  all väheneb nurga suurenemisega [7, lk 33 - 34] ning seda võib leida Eurokoodeks 5 järgi seosega:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}, \text{ kus} \quad (30)$$

$\alpha$  on nurk [°] jõu mujumissuuna ja pikikiu vahel;

$$f_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d \rightarrow \text{okaspuidule} \\ 1,30 + 0,015d \rightarrow \text{spoonliimpuidule, kus} \\ 0,90 + 0,015d \rightarrow \text{lehtpuidule} \end{cases} \quad (31)$$

Sama suurust leiab USA standardite ANSI/AWC NDS-2005 ja TFEC 1-2012 jaoks Hankinsoni valem:

$$F_{e\theta} = \frac{F_{e\parallel} \cdot F_{e\perp}}{F_{e\parallel} \cdot \sin^2 \theta + F_{e\perp} \cdot \cos^2 \theta}, \text{ kus} \quad (32)$$

$\theta$  on maksimaalne nurk ( $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ) mõjuvate jõudude ja puidu kiudude vahel. [4]

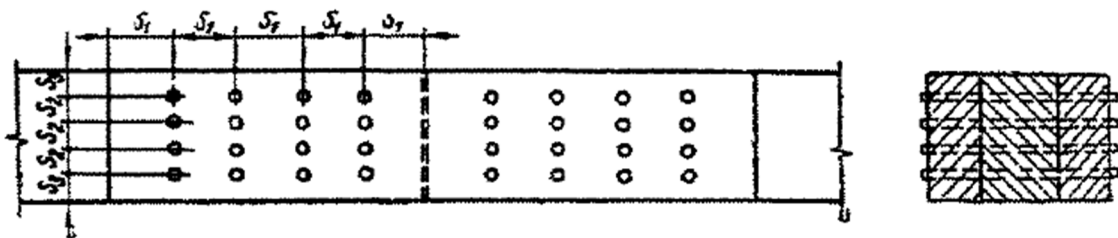
Puidu muljumisdeformatsioonid sõltuvad järgmistest teguritest: puidu niiskusest, puidukiudude suunast mõjuva jõu suhtes ja muljumispinna suuruselt. Normidega on kehtestatud arvutuslikud muljumistugevused piki kiudu, põikikiudu tervel pinnal, põiki kiudu, kui muljumispinna pikkus on rohkem kui 10 cm ning põiki kiudu, kui muljumispinna pikkus on 3 cm. Vahepealsete juhtumite korral saab muljumistugevust määrata lineaarse interpoleerimise teel. Muljumispindade kandevõime arvutatakse valemiga:

$$N \leq m_{CM} R_{CM\alpha} F_{CM}, \text{ kus} \quad (33)$$

$m_{CM} = 1,0$  on puidu töötamistingimuste tegur muljumisel;

$R_{CM\alpha}$  on puidu arvutuslik muljumistugevus;

$F_{CM}$  on arvutuslik muljumispinna suurus. [6, lk 74-75]



Joonis 9 Tammenaaglite minimaalsed vahekaugused

Naaglite minimaalsed vahekaugused on toodud Joonis 9. Kui ühendatava paketi paksus  $b \leq 10d$ , võib võtta  $s_1=4d$  ja  $s_2=s_3=2,5d$ . Selliste vahekauguste korral leitakse naagli kandevõime jõudude mõjumisel piki kiudu puidu muljumise ja naagli painde tingimuste Tabel 1 järgi.

**Tabel 1** Silindrilise naagli ühe lõike arvutuslik kandevõime [6, lk 117]

Pingeseisukord	Elemendi nimetus	Arvutuslik kandevõime ühe töötava lõike kohta [kg]		
		Terasnaaglid	Naelad	Tammenaaglid
Puidu muljumine	Sümmeetriliste ühenduste keskmised elemendid	$50cd$	$50cd$	$30cd$
Puidu muljumine	Sümmeetriliste ühenduste äärmised ja ebasümmeetriliste ühenduste õhemad elemendid	$80ad$	$80ad$	$50ad$
Puidu muljumine	Ebasümmeetriliste ühenduste paksemad elemendid	$35cd$	$35cd$	$20cd$
Naagli paine	Kinnituspikkuse järgi	$180d^2 + 2a^2$	$250d^2 + a^2$	$45d^2 + 2a^2$
Naagli paine	Maksimaalne	$250d^2$	$400d^2$	$65d^2$

Naagli kandevõime väärtused on järgnevas Tabel 2, kus naagli ühe lõike kandevõimeks loetakse väiksem tabelis toodud kandevõime väärtustest.

**Tabel 2** Tammenaaglite arvutuslik kandevõime niiskuse ja kuumuse eest kaitstud kuuse- või männipuidust konstruktsioonides

Elemendi nimetus	Elemendi paksus		Naagli ühe lõike arvutuslik kandevõime [kg]				
	Tähis	cm	Naagli läbimõõt [cm]				
			1,2	1,6	2,0	2,4	3,0
Sümmeetriliste ühenduste keskmised elemendid	c	2,5	90	120	150	180	225
		4	94	166	240	288	360
		5	94	166	260	360	450
		6	94	166	260	374	540
		$\geq 7$	94	166	260	374	585
Sümmeetriliste ühenduste äärmised ja ebasümmeetriliste ühenduste õhemad elemendid	a	2,5	77	127	192	271	375
		4	94	147	212	291	437
		5	94	165	230	309	455
		6	94	166	252	331	477
		7	94	166	260	357	503
		8	94	166	260	374	533

		≥10	94	166	260	374	585
Ebasümmeetriliste paksemad elemendid	ühenduste c	2,5	60	80	100	120	150
		4	94	128	160	192	240
		5	94	160	200	240	300
		6	94	166	240	288	360
		7	94	166	260	336	420
		8	94	166	260	374	480
		≥10	94	166	260	374	585

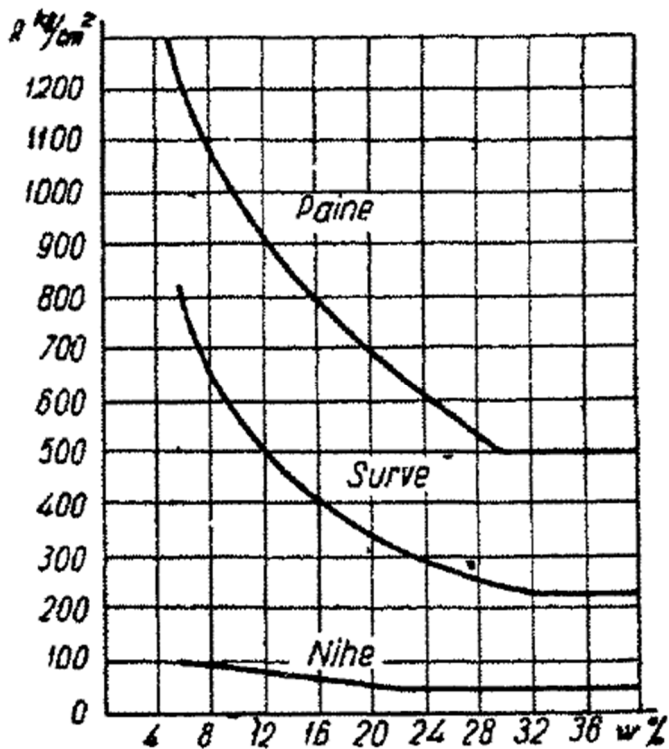
Parandustegureid jõudude suuna, puidu liigi, niiskusrežiimi ja koormuste iseloomu kohta kasutatakse samamoodi kui terasnaaglite korral. [6, lk 122-123]

Puidu tugevusomadused olenevad puidu liigist, jõu mõjumise suunast kiudude suhtes, puidu tihendusest, niiskusest ja temperatuurist. Puidu struktuuri ebahütlus tingib mehaaniliste omaduste suure kõikumise ka ühe puiduliigi piires. Veel on olemas puidu tugevus koormamise kiirusest ja kestusest, mis määratakse lühiajalisel koormamisel.

Niiskussisalduse suurenedes väheneb puidu tugevus eriti paindel ja survel, vähem nihkel, eriti vähe tõmbel ja löökkkoormusel. [7, lk 37] **Joonis 7** Joonis 10 on näha, et niiskuse suurenemisega kuni 30 protsendini (kiudude küllastusaste) puidu painde-, surve- ja löiketugevus algul järsult vähenevad, kuid edasisel niiskumisel jäävad puidu tugevused praktiliselt konstantseks. [6, lk 21] Juhusliku niiskuse  $\omega$  juures määratud tugevuse taandamiseks niiskusele  $\omega = 12\%$  kasutatakse seost

$$\sigma_{12} = \sigma_w [1 + \alpha(\omega - 12)], \quad (34)$$

kus  $\alpha$  väärtused näiteks männipuidul on survel pikikiudu 0,05, paindel 0,04, nihkel pikikiudu 0,03. valemid kehtivad niiskuse piires 0...23%. Okaspuidu tõmbetugevust mõjutab niiskus õige vähe ja seda ei arvestata.



Joonis 10 Puidu tugevuse sõltuvus niiskussisaldusest

Kõrgematel temperatuuridel väheneb puidu tugevus. Temperatuurikasv 20...50 °C langeb puidu survetugevus 20...40%, tõmbetugevus 12...15% ja nihketugevus 15...20%. Väheneb ka puidu elastsusmoodul umbes 2,5 korda. Temperatuuri tõustes suurenevad puidu deformatsioonid ning kuivamisprotsessiga kaasnevad suurte okste juures lisapinged. Sellega on seletatavad puitkonstruktsioonide avariid suvisel kuumal ajal, kuigi konstruktsioon ei pruugigi olla maksimaalselt koormatud. Miinuskraadidel suureneb puidu tugevus staatilisel koormamisel igasuguse niiskussisalduse korral. Jäätunud toore puidu tugevus suureneb survel keskmiselt 30%, paindel 40% ning löikel 70%. löökkoormusel on külmunud puit hapruse tõttu kuni 50% nõrgem. [7, lk 37-38] [6, lk 21-23]

Standardi EN 384 kohaselt peab soovitatav puidu niiskusesisaldus vastama tasakaaluniiskusele keskkonnas, kus temperatuur on 20 °C ja suhteline õhuniiskus 65%. paljudel okaspuuliikidel vastab see massi järgi ligikaudu 12% niiskusesisaldusele. Puitkonstruktsioonide arvutamise normides on kasutusele võetud kolm kasutusklassi, mis seavad kindlad tingimused niiskusele ja temperatuurile. Kasutusklassi 1 alla kuuluvaks loetakse konstruktsioonid, mille materjali niiskus vastab temperatuurile 20 °C ja õhu

suhteline niiskus on kuni 65%. Sellistel tingimustel on puitmaterjali niiskusesisaldus  $\leq 12\%$ . Kasutusklassi 2 materjali niiskus vastab temperatuurile 20 °C ja õhu suhtelisele niiskusele kuni 85%. Sel juhul on puidu niiskusesisaldus  $\leq 20\%$ . Kasutusklassi 3 materjali niiskus on suurem kasutusklassi 2 omast. Kasutusklasside 1 ja 2 korral on suurem niiskus lubatud mõnel nädalal aastas. [7, lk 38-39]

L. B. Sandberg'i, W. M. Bulleit'i ja E. H. Reid'i katsetulemustest võib välja lugeda, et ühendatavate detailide koormamise suunal on võrdlemisi väike mõju nii jääkusele kui kandevõimele. Samuti leiti katsete käigus kinnitust J. R. Church'i ja B. W. Tew väitele, et naagli puidukiudude orienteeritusel on kandevõimele väga väike efekt. Punasest tammest naaglitel oli radiaalselt koormates 4% väiksem jääkus ja 8% väiksem kandevõime kui tangentsiaalselt koormates. 45-kraadise nurga all koormatud naaglid andsid tulemused, mis jäid tangentsiaalselt ja radiaalselt koormatud naaglite tulemuste vahele. Church ja Tew leidsid oma katsetes, et kui valge tamme naagleid radiaalselt koormata on kandevõime ja jääkuse tulemused paremad. Erinevuse põhjuseks võib pidada valge ja punase tamme anatoomilist erinevust.

Voolavusteooria mudel (ingl *yield model*) põhineb liidetavate elementide muljumistugevuses. Metallnaaglite puhul on keskmiste tugevuste leidmiseks järgnevad valemid:

$$F_{e\parallel} = 77,2G; \quad (35)$$

$$F_{e\perp} = 212G^{1,45}D^{-0,5}, \text{ kus} \quad (36)$$

G on ahjukuiv erikaal;

D on naagli diameeter.

Keskmine ahjukuiva materjali erikaal Sandberg *et al* katse jaoks oli valge männi jaoks 0,39, suhkruvahtral 0,70. Kasutades valemid (35) ja (36), saame, et vastavad väärtused oleksid valge männi jaoks 30,1 MPa ja 10,7 MPa ning suhkruvahtra jaoks 54,0 MPa ja 25,1 MPa. Naagli enda tugevust saab määrata Schmidt'i ja Daniels'i poolt nominaaldiameetriga 25,4 mm valgest tammest naaglite jaoks välja töötatud empiirilise valemi järgi:

$$F_{ed} = 39,0(G_{12})^{2,04}, \text{ kus} \quad (37)$$

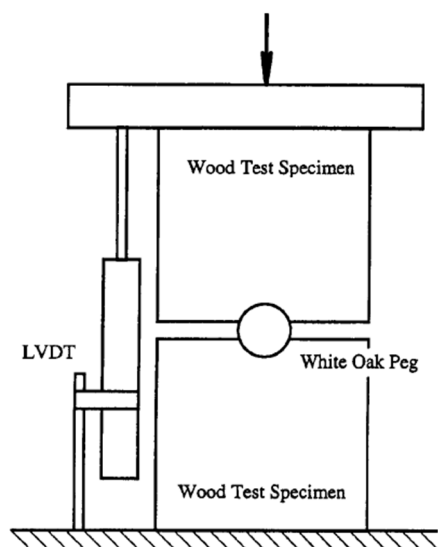
$G_{12}$  on erikaal 12-protsendilise puidu niiskussisalduse juures.

Antud katse juures oli punasest tammest naaglite  $G_{12}$  ligikaudu 0,60, mis tähendab, et naagli kandevõimeks võib arvestada 13,7 MPa. Olgu ka märgitud, et Church ja Tew tegid oma kandevõime katseid valgest tammest naaglitega, mis pesitsesid poolsilindrilises ebatsuga või punase tamme „taskutes“. Nende tulemused näitasid umbkaudu 50% vähenemist  $F_{e||}$  puhul võrreldes metallist naagliga. Church'i ja Tew'i katse aga oli üles ehitatud nii, et ilmselt sisaldas piirav deformatsioon nii naagli kui ka alusmaterjali purunemist.

Schmidt ja Daniels leidsid, et naagli löikekandevõime  $F_{ev}$  on tugevasti sõltuv tapikeele ja – pesa vahelisest vahest. Nad katsetasid valgest tammest naagleid lõtku ja naagli diameetri suhtega 1/8, 1/4, 1/2 ja 1/1 ning sobitasid katsest saadud andmed võimsuskõveraga. See kaotab aga kehtivuse väga väikese või olematu lõtku puhul ja seega ei saa seda siinsel juhul kasutada, sest naagel peab pesa sobituma täpselt. Et leida näitaja ka null-lõtku jaoks, võeti kaks lähenemist. Esiteks koostati Schmidt'i ja Daniels'i 1/8, 1/4 ja 1/2 suhtega andmete kohta parabool. See ennustas null-lõtkuga liite naagli löiketugevuseks 1,32 kordselt raamatu „Wood Handbook“ (1974) järgi leitud. Teiseks koostati suhete 1/8 ja 1/4 jaoks lineaarne graafik. See andis publitseeritud arvutumeetodiga võrreldes 1,29 kordse tulemuse. Sellest järeldati, et punase tamme löiketugevuse  $F_{ev}$  väärtus tuleb võtta 1,3 kordne ning raamatu „Wood Handbook“ järgi leitud 12,3 MPa on 16,0 MPa.

Sandberg'i *et al* katsete tulemustest võib välja lugeda, et valemite (1) – (21) järgi ennustatud purunemisviis ühtib katsest saadud andmetega. Mõnes katserühmas esines kahte tüüpi purunemisviise. Eriti keeruline oli vahet teha purunemisviisidel  $I_d$  ja  $V_d$ , sest mõlemal juhul on naagli purunemine kontsenteeritult löikepindadel ja pole aru saada, kas see tuleneb muljumiskandevõime ületamisest, tapikeele ja –seina vahelises väikesest lõtkust ning löikejõulisest purunemisest või mõlema eelmainitu kombinatsioonist. Kõigil juhtudel aga andis voolavusteoorial põhinev mudel minimaalsed kandevõimed, mis vastasid purunemisviisidele. Mudeli järgi leitud kandevõimed olid katseliselt saadud tulemustest keskmiselt 9,3% väiksemad. Kandevõime oli keskmisest valge männi ristikiudu koormatud

ja 50,8 mm külgmiste elementidega juhul 15,8% madalam ning samal juhul pikikiudu koormates 1,9% kõrgem. [1]

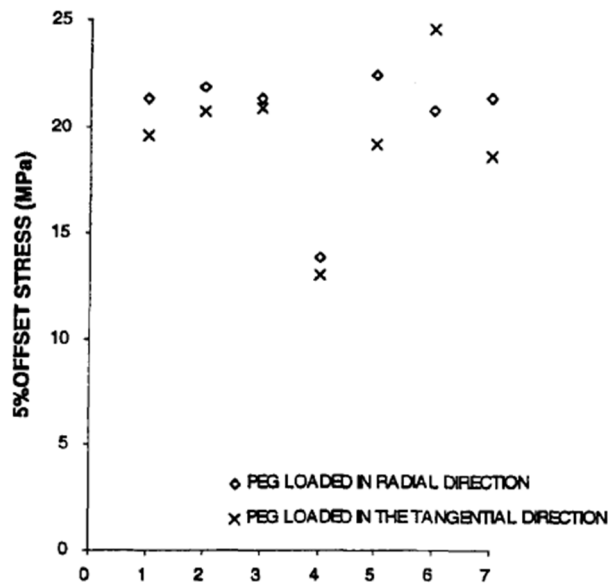


*Joonis 11 Church'i ja Tew'i puitnaaglite muljumistugevuse katseskeem*

Church ja Tew kohandasid metallnaaglite katsetamise meetodit puitnaaglitele ning uurisid muljumistugevust katseskeemi abil, mida on kujutatud Joonis 11. Selle kohaselt jäljendatakse puitnaagli olukorda liites kahe koormatud puitklotsi vahel. Alusmaterjaliks kasutati ebatsuuga ja punase tamme puitu, naaglite puhul valge tamme puitu. Uurimuse fookuseks olid naagli orienteerituse, alusmaterjali orienteerituse, puiduliigi, ava suuruse variatsiooni ning naagli diameetri mõju kandevõimele.

Valgest tammest puitnaagli jäikus on radiaalsuunas koormates peaaegu kaks korda suurem kui tangentsiaalsuunas ning see avaldab positiivset mõju ka kandevõime suurenemisele. Nendel katsekehadel, kus puitnaagel oli koormatud 45-kraadise nurga all, jäi kandevõime ootuspäraselt 0- ja 90-kraadiselt koormatud katsekehade tulemuste vahele. Mõju on küll suhteliselt väike, aga naagleid liites radiaalselt kasutades võiks oodata suuremat kandevõimet (vt Joonis 12). [13] Ka Shanks ja Walker leidsid oma katsetes, et naagleid radiaalselt koormates saadakse paremad kandevõime tulemused. [9]





*Joonis 12 Naagli orienteerituse mõju kandevõimele. O – naagel on koormatud radiaalsuunas, X – naagel on koormatud tangentsiaalsuunas.*

Alusmaterjali kiudude suuna mõju uuriti 0-, 45- ja 90-kraadise kiudude koormamise suuna juures. Punasest tammest alusmaterjali puhul ei täheldatud mõju proportsionaalsele piirpingele ega 5% diameetri kõrvalekalde meetodiga voolavuspiiri määramisel. Ebatsuuga korral olid aga mõlemad näitajad ristikiudu koormamise puhul madalamad.

Puiduliigi mõju väljaselgitamiseks kasutati erinevaid katsekehade ja naaglite kiudude koormamissuundade kombinatsioone nii punase tamme kui ebatsuuga jaoks. Kui alusmaterjali koormati ristikiudu, oli 5-protsendilise nihkega pinge oluliselt suurem punase tamme korral. Paralleelselt kiududega koormatud katsekehades olid erinevused kahe puiduliigi vahel väga väikesed.

Ava suuruse mõju testiti kasutades 2,53 cm diameetriga naagli jaoks kolme erineva suurusega ava alusmaterjalis: avad olid naagli diameetri mõõdust 1,59; 2,38 ja 3,18 mm suuremad. Naagleid koormati tangentsiaalselt ning alusmaterjali pikikiudu. Efekt ava suurusest pingetele oli väike.

Naagli diameetri mõju välja selgitamiseks katsetati kolme diameetrit: 2,54; 2,86 ja 3,18 cm. Alusmaterjali kiud olid katses koormatud ristisuunas, naaglid aga nii tangentsiaalselt kui radiaalselt. Naagli diameetri erinevus mõjutas proportsionaalset piirpinget ja 5-protsendilise

nihkega pinget väga vähe. Tangetiaalselt koormates erinevused puudusid, radiaalselt koormates oli 2,54 cm naagli proportsionaalne piirpinge teistest madalam. [13]

Shanks'i ja Walker'i katsed näitasid edukalt, et liigendite tekkimiskauguse järgi saab ennustada piirkoormust. Kui suurendada vahet 0,75 naagli diameetrilt 2 diameetrini, väheneb piirkoormus 43...54%. Seega on liite tugevuse seisukohalt oluline mõista liigendite tekkimisega seotud, mis on mõjutatud järgnevatest teguritest:

1. naagli jäikusest: kõrge Young'i mooduli ja lõikejäikuse korral tekivad hinged üksteisele lähemale;
2. naagli „istuvusest“ naagliavasse: kui ahenev naagel ei sobitu avasse just lõpuosast, võib see avas pöörduda ning tekitada suurte vahedega nelja liigendi moodustumise või puruneda kolmest kohast;
3. tapikeele „istuvusest“ tapiavasse: suurema lõtku korral moodustuvad liigendid tapis üksteisest kaugemale;
4. tapiava jäikusest: mida jäigem on tapisein, seda lähemale liigendid üksteisele moodustuvad. [9]

## 2 TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED

Restaureerimisfilosoofia seisukohast on oluline, et konstruktsioonide taastamisel kasutatakse algupäraseid materjale ja võimalusel ka töövõtteid. Seepärast on meie kultuuriloo hoidmiseks ning ehituskunsti ja –traditsiooni säilitamiseks ja arendamiseks vajalik osata puitnaaglitega liidete kandevõimeid arvutada. Varasematel aegadel on see olnud ehitusmeistrite kogemuse küsimus ning nende vastutada, kuid tänapäeval võiks olla välja töötatud vastavad arvutuseeskirjad ja standardid, mis lubaksid liiteid ratsionaalsemalt projekteerida ja annaksid teaduslikult ka kindluse konstruktsiooni vastupidavusele.

Seni puuduvad Euroopas vastavad standardid puitnaaglitega liidete kandevõimete leidmiseks. Puudub ka vastav standard, mille järgi puitnaaglist kinnitiga liitele kandevõime väljaselgitamiseks katseid läbi viia.

Eelnevast lähtuvalt on antud diplomitöö eesmärgiks püüd välja selgitada puitnaaglist liite katsetusmeetod ja kandevõime. Selleks vajalikud ülesanded on järgnevad:

1. välja töötada katsetoodika puitnaaglite kandevõime leidmiseks liites;
2. võrrelda katsetulemusi standarditega Eurokoodeks 5 (koos L. Musta magistratöö märkustega) ja TFEC 1-2012, Sandberg *et al* uurimuse valemitega ning L. Allikas'e ja V. Kulbach'i raamatus „Puitkonstruktsioonid“ toodud eeskirjadega ning välja selgitada, kas antud valemiteid võiks rakendada puitnaaglist liidete kandevõimete arvutamisel.

### 3 MATERJAL JA METOODIKA

#### 3.1 Katseteetoodika

Puitnaaglitega liidete katsetamiseks puudub vastav standard. Seepärast on käesolevas töös välja töötatud katseteetoodika, mis toetub standardile EVS-EN 26891:1999 „Puittarindid. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus- ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused“ ning varasematele sarnastele katsetustele välismaal.

Standardi EVS-EN 26891:1999 järgi tuleks pöörata tähelepanu katsekehade konditsioneerimisele nii valmistamise ajal kui ka vahetult enne katsetamist. Konditsioneerimine tuleks läbi viia nii, et katsetingimused vastaksid realistlikele tingimustele liite konstruktsioonis olemisele. Liitedetailide kuju ja mõõtmed peavad olema sellised, et katsetega oleks võimalik leida vajalikud tulemused kandevõime ja deformatsioonide kohta.

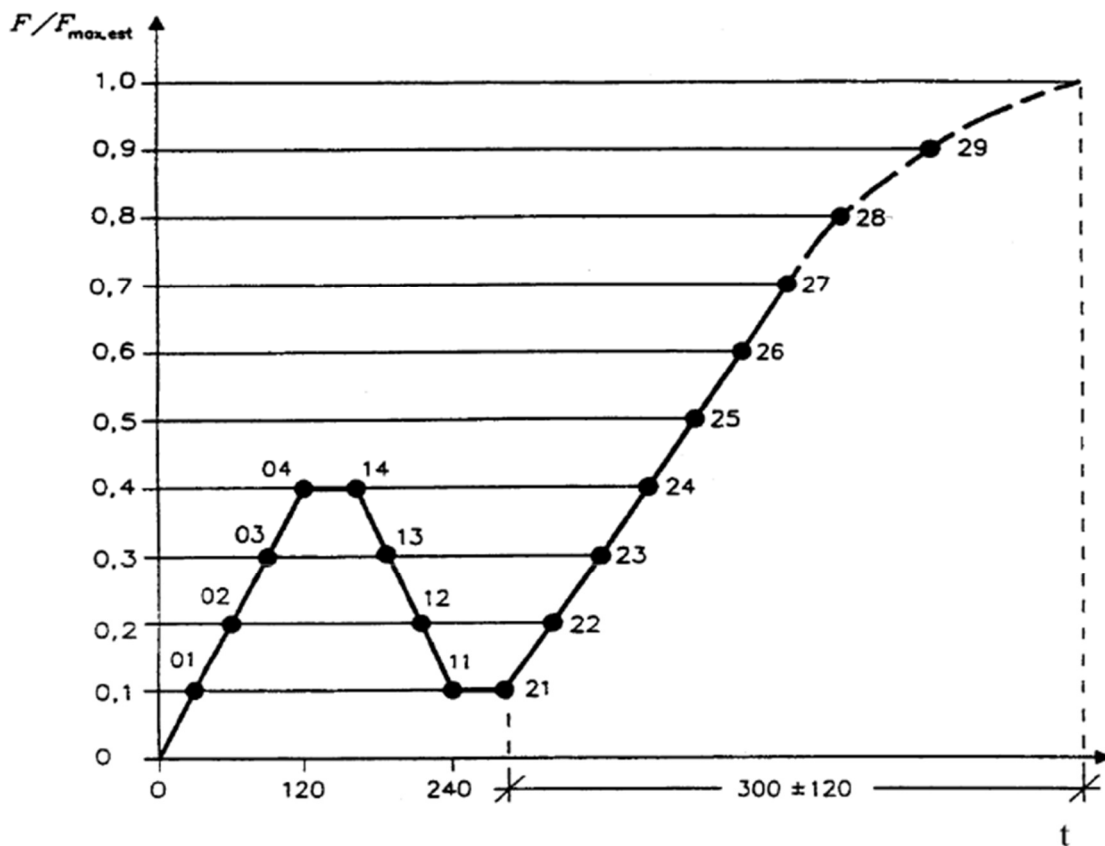
Katsemasinatele esitab EVS-EN 26891:1999 järgmised nõuded:

- a) peab koormama ja mõõtma jõudu vähemalt täpsusega  $\pm 1\%$  eeldatavast maksimaalsest jõust või paremini;
- b) peab mõõtma koormusest tulenevaid deformatsioone vähemalt täpsusega  $\pm 1\%$  või täpsemalt. Kui deformatsioonid on väiksemad kui 2 mm, siis täpsusega  $\pm 0,02$  mm.

Eeldatav maksimaalne jõud liite jaoks määratakse kindlaks kogemuste, arvutuste või esialgsete katsete põhjal.

Koormamisel peab üldjuhul järgima järgnevalt kirjeldatud skeemi (vt Joonis 13). Katsekehale rakendatakse koormust kuni 40 % eeldatavast maksimaalsest koormusest ja seda hoitakse 30 sekundit. Seejärel vähendatakse koormust kuni 10 % maksimaalsest koormusest ja hoitakse jälle 30 sekundit. Pärast seda suurendatakse koormust kuni piirkoormuse saavutamiseni või kui saavutatakse deformatsioon väärtusega 15 mm. Alla 70 % eeldatava koormuse juures olgu koormamiskiirus 20 % eeldatavast maksimaalsest koormusest minuti kohta veaga  $\pm 25\%$ . Suurema kui 70 % eeldatava koormuse juures

kohandatakse koormust nii, et piirkoormus või deformatsioon suurusega 15 mm saavutatakse 3 – 5 minuti jooksul.



*Joonis 13 Koormamisprotsess*

Iga katsekeha jaoks määratakse katse käigus kindlaks piirkoormus, mis saabub kas deformatsiooni juures suurusega 15 mm või enne seda purunemisel. Deformatsioone loetakse graafikul näidatud hetkedel. Ka tehakse kindlaks maksimaalne deformatsioon maksimaalse koormuse juures. Kui koormuse-/deformatsioonidiagrammi pole võimalik koostada, mõõdetakse deformatsioone iga 10 % koormuse tõusu järgi.

Kui katsetamise käigus tuleb välja, et maksimaalse eeldatava koormuse ja katsetes leitud maksimaalse koormuse erinevus on rohkem kui 20 %, tuleks eeldatavat maksimaalset koormust järgnevate katsete jaoks vastavalt muuta. Juba saadud maksimaalseid koormusväärtusi võib katse tulemustes ühe osana muutmata kujul arvesse võtta, kuid sellisel juhul tuleb teha vastavad muudatused deformatsioonimooduli valemite seoses uue eeldatava maksimaalse koormusega. [14]

USAs kasutatakse muljumistugevuse leidmiseks poole augu süsteemi, kus ristkülikulisele katsekehale on süvistatud raadiuse sügavune naagli vagu ning koormamine toimub metallplaadi abil. Euroopas on katsetatakse terve augu süsteemiga, et ristkülikulise katsekehasse on naagli jaoks puuritud auk. Mõlemal meetodil on omad puudused. USA meetodi korral võib suure katsekeha ja väikse diameetriga naagli puhul tekkida puidu lõhenemine naagli all. Euroopa meetodiga on see välditud, sest naaglit ümbritseb puit. Samas pole võimalik naaglit paindevabalt koormata ja sellest tulenevalt tekitab naagel puidule mitteühtlaseid muljumispingeid. [4] Kuna J. Järvpõllu lõputöö ei andnud küllaldaselt vastuseid muljumistugevuse leidmisele, tuleks naagleid katsetada ja uurida lähemalt nende käitumist liites.

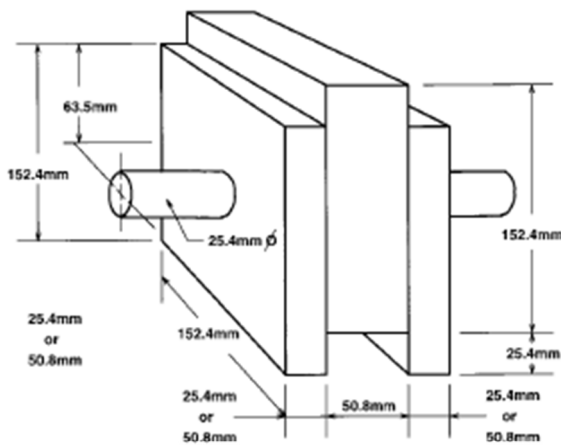
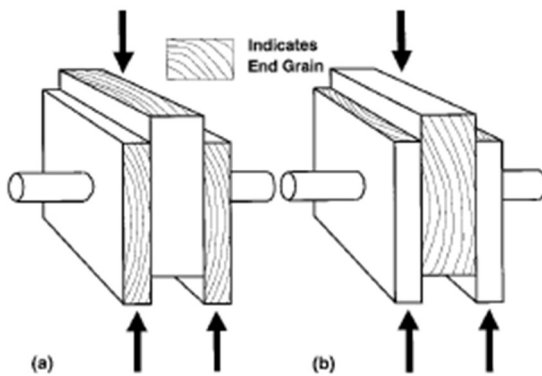


FIG. 3. Test Specimen Dimensions



Joonis 14 Sandberg'i ja Bulleit'i katseskeem

jagati omakorda ka naagli kiudude suuna järgi kolmeks: radiaalsuunaline koormus, tangentsiaalsuunaline koormus, koormus 45-kraadise nurga all.

Michigani tehnikaülikooli professorid L. Bougue Sandberg ja William M. Bulleit on läbi viinud 72 katset kahelõikelise naagliga tappliite mudeliga (vt Joonis 14). Katsetes kasutati 25,4 mm läbimõõduga punase tamme (*Quercus rubra*) naagleid, mis on Põhja-Ameerika ehituses laialdaselt levinud. N-ö tapikeele paksuseks oli 50,8 mm. Pooled detailidest tehti valgest männist (*Pinus strobus*) ja pooled suhkruvahtrast (*Acer saccharum*). Iga liigi puhul pooltel katsetest olid n-ö tapipesa detailide paksused kas 25,4 mm või 50,8 mm. Iga grupi jaoks oli ka kaks kombinatsiooni: keskmist detaili koormati paralleelselt kiusuunaga (vt joonis 14a) ja äärmisi risti kiusuunaga või vastupidi (vt joonis 14b). Kõik nimetatud alagrupid

Kõik detailid viidi tasakaaluseisundisse: niiskusesisaldus männi- ja vahtrapuidust detailidel jäi vahemikku 6 – 8 %, tammenaaglitel 8 %.

Naagliaugud valmistati puurpingil rakise abil, et kindlustada, et avad oleks koormamistasandiga kindlasti risti. Kuigi mõningaid naagleid sai pärast detailide monteerimist keerata, siis sisuliselt nõuti naagli tihedat sobivust auku. Kogu puitmaterjal oli struktuurilt sirgekiuline.

Katsed sooritati 98 kN servohüdraulilise arvutijuhitud universaalse katsemasinaga. Kasutati 25 kN jõumõõtetoosi. Aega, koormust ja nihet mõõdeti katse jooksul iga sekundi kohta. Koormamine lõpetati, kui nihke suuruseks mõõdeti 20 mm või kui sai määrata voolavuspiiri, kus koormus langes järsult 10 – 15 %. Männipuidust katsekehi koormati kiirusega 0,015 mm/s 5 minuti jooksul ja vahtrapuidust katsekehi 0,008 mm/s 6 minuti jooksul.

Vältimaks välimiste klotside laiali vajumist, paigaldati liitele Jorgenseni pitskruvi puidu jaoks. See toetus koormamislauale ja oli külgmiste detailidega vaid kontaktis neid pingutamata. Et kontrollida, ega pitskruvi kasutamine katset mõjuta, mõõdeti jõudünamomeetriga selle mõju. Kuna maksimaalne dünamomeetri mõõtmistulemus oli 0,045 kN, mis on vähem kui 0,5 % keskmisest maksimaalsest jõust, ja hõõrdetegur puitpuiduga liites on 0,60, võib väita, et hõõrdest põhjustatud viga on tühine. [1]

Jonathan Shanks ja Peter Walker töötasid katseliselt ja lõplike elementide mudelit vaadeldes välja puitnaagliga tappliite kandevõime ja jäikuse hindamise meetodi, mis on peamiselt kasutatav Ühendkuningriikide toorest tammepuidust liidete ja kuivatatud tammepuidust naaglite puhul. Varasem uurimus samade autorite poolt on kinnitanud, et Suurbritannia traditsioonilistes liidetes tekkib enamasti plastne purunemine tõmbejõule kui tapikeele rabe lõikepurunemine. Enamasti kasutatakse Suurbritannias tammest puittappe mõõduga 19 mm (0,75 tolli). Liidetavate detailide ristlõike mõõtmed jäävad nii traditsioonilistel kui ka kaasaegsetel puitsõrestikel vahemikku 200 – 250 mm. Kui tegemist on teadaolevalt suuremate jõududega, kasutatakse ka 25,4 mm (1 toll) ja suuremaid naagleid.

Kokkuleppeliselt loetakse Suurbritannias naagli mõõduks ava diameetrit, kuhu naagel lüüakse. Näiteks võib 19 mm naagli läbimõõt olla tegelikult veidi väiksem või see võib olla otsast ahenev. Tapipesa sügavus olgu suurem kui tapikeele pikkus, et kindlustada, et tapikeele tipp ei tapipesa põhjal pärast tapipesa detaili kuivamisejärgset kokku tõmbumist. Tapikeele külgpõse, tapikeele paksus ja tapipesa otsa paksus on tavaliselt umbes 2 naagli läbimõõtu. Naagli ava keskpunkt paikneb tüüpiliselt tapipesa servast 1,5 naagli läbimõõdu kaugusel. Need mõõdud on märkimisväärselt väiksemad võrreldes soovituslike normidega metallkinnitite puhul: BS EN 1996-1 ja BS 5268. Suurbritannias, Ameerika Ühendriikides kui ka Aasias on tavapärase, et tapipesasse puuritakse ava 2 – 3 mm nihkesse võrreldes tapikeelega. [9]

### 3.2 Katsematerjal

Et liites võib kandevõimet mõjutada väga palju erinevaid tegureid, võeti anutud lõputöös vaatluse alla vaid mõned. Naaglite jaoks valiti välja kaks puiduliiki ning kaks erinevat diameetrit, samuti varieeriti tappliidet imiteerivate detailide paksusi kahe erineva mõõdu vahel. Katseid tehti kokku 24 liitemudelil, iga erineva konfiguratsiooniga katsekehi oli kolm.

Liisi Musta eelnevatest katsetustest puitnaaglite kohta on teada, et võrreldes jalaka ja kuusega on saarel ja tammel suurem paindekandevõime [4] ning Joosep Järvpõllu katsetest järeldub, et saare ning tamme naaglite muljumistugevus on suurem kuuse omast. [5] Harilik tamm (*Quercus robur*) on kõva, elastne, suure tihedusega, heade tugevusomadustega, kergesti lõhestatav ning töödeldav puit, mida on traditsiooniliselt kasutatud naaglite valmistamiseks. Hariliku saare (*Fraxinus excelsior*) puit on suhteliselt kõva ja sitke, sirgekiuline, jämeda struktuuriga, lõhenemis- ja löögikindel ning hästi töödeldav. Ka saarepuitu on ajalooliselt kasutatud naaglite valmistamiseks. [15, lk 352] Sellest lähtuvalt teostati katsed saare- ja tammepuidust naaglitena. Ühendatavad detailid olid valmistatud kuusepuidust kui ühest enamlevinud puiduliigist ehitusel. Harilik kuusk (*Picea abies*) on hästi töödeldav, lõhestatav, suhteliselt kerge ning tugev. [15, lk 352]

Katse joonis on antud töö lisas 1 ja puitdetailide joonised lisas 2. Katsete mõõtmistulemused leiab antud töö lisas 3. Katsetatavate naaglite läbimõõdud olid 20 ja 25 mm ning korruga



katsetati liites ühte naaglit. Tapikeelt imiteerivad detailid on Sandberg'i ja Bulleit'i eeskujul kõrguse ja laiusega 150x150 mm ning paksusega kas 50 või 100 mm, mis on lähedasemad kohalikus ehitustraditsioonis kasutatavate mõõtudega. Tapipesa seinu imiteerivad detailid olid valmistatud mõõtmega 150x150 mm ning vastavalt paksustega kas 25 või 50 mm. Keskmise detail on võrreldes külgmistega vertikaalsuunas 25 mm nihutatud, et see ei hakkaks koormamisel survele tööle. Naagel sobitus avasse tihedalt ja seda ei olnud võimalik avas enam keerata. Lühemad naaglid said detailidesse löödud haamri abil, pikemate puhul kasutati töö lihtsustamise mõttes survemasinat. Naagli kiudude suuna mõju katsetamisel ei arvestatud, sest eelnevalt on teada, et selle mõju hinnatakse väikseks. Puitdetaile, mis esindasid tappliidet, koormati kõiki pikki kiudu.

Kõik naaglid ja ühendatavad detailid pidid olema valmistatud lõhedeta, vigadeta ja võimalikult sirgekiulisest ja oksavabast puitmaterjalist. Siiski esines 2/3 150x150x25 mm puitdetailidel kuivamispragusid, mis katsetamisel surve tõttu plaadi pooleks lõhkusid. Tegemist oli lihtsalt õhukeste ja väiksete mõõtmega detailidega, mis hakkasid enne katsetamist kuivama. Kuivamispraod ei läbinud naagli jaoks valmistatud ava, vaid jooksid selle kõrvalt. Seega võib öelda, et naagel ise oli siiski puitmaterjali poolt koormatud. Katse nr 10 puhul täheldati ka ühe külgmise puitplaadi kooldumist. Paksemate detailidega kui 25 mm nimetatud probleeme ei esinenud ning need ei purunenud katsetamise käigus ka üksikutele kuivamispragudele vaatamata. Katsetatav puitmaterjal ei olnud tugevussorteeritud.

Kõik vajalikud detailid valmistas Väimela Kutsehariduskeskuse kutseõpetaja Taavi Pumbo. Puitmaterjal lõigati vastavalt ristlõikele õigesse suurusesse ning kalibreeriti paksusmasinaga. Seejärel saeti laud või pruss vajalikku mõõtu tükkideks. Naagliavad puuriti puurpingil. Naaglid valmistati treides.

Kuusematerjal oli varem liistul välitingimustes staablis seisnud ning naaglimaterjal oli varasemalt olnud kuivades sisetingimustes. Kogu materjal seisis enne töötlemist vaakumkambris. Pärast töötlemist ja enne katsetamist hoiustati detaile ühe ööpäeva jahedas siseruumis.

Alljärgnevalt on Tabel 3 ja Tabel 4 Tabel 3 ära toodud kasutatud puitmaterjali keskmised tihedused ning niiskussisaldused ja nende varieeruvused.

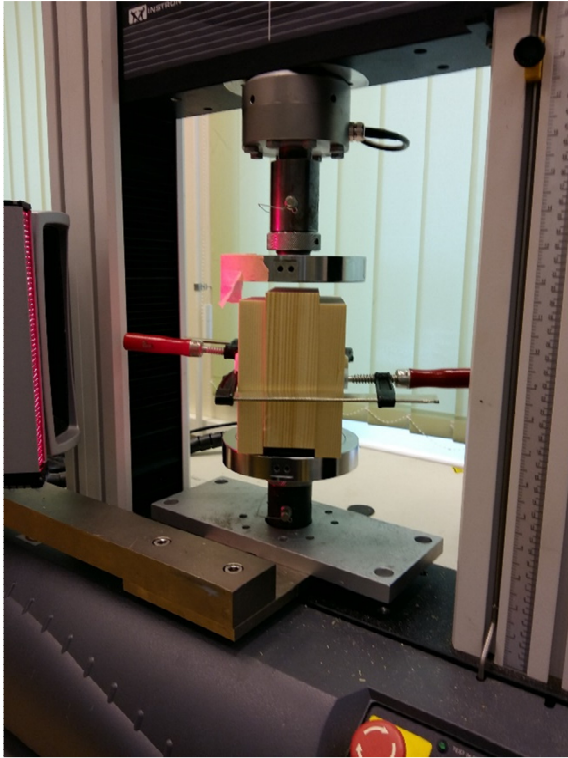
*Tabel 3 Katsematerjali tihedused*

<b>Puiduliik</b>	<b>Keskmine katsekehade tihedus [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Väikseim tihedus [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Suurim tihedus [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Keskmine katsekehade tihedus 12% niiskussisalduse juures [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Keskmine kuiv tihedus puiduliigil kirjanduse järgi [kg/m<sup>3</sup>] [7, p. 24]</b>
Saar	909,4	713,9	1466,2	912,4	680
Tamm	675,4	600,3	1023,1	681,3	720
Kuusk	480,9	411,5	537,8	444,3	460

*Tabel 4 Katsematerjali niiskussisaldused*

<b>Puiduliik</b>	<b>Keskmine niiskussisaldus [%]</b>	<b>Väikseim niiskussisaldus [%]</b>	<b>Suurim niiskussisaldus [%]</b>
Saar	11,9	7,0	14,0
Tamm	11,2	10,0	12,8
Kuusk	19,5	8,6	26,0

Katsed teostati Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maehitusinstituudi puidulaboris. Survekatsed viidi läbi aparaadiga INSTRON 3369. Enne katsetama asumist mõõdeti ja kaaluti kõik katsekehad üle. Seejärel pandi mudel kokku ning asetati tsentreeritult aparaadi jõupeade alla. Puitdetailide ümber kruviti kahele poole pitskruid, et vältida survele mudeli detailide lahknemist. Pitskruid ei olnud lõpuni pingutatud, vaid ainult mudeli kooshoidmise eesmärgil paigaldatud. Katsekehale märgiti markeriga punkt. Teine punkt paiknes aparaadi jõupea küljes ja katse käigus mõõtis infrapunakaamera nende abil deformatsioone.



*Joonis 15 Katsetamine aparaadiga  
INSTRON 3369*



*Joonis 16 Katse nr 3 detailid enne  
monteerimist*

Esialgne koormamiskiirus sai välja arvatud eeldusega, et hinnanguliselt võib alusmaterjali tugevuseks lugeda C24 ja naaglit C30. Arvutuskäik variandi jaoks, kus katsetatakse 20 mm läbimõõduga naaglit tappmudelis paksustega 25-50-25 mm ehk naaglipikkusega 120 mm on näidatud allpool (valemid allikast [5]) ning tulemused erinevate variantide jaoks on esitatud

Tabel 5. Katsetamise koormamiskiirused valiti arvutustulemustele toetudes  $F_3$  väärtuste järgi. Kuna oletatav koormamiskiirus osutus esimese katse jaoks piisavalt täpseks, s.t maksimaalne koormus saavutati 290 sekundi jooksul, kui see oli vaja saavutada 300 sekundi jooksul, ei olnud seda vaja muuta. Kuigi järgnevatel katsetel polnud maksimaalse koormuse saavutamise aeg enam ühtlane, oli katseid vähe ja parema võrdlustulemuse saamiseks koormamiskiirust pärast igat katset eraldi enam ei muudetud.

Andmed alusmaterjali kohta:

C24

$$f_{c,0,k} = 21 \text{ N/mm}^2$$

Andmed naagli kohta:

C30

$$f_{c,90,k,C} = 2,7 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,k} = 4 \text{ N/mm}^2$$

$$t_1 = 50 \text{ mm}$$

$$t_2 = 25 \text{ mm}$$

$$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

Koormuse ülevarutegur:  $\gamma_Q = 1,5$

Sisejõudude õlg:  $l = 75 \text{ mm}$

Eeldatav purustav jõud naagli nihkekandevõimest kahelõikelise liite korral:

Poolringi raskuskeskme koordinaat: 
$$z_1 = 0,21 \cdot D = 0,21 \cdot 20 = 4,2 \text{ mm} \quad (38)$$

Poolringi pindala: 
$$\frac{A_r}{2} = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot 2} = \frac{\pi \cdot 20^2}{4 \cdot 2} = 157,1 \text{ mm}^2 \quad (39)$$

Poolringi staatiline moment: 
$$S_{pool} = z_1 \cdot \frac{A_r}{2} = 4,2 \cdot 157,1 = 660 \text{ mm}^2 \quad (40)$$

Ringi inertsimoment: 
$$I_y = \frac{\pi \cdot D^4}{64} = \frac{\pi \cdot 20^4}{64} = 7854 \text{ mm}^2 \quad (41)$$

Naaglile mõjuv põikjõud: 
$$Q = \frac{f_{v,k} \cdot I_y \cdot D}{S_{pool}} = \frac{4 \cdot 7854 \cdot 20}{660} = 952 \text{ N} \quad (42)$$

Kuna liide on kahelõikeline: 
$$F_1 = \gamma_Q \cdot 2 \cdot Q = 1,5 \cdot 2 \cdot 952 = 2856 \text{ N} = 2,86 \text{ kN} \quad (43)$$

Koormus naagli muljumisest ristikiudu:

Naagli muljutava pinna pindala: 
$$A_1 = 2 \cdot t_2 \cdot D = 2 \cdot 25 \cdot 20 = 1000 \text{ mm}^2 \quad (44)$$

Naagli muljumistugevus ristikiudu: 
$$F_2 = \gamma_Q \cdot f_{c,90,k,c} \cdot A_1 = 1,5 \cdot 2,7 \cdot 1000 = 4050 \text{ N} \\ = 4,05 \text{ kN} \quad (45)$$

Koormus alusmaterjali muljumistugevusest pikikiudu:

Alusmaterjali muljutava pinna pindala: 
$$A_2 = t_1 \cdot D = 50 \cdot 20 = 1000 \text{ mm}^2 \quad (46)$$

Alusmaterjali muljumistugevus pikikiudu: 
$$F_3 = \gamma_Q \cdot \frac{f_{c,0,k} \cdot A_2}{2} = 1,5 \cdot \frac{21 \cdot 1000}{2} = 15750 \text{ N} \\ = 15,75 \text{ kN} \quad (47)$$

*Tabel 5 Eeldatavad maksimaalsed koormused*

<b>Naagli läbimõõt – pikkus</b>	<b>F<sub>1</sub> [kN]</b>	<b>F<sub>2</sub> [kN]</b>	<b>F<sub>3</sub> [kN]</b>
20-120	2,86	4,05	15,75
25-120	4,46	8,10	19,69
20-220	2,86	5,06	31,5
25-220	4,46	10,13	39,4

Pärast katsetamist lammutati katsemudel lahti ja mõõdeti kõigil detailidel puidu niiskussisaldus.

Katsetulemusi võrreldi standardtite Eurokoodeks 5 ja TFEC 1-2012 ning Sandberg *et al* uurimuse valemitega saadud arvutuslike tulemustega ning hinnati nende sobivust kasutuselevõtuks. Tammenaaglite puhul sai võrdlusi sooritada ka L. Allikas'e ja V. Kulbach'i raamatus „Puitkonstruktsioonid“ toodud eeskirjade järgi.

## 4. TULEMUSED

### 4.1 Katsetulemused

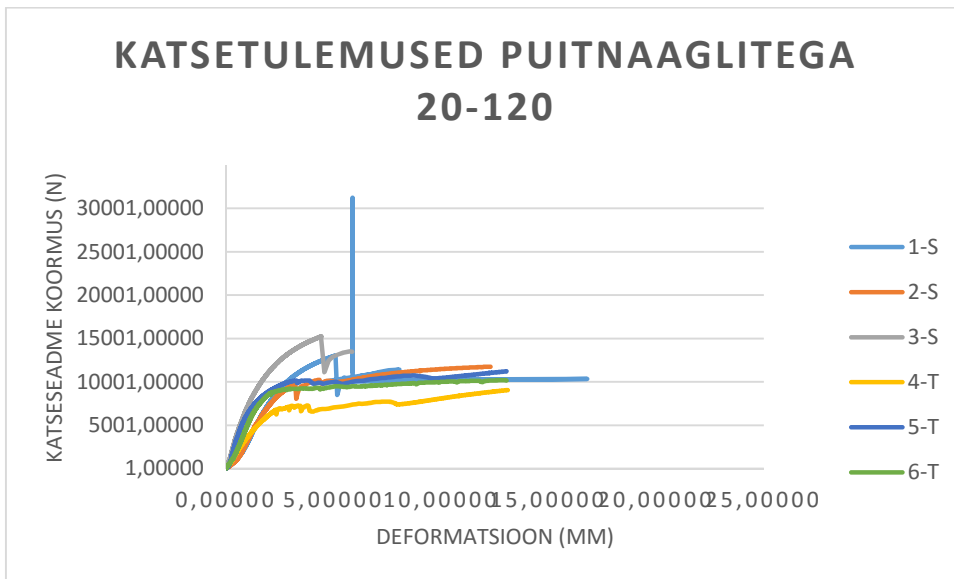
Kõik katsed viidi läbi liitemudeli purunemiseni, kus määravaks sai naagli purunemine või 25 mm paksuste puitdetailide puhul nende lõhenemine. Naaglitel oli muljumisjäljed ja paindest tingitud praod (vt Joonis 17).



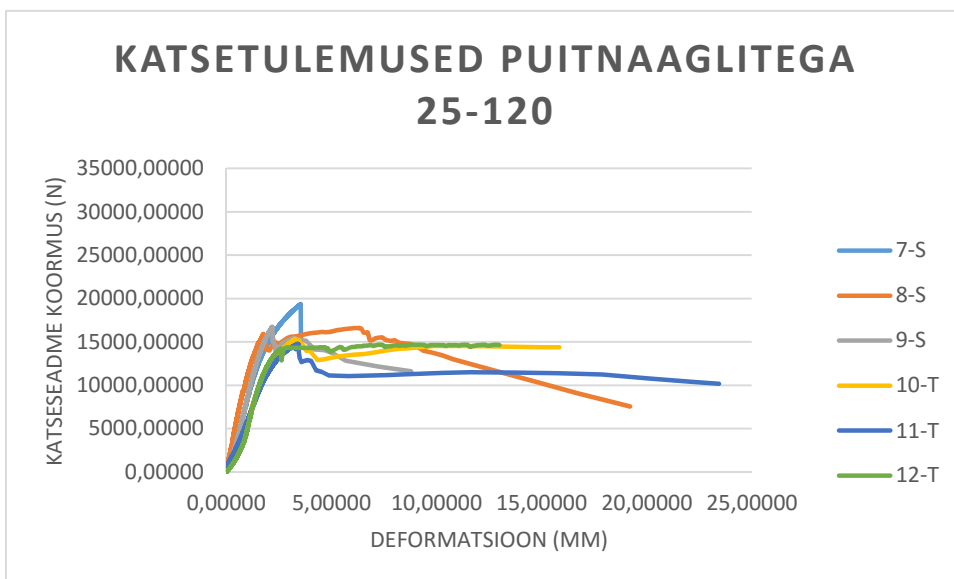
*Joonis 17 Naaglite purunemispildid.*

Järgnevalt on ära toodud katsetulemusete koormus-deformatsiooni graafikud (vt Joonis 18 kuni Joonis 21). Siin ja edaspidi on kasutusel järgnev katseskeemi märkimise süsteem, kus S-täht tähistab saarepuidust naaglit, T-täht tammepuitu ning koodi XX-XXX esimene osa näitab puitnaagli diameetrit (20 ja 25 mm) ja teine osa puitnaagli pikkust (120 mm puitdetailide paksuste 25-50-25 mm puhul ja 220 mm puitdetailide paksuste 50-100-50 mm puhul). Katseid tehti kokku 24 ning nii on ka järjekorranumbreid 24. Tehnilistel põhjustel

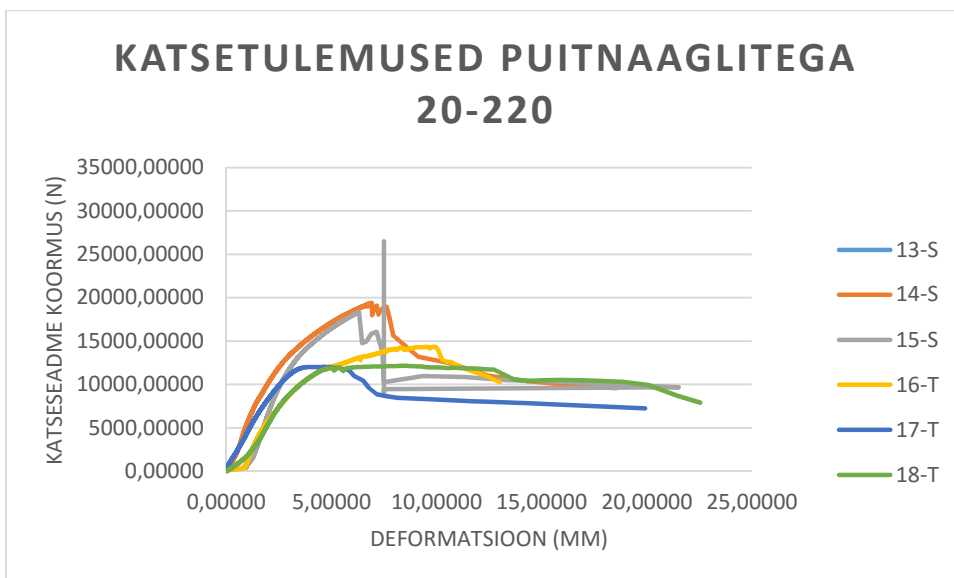
on katsemasina arvuti poolikult salvestanud katse nr 13 tulemused, mistõttu on selle katse tulemused vaatlusest kõrvale jäetud.



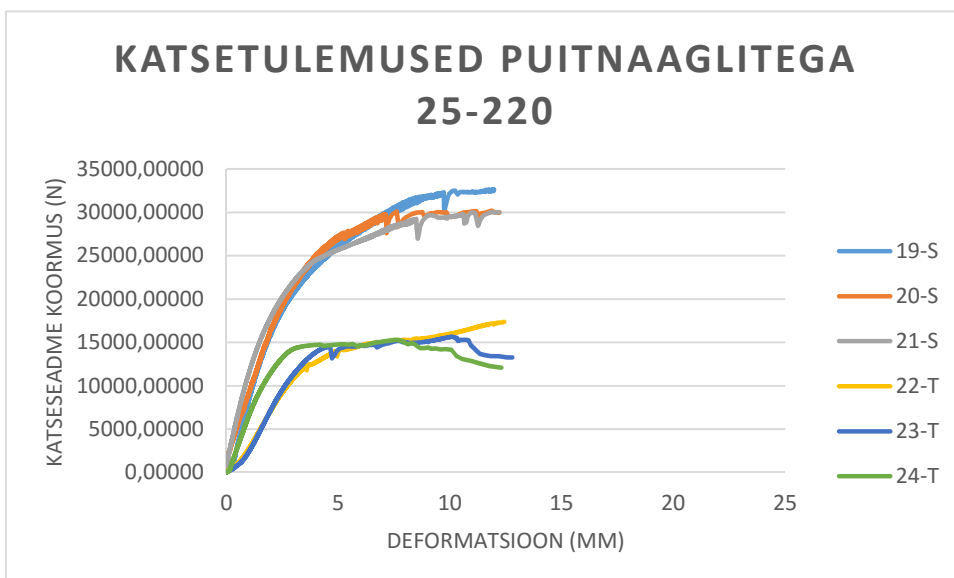
**Joonis 18** Katsetulemused 20 mm läbimõõdu ja 120 mm pikkuste puitnaaglitega



**Joonis 19** Katsetulemused 25 mm läbimõõdu ja 120 mm pikkuste puitnaaglitega



**Joonis 20** Katsetulemused 20 mm läbimõõdu ja 220 mm pikkuste puitnaaglitega



**Joonis 21** Katsetulemused 25 mm läbimõõdu ja 220 mm pikkuste puitnaaglitega

Nagu graafikuid (vt Joonis 18 kuni Joonis 21) vaadates selgub, näitab saarepuit ootuspäraselt paremaid tugevusomadusi võrreldes tammega. Samuti tuleb neilt välja loogiline seos, et suurema puitnaagli diameetri korral on ka kandevõime suurem.

Et tulemused katsete kohta oleks paremini võrreldavad, arvestati katsete puhul jõudu, mis tekitas mudelile 5 mm deformatsiooni. Liisi Musta magistritöös selgus standardite



võrdlemisel, et puitnaaglite voolavuspiirile vastava paindemomendi leidmiseks tuleb kasutada paindetugevuse ja elastse vastupanumomendi korrutist.

#### 4.2 Arvutuslikud kandevõimed Eurokoodeks 5 järgi

Järgnevalt on toodud näide 20 mm diameetri ja 120 mm pikkuse tammenaagliga liitemudeli kandevõime arvutamisest. Arvutustes kasutati mõõtmistel saadud aritmeetiliselt keskmisi väärtusi.

Andmed:

$$d = 20,1 \text{ mm}$$

$$t_1 = 25,0 \text{ mm}$$

$$t_2 = 50,2 \text{ mm}$$

$$\rho_k = 444,3 \text{ kg/m}^3$$

$$f_{m,tamm} = 97,7 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{m,saar} = 105,0 \text{ N/mm}^2$$

Paindetugevuse väärtused  $f_{m,tamm}$  ja  $f_{m,saar}$  on saadud raamatust „Puiduteadus“. [16]

Lahenduskäik:

Pikikiudu norm-  
muljumistugevus:

$$f_{h,1,k} = f_{h,2,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 20,1) \cdot 444,3 = 29,1 \text{ N/mm}^2 \quad (24)$$

Elementide  
muljumistugevuste  
suhe:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = \frac{29,1}{29,1} = 1 \quad (6)$$

Elastse staadiumi  
paidemoment:

$$M_{el} = \sigma_{max,el} \frac{\pi \cdot d^3}{32} = f_{m,saar} \frac{\pi \cdot d^3}{32} = 97,7 \cdot \frac{\pi \cdot 20,1^3}{32} = 77851 \text{ Nmm} \quad (22)$$

Purunemisviis (g):

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d = 29,1 \cdot 25,0 \cdot 20,1 = 14628 \text{ N} = 14,63 \text{ kN} \quad (8)$$

Purunemisviis (h):

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d = 0,5 \cdot 29,1 \cdot 50,2 \cdot 20,1 = 14676 \text{ N} = 14,68 \text{ kN} \quad (11)$$

Purunemisviis (j):

$$\begin{aligned}
 F_{v,Rk} &= 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] \\
 &= 1,05 \frac{29,1 \cdot 25,0 \cdot 20,1}{2 + 1} \left[ \sqrt{2 \cdot 1(1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 77851}{29,1 \cdot 20,1 \cdot 25,0^2}} \right. \\
 &\quad \left. - 1 \right] = 7988 \text{ N} = 7,99 \text{ kN}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Purunemisviis (k):

$$\begin{aligned}
 F_{v,Rk} &= 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \\
 &= 1,15 \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \sqrt{2 \cdot 77851 \cdot 29,1 \cdot 20,1} = 10976 \text{ N} \\
 &= 10,98 \text{ kN}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Kandevõimele saab otsustavaks jõud 7,99 kN ning purunemisviis (j).

Järgnevalt on Tabel 6 esitatud arvutustulemused ka teiste katsete kohta. Helepunastest lahtrites on antud liite kandevõime arvutuse minimaalseim tulemus ja määravaks saav jõud.

**Tabel 6** Arvutuslikud kandevõimed Eurokoodeks 5 järgi

Katse	d [mm]	t <sub>1</sub> [mm]	t <sub>2</sub> [mm]	f <sub>h,1,k</sub> =f <sub>h,2,k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>el</sub> [Nmm]	g [N]	h [N]	j [N]	k [N]
S20-120	20,3	25,2	50,0	29,0	86190,0	14834,4	14736,2	8317,6	11592,1
T20-120	20,1	25,0	50,2	29,1	77850,7	14627,6	14676,4	7987,7	10976,4
S25-120	25,3	25,2	50,2	27,2	167512,0	17343,4	17286,0	11736,7	17473,9
T25-120	25,5	25,1	50,0	27,2	158340,0	17345,9	17288,3	11490,0	17018,2
S20-220	20,5	50,0	99,8	29,0	88762,7	29688,0	29613,8	12178,0	11806,8
T20-220	20,2	49,4	99,5	29,1	78627,9	28985,6	29181,1	11752,0	11044,7
S25-220	25,5	50,1	100,0	27,1	170840,0	34664,1	34606,4	15482,8	17684,8
T25-220	25,2	50,1	99,3	27,3	153417,8	34394,2	34108,1	15064,2	16693,5

Liisi Musta magistritöö USA ja Euroopa standardite valemite analüüsist selgus, et purunemisviisi (j) puhul pole Eurokoodeks 5 valemis puitnaagli puhul vaja kasutada kordajat

1,05. Samuti tõdeti, et USA puitnaagleid käsitlev standard TFEC 1-2012 ei kajasta neljandat purunemisviisi, sest seda puitnaaglite puhul väidetavalt ei esine.

Järgnevalt on Liisi Musta magistritööle toetudes lisaks ära toodud purunemisviisi (j) arvutus kordajata 1,05. Muud andmed ja purunemisviisi tulemused jäid samaks eelneva juhuga.

Purunemisviis (j):

$$F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$$

$$= \frac{29,1 \cdot 25,0 \cdot 20,1}{2 + 1} \left[ \sqrt{2 \cdot 1(1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 77851}{29,1 \cdot 20,1 \cdot 25,0^2}} - 1 \right]$$

$$= 7607 \text{ N} = 7,61 \text{ kN}$$

Ka sellisel juhul saab määravaks purunemisviis (j) ja jõud 7,61 kN. Teiste naaglite arvutuslikud tulemused leiab alljärgnevast Tabel 7. Helepunastest lahtrites on antud liite kandevõime arvutuse minimaalseim tulemus ja määravaks saav jõud.

**Tabel 7** Arvutuslikud kandevõimed Eurokoodeks 5 järgi arvestades L. Musta lõputööd

Katse	d [mm]	t <sub>1</sub> [mm]	t <sub>2</sub> [mm]	f <sub>h,1,k</sub> = f <sub>h,2,k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>el</sub> [Nmm]	g [N]	h [N]	j [N]
S20-120	20,3	25,2	50,0	29,0	86190,0	14834,4	14736,2	7921,6
T20-120	20,1	25,0	50,2	29,1	77850,7	14627,6	14676,4	7607,3
S25-120	25,3	25,2	50,2	27,2	167512,0	17343,4	17286,0	11177,8
T25-120	25,5	25,1	50,0	27,2	158340,0	17345,9	17288,3	10942,9
S20-220	20,5	50,0	99,8	29,0	88762,7	29688,0	29613,8	11598,1
T20-220	20,2	49,4	99,5	29,1	78627,9	28985,6	29181,1	11192,4
S25-220	25,5	50,1	100,0	27,1	170840,0	34664,1	34606,4	14745,5
T25-220	25,2	50,1	99,3	27,3	153417,8	34394,2	34108,1	14346,9

### 4.3 Arvutuslikud kandevõimed TFEC 1-2012 järgi

Toodud näide on 20 mm diameetri ja 120 mm pikkuse tammenaagliga liitemudeli kandevõime arvutamisest. Arvutustes kasutati mõõtmistel saadud aritmeetiliselt keskmisi väärtusi.

Andmed:

$$\begin{aligned}D &= 20,1 \text{ mm} = 0,791 \text{ in} \\l_s &= 25,0 \text{ mm} = 0,984 \text{ in} \\l_m &= 50,2 \text{ mm} = 1,975 \text{ in} \\G_{p,saar} &= 0,748 \\G_{p,tamm} &= 0,569 \\G_t &= 0,387 \\ \theta &= 0^\circ\end{aligned}$$

Lahenduskäik:

Pikikiudu norm-  
muljumistugevus:

$$F_{es} = F_{em} = F_{e\parallel} = 4770 \cdot G_{p,tamm}^{1,32} = 4770 \cdot 0,569^{1,32} = 2231 \text{ psi} \quad (27)$$

Tegur  $K_\theta$ :

$$K_\theta = 1 + \frac{\theta}{360} = 1 + \frac{0}{360} = 1 \quad (2)$$

Tapikeele ja -pesa  
norm-  
muljumistugevuste  
suhe:

$$R_e = \frac{F_{em}}{F_{es}} = \frac{2231}{2231} = 1 \quad (4)$$

Naagli  
paindetugevus:

$$F_{yb} = 24850 \cdot G_{p,tamm}^{1,13} = 24850 \cdot 0,569^{1,13} = 13132 \text{ psi} \quad (23)$$

Abisuurus  $k_3$ :

$$\begin{aligned}k_3 &= -1 + \sqrt{\frac{2 \cdot (1 + R_e)}{R_e} + \frac{2 \cdot F_{yb} \cdot (2 + R_e) \cdot D^2}{3 \cdot F_{em} \cdot l_s^2}} \\ &= -1 + \sqrt{\frac{2 \cdot (1 + 1)}{1} + \frac{2 \cdot 13132 \cdot (2 + 1) \cdot 0,791^2}{3 \cdot 2231 \cdot 0,984^2}} \\ &= 2,407\end{aligned} \quad (3)$$

Naagli  
lõikekandevõime:

$$F_{yv} = 4850 \cdot G_{p,tamm} \cdot G_t^{0,75} = 4850 \cdot 0,569 \cdot 0,387^{0,75} = 1352 \text{ psi} \quad (5)$$

Purunemisviis  $I_m$ :

$$\begin{aligned}Z_{I_m} &= \frac{D \cdot l_m \cdot F_{em}}{4,0 \cdot K_\theta} = \frac{0,791 \cdot 1,975 \cdot 2231}{4,0 \cdot 1} = 872 \text{ lb} = 3878 \text{ N} \\ &= 3,88 \text{ kN}\end{aligned} \quad (1)$$

Purunemisviis  $I_s$ :

$$\begin{aligned}Z_{I_s} &= \frac{2 \cdot D \cdot l_s \cdot F_{es}}{4,0 \cdot K_\theta} = \frac{2 \cdot 0,791 \cdot 0,984 \cdot 2231}{4,0 \cdot 1} = 869 \text{ lb} = 3865 \text{ N} \\ &= 3,87 \text{ kN}\end{aligned} \quad (9)$$

Purunemisviis III<sub>s</sub>: 
$$Z_{III_s} = \frac{2 \cdot k_3 \cdot D \cdot l_s \cdot F_{em}}{(2 + R_e) \cdot 3,2 \cdot K_\theta} = \frac{2 \cdot 2,407 \cdot 0,791 \cdot 0,984 \cdot 2231}{(2 + 1) \cdot 3,2 \cdot 1} = 871 \text{ lb} = 3877 \text{ N} = 3,88 \text{ kN}$$
 (12)

Purunemisviis V<sub>d</sub>: 
$$Z_{V_d} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot F_{yv}}{2 \cdot 3,5 \cdot K_\theta} = \frac{\pi \cdot 0,791^2 \cdot 1352}{2 \cdot 3,5 \cdot 1} = 380 \text{ lb} = 1690 \text{ N} = 1,69 \text{ kN}$$
 (20)

Kandevõime määrab vähim tulemus ja seega saab otsustavaks purunemisviis V<sub>d</sub> ning jõud 1,69 kN. Tabel 8 on antud teiste katsegruppide arvutuslikud kandevõimed. Helepunastest lahtrites on antud liite kandevõime arvutuse minimaalseim tulemus ja määravaks saav jõud.

**Tabel 8** Arvutuslikud kandevõimed TFEC 1-2012 järgi

Katse	D [in]	I <sub>m</sub> [in]	I <sub>s</sub> [in]	F <sub>cs</sub> =F <sub>em</sub> [psi]	F <sub>yb</sub> [psi]	k <sub>3</sub>	F <sub>yv</sub> [psi]	I <sub>m</sub> [N]	I <sub>s</sub> [N]	III <sub>s</sub> [N]	V <sub>d</sub> [N]
S20-120	0,799	1,969	0,991	3205,3	17907,2	2,357	1779,5	5607,9	5645,3	5544,2	2268,0
T20-120	0,791	1,975	0,984	2231,1	13131,5	2,407	1352,3	3877,8	3864,9	3876,5	1689,7
S25-120	0,997	1,975	0,991	3205,3	17907,2	2,914	1779,5	7021,6	7045,0	8554,7	3532,1
T25-120	1,003	1,969	0,988	2231,1	13131,5	3,017	1352,3	4896,8	4913,1	6175,6	2712,5
S20-220	0,807	3,927	1,969	3205,3	17907,2	1,425	1779,5	11297,9	11326,2	6722,6	2312,9
T20-220	0,794	3,917	1,946	2231,1	13131,5	1,441	1352,3	7716,6	7664,9	4603,4	1701,0
S25-220	1,004	3,937	1,972	3205,3	17907,2	1,626	1779,5	14088,7	14112,2	9561,8	3578,7
T25-220	0,992	3,911	1,972	2231,1	13131,5	1,642	1352,3	9626,4	9707,2	6641,4	2656,0

#### 4.4 Arvutuslikud kandevõimed Sandberg *et al* järgi

Järgnevalt on toodud näide 20 mm diameetri ja 120 mm pikkuse tammenaagliga liitemudeli kandevõime arvutamisest. Arvutustes kasutati mõõtmistel saadud aritmeetiliselt keskmisi väärtusi.

##### Andmed:

$$D = 20,1 \text{ mm} = 0,791 \text{ in}$$

$$l_s = 25,0 \text{ mm} = 0,984 \text{ in}$$

$$l_m = 50,2 \text{ mm} = 1,975 \text{ in}$$

$$F_{es} = 2231 \text{ psi (vt ptk 1.11 Arvutuslikud kandevõimed TFEC 1-2012 järgi)}$$

$$F_{em} = 2231 \text{ psi (vt ptk 1.11 Arvutuslikud kandevõimed TFEC 1-2012 järgi)}$$

$$F_{yb} = 13132 \text{ psi (vt ptk 1.11 Arvutuslikud kandevõimed TFEC 1-2012 järgi)}$$

$$G_{12,saar} = 0,850$$

$$G_{12,tamm} = 0,645$$

$$G_{p,saar} = 0,748$$

$$G_{p,tamm} = 0,569$$

$$G_t = 0,387$$

Lahenduskäik:

Abitegur Q:

$$Q = \frac{2(F_{es} + F_{em})}{F_{em}} + \frac{2F_{yb}(2F_{es} + F_{em})D^2}{3F_{em}F_{es}l_s^2}$$

$$= \frac{2(2231 + 2231)}{2231} + \frac{2 \cdot 13132 \cdot (2 \cdot 2231 + 2231) \cdot 0,791^2}{3 \cdot 2231 \cdot 2231 \cdot 0,984^2} = 11,61 \quad (14)$$

Naagli

muljumistugevus:  $F_{ed} = 39,0 \cdot G_{12,tamm}^{2,04} = 39,0 \cdot 0,645^{2,04} = 15,97 \text{ MPa} = 2316 \text{ psi} \quad (29)$

Naagli ristikiudu  
muljumistugevus:

$$F_{e\perp} = F_{ev} = 4900 \cdot G_{p,tamm} \cdot G_t^{0,50} = 4900 \cdot 0,748 \cdot 0,387^{0,50} = 1733 \text{ psi} \quad (28)$$

Purunemisviis I<sub>m</sub>:

$$Z_{I_m} = D l_m F_{em} = 0,791 \cdot 1,975 \cdot 2231 = 3487 \text{ lb} = 15511 \text{ N} = 15,51 \text{ kN} \quad (7)$$

Purunemisviis I<sub>s</sub>:

$$Z_{I_s} = 2D l_s F_{es} = 2 \cdot 0,791 \cdot 0,984 \cdot 2231 = 3475 \text{ lb} = 15459 \text{ N} = 15,50 \text{ kN} \quad (10)$$

Purunemisviis  
III<sub>s</sub>:

$$Z_{III_s} = \frac{2D l_s F_{em} F_{es}}{2F_{es} + F_{em}} (\sqrt{Q} - 1)$$

$$= \frac{2 \cdot 0,791 \cdot 0,984 \cdot 2231 \cdot 2231}{2 \cdot 2231 + 2231} (\sqrt{11,61} - 1)$$

$$= 2789 \text{ lb} = 12405 \text{ N} = 12,41 \text{ kN} \quad (13)$$

Purunemisviis  
IV<sub>d</sub>:

$$Z_{IV_d} = 2D^2 \sqrt{\frac{2F_{yb}F_{em}F_{es}}{3(F_{es} + F_{em})}} = 2 \cdot 0,791^2 \sqrt{\frac{2 \cdot 13132 \cdot 2231 \cdot 2231}{3(2231 + 2231)}}$$

$$= 3913 \text{ lb} = 17410 \text{ N} = 17,41 \text{ kN} \quad (17)$$

Purunemisviis I<sub>d</sub>:

$$Z_{I_d} = \min \begin{cases} D \cdot l_m \cdot F_{ed} = 0,791 \cdot 1,975 \cdot 2316 = 3619 \text{ lb} = 16100 \text{ N} \\ 2 \cdot D \cdot l_s \cdot F_{ed} = 2 \cdot 0,791 \cdot 0,984 \cdot 2316 = 3607 \text{ lb} = 16046 \text{ N} \end{cases} \quad (19)$$

$$\rightarrow 16,1 \text{ kN}$$

Purunemisviis

$$V_d: Z_{V_d} = 2 \frac{\pi D^2}{4} F_{ev} = 2 \frac{\pi \cdot 0,791^2}{4} \cdot 1733 = 1703 \text{ lb} = 7577 \text{ N} = 7,58 \text{ kN} \quad (21)$$

Otsustavaks osutub purunemisviis  $V_d$  ja arvutuslik kandevõime on 7,58 kN. Ülejäänud arvutustulemused on esitatud Tabel 9. Helepunastes lahtrites on kandevõimele otsustavaks osutunud jõud.

**Tabel 9** Arvutuslikud kandevõimed Sandberg et al järgi

Katse	Q	F <sub>ed</sub> [psi]	F <sub>ev</sub> [psi]	I <sub>m</sub> [N]	I <sub>s</sub> [N]	III <sub>s</sub> [N]	IV [N]	I <sub>d</sub> [N]	I <sub>d</sub> [N]	I <sub>d,min</sub> [N]	V <sub>d</sub> [N]
S20-120	11,27	4059	2280	22431,5	22581,0	17741,6	24855,9	28409,0	28598,4	28409,0	10170,2
T20-120	11,61	2316	1733	15511,0	15459,5	12405,0	17409,8	16099,6	16046,1	16046,1	7577,4
S25-120	15,32	4059	2280	28086,6	28179,9	27375,0	38710,0	35571,2	35689,3	35571,2	15838,9
T25-120	16,13	2316	1733	19587,2	19652,4	19762,1	27947,7	20330,4	20398,1	20330,4	12163,8
S20-220	5,88	4059	2280	45191,7	45304,9	21512,4	25348,1	57234,4	57377,9	57234,4	10371,6
T20-220	5,96	2316	1733	30866,4	30659,6	14731,0	17525,5	32037,6	31822,9	31822,9	7627,7
S25-220	6,90	4059	2280	56354,9	56448,8	30597,6	39221,0	71372,5	71491,4	71372,5	16048,0
T25-220	6,98	2316	1733	38505,7	38828,7	21252,4	27365,4	39966,7	40302,0	39966,7	11910,4

#### 4.5 Arvutuslikud kandevõimed tammenaaglite arvutusjuhiste järgi

Järgnevalt on toodud näide 20 mm diameetri ja 120 mm pikkuse tammenaagliga liitemudeli kandevõime arvutamisest. Arvutustes kasutati mõõtmistel saadud aritmeetiliselt keskmisi väärtusi. Valemid on võetud tabelist 10.

Andmed:

$$d = 2,01 \text{ cm}$$

$$a = 2,50 \text{ cm}$$

$$c = 5,02 \text{ cm}$$

Lahenduskäik:

Puidu muljumine

keskmistes

$$2 \cdot 30 \cdot c \cdot d = 2 \cdot 30 \cdot 5,02 \cdot 2,01 = 605 \text{ kg} = 5937 \text{ N} = 5,94 \text{ kN}$$

elementides:

Puidu muljumine  
äärmistes  
elementides:

$$2 \cdot 50 \cdot a \cdot d = 2 \cdot 50 \cdot 2,50 \cdot 2,01 = 503 \text{ kg} = 4928 \text{ N} = 4,93 \text{ kN}$$

Naagli paine  
kinnituspikkuse  
järgi:

$$2(45d^2 + 2a^2) = 2(45 \cdot 2,01^2 + 2 \cdot 2,50^2) = 389 \text{ kg} = 3811 \text{ N} = 3,81 \text{ kN}$$

Naagli maksimaalne  
paine:

$$2 \cdot 65d^2 = 2 \cdot 65 \cdot 2,01^2 = 525 \text{ kg} = 5151 \text{ N} = 5,15 \text{ kN}$$

Tammenaaglite juhiste järgi saab liite kandevõimele määravaks naagli paine kinnituspikkuse järgi ja jõud 3,81 kN. Tabel 11 annab tulemused ka teiste katsegruppide jaoks. Helepunastes lahtrites on koormused, mis saavad liite kandevõimele määravaks.

*Tabel 11 Arvutuslikud kandevõimed tammenaaglite arvutusjuhiste järgi*

Katse	d [cm]	a [cm]	c [cm]	Puidu muljumine keskmistes elementides [N]	Puidu muljumine äärmistes elementides [N]	Naagli paine kinnituspikkuse järgi [N]	Naagli maksimaalne paine [N]
T20-120	2,01	2,50	5,02	5937	4928	3811	5151
T25-120	2,55	2,51	5,00	7502	6277	5986	8290
T20-220	2,01	4,94	9,95	11768	9737	4523	5151
T25-220	2,52	5,01	9,93	14724	12381	6589	8096



## 5. ARUTELU

Tulemusi analüüsid (vt Tabel 12, Tabel 13, Tabel 14) saab nentida, et tegelikult annavad kõigi standardite ja eeskirjade arvutusvalemid liite kandevõime varu kasuks. Vaid tammepuidust 25 mm diameetriga ja 220 mm pikkuse naagliga katse korral ületas Eurokoodeks 5 arvutuslik kandevõime tegelikku katselist kandevõimet. Kui vaadata standardeid eraldi, annavad reaalsele olukorrale kõige lähedasema ja väikseima kõikumisega tulemuse just Eurokoodeks 5 metallnaaglitele mõeldud valemid tammepuidust naaglite jaoks. Üleüldiselt on kindlaimaks lahendusviisiks siiski Sandberg *et al* uuringus kajastatud valemid.

Eurokoodeks 5 puhul tuleks võrrelda arvutuslike ja katselisi tulemusi puiduliikide kaupa, sest tamme ja saare puhul on selgelt näha erinevus arvutuslike ja katseliste tulemuste omavahelises kokkulangevuses. Kaheksast katsegrupist kuue puhul sai määravaks purunemisviis (j); nii saare- kui ka tammenaaglite puhul diameetriga 20 mm ja pikkusega 220 mm sai otsustavaks aga purunemisviis (k).

Saarepuidust naaglite arvutuslikud tulemused erinesid absoluutväärtuste poolest katselistest keskmiselt 32,6 %. Suurim erinevus tulemustes saarepuidust naaglitega oli 25 mm diameetriga ja 220 mm pikkusega naaglite puhul, kus see oli 41,2 % kandevõime varu kasuks. Keskmisest tulemusest erines see 8,6 % võrra. Väikseim seevastu 25 mm diameetriga ja 120 mm pikkuste saarenaaglite puhul, kus arvutuslik kandevõime ületas katselist 29,0 % ja keskmisest tulemusest oli see 3,6 % väiksem.

Tammepuidust naaglite arvutuslikud ja katselised tulemused Eurokoodeks 5 järgi olid antud töös teineteisele kõige lähedasemad. Keskmiselt erinesid absoluutväärtused vaid 8,2 %. Maksimaalne erinevus katseliste ja arvutuslike tulemuste vahel tuli välja diameetriga 25 mm ja pikkusega 120 mm naaglite puhul, kus see oli 9,6 % kandevõime kasuks. Keskmisest on erinevus vaid 1,4 %. Minimaalne erinevus tekkis 25 mm ja 220 mm pikkuste tammenaaglite juures, kus kandevõime jäi 6,4 % varu kahjuks. Absoluutväärtusena võetuna on see keskmisest erinevusprotsendist 1,8 % võrra väiksem.

Kui võtta arvesse Liisi Musta magistritöö tulemused valemite analüüsi osas, siis on kõigi katsetulemuste juures määravaks purunemisviis (j) ning erinevused katseliste ja arvutuslike tulemuste vahel suurenevad mõnevõrra varu kasuks. Nii on saarenaaglite keskmine

arvutuslike ja katseliste tulemuste erinevus 35,3 %; suurim seejuures 44,0 % ja vähim 31,0 %. Tammenaaglite juures on samad näitajad keskmiselt 8,8 % ning suurim ja vähim erinevus katseliste ja arvutuslike tulemuste juures 13,9 % kandevõime varu kasuks ning 1,3 % varu kahjuks.

TFEC 1-2012 on spetsiaalselt puitnaaglite arvutamiseks välja töötatud USA standard. Selle järgi on arvutuslikud tulemused küll kõige ühtlasemad, kuid ka väga tugevalt ja ebaratsionaalselt varu kasuks võrreldes katseliste tulemustega. Standardi puhul ei ole küll puiduliikidel arvutustulemustele suurt mõju, aga paremaks ülevaateks esitatakse need siiski eraldi. Kõigi katsegruppide puhul sai arvutusliku kandevõime puhul määravaks purunemisviis  $V_d$ .

Keskmiselt on saarenaaglite arvutuslikud tulemused 83,1 % väiksemad katseliselt saadud kandevõimetest. Suurim erinevus tekkis 25 mm ja 220 mm pikkuste naaglite juures, kus erinevusprotsent oli 86,4 %, mis erineb keskmisest vaid 3,3 % võrra. Väikseim erinevus esines diameetriga 25 mm ja pikkusega 120 mm saarenaaglite puhul, kus erinevusprotsent oli 78,6 %. See tulemus on samuti keskmise erinevusprotsendiga üsna lähedane: vaid 4,5 % väiksem.

TFEC 1-2012 tammenaaglite arvutuslikud keskmised kandevõimed olid saarenaaglite omadest katselistele lähemal, kuid vahe on vaid 1,5 % ja pole märkimisväärne. Arvutuslike ja katseliste kandevõimete keskmine erinevus tammenaaglitega katsetes on 81,6 %. Suurim erinevusprotsent esines 20 mm diameetriga ja 220 mm pikkusega naaglite puhul ning see oli 85,8 %. Keskmisest tulemusest on see 4,2 % suurem. Väikseim erinevus kahe tulemuse vahel leiti 25 mm diameetri ja 120 mm pikkuse naagliga katsegrupi juures, kus see on 78,7 % ning erineb keskmisest 2,9 % võrra.

Sandberg *et al* uurimuses antud valemite põhjal aga on saadud ehk kõige realistlikumad tulemused, mis annaksid julguse just neid vameid kasutada. Valemite abil leitud purunemispilt vastas ka katsetustes leitule. Valemid purunemisviisidele  $I_m$  ja  $I_s$  sarnanevad TFEC 1-2012 standardile, kuid ära on jäetud teisendustegur  $R_d$  ning purunemisviiside IIIs ja  $V_d$  valemid on eraldi välja töötatud. Kõigi katsegruppide puhul sai määravaks purunemisviis  $V_d$  ning arvutuslikud tulemused annavad kandevõime võrreldes katsetulemustega varu

kasuks. Erinevused puiduliikide kaupa on arvutustulemustes võrreldes katsetulemustega väikesed ja tühiseks loetavad.

Saarepuidust naaglite arvutuslik keskmine erinevus katsetulemustest on 24,1 %. Erinevusprotsent on suurim 25 mm diameetri ja 220 mm pikkuste naaglite korral ning see on 39,1 %, suurenedes keskmisest 15 % võrra. Väikseima erinevuse arvutuste ja katsete vahel andsid naaglid diameetri ja pikkusega 25 mm ja 120 mm. Erinevusprotsent tulemuste vahel oli kõigest 4,1 %, keskmisest erinevusprotsendist erines see 20 % võrra.

Tammenaaglite arvutuslikud ja katselised tulemused on mõnevõrra teineteisele lähedasemad: erinevusprotsent tulemuste vahel on keskmiselt 17,6 % varu kasuks. Suurim erinevusprotsent arvutuslike ja katsetulemuste vahel oli siinsel juhul 20 mm diameetri ja 220 mm pikkuste naaglite korral ning see oli 36,3 %. Keskmisest erinevusprotsendist oli see 18,7 % võrra suurem. Väikseima erinevuse määras ka sel korral naaglite katsegrupp diameetriga 25 mm ja pikkusega 120 mm. Ka siin on erinevus väga väike: 4,3 %. Keskmisest erinevusprotsendist on see 13,3 % võrra väiksem.

Kui vaadelda Sandberg *et al* arvutusvalemite tulemusi ja võrrelda neid katseliste tulemustega, annavad need päris hea tulemuse. Kuigi suurima ja vähima erinevusprotsendi amplituud on üle 30 % – täpsemalt saarel 34,9 % ja tammel 32,0 % – on minimaalne erinevus arvutuslike ja katseliste tulemuste vahel 4,1 % ja 4,3 %, mis on juba väga hea tulemus. Arvestades, et puit on ebahomogeenne materjal, on see pigem hea, sest arvutuslikud tulemused tulevad ka minimaalsete erinevuste korral võrreldes katselistega mõistlikul määral varu kasuks. Ka Sandberg *et al* uurimuse kokkuvõttes leiti, et valemitega leitud purunemisviisid vastasid tegelikele ning eelduslikud kandevõime tulemused jäid keskmiselt 9,3 % katselistele alla, erinedes 15,8 % võrra väiksemana ristikiudu koormamise korral ja 1,9 % võrra suuremana pikikiudu koormamise korral. [1]

Ka L. Allikas'e ja V. Kulbach'i raamatus „Puitkonstruktsioonid“ ära toodud arvutuseeskirjad tammenaaglite kasutamiseks annavad võrreldes katsetulemustega väga konservatiivsed tulemused varu kasuks. Kandevõimele saab arvutuste järgi määravaks naagli paine kinnituspikkuse järgi. Keskmiselt on arvutuslikud tulemused 56,3 % katselistest suuremad. Suurim erinevus 62,2 % näol esineb naaglitel diameetriga 20 mm ja pikkusega 220 mm. See on keskmisest 5,9 % võrra suurem. Väikseim erinevus tuleb välja

25 mm diameetriga ja 120 mm pikkuste tammenaaglite korral, kus see on 52,9 % ning keskmisest 3,4 % võrra väiksem. Arvutuseeskirjad on esitatud väga lihtsustatud kujul võttes arvesse ainult naagli ja liiteelementide mõõtmeid.

Kuna antud töö raames tehti katseid vähe ja piiratud koguses, ei saa nende põhjal lõplike järeldusi veel teha, kas ja kuidas võiks katsetulemustega võrreldud standardeid ja arvutusjuhiseid puitnaaglitega liidete kandevõimete arvutamiseks rakendada. Töö esialgsete tulemuste põhjal osutusid üsna täpseteks standardi Eurokoodeks 5 arvutuslikud tulemused. Kuigi need erinesid puiduliikide saare ja tamme puhul küllaltki olulisel määral, andsid need puiduliigi siseselt vähem varieeruvad tulemused. Valemeid ja arvutuskäike vaadates erinevad saare ja tamme arvutused ühe konstandi alusel: puiduliigi paindetugevus. Kuigi saare paindetugevus  $105,0 \text{ N/mm}^2$  ei ole tamme paindetugevusest  $97,7 \text{ N/mm}^2$  nii oluliselt palju suurem, tuleks tulevikus uurida, kuidas see täpsemalt kandevõimet mõjutab ja kuidas seda arvutusvalemitesse sobitada. Tõenäoliselt tuleb selleks puiduliikide kaupa leida vastavad konstandid.

Nii Eurokoodeks 5 kui ka TFEC 1-2012 standardid põhinevad mõlemad Johanseni voolavusteoorial, mille valemid ja seosed on üsna kindlalt paigas ja välja töötatud. Et metallnaaglitele mõeldud valemeid ka puitnaaglitega liidete kandevõimete arvutamiseks kasutada saaks, tuleks edaspidistes uurimustes käsitleda konstantseid kordajaid nendes valemites. Eurokoodeks 5 puhul, mis andis võrreldes katsetulemustega täpsemaid vastuseid, tuleks leida uus kordaja purunemisviiside (j) ja (k) arvutusvalemitesse 1,05 ja 1,15 asemele. Samuti oleks tulevikus vaja uurida norm-muljumistugevuse valemit ja seda, kas kordaja 0,082 sobib ka puitnaaglitega liidete puhul kasutamiseks.

Arutluse lõpuks võib tõdeda, et nende vähete katsete puhul saadud tulemuste põhjal tuleks edasi uurida Eurokoodeks 5 metallnaaglitele mõeldud liite kandevõime valemeid ja võimalusi nende kohandamiseks puitnaaglitele. Samuti kinnitavad katsed, et Sandberg *et al* uurimuses välja toodud valemid on üsna sobilikud puitnaaglitega kinnitatud liidete kandevõimete leidmiseks. Arvestama peab, et kandevõime saadakse minimaalsel juhul väikese, kuid mõistliku varuga, kuid suuremas plaanis annavad valemid kandevõimetele suurema varieeruvuse ja varuga tulemuse.

*Tabel 12 Eurokoodeks 5, Eurokoodeks 5 koos L. Musta soovitudestega ja katsetulemuste võrdlemine*

Katse	Eurokoodeks 5 [N]						Eurokoodeks 5 L. Musta järgi [N]					Katsed [N]
	g	h	j	k	Erinevus katsest [N]	Erinevus katsest [%]	g	h	j	Erinevus katsest [N]	Erinevus katsest [%]	
S20-120	14834,4	14736,2	8317,6	11592,1	3638,3	30,4	14834,4	14736,2	7921,6	4034,3	33,7	11955,9
T20-120	14627,6	14676,4	7987,7	10976,4	801,8	9,1	14627,6	14676,4	7607,3	1182,1	13,4	8789,5
S25-120	17343,4	17286,0	11736,7	17473,9	4784,8	29,0	17343,4	17286,0	11177,8	5343,6	32,3	16521,5
T25-120	17345,9	17288,3	11490,0	17018,2	1220,6	9,6	17345,9	17288,3	10942,9	1767,8	13,9	12710,7
S20-220	29688,0	29613,8	12178,0	11806,8	4990,6	29,7	29688,0	29613,8	11598,1	5199,4	31,0	16797,5
T20-220	28985,6	29181,1	11752,0	11044,7	927,2	7,7	28985,6	29181,1	11192,4	779,6	6,5	11971,9
S25-220	34664,1	34606,4	15482,8	17684,8	10854,2	41,2	34664,1	34606,4	14745,5	11591,5	44,0	26337,0
T25-220	34394,2	34108,1	15064,2	16693,5	-907,1	-6,4	34394,2	34108,1	14346,9	-189,8	-1,3	14157,1

*Tabel 13 TFEC 1-2012, Sandberg et al arvutusvalemite ja katsetulemuste võrdlemine*

Katsed	TFEC 1-2012 [N]						Sandberg et al [N]								Katsed [N]
	I <sub>m</sub>	I <sub>s</sub>	III <sub>s</sub>	V <sub>d</sub>	Erinevus katsest [N]	Erinevus katsest [%]	I <sub>m</sub>	I <sub>s</sub>	III <sub>s</sub>	IV	I <sub>d</sub>	V <sub>d</sub>	Erinevus katsest [N]	Erinevus katsest [%]	
S20-120	5607,9	5645,3	5544,2	2268,0	9687,9	81,0	22431,5	22581,0	17741,6	24855,9	28409,0	10170,2	1785,7	14,9	11955,9
T20-120	3877,8	3864,9	3876,5	1689,7	7099,7	80,8	15511,0	15459,5	12405,0	17409,8	16046,1	7577,4	1212,1	13,8	8789,5
S25-120	7021,6	7045,0	8554,7	3532,1	12989,4	78,6	28086,6	28179,9	27375,0	38710,0	35571,2	15838,9	682,6	4,1	16521,5
T25-120	4896,8	4913,1	6175,6	2712,5	9998,2	78,7	19587,2	19652,4	19762,1	27947,7	20330,4	12163,8	546,9	4,3	12710,7
S20-220	11297,9	11326,2	6722,6	2312,9	14484,6	86,2	45191,7	45304,9	21512,4	25348,1	57234,4	10371,6	6425,8	38,3	16797,5
T20-220	7716,6	7664,9	4603,4	1701,0	10271,0	85,8	30866,4	30659,6	14731,0	17525,5	31822,9	7627,7	4344,2	36,3	11971,9
S25-220	14088,7	14112,2	9561,8	3578,7	22758,3	86,4	56354,9	56448,8	30597,6	39221,0	71372,5	16048,0	10289,0	39,1	26337,0
T25-220	9626,4	9707,2	6641,4	2656,0	11501,1	81,2	38505,7	38828,7	21252,4	27365,4	39966,7	11910,4	2246,7	15,9	14157,1

*Tabel 14 Tammenaaglite arvutusjuhise ja katsetulemuste võrdlemine*

Katse	Tammenaaglite arvutusjuhise [N]						Katsed [N]
	Puidu muljumine keskmistes elementides	Puidu muljumine äärmistes elementides	Naagli paine kinnituspikkuse järgi	Naagli maksimaalne paine	Erinevus katsest	Erinevus katsest [%]	
T20-120	5937,1	4927,8	3811,0	5150,6	4978,5	56,6	8789,5
T25-120	7502,1	6276,7	5986,2	8289,8	6724,5	52,9	12710,7
T20-220	11767,7	9737,4	4523,1	5150,6	7448,9	62,2	11971,9
T25-220	14723,9	12381,1	6589,4	8095,9	7567,6	53,5	14157,1

## KOKKUVÕTE

Magistritöö „Puitnaagliga puit-puiduga liite kandevõime määramine“ eesmärgiks on välja töötada puitnaagliga kinnitatud liite katsetamise metoodika ning selgitada välja kas ja kuidas erinevad standardid ja arvutusjuhised (Eurokoodeks 5, Eurokoodeks 5 L. Musta magistritöö järeldestega, TFEC 1-2012, Sandberg *et al* uurimise arvutusvalemid, arvutusjuhised tammenaaglite kohta L. Allikas'e ja V. Kulbach'i raamatust „Puitkonstruktsioonid“) liite kandevõime määramiseks kehtivad puitnaagliga puit-puiduga kahelõikelise liite kohta. Seniajani puuduvad standardid nii katsetamise kui ka kandevõime arvutamise kohta. Töö on aga oluline, sest katsetamismeetodika väljatöötamine on aluseks edaspidisteks uuringuteks ning kandevõime arvutusjuhiste leidmine lubab projekteerida puitnaagliga liiteid ratsionaalsemalt, teaduspõhisemalt ja kindlamalt. Puitnaaglite kasutamine on tähtis osa meie ehituskunsti pärandist ning antud töö teadmised ja tulemused osutuvad puitnaaglitega konstruktsioonide restaureerimisel kindlasti vajalikeks.

Katsetamismeetodika on arendatud peamiselt standardi EVS-EN 26891:1999 „Puittarindid. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus- ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused“ ja sarnaste välismaal tehtud katsete alusel. Katseid teostati kokku 24, kuid tehnilistel põhjustel võeti arvesse ainult 23 katse tulemused. Et liite kandevõimet võivad mõjutada paljud tegurid, piirati muutuvate parameetrite hulka. Katsetati kahest puuliigist naagleid: saarenaaglid näitasid paremaid tugevusomadusi tammenaaglite ees. Naaglite diameetrid olid 20 mm ja 25 mm, tapimudeli detailide paksused kas 25-50-25 mm või 50-100-150 mm. Katse seisnes omavahel ühe puitnaagliga ühendatud kolmest puitdetailist koostatud liitemudeli surumises ning nihke mõõtmises. Kuigi Sandberg *et al* kasutas oma katsetes teisi puiduliike – punasest tammest naagleid ja valge männi ning suhkruvahtra tapimudeli detaile –, on tulemuste suurusjärg kokkulangev. Seega võib oletada, et antud katsed olid teostatud realistlikult.

Saadud katsetulemusi võrreldi seejärel standardite ja arvutusjuhiste valemite tulemustega. Selgus, et kõige realistlikumalt ja kindlamalt saab puitnaagliga kahelõikelise liite kandevõimet määrata Sandberg *et al* uuringus kasutatud valemite järgi. Nendega arvutatud kandevõime jäi alati varu kasuks ning ka arvutuslike ja katseliste kandevõimete



minimaalseim vahe jäi mõistlikult väike: ligikaudu 4 %. Samuti andsid valemid kahe puiduliigi lõikes üsna ühtlased kandevõime tulemused võrreldes näiteks Eurokoodeks 5 arvutusvalemitega. Tuleb märkida, et arvutuslikult leitud purunemisviis vastas katselisele.

Ka Eurokoodeks 5 valemid andsid üsna häid tulemusi, kuid neis esines tugev erinevus erinevate puiduliikide tõttu. Ilmselt mõjutab tulemusi puidu paindetugevus ja seepärast oleks valemite kasutuselevõtuks vaja teha veel edasisi uuringuid. Parema katsetulemustele vastavuse saamiseks võib uurida ka kordajate muutmist purunemisviiside (j) ja (k) ning puidu norm-muljumistugevuse valemite. See on aga juba edasise uurimise ülesandeks.

Puitnaaglitega arvutamise standardi TFEC 1-2012 ja L. Allikas'e ja V. Kulbach'i raamatust „Puitkonstruktsioonid“ võetud tammenaaglite kandevõime arvutusjuhistega saadud vastused jäid võrreldes katsetulemustega väga konservatiivseteks. TFEC 1-2012 valemite võib näha sarnasusi Sandberg *et al* valemitega, sest purunemisviiside  $I_m$  ja  $I_s$  valemid on neis jagatud läbi teisendusteguriga  $R_d$ . Tammenaaglite arvutusjuhised on aga antud väga lihtsakoeliselt, kus kandevõime sõltub peamiselt kordaja(te)st, naagli diameetrist ning ühendatavate elementide paksustest.

Kuigi katseid on lõplike ja otsustavate järelduste tegemiseks antud töö käigus liiga vähe läbi viidud, näitavad tulemused siiski suundumust, et puitnaaglitega puit-puiduga kahelõikeliste liidete kandevõimete arvutamiseks võiks kasutusele võtta Sandberg *et al* töös välja toodud valemid. Kindlasti on selle tõestamiseks vajalik teha täiendavalt rohkem katseid. Kuna töös koormati tapimudelit vaid pikikiudu, võiks edaspidistes uurimistes käsitleda ka ristikiudu koormamist ning nurga, näiteks 45-kraadise nurga, all koormamist.

Lõpetuseks võib tõdeda, et antud magistritöö täitis oma eesmärgi: välja töötati realistlikke tulemusi andev katsetoodika puit-puiduga liidete kandevõime katsetamiseks ning katsetulemusi erinevate kandevõimevalemitega võrreldes leiti sobivad valemid puitnaagliga liidete arvutamiseks.

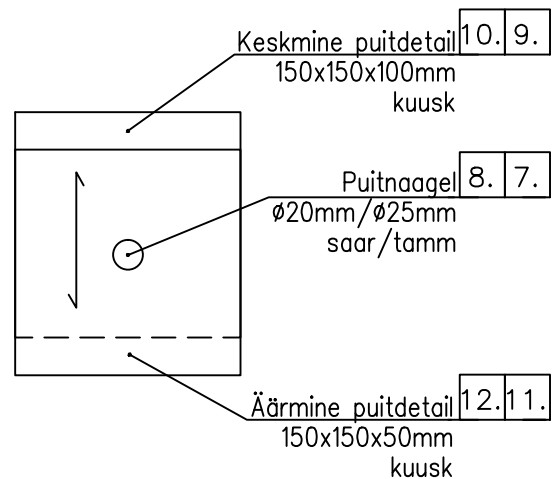
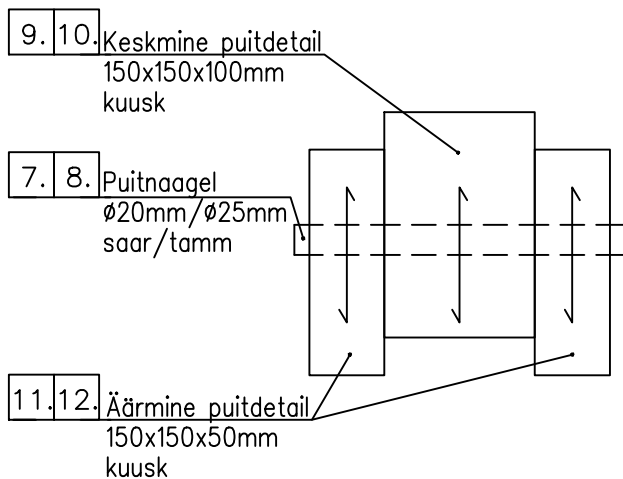
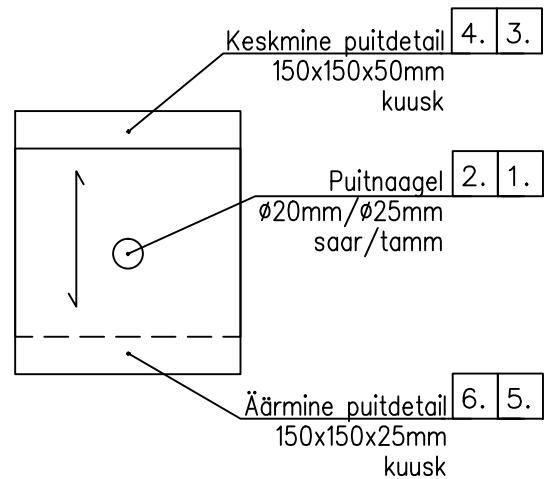
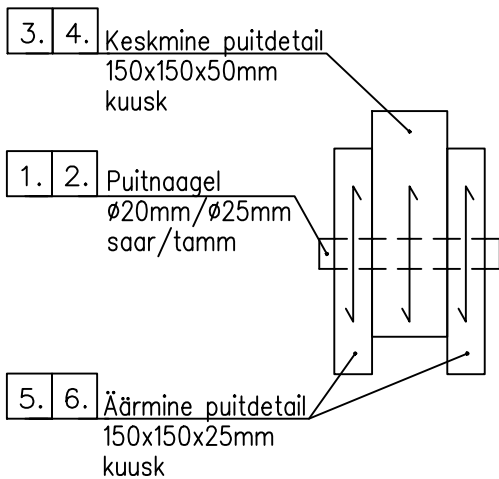
Autor tänab väga Eesti Maaülikooli lektorit Regino Kask'e, kes juhendas katsetamisel ning Väimela Kutsehariduskeskuse kutseõpetajat Taavi Pumbo't, kes valmistas katsetamiseks vajalikud detailid. Eriline tänu kuulub juhendajale Illimar Kalk'ile, kelle innustusel ja toel antud töö valminud on.

## KIRJANDUSE LOETELU

- [1] L. B. B. W. M. R. E. H. Sandberg, „Strength and Stiffness of Oak Pegs in Traditional Timber-Frame Joints,“ *Journal of Structural Engineering*, pp. 717-723, juuni 2000.
- [2] F. J. S. R. J. B. W. M. Miller, „New Yield Model for Wood Dowel Connections,“ *Journal of Structural Engineering*, pp. 1255-1261, oktoober 2010.
- [3] L. Mõrd, *Puit-puiduga liidete kasutamine ja projekteerimine ehitistes*, Tartu: Eesti Maaülikool, 2012.
- [4] L. Must, *Puidust naaglitega puit-puiduga kahelõikeliste liidete arvutusteooriate analüüs*, Tartu: TTÜ Tartu Kolledž, 2013.
- [5] J. Järvpõld, *Puidust naaglitega puit-puiduga liidetes muljumistugevuste määramine katsete abil*, Tartu: TTÜ Tartu Kolledž, 2014.
- [6] L. K. V. Allikas, *Puitkonstruktsioonid*, Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus, 1962.
- [7] E.-J. Õ. K. J. A. Just, *Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid*, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2015.
- [8] T. Noll, *Puitühenduste piibel*, Tallinn: Sinisukk, 2007.

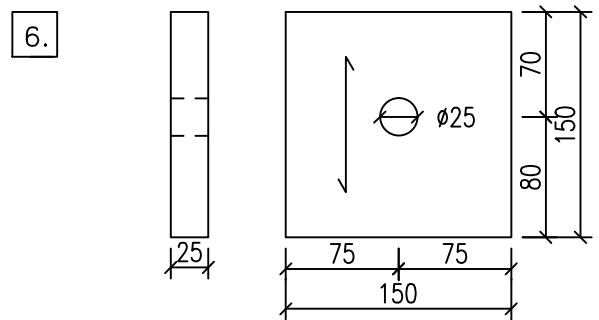
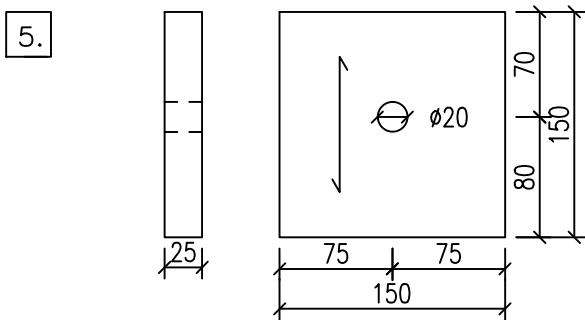
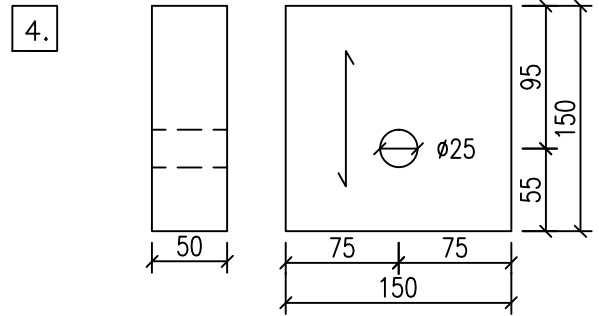
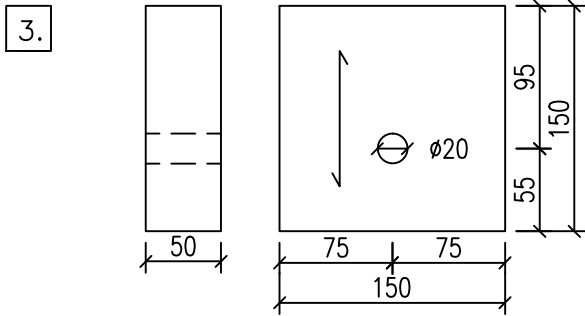
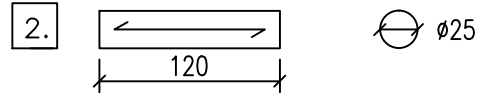
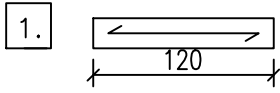
- [9] J. W. P. Shanks, „Strength and Stiffness of All-Timber Pegged Connections,“ *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 10-18, jaanuar 2009.
- [10] C. Schwarz, „Drawboring Resurrected,“ *Woodworking Magazine*, kd. september, pp. 12-15, september 2005.
- [11] L. Allikas, Puit- ja plastmasskonstruktsioonid, Tallinn: Valgus, 1985.
- [12] R. J. M. R. B. Schmidt, *Timber Frame Tension Joinery*, Wyoming: University of Wyoming, 1997, pp. 10-11.
- [13] J. R. T. B. W. Church, „Characterization of Bearing Strength Factors in Pegged Timber Connections,“ *Journal of Structural Engineering*, pp. 326-332, märts 1997.
- [14] *EVS-EN 26891:1999 Puittarindid. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus- ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused*, Eesti Standardikeskus, 1999.
- [15] D. J. A. Day, Puutöömeistri käsiraamat, Tallinn: TEA, 2006.
- [16] E. V. U. Saarman, Puiduteadus, Tartu: Eesti Metsaselts, 2006.

**LISAD**



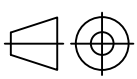
↔ Puidukiu suund

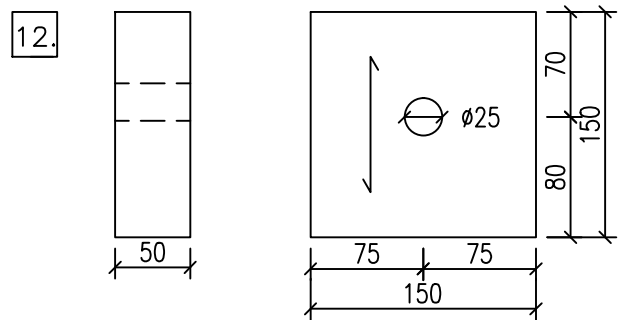
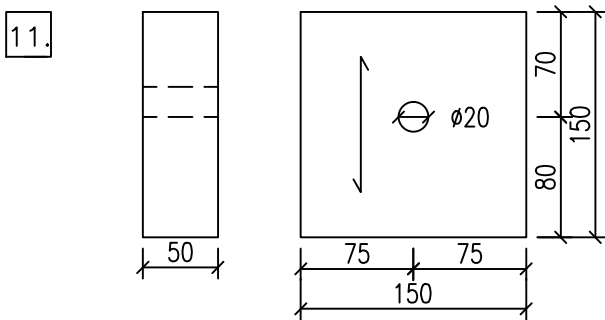
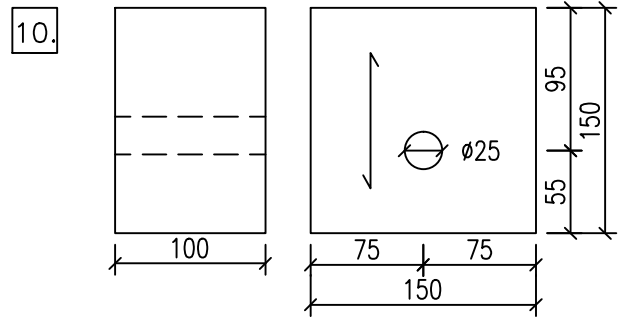
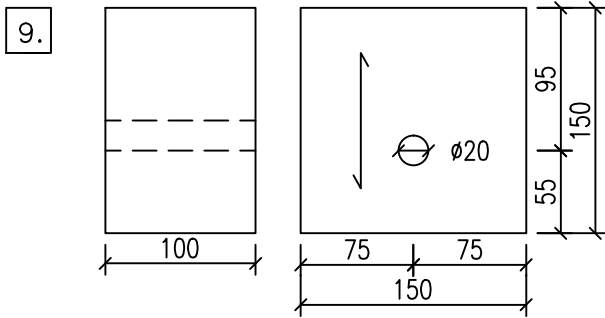
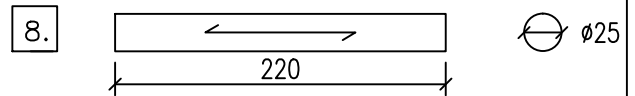
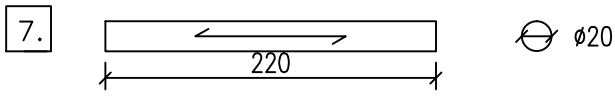
	Materjal: saar tamm kuusk			Nimetamata piirhálbed:	Mass:	Mõõt: 1:5
	Nimi	Allkiri	Kuupäev	Nimetus:		
Koostas	M. Aia		07.02.16	Naagleliide		
Juhendas	I. Kalk					
TTÜ Tartu Kolledž			Leht: 1	Lehti: 3	Tähis: EAEI105352	



Pos	Detail	Mõõdud	Materjal	Kogus
1	Puitnaagel	$\varnothing 20\text{mm}$ , L=120mm	saar	3tk
1	Puitnaagel	$\varnothing 20\text{mm}$ , L=120mm	tamm	3tk
2	Puitnaagel	$\varnothing 25\text{mm}$ , L=120mm	saar	3tk
2	Puitnaagel	$\varnothing 25\text{mm}$ , L=120mm	tamm	3tk
3	Keskmine puitdetail	150x150x50mm	kuusk	6tk
4	Keskmine puitdetail	150x150x50mm	kuusk	6tk
5	Äärmine puitdetail	150x150x25mm	kuusk	12tk
6	Äärmine puitdetail	150x150x25mm	kuusk	12tk

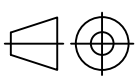
← Puiduki suund

	Materjal: saar tamm kuusk			Nimetamata piirhälbed:	Mass:	Mõõt: 1:5
	Nimi	Allkiri	Kuupäev	Nimetus:		
Koostas	M. Aia		07.02.16	Puitdetailid 1		
Juhendas	I. Kalk					
TTÜ Tartu Kolledž			Lehti: 2	Lehti: 3	Tähis: EAEI105352	



Pos	Detail	Mõõdud	Materjal	Kogus
7	Puitnaigel	∅20mm, L=220mm	saar	3tk
7	Puitnaigel	∅20mm, L=220mm	tamm	3tk
8	Puitnaigel	∅25mm, L=220mm	saar	3tk
8	Puitnaigel	∅25mm, L=220mm	tamm	3tk
9	Keskmine puitdetail	150x150x100mm	kuusk	6tk
10	Keskmine puitdetail	150x150x100mm	kuusk	6tk
11	Äärmine puitdetail	150x150x50mm	kuusk	12tk
12	Äärmine puitdetail	150x150x50mm	kuusk	12tk

← Puiduki suund

	Materjal: saar tamm kuusk			Nimetamata piirhälbed:	Mass:	Mõõt: 1:5
	Nimi	Allkiri	Kuupäev	Nimetus:		
Koostas	M. Aia		07.02.16	Puitdetailid 2		
Juhendas	I. Kalk					
TTÜ Tartu Kolledž			Lehti: 3	Lehti: 3	Tähis: EAEI105352	

2		1				Katse
K03	S01	K05B	K05A	K03	S01	Detail*
150	122	148	146,5	150,5	122	
150	20,2	150	150	150	20,2	Mõõtmed ** [mm]
50		25	26	50		
1125000	39078	555000	571350	1128750	39078	Ruumala [mm <sup>2</sup> ]
563,2	32,32	294,6	252	546,8	32,13	Kaal [g]
500,6	827,1	530,8	441,0	484,4	822,2	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]
20,9	12,3	18,8	20,7	16,5	12	Niiskus [%]
104,6	101,7	99,8	91,3	79,9	98,7	Veesisaldus [kg/m <sup>3</sup> ]
60,1	99,2	63,7	52,9	58,1	98,7	Veesisaldus 12% juures [kg/m <sup>3</sup> ]
456,0	824,6	494,7	402,6	462,6	822,2	Tihedus 12% niiskuse juures
396,0	725,3	431,0	349,7	404,5	723,5	Tihedus 0% niiskuse juures
0,456	0,825	0,495	0,403	0,463	0,822	Erikaal 12% niiskuse juures
0,396	0,725	0,431	0,350	0,404	0,724	Erikaal 0% niiskuse juures
11741,5			31242,6			Maksimaalne jõud katses [N]
12,3			5,9			Nihe maksimaalse jõu juures [mm]
220,5			0,3			Katse kestvus [s]
9999,7			12973,6			Jõud 5mm nihke juures [N]
9999,7			12973,6			Arvutustes kasutatav jõud
			11955,9			Aritmeetiline keskmine jõud [N]
-1956,2			1017,7			Hälve aritmeetiliselt
-16,36			8,51			Hälve aritmeetiliselt
			1694,5			Standardhälve [N]
			14,17			Standardhälve [%]



4		3					
K03	T01	K05B	K05A	K03	S01	K05B	K05A
150	122	148	147	150,5	121	150	150
150	19,5	150	150	150	20,5	148	147,5
50		25	25	50		25	25
1125000	36417	555000	551250	1128750	39917	555000	553125
563,7	22,52	283,1	283,7	587,3	32,7	274,8	291,4
501,1	618,4	510,1	514,7	520,3	819,2	495,2	526,8
20,7	11,2	20,6	20,9	19,8	12	21,2	20,9
103,7	69,3	105,1	107,6	103,0	98,3	105,0	110,1
60,1	74,2	61,2	61,8	62,4	98,3	59,4	63,2
457,5	623,3	466,3	468,9	479,7	819,2	449,6	479,9
397,4	549,1	405,1	407,1	417,3	720,9	390,2	416,7
0,457	0,623	0,466	0,469	0,480	0,819	0,450	0,480
0,397	0,549	0,405	0,407	0,417	0,721	0,390	0,417
9046,5			15232,0				
13,1			4,4				
169,8			285,6				
6971,6			12894,4				
6971,6			12894,4				
8789,5							
-1817,9			938,5				
-20,68			7,85				
1595,1							
18,15							

6		5						
K03	T01	K05B	K05A	K03	T01	K05B	K05A	
150	121	150	150	150,5	121	150	150	
150,5	20,1	148,5	148,5	150,5	20,7	147,5	147	
50		25	25	50,5		25	25	
1128750	38375	556875	556875	1143838	40700	553125	551250	
555,1	24,95	282,6	299,5	568,3	26,38	283,4	251,3	
491,8	650,2	507,5	537,8	496,9	648,2	512,3	455,8	
21,8	10	21,8	20,9	10	10,9	21,7	21,6	
107,2	65,0	110,6	112,4	49,7	70,6	111,2	98,5	
59,0	78,0	60,9	64,5	59,6	77,8	61,5	54,7	
443,6	663,2	457,7	490,0	506,8	655,3	462,6	412,1	
384,6	585,1	396,8	425,4	447,2	577,5	401,2	357,4	
0,444	0,663	0,458	0,490	0,507	0,655	0,463	0,412	
0,385	0,585	0,397	0,425	0,447	0,578	0,401	0,357	
10199,6			11205,6					
12,9			13,0					
191,6			210,1					
9441,8			9955,1					
9441,8			9955,1					
652,3			1165,6					
7,42			13,26					

8		7						
K04	S02	K06B	K06A	K04	S02	K05B	K05A	
150	121	148	147	150	122	150	150	
150,5	25,5	150	150	150	25	148,5	148	
50		25	25	50		25	25	
1128750	61764	555000	551250	1125000	59856	556875	555000	
560,8	45,27	282,1	250,1	560,1	32,13	289,7	292,3	
496,8	733,0	508,3	453,7	497,9	536,8	520,2	526,7	
9,5	10,9	22,5	20,2	19,7	12	19,8	21,7	
47,2	79,9	114,4	91,6	98,1	64,4	103,0	114,3	
59,6	88,0	61,0	54,4	59,7	64,4	62,4	63,2	
509,3	741,0	455,0	416,5	459,6	536,8	479,7	475,6	
449,6	653,1	394,0	362,0	399,8	472,4	417,2	412,4	
0,509	0,741	0,455	0,416	0,460	0,537	0,480	0,476	
0,450	0,653	0,394	0,362	0,400	0,472	0,417	0,412	
16601,9			19351,1					
6,3			3,5					
240,3			290,3					
16161,4			-					
16161,4			19351,1					
			16521,5					
-360,0			2829,7					
-2,18			17,13					
			2667,9					
			16,15					

10		9					
K04	T02	K06B	K06A	K04	S02	K06B	K06A
151	120	147	147	150,5	122	150	147,5
150	25,5	150	150	150,5	25,5	147	150
50		25,5	25	50,5		25	25,5
1132500	61254	562275	551250	1143838	62274	551250	564188
559,9	41,81	281,7	261	557,1	44,46	256,3	295
494,4	682,6	501,0	473,5	487,1	713,9	465,0	522,9
20,9	11,7	20,1	19,8	19,1	12,2	19,2	18,9
103,3	79,9	100,7	93,8	93,0	87,1	89,3	98,8
59,3	81,9	60,1	56,8	58,4	85,7	55,8	62,8
450,4	684,6	460,4	436,6	452,5	712,5	431,5	486,8
391,1	602,7	400,3	379,8	394,0	626,8	375,7	424,1
0,450	0,685	0,460	0,437	0,452	0,713	0,432	0,487
0,391	0,603	0,400	0,380	0,394	0,627	0,376	0,424
15326,9			16746,0				
3,3			2,2				
230,1			251,6				
13129,6			14051,8				
13129,6			14051,8				
12710,7							
418,9			-2469,6				
3,30			-14,95				
1411,2							
11,10							

12		11						
K04	T02	K06B	K06A	K04	T02	K06B	K06A	
150	122	150	150	150	120	150	150	
150,5	25,4	147	147	151	25,5	147	147	
50		25	25	50		25	25	
1128750	61787	551250	551250	1132500	61254	551250	551250	
514,2	39,73	259,2	265,1	561,5	39,49	226,8	230,3	
455,5	643,0	470,3	480,8	495,8	644,7	411,5	417,7	
8,6	12	19,9	18,6	19,8	10,7	27,8	18,1	
39,2	77,2	93,6	89,4	98,2	69,0	114,4	75,6	
54,7	77,2	56,4	57,7	59,5	77,4	49,4	50,1	
471,0	643,0	433,1	449,1	457,1	653,1	346,5	392,3	
416,4	565,9	376,7	391,4	397,6	575,7	297,1	342,1	
0,471	0,643	0,433	0,449	0,457	0,653	0,346	0,392	
0,416	0,566	0,377	0,391	0,398	0,576	0,297	0,342	
14686,4			14777,4					
7,4			3,4					
217,6			219,9					
13865,0			11137,4					
13865,0			11137,4					
1154,4			-1573,3					
9,08			-12,38					

14		13						
K09	S07	K11B	K11A	K09	S07	K06B	K06A	
151	121,5	151	150	150	220	147	147,5	
150	20,5	151	151	150,5	20,2	150	150	
99,5		50	49	100		25,5	25	
2253675	40082	1140050	1109850	2257500	70469	562275	553125	
991,5	58,77	585,8	504	1018	62,61	277,1	278,7	
439,9	1466,2	513,9	454,1	450,9	888,5	492,9	503,8	
21,6	7	17,8	13,8	20,9	13,6	20,7	20,6	
95,0	102,6	91,5	62,7	94,2	120,8	102,0	103,8	
52,8	175,9	61,7	54,5	54,1	106,6	59,1	60,5	
397,7	1539,5	484,1	446,0	410,8	874,3	450,0	460,5	
344,9	1363,6	422,4	391,5	356,7	767,6	390,8	400,0	
0,398	1,540	0,484	0,446	0,411	0,874	0,450	0,460	
0,345	1,364	0,422	0,391	0,357	0,768	0,391	0,400	
19371,8			339,8					
6,9			0,0					
181,4			5,0					
17141,4			-					
17141,4			339,8					
			16797,5					
344,0								
2,05								
			486,4					
			2,90					

16		15							
K09	T07	K11B	K11A	K09	S07	K11B	K11A		
149	221	150,5	150	149	220,5	150,5	150,5		
150	20	150	150,5	150	20,5	151	150,5		
100		50	50	100		50	50		
2235000	69394	1128750	1128750	2235000	72742	1136275	1132513		
999,8	46,69	592,5	596	986,4	59,78	524,9	523,8		
447,4	672,8	524,9	528,0	441,3	821,8	461,9	462,5		
22,9	10,9	20,7	20,6	23,7	11,5	20	18,2		
102,4	73,3	108,7	108,8	104,6	94,5	92,4	84,2		
53,7	80,7	63,0	63,4	53,0	98,6	55,4	55,5		
398,6	680,2	479,3	482,6	389,7	825,9	425,0	433,8		
344,9	599,5	416,3	419,3	336,7	727,3	369,5	378,3		
0,399	0,680	0,479	0,483	0,390	0,826	0,425	0,434		
0,345	0,599	0,416	0,419	0,337	0,727	0,370	0,378		
14325,3			18361,4						
9,5			6,3						
134,5			172,9						
12056,3			16453,5						
12056,3			16453,5						
11971,9									
84,4			-344,0						
0,71			-2,05						
87,4									
0,73									





20		19					
K10	S08	K12B	K12A	K10	S08	K11B	K11A
150	221	150	150	149,5	220,5	151	151
150,5	25,7	151	150,5	150	25,3	150,5	150,5
100		50	50	100		48,5	48
2257500	114585	1132500	1128750	2242500	110795	1102187	1090824
1053	96,51	550,7	548,1	994,2	96,46	511,9	497,3
466,4	842,3	486,3	485,6	443,3	870,6	464,4	455,9
24	14	20,5	17,6	21	13,2	12,8	10
111,9	117,9	99,7	85,5	93,1	114,9	59,4	45,6
56,0	101,1	58,4	58,3	53,2	104,5	55,7	54,7
410,4	825,4	444,9	458,4	403,4	860,2	460,7	465,0
354,4	724,3	386,6	400,1	350,2	755,7	405,0	410,3
0,410	0,825	0,445	0,458	0,403	0,860	0,461	0,465
0,354	0,724	0,387	0,400	0,350	0,756	0,405	0,410
30204,0			32647,5				
11,9			11,9				
224,8			244,0				
27201,9			26128,1				
27201,9			26128,1				
			26337,0				
864,9			-208,9				
3,28			-0,79				
			781,7				
			2,97				

22		21					
K10	T08	K12B	K12A	K10	S08	K12B	K12A
150	221	151	150,5	150	220	150	151
150	25,5	151	150	150	25,5	150	150
99,5		50	50	100		50,5	50
2238750	112809	1140050	1128750	2250000	112298	1136250	1132500
1043	67,49	565,8	585,2	1038	92,16	541,8	542,9
465,8	598,3	496,3	518,4	461,1	820,7	476,9	479,3
24	10,9	18,6	17,8	21,2	12,4	13,9	19,3
111,8	65,2	92,3	92,3	97,8	101,8	66,3	92,5
55,9	71,8	59,6	62,2	55,3	98,5	57,2	57,5
409,9	604,9	463,6	488,4	418,7	817,4	467,8	444,3
354,0	533,1	404,0	426,2	363,4	718,9	410,6	386,8
0,410	0,605	0,464	0,488	0,419	0,817	0,468	0,444
0,354	0,533	0,404	0,426	0,363	0,719	0,411	0,387
17371,6			30038,2				
12,4			12,2				
130,2			224,2				
13741,0			25681,0				
13741,0			25681,0				
14157,1							
-416,1			-656,0				
-2,94			-2,49				
532,4							
3,76							

24		23					
K10	T08	K12B	K12A	K10	T08	K12B	K12A
150	220	150,5	150	150	222	150	150
150	25,1	151	151	151	25	151	151
99		50	50,5	99,5		50	50
2227500	108803	1136275	1143825	2253675	108919	1132500	1132500
976,5	67,03	552,9	543,2	1005	65,38	517,8	552,9
438,4	616,1	486,6	474,9	446,0	600,3	457,2	488,2
22,9	12,8	16	20,8	26	10,8	16,6	18,5
100,4	78,9	77,9	98,8	116,0	64,8	75,9	90,3
52,6	73,9	58,4	57,0	53,5	72,0	54,9	58,6
390,6	611,1	467,1	433,1	383,5	607,5	436,2	456,5
338,0	537,2	408,7	376,1	330,0	535,4	381,3	397,9
0,391	0,611	0,467	0,433	0,384	0,607	0,436	0,456
0,338	0,537	0,409	0,376	0,330	0,535	0,381	0,398
15307,7			15655,1				
7,7			10,1				
113,0			117,5				
14757,0			13973,3				
14757,0			13973,3				
599,9			-183,8				
4,24			-1,30				

	K12A																					
	151	151	50	1140050	561	492,1	19,4	95,5	59,1	455,7	396,6	0,456	0,397									
	151	151	50	1140050	534,4	468,8	17,8	83,4	56,3	441,6	385,3	0,442	0,385									

\* Detailid on kujutatud töö lisan 2. Koodi esimene täht märgib antud detaili puiduliiki: S – saar, T – tamm, K – kuusk. Number tähe taga näitab tootejoonise koodi, mis on toodud lisan 2. Lisatähis A ja B on vaid kahe samasuguse toote eristamiseks ühe katse juures.

\*\* Mõõtmed on antud järgmiselt: naaglil esimene mõõde pikkus ja teine diameeter, tapliidet kujutavate detailide esimesed kaks mõõdet kõrgus ja laius ning kolmas detaili paksus.