

Säästva tehnoloogia õppetool

**PUIDUST NAAGLITEGA PUIT-PUIDUGA LIIDETES  
MULJUMISTUGEVUSTE MÄÄRAMINE KATSETE  
ABIL**

**DETERMINATION OF EMBEDMENT STRENGTH BY TESTING IN WOOD-  
PEGGED TIMBER JOINTS**

Üliõpilane: Joosep Järvpõld .....

Juhendaja: Illimar Kalk .....

TARTU 2014

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:

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud: ..... (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: ..... (allkiri)

**Abstract of the Master's Thesis**

Tallinn University of Technology Tartu  
College

Author: Järvpõld J  
Supervisor: Kalk I

Place and date: Tartu, 2014  
Language: Estonian

**Determination of embedment strength by testing in wood-pegged timber joints**

65 pages      34 figures      11 tables      4 appendixes      1 binding

Historically there has been used wood pegs in many different timber joints. But in today's Europe there is no calculation methods for wood-pegged timber joints that engineers and designers could follow.

The aim of Master thesis is to determine embedment strengths by testing in wood-pegged timber joints. Standard EN 383:2007 „Timber structures – Test methods – Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners“ was used for tests. The analysis consists of three main parts:

1. to evaluate in Europe used test method, that is based on determining embedment strength for dowel type fasteners, if it is suitable for testing wood pegs and give suggestions for new test method if necessary;
2. trying to derive an equation based on test results, which would be possible to calculate embedment strength for wood pegs and base materials comparing test results with calculations of Eurocode 5 that is based on steel peg joints and with calculations of TFEC 1-2012 that is based on wood-pegged joints.;
3. based on test results to analyse, what will get determinant failure of wood peg.

Because with wood pegs fastened joints depends on different parameters and strength measures, then this result of this paper is not final. It potentially sets up new hypothesis on the topic to spring off subsequent papers.

Keywords: wood peg fasteners, dowel connections, embedding strength, test method.

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	6
1. Kirjanduse ülevaade.....	8
1.1 Puit ehitusmaterjalina.....	8
1.1.1 Puidu keemiline koostis ja struktuur.....	8
1.1.2 Puidu tugevus .....	8
1.2 Üldiselt naagelliidetest.....	12
1.3 Puitnaaglite võrdlus metallnaaglitega: eelised ja puudused .....	13
1.4 Puitnaaglitega kinnitatud liited.....	15
1.5 Kahelõikelise terasnaagli normkandevõime Euroopa standardi Eurokoodeks 5 järgi .....	18
1.6 Muljumistugevus .....	20
1.6.1 Muljumistugevuse määramise põhimõtted .....	20
1.6.2 Muljumistugevus Euroopa standardi Eurokoodeks 5 põhjal terasnaagli korral .....	22
2 Töö eesmärk ja ülesanded .....	24
3 Materjal ja meetodika .....	25
3.1 Katsemetoodika .....	25
3.2 Katsekehad .....	26
3.3 Katseseade .....	27
3.4 Katsekehade ettevalmistus .....	27
3.5 Protseduur.....	27
3.5.1 Katseseadme kalibreerimine .....	27
3.5.2 Naagli asetamine katsekehasse.....	28
3.5.3 Katsekeha asetamine katseseadmesse.....	28
3.5.4 Mõõteseadme asukoht.....	28
3.5.5 Eeldatav maksimum jõud.....	28
3.5.6 Koormuse rakendamine .....	28
3.5.7 Deformatsioonide salvestamine.....	29
3.5.8 Tiheduse ja niiskussisalduse määramine.....	30
3.6 Tulemused .....	31
3.6.1 Arvutused .....	31
3.6.2 Reguleerimine.....	31

3.7	Katse raport .....	31
3.8	Katse materjal .....	32
3.9	Eeldatava maksimum jõu arvutamine .....	33
4	Katsetulemused ja analüüs .....	37
4.1	Katse käik .....	37
4.2	Katsed ja katse tulemused .....	39
4.3	Katsetulemuste põhjal nihketugevuse, muljumistugevuse ja paindetugevuse leidmine .....	39
4.4	Terasnaagliga olukorras arvutused Eurokoodeks 5 järgi .....	46
4.4.1	Muljumistugevus .....	46
4.4.2	Voolavuspiirile vastava paindemomendi leidmine .....	46
4.5	Puitnaagli arvutused USA puitnaaglitega standardi TFEC 1-2012 järgi .....	47
4.6	Muljumistugevuse normväärtus .....	49
4.7	Katsetulemuste põhjal naaglit purustava jõu analüüs .....	50
5	Arutelu ja järeldused .....	54
5.1	Standardi EN 383:2007 katsetoodiga sobivus puitnaaglitega liite muljumistugevuste määramiseks .....	54
5.2	Puitmaterjali nihketugevused naagelliite korral .....	54
5.3	Muljumistugevuse normväärtus .....	55
	KOKKUVÕTE .....	56
	KASUTATUD KIRJANDUS .....	58
	Lisa 1. Alusmaterjalite joonised .....	59
	Lisa 3. Katseseeriade tulemused graafikutena .....	62
	Lisa 4. Katse joonised .....	64

## SISSEJUHATUS

Puit on üks vanemaid ja laialdasemalt kasutatust leidev ehitusmaterjal. Seda on kasutatud sajandeid edukalt. Tänu tema kergele kaalule, piisavale tugevusele ja töötlemise hõlpsusele leiab puit laialdast kasutust ka tänapäeva ehitustegevuses. Liimpuidu ja ristkihtpuidu kasutusele võtuga on puidu osakaal veelgi suurenenud.

Puidu eelisteks teiste konstruktsioonimaterjalide ees on:

- seda on soodne toota,
- puit on taastuv loodusvara,
- puidul on suhteliselt hea kaalu ja tugevuse suhe,
- puit sobitub igasse keskkonda ja
- lisaks on puidu tekstuur esteetilise välimusega.

Magistritöö valik toimus koostöös juhendaja Illimar Kalk'iga. Kuna tema juhendamisel viidi läbi Liisi Must'a poolt tehtud töö „Puidust naaglitega puit-puiduga kahelõikeliste liidete arvutusteooriate analüüs“, milles pöörati suuremat tähelepanu puidust naaglite paindetugevuse määramisele ja lisaks tehti vastavad katsed teooriate tõestamiseks. Kuna paindetugevus ei ole ainuke tugevusnäitaja liite arvutamisel ja Euroopas vastavad arvutusalusused puitnaagliga liidete arvutamiseks puuduvad, siis saigi tööd jätkata naagli enda ja saematerjalist alusmaterjali muljumistugevuse määramisega. Puitnaaglitega puit-puiduga liidete arvutusjuhendid oleks suureks abiks vanade puitkonstruktsioonide restaureerimisel kui ka uute puitliidete loomisel.

Magistritöö peamiseks eesmärgiks on katsetamise teel määrata puitnaagli ja alusmaterjali muljumistugevused. Kuna puitnaaglitega kinnitatud liide sõltub erinevatest parameetritest, siis antud magistritöö ei ole veel lõplik lahendus, küll aga annab töö täiendavat ülevaadet ja analüüsi ning ideesid, millest järgnevates uurimustöödes lähtuda.

Eestis on antud temaatikat käsitlenud TTÜ Tartu Kolledži üliõpilane Liisi Must. Tema magistritöö „Puidust naaglitega puit-puiduga kahelõikeliste liidete arvutusteooriate analüüs“ esimeses osas keskenduti naaglile ja puitnaaglitega kinnitatud liidete kirjeldamisele ning kirjeldati erinevaid standardeid, mis käsitlevad puit-puiduga naagelliiteid. Teiseks analüüsiti standardeid ja võrreldi valemid ning toodi välja katse metoodika. Kolmandana toodi välja tulemused erinevate standardite vahel, lisaks veel

katse tulemused ja analüüs. Ka EMÜ üliõpilane Liia Mõrd on käsitlenud puitnaaglite temaatikat oma töös „Puit-puiduga liidete kasutamine ja projekteerimine ehitistes“. Antud töös keskenduti esimesena tappliidetele ja nende ajaloole. Teisena toodi välja erinevate riikide standardid, mis käsitlevad puitnaagleid. Nende põhjal on tehtud ka arvutused ning võrreldud neid arvutusi konkreetse hoone põhjal. Autori teada pole Eestis rohkem uurimustöid puit-puiduga puitnaagliga kinnitatud liidete kohta tehtud.

Käesolev magistritöö koosneb viiest peatükist ja neljast lisast. Esimeses peatükis räägitakse naagli tööpõhimõttest selle traditsioonilistest kasutuskohtadest. Tuuakse välja naagelliite arvutusalsused standardi Eurokoodeks 5 põhjal. Teises osas seletatakse ära töö eesmärk ja püstitatakse töös lahendatavad ülesanded. Kolmandas peatükis kirjeldatakse katsemetoodikat, mis on katsete jaoks aluseks võetud. Töö neljandas peatükis on välja toodud katse tulemused ja nende põhjal välja arvutatud tugevusnäitajad. Lisaks on esitatud tugevusnäitajate arvutused terasnaagliga puitliite korral Eurokoodeks 5 põhjal ning USA puitnaaglitega liite standardi TFEC 1-2012 järgi, et võrrelda tulemusi katsetega saadud tugevusnäitajatega. Viiendas peatükis on esitatud tulemuste analüüs ja järeldused. Lisas 1 on esitatud katses kasutatavate puitmaterjalide kujujoonised ja lisas 2 terasrakise kujujoonis koos vajalike detailidega. Lisas 3 on esitatud osade katseseeriade tulemused graafikutena. Lisas 4 on välja toodud valik katsekehade purunemisfotodest ja katsekehadest.

# 1. Kirjanduse ülevaade

## 1.1 Puit ehitusmaterjalina

### 1.1.1 Puidu keemiline koostis ja struktuur

Puidu koostis on keskmiselt järgmine: süsinikku – 50%, hapnikku – 43%, vesinikku -6%, lämmastikku – 0,2%, naatriumi, kaaliumi, kaltsiumi, fosforit ja teisi elemente – 0,8%. Puidu põhilisteks koostisosadeks on tselluloos ja ligniin; vähesel määral sisaldab ta ka rasvu, vaike jne. [1]

Ehituskonstruktsioonides kasutatakse peamiselt pika ja sirge tüvega, suhteliselt väheste looduslike vigadega ning küllaldase tugevusega ja laia levikuga okaspuitu (mänd või kuusk). [6]

Lehtpuit (peale mõne erandi, näiteks tamm) on okaspuidust nõrgem ja kergemini kõdunev. Teda kasutatakse ajutistes konstruktsioonides, raketistes jne.[6]

### 1.1.2 Puidu tugevus

Puidu looduslikud vead, aukudest ja sisselõigetest põhjustatud pingekontsentratsioonid, keskkonna tingimused (temperatuur ja niiskus) ja koormuse kestus mõjutavad kõige rohkem konstruktsioonipuidu tugevust. [6]

Niiskus on peamine puidu tugevust mõjutav parameeter. Seetõttu taandatakse puidu (tugevus)omadused 12% juurde, et neid saaks adekvaatselt omavahel võrrelda. [2] Mida kuivem on puit, seda tugevam on puidukiudusid siduv ligniin, mis töötab nagu liim, ja seda suurem on vastupanu välisjõududele. Keskmiselt vähendab üheprotsendiline niiskuse tõus paindetugevust 2% ja survetugevust 4% võrra. Näiteks alaneb survetugevus 400 kg/cm<sup>2</sup>-lt 320-le, kui niiskus tõuseb 15%-lt 20%-le. [7]

Kõrgematel temperatuuridel on puidu tugevus väiksem. Temperatuuri tõustes suurenevad lisaks puidu deformatsioonid. Samal ajal tekivad kuivamisega lisapinged puidus olevate suurte okste juures. [2]



Puidu looduslikud vead vähendavad puidu tugevust. Nendeks on oksad, tüve koonilisus ja keerdkasv. [6] Samamoodi vähendavad puidu tugevust nõrgestused. Konstruktioonide valmistamisel tuleb elementidesse teha sisselõikeid, puurida auke jne. Sellistes nõrgestatud kohtades tekivad pingete kontsentratsioonid, mis vähendavad elemendi kandevõimet. [1]

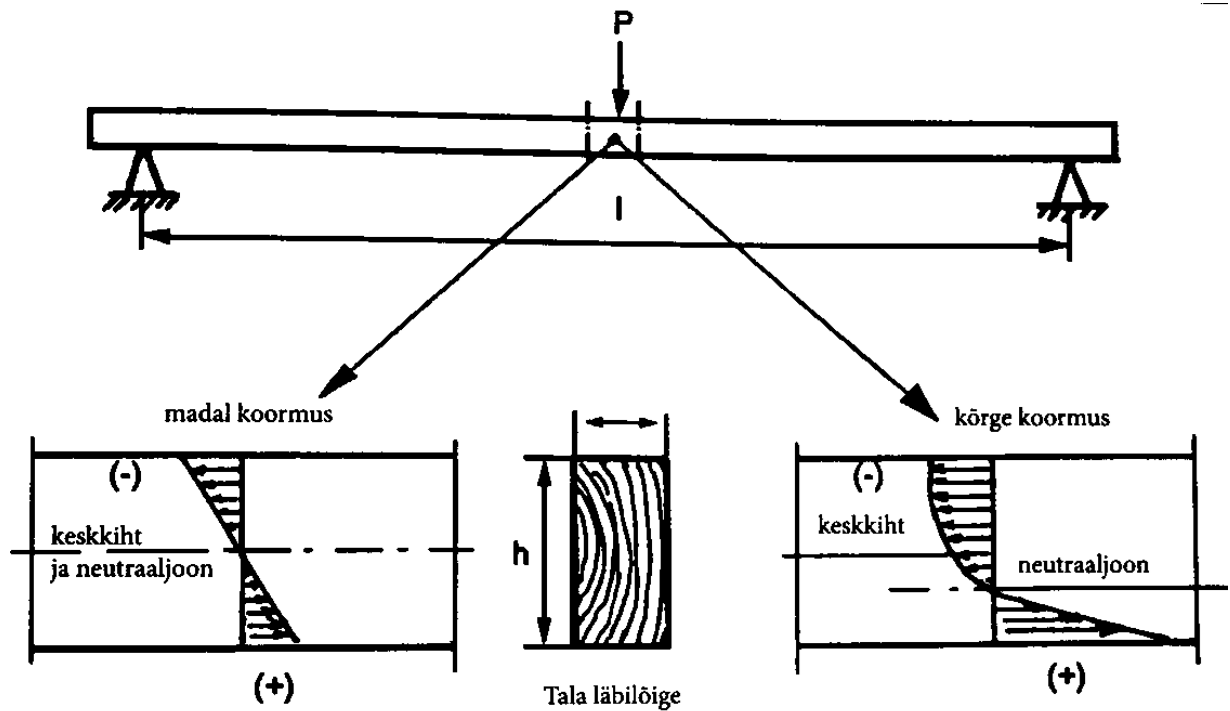
Sõltuvalt puitkonstruktsioonile rakenduva koormuse suunast, võivad materjalis tekkida erinevat tüüpi pinged, seega esinevad erinevad tugevused. Neist sagedasemad on tõmbe-, surve-, painde- ja nihketugevused. Tähtsad on ka löögi- ja lõhestamistugevused ning kõvadus. [3]

Defektideta puidu survetugevus on pikikiudu umbes pool samasuunalise tõmbetugevuse väärtusest, kuid ei sõltu niipalju kaldkiulisusest ega okstest. Suure tõmbepinge all rebitakse kiud katki, kuid tugeva survepinge korral kiud painduvad ja nihkuvad kõrvale. [3] Puidu survetugevus pikikiudu on keskmiselt 40 MPa. Puidu looduslike vigade mõju tugevusele, võrreldes tõmbega, on väiksem. [6] Survetugevus on ristikiudu 5...6 korda väiksem kui pikikiudu. [3]

Tõmmet iseloomustab plastse deformatsiooni puudumine. Seejuures purunemine toimub elemendi telje suunas pikemas piirkonnas järk-järgult. [2] Vigateta puidu tõmbetugevus on võrreldes teiste tugevuse liikidega kõige suurem pikikiudu. Vigateta männi- ja kuusepuidu pikikiudu tõmbetugevus on võrreldes nende survetugevusega peaaegu topelt suurem. Ristikiudu on see aga ainult murdosa pikisuuna tugevusest. Kui tõmbetugevuse kaudu vaadelda koormuse ja kiusuuna muutumist  $0^\circ$ -st kuni  $90^\circ$ -ni, siis juba  $15^\circ$  kiusuuna muutumise korral langeb tõmbetugevus umbes poole võrra. [3] Standardsel niiskusel, looduslike vigadeta väikeste proovikehade tõmbetugevus on kiudude suunas keskmiselt 100 MPa. Konstruktioonelementide tugevust vähendavad puidu looduslikud vead, mis põhjustavad ristlõikes sisemise ekstsentrilisuse ja pingekontsentratsiooni. [6]

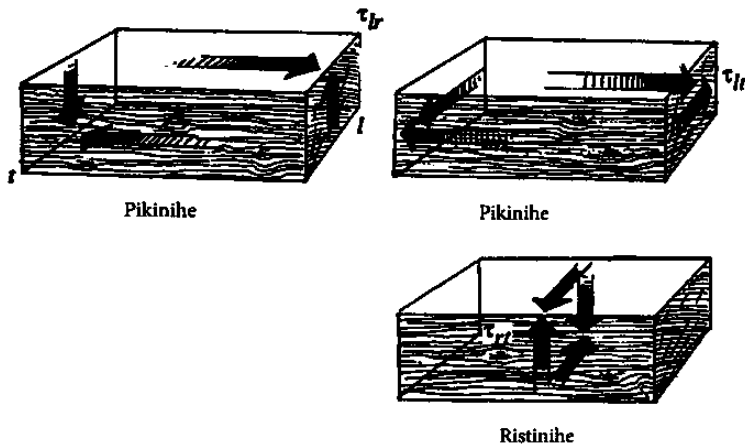
Paindetugevus on kombinatsioon tõmbe- ja survetugevusest (ka nihketugevusest). Selle väärtus defektideta puiduproovis jääb arvuliselt tõmbe- ja survetugevuse väärtuste vahele. Kahel toel asetseva tala koormamisel välisjõuga surutakse tala ülemine pind kokku ja alumine pind venitatakse veidi pikemaks (vt. joonis 1.1). Jälgides ristlõike pingediagrammi tala keskel, on näha, et diagrammi ülemise osa survepingest alumise osa tõmbepingeni läbib diagramm 0-joone umbes ristlõike poolel kõrgusel. Tala keskkõrgusel asetseb neutraaltsoon, mis mõõdukate koormuste rakendamisel jääb pingevabaks. [3] Puidu keskmine paindetugevus on 75 MPa. Puidu defektid vähendavad painutatud elemendi

tugevust, eriti tõmbetsoonis asetsevad oksad. Oksaläbimõõdu puhul 1/3 elemendi küljepikkusest väheneb tugevus õhukeses saematerjalis 0,5...0,45 ja palkides ning prussides 0,6...0,8 standardse katsekeha tugevuseni. [6]



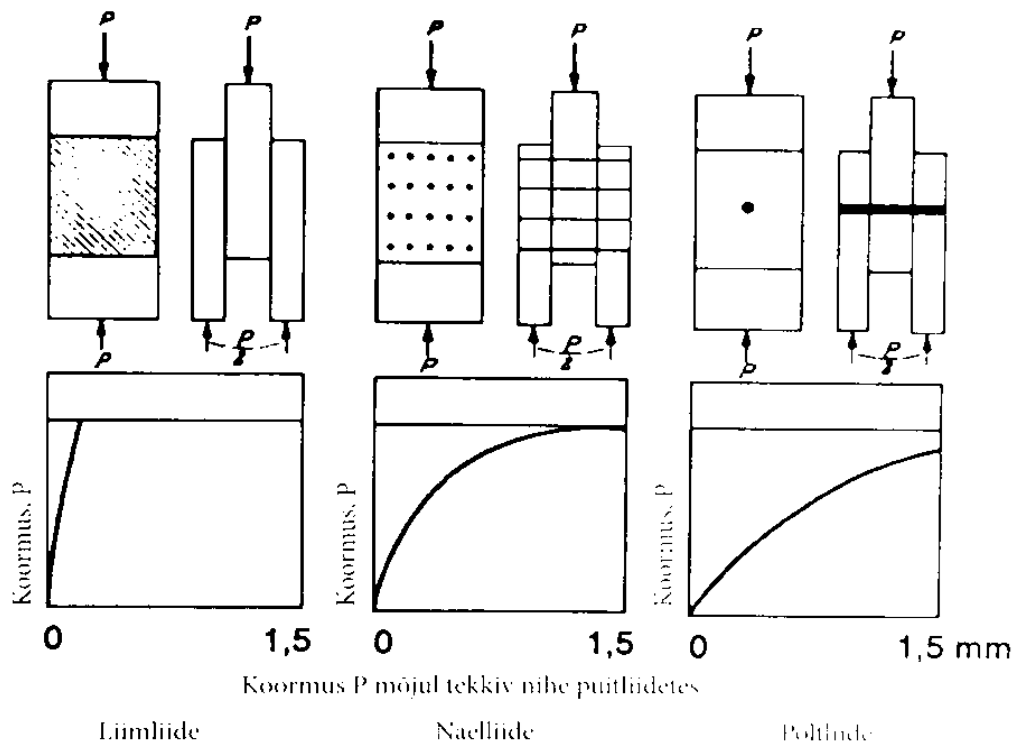
**Joonis 1.1.** Näide koormusest talale ja epüürid paindepingete jaotusest [3]

Nihkepinged tekivad, kui välisjõud mõjutavad keha pindasid. Välisjõud nihutavad kihte teineteise suhtes paralleelselt (vt. joonist 1.2). Praod ja lõhed vähendavad oluliselt nihketugevust. Nihketugevusel on suur tähtsus puitühenduste arvutamisel (vt. joonist 1.3).



Joonis 1.2. Nihke mõju puidus [3]

Erinevate ühenduste efektiivsust saab omavahel võrrelda nende kandevõime ja vajaliku kokkupuutepinna suhtega. [3] Standardkatse puhul on okaspuidu nihketugevus keskmiselt 7 MPa. Nihet iseloomustab plastse deformatsiooni täielik puudumine. Nihkepinge jaotus lõikepinnas on väga ebahütlane ja suurused olenevad lõikepinna pikkuse ja nihkejõu ekstsentrilisuse suhtest ning lõikepinnaga risti mõjuva põikjõu  $Q$  suurusest. [6]



Joonis 1.3. Kookmus-deformatsiooni diagramm liim-, nael- ja poltliidetele [3]

## 1.2 Üldiselt naagelliidetest

Naagel on põhiliselt paindele töötav sale silindriline varras või plaat, mis läbib ühendatavaid elemente ja takistab nende omavahelist nihkumist. Kasutatakse nii plaat- kui ümarnaagleid. Kuna plaatnaaglid laialisuruvat jõudu ei realiseeri, siis on vajalik täiendavaid kinnituselemente poltide näol. Laialdaselt kasutatakse ümarnaagleid sõrestik- ja raamkonstruktsioonides ning konstruktsioonelementide omavaheliseks ühendamiseks. [2] Naagelühenduste peamiseks kasutusala on laudade ja prusside tõmbejätkud, kergete laudsõrestike sõlmed, liittalad jne. Ühe naagli kandevõime on suhteliselt väike, mistõttu ühendus koosneb tavaliselt suurest arvust naaglitest. Ühenduse kandevõime kasvab võrdeliselt naaglite arvuga, olenemata ühenduse pikkusest, sest piirilukorras on ühenduse deformatsioonid küllalt suured ning jõudude jaotus naaglite vahel ühtlane. Ühenduse laialipillatuse ja ühendatavate elementide vähese nõrgestuse tõttu avaldavad puidu defektid ühenduse kandevõimele suhteliselt vähest mõju ja materjali ärakasutamine on parem kui teiste ühenduste puhul. Naagelühenduste valmistamine on lihtne ja võimaldab lihtsate mehhanismide laialdast kasutamist. [1]

Naagelühendused võivad olla kas ühe-, kahe- või mitmelõikelised. Rakendatud jõudude iseloomu järgi jagunevad ühendused sümmeetrilisteks ja ebasümmeetrilisteks. Tavaliselt langeb naagelühendusele mõjuva jõu suund kokku ühendatavate elementide puidukiudude suunaga (muljumispinged naaglilt puidule mõjuvad piki kiudu). Kui aga ühendatavad elemendid lõikuvad nurga all (näiteks laudsõrestiku sõlmedes), muljub naagel puidukiude sama nurga all ja ühenduse kandevõime muljumisele on väiksem. Ühenduste arvutamisel võetakse aluseks skeem, kus muljumine toimub piki kiudu. [1]

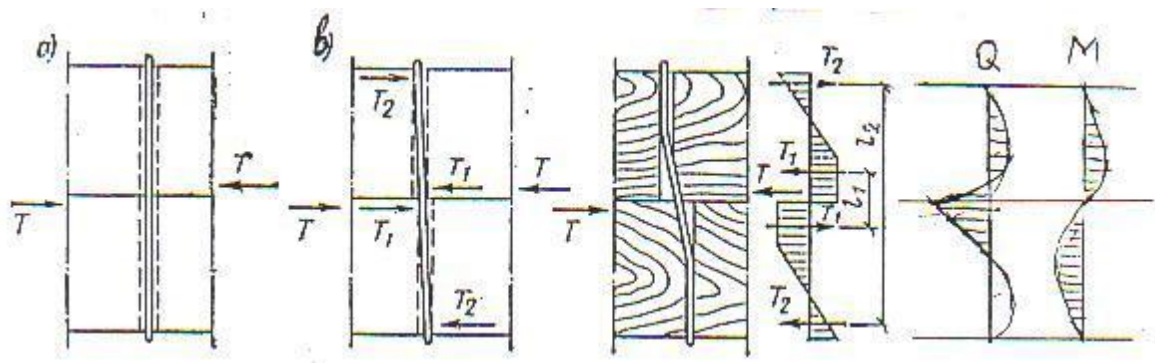
Naagelühenduse kandevõime piirilukord saavutatakse ühel järgmistest juhtudest:

- 1) kui puruneb põhielement tõmbele naaglitega nõrgestatud ristlõikes
- 2) kui põhielemendi nihketugevus pole küllaldane naaglilt tuleva jõu ülekandmiseks.
- 3) kui muljumispinged naagli ja puidu vahel saavutavad puidu muljumistugevuse
- 4) kui paindepinged naaglis saavutavad voolavuspiiri ja naaglis tekib plastne šarniir.

[1]

Naagel töötab liites kui tala elastoplastsel alusel. Nihkudes liidetavad elemendid püüavad naaglit pöörata liitekohas ja saabub olukord, kus naagel toetub liidetavate elementide

servadel (vt. joonist 1.4 b). Seejärel hakkab naagel kõverduma ja jõu edasisel suurendamisel naagli ning puidu kontakt suureneb ja puidus tekivad ebäühtlased muljumispinged (vt. joonise 1.4 paremat poolt) ning elementide servad liitühenduses on rohkem muljutud kui nende keskosa. Muljumisest tekivad kahemärgilised pinged, kus resultantjõud moodustavad teineteist tasakaalustavad jõupaarid, mis takistavad naagli pöördumist.



**Joonis 1.4.** Naagli töötamine liites [2]

Seosed näitavad, et naagli tasakaal tagatakse ainult pikijõududega, mis on paralleelsed liidetavate elementide omavahelise nihkumisega. Nagu nähtub sisejõudude M ja Q epüüridest, naagelühendustes puuduvad toereaktsioone tekitavad põikjõud. [2]

Puitnaaglid töötavad analoogiliselt terasnaaglitega. Puitnaaglite kasutamisel väheneb terasekulu, kuid suureneb ühendatava elemendi ristlõike nõrgestus. Puitnaaglid valmistatakse sirgete kiududega puiduprussidest treimise teel. [1]

### 1.3 Puitnaaglite võrdlus metallnaaglitega: eelised ja puudused

Puit- ja metallnaagel töötavad sarnasel tööpõhimõttel. Samas on materjalid täiesti erinevad ja erinevates tööolukordades ilmnevad erinevad eelised ja puudused.

Puitnaaglid on parema vastupidavusega ümbritseva keskkonna mõjudele. Puidust naaglid sobivad kasutamiseks tingimustes, kus on karta terasnaaglite intensiivset korrodeerumist.

[1] Puit kannatab happeid ja muid kemikaale tunduvalt paremini kui teras. [7] Kuna metalli soojusjuhtivus on suurem kui puidul võib metalldetailidele kondenseeruda õhuniiskus, mille tulemusena kinnituselementi ümbritsev puit saab niiskuskahjustusi ning liite eluiga ja kandevõime väheneb. [8] Puit on tulekindlam kui kaitsemata teras. Nimelt oma hea soojajuhtivuse tõttu kuumeneb kaitseta teras õige kiiresti juba väikseski tules ja pehmeneb selle tagajärjel. Juba 600°C juures kaotab teras 2/3 oma tavalisest tugevusest, hakkab looka vajuma ja varisema. [7]

Naaglates kasutatava puidu niiskus ei tohi olla väiksem konstruktsiooni puidu niiskusest, kuna naagli paisumine niiskusel võib esile kutsuda hilisema elementide pragunemise. [1] Puitnaaglitega puit-puiduga liited on metallkinnituselemendiga liidetest stabiilsemad kuna nii tapp kui ka selle naagel on samast materjalist ning elementide reageerimine temperatuuri ja niiskuse muutustele on sarnane. Kuna metalli tugevusomadused on puidu omadest paremad, siis võib metallkinnituselementidega konstruktsioonis esineda pragunemist, lõhesid ning ka muljumist. Puitnaagli ja tapi materjalide sarnaste omaduste tõttu töötab tapp paremini dünaamilistele koormustele, mille tõttu kasutatakse puitnaaglitega kinnitatud tappe seismiliselt ohtlikes piirkondades. [8]

Tammenaaglite kasutamisel väheneb terasekulu, kuid samas suureneb ühendatavate elementide ristlõike nõrgestused. [1] Kuigi naaglid konstruktsiooni omakaalust väga suurt osa ei moodusta, on puitnaaglite kasutamine efektiivsem, sest puidu tugevus erikaalu kohta on umbes 2 korda suurem kui metallil. Puitu saab lõigata, saagida, raiuda, naelutada ja painutada palju kergemini ja lihtsamate riistadega ning lihtsamal menetlusel kui ehitusterast. [7] Seega võib väita, et puitnaagliga liidetud liide on ökonoomsem.

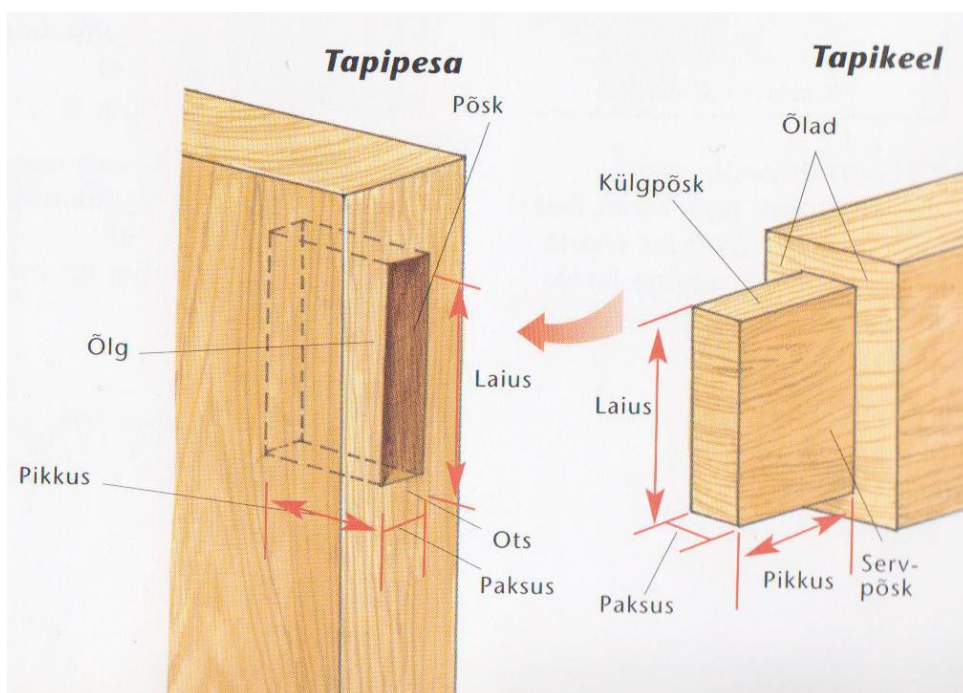
Puitnaaglite kasutamise peamiseks puuduseks Euroopas on ühtsete arvutusjuhendite puudumine, mille tõttu kiputakse sõlmi üle dimensioneerima ning sellega kaob ka ökonoomsuse faktor. [8]

## 1.4 Puitnaaglitega kinnitatud liited

Naagleid on peamiselt kasutatud laudade ja prusside tõmbejätkuna, kergete laudsõrestike sõlmedes, liittalades jne. [1] Tappühendus on ilmselt kõige laialt levinum liide maailmas. Naaglid on lisatud liitele, et liitel oleks ka tõmbekandevõime. [11]

Tappseotise võib kindlustada naagliga nii, et naagli sisselöömisel tekib seotist kokkutõmbav eelpinge. Selleks kasutatakse koonilist naaglit. Sellist seotist kasutatakse enamasti talupojamööbli, kuivatamata puidust valmistatud toodete ning puusepatööde puhul. [12]

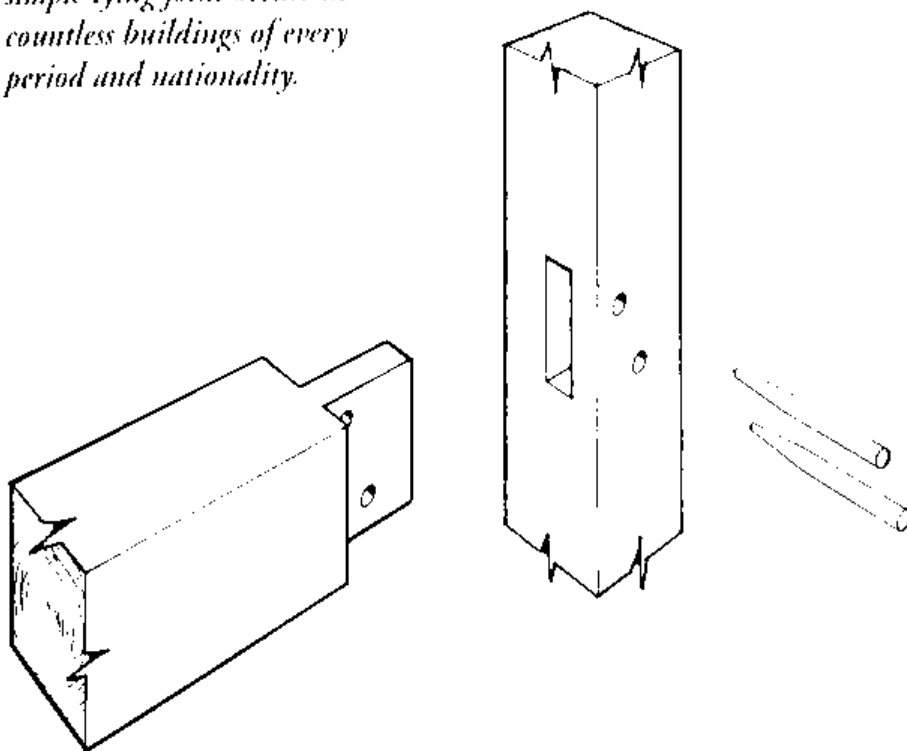
Levinuim kahelõikeline seotis on keeltapp. Joonisel 1.5 on kujutatud klassikaline keeltapp, kus on kirjas tapi peamised osad ja nimetused.



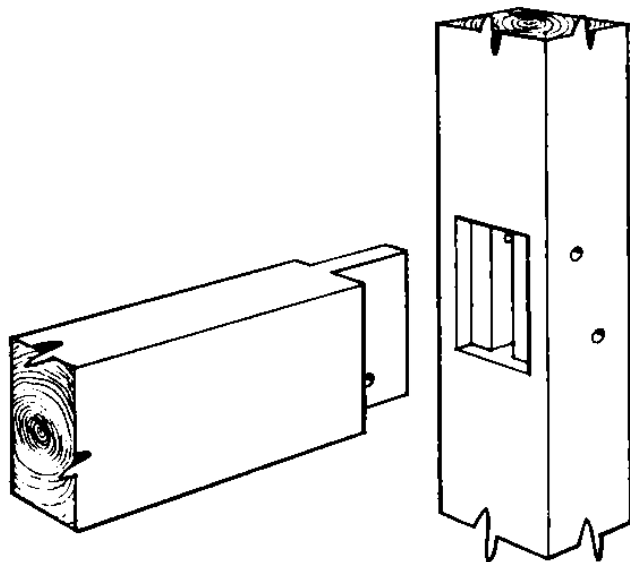
**Joonis 1.5.** Keeltapi osad ja nimetused. [12]

Tala ja posti sõlmes on kasutatud tavalist keeltappi (joonis 1.6) või õlaga keeltappi (joonis 1.7). Samuti on kasutatud kaldtoega keeltappi (vt. joonist 1.8) tala ja posti sõlmes. Sellised liited on tugevad ning puitnaaglid annavad sõlmele tõmbekandevõime ja fikseerivad liite. [11]

*simple tying joint occurs in countless buildings of every period and nationality.*

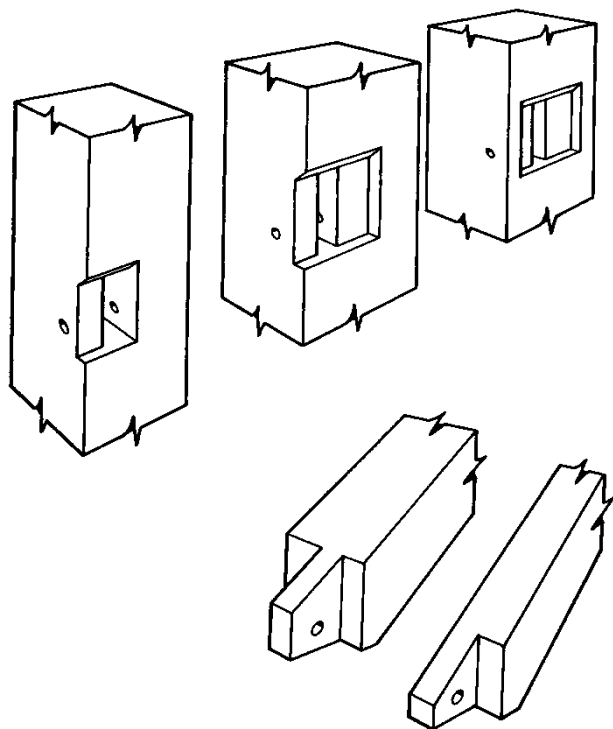


**Joonis 1.6.** Harilik keeltapp [11]



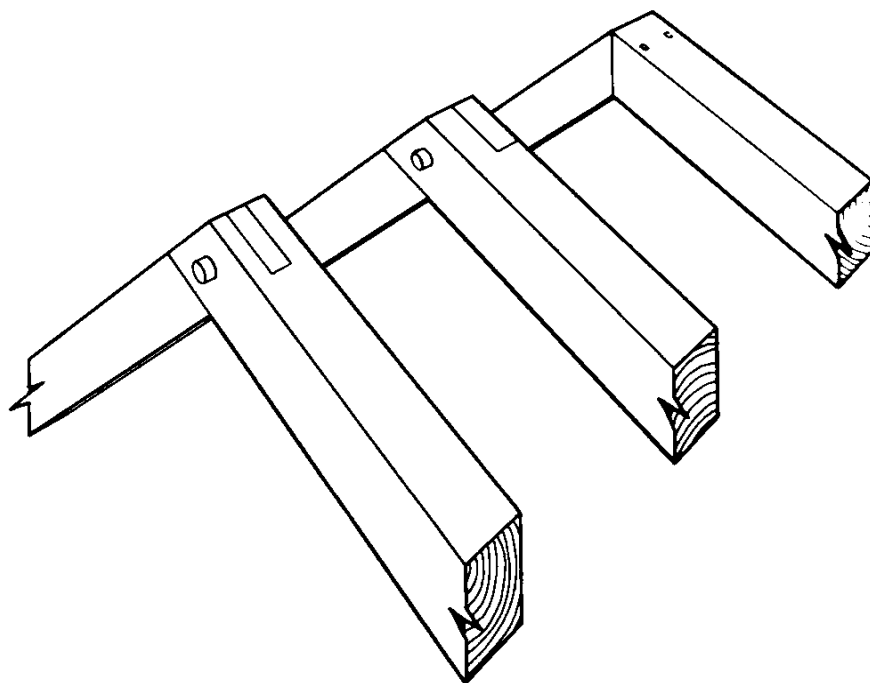
**Joonis 1.7.** Ölaga keeltapp [11]



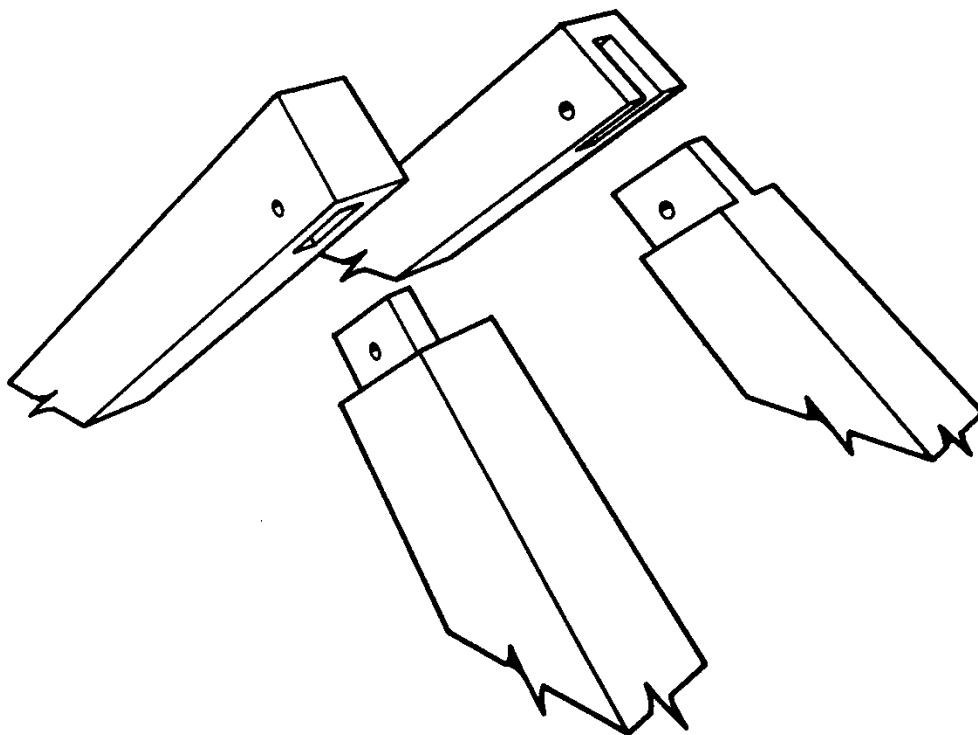


**Joonis 1.8.** Kaldtoega keeltapp [11]

Samuti on harjasõlmes kasutatud puitnaagleid liite fikseerimiseks. Joonistel 1.9 ja 1.10 on näha mõningad näited, kus on kasutatud puitnaaglit liite fikseerimiseks.



**Joonis 1.9.** Alt vasakult esimene lahtine keeltapp, pool poolega seotis ja pökkseotis[11]



Joonis 1.10. Kinnised keeltapid [11]

## 1.5 Kahelõikelise terasnaagli normkandevõime Euroopa standardi Eurokoodeks 5 järgi

Eurokoodeks 5-ss esitatakse arvutusvalemid ühe- ja kahelõikeliste ühenduste korral ühe kinnituselemendi ühe nihkepinna kohta. Liite ühe kinnituselemendi ühe lõikepinna normatiivne kandevõime arvutatakse järgmiste valemitega [10]:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} * t_1 * d \quad (g) \quad (1.1) \\ 0,5 f_{h,2,k} * t_2 * d \quad (h) \quad (1.2) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} * t_1 * d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} * d * t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (j) \quad (1.3) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} * f_{h,1,k} * d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}}, \quad (k) \quad (1.4) \end{array} \right.$$

kus  $t_1$  - on äärmise puitelemendi vähim paksus või süvistussügavus liites (mm),

$t_2$  - on keskmise puitelemendi paksus liites (mm),

$t_{h,i,k}$  - on norm-muljumistugevus puitelemendis (N/mm<sup>2</sup>),

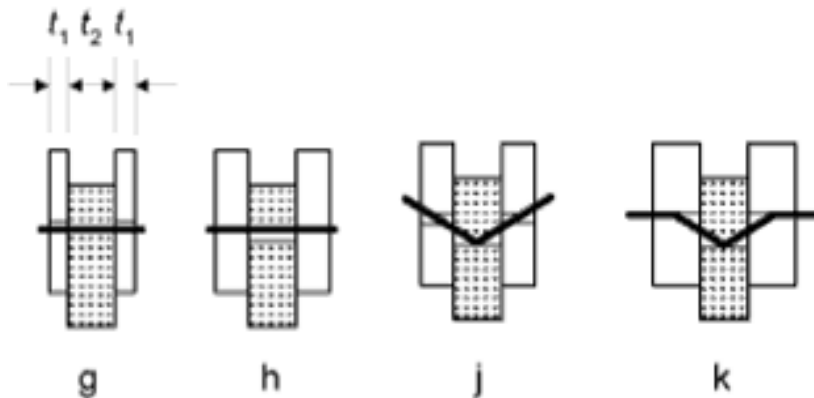
$M_{y, Rk}$  - on voolavuspiirile vastava paindemomendi normväärtus (Nmm),

$\beta$  - on elementide muljumistugevuste suhe, mis arvutatakse valemiga

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (1.5)$$

$F_{ax, Rk}$  on kinnituselemendi teljesuunaline väljatõmbe normkandevõime (N).

Mitmelõikelise liite kandevõime määratakse üksikute liitepindade vähimate kandevõimete summana. [10] Joonisel 1.11 on esitatud kahelõikelise puitliite tööseisundid graafilisel kujul.



**Joonis 1.11.** Kahelõikeline naagelliide [10]

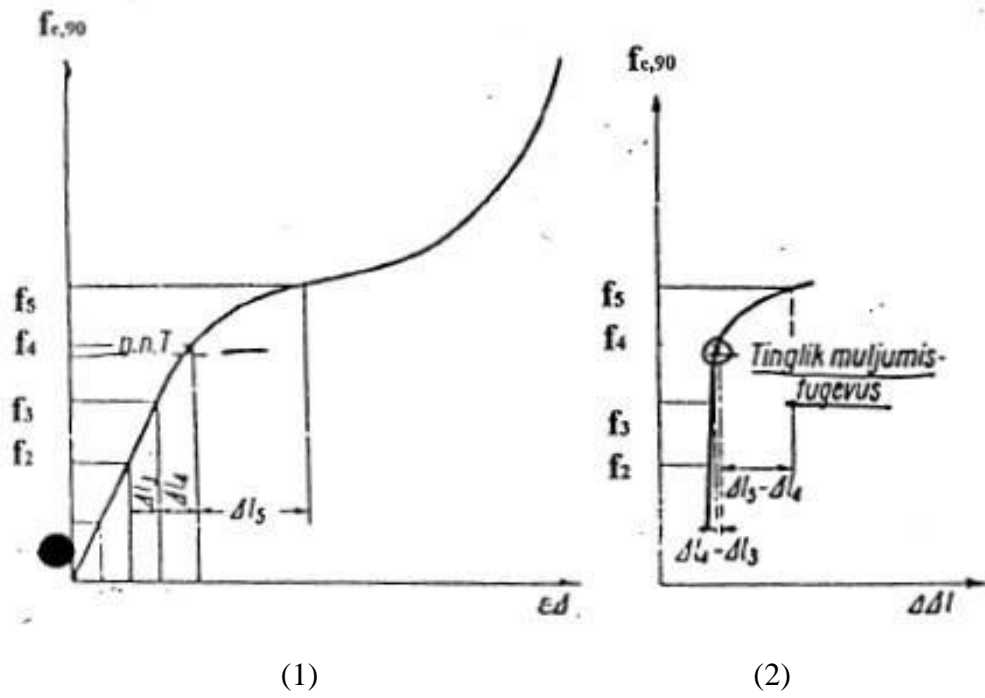
Valemities (1.3) ja (1.4) on esimene liige kandevõime Johanseni voolavusteooria kohaselt, teine liige on nn. kõieefekt. Johanseni voolavusteooria kohaselt tuleb naagelliidete puhul piirata kõie efekti mõju kandevõimele 0%, seega pole vaja kõieefekti käesoleva magistritöö raames käsitleda. [10]

## 1.6 Muljumistugevus

### 1.6.1 Muljumistugevuse määramise põhimõtted

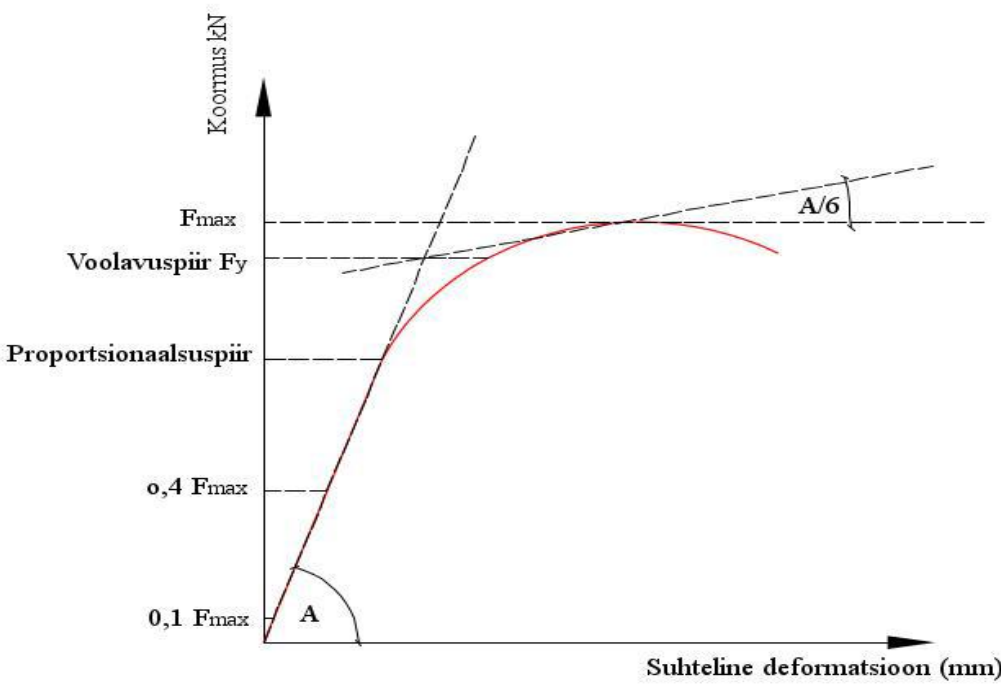
Muljumistugevuseks nimetatakse naagelliites põhimaterjali tugevust vastu seista naagli poolt edasi kantud koormusele. Algselt tehti muljumistugevuse määramiseks katseid metallpoltidele ja -naeltele ning nüüd on jõutud puitnaaglite katsetamiseni. [9] Naagli kandevõime määramisel muljumise ja painde tingimustest vaadeldakse teda talana elastoplastsel alusel. Ülesande lihtsustamiseks loobutakse puidu muljumispingete määramisel naagli paindedeformatsioonidest, mispuhul on muljumisdeformatsiooni jaotus elemendi paksusel lineaarne. [6]

Puidu tugevus survele risti kiudu  $f_{c,90}$  on tunduvalt väiksem kui pikikiudu  $f_{c,0}$  ning deformatsioonid on nii suured, et proovikeha võidakse õhukeseks suruda. Seetõttu kujutab muljumistugevus endast tinglikku suurust, mida piiratakse deformatsiooniga. Seega muljumistugevus on sisuliselt survetugevus ristikiudu, mis saadakse puidu deformatsiooni põhjal selle töötamisel elastses staadiumis. Punkt, kus deformatsioonide lineaarsus lõpeb ja algab diagrammi kõverjooneline osa, on tinglik puidu tugevus survele ristikiudu. Eelnevast kokkuvõttest võib märkida, et puidu töötamist muljumisele saab otsustada lubatud deformatsioonide järgi ja arvutustugevuseks võetakse proportsionaalsuse piir. Proportsionaalsuse piir sõltub muljuva pinna ja katsekeha pinnast (vt. joonist 1.12.). Mida väiksem on see suhe, seda suurem on puidu muljumistugevus (võrdle graafikud 1 ja 2 joonisel 1.12). Selle põhjuseks on asjaolu, et koormatud pinna all oleva materjali põikdeformatsioonid on kõrvaloleva koormamata puidu poolt tõkestatud. Tekib lokaalne ruumiline pingelolukord, milles materjal teatavasti näitab suuremat tugevust. [2]



Joonis 1.12. Puidu muljumistugevuse proportsionaalsus piir

Euroopa standardites ehk Eurokoodeksites võetakse puitmaterjali puhul muljumistugevuse arvutusväärtuseks materjali tinglik voolavuspiir. Kasutatakse European Committee for Standardisationi poolt heakskiidetud meetodit, mida kirjeldab joonis 1.13. [9]



Joonis 1.13. Euroopas kasutatav voolavuspiiri määramise graafik [9]

Selle meetodi kohaselt tuleb esmalt joonestada lineaarne sirge punktide  $0,1F_{max}$  ja  $0,4F_{max}$  vahel ning leida sirge tõusunurk  $A$ . Teiseks tuleb joonestada koormusdeformatsiooni graafikule puutuja maksimaalse koormuse punkti suhtes. Seejärel joonistatakse sirge, mis läbib koormuskõvera maksimumi ning mille tõus on  $A/6$ . Esimesena ja viimasena joonestatud sirgete lõikepunktile vastav koormus on volavuspäärele vastav tugevusväärtus. [9]

### 1.6.2 Muljumistugevus Euroopa standardi Eurokoodeks 5 põhjal terasnaagli korral

Katsete tulemustest lähtudes on tuletatud Eurokoodeks 5 esitatud valemid muljumistugevuse arvutamiseks. Standard esitab puit-puiduga liidetele valemid, kus muljumistugevus sõltub puidu tihedusest ja naagli diameetrist.

Norm-muljumistugevus pikikiudu  $f_{h,0,k}$  (N/mm<sup>2</sup>) on arvutatav valemiga [10]

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01 * d) * \rho_k, \quad (1.6)$$

kus

$\rho_k$  on puidu normtihedus, kg/m<sup>3</sup>

$d$  on kinnituselemendi läbimõõt, mm (peaks olema vahemikus 6...30mm).

Nagu selgus eelnevast peatükist, sõltub muljumistugevus jõu mõjumise suunast puidukiudude suhtes. Kuni 30 mm diameetriga poltide korral tuleks kasutada puidukiudude ja jõu vahelisest nurgast  $\alpha$  sõltuvaid puidu muljumistugevuse  $f_{h,\alpha,k}$  (N/mm<sup>2</sup>) normväärtusi: [10]

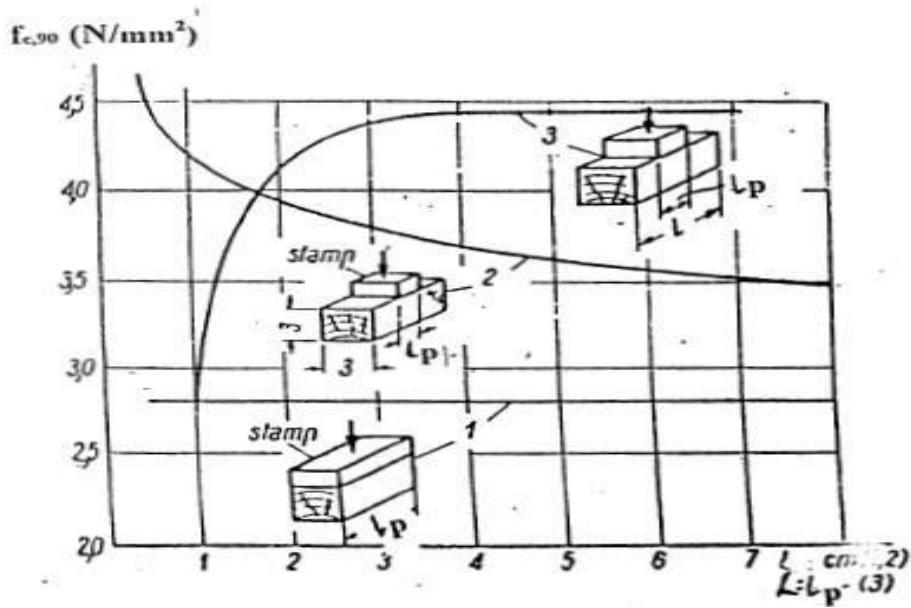
$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} * \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}, \quad (1.7)$$

kus

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 * d & \rightarrow \text{okaspuidule} \\ 1,3 + 0,015 * d & \rightarrow \text{spoonliimpuidule} \\ 0,9 + 0,015 * d & \rightarrow \text{lehtpuidule} \end{cases},$$

$\alpha$  on nurk jõu mõjumissuuna ja pikikiu vahel.

Puidu koormamisel risti kiudu on oluline elemendi vaba otsa pikkus kiudude suunas, kus vaba otsa suurenemisega puidu tugevus risti kiudu suureneb, kuid mitte lõpmatult (joonis 1.14). Standard EVS-EN 1995-1-1 arvestab seda asjaolu survetugevuse leidmisel teguriga  $k_{90}$ . Nimetatud tegur arvestab koormuse konfiguratsiooni, lõhestumisvõimalust ning survedeformatsioone. Lühikese koormatud ala puhul võib muljumistugevus kasvada. [2]



**Joonis 1.14.** Proportsionaalsus piiri sõltuvus muljuva pinna ja katsekeha pinnast.

## 2 Töö eesmärk ja ülesanded

Peamised tegurid, mis mõjutavad naaglitega kinnitatud liite kandevõimet on liite geomeetria ja paindetugevuse ning muljumistugevuse normväärtus. Euroopas on olemas standard Eurokoodeks 5, milles on kehtestatud arvutusreeglid metallnaaglitega liidete dimensioneerimiseks, kuid puuduvad arvutusreeglid puitnaaglitega kinnitatud liidete dimensioneerimiseks.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on katsete abil teada saada puit-puiduga liidete muljumistugevused nii puitnaaglil kui alusmaterjalil.

Magistritöös lahendatavateks ülesanneteks on:

1. katsuda hinnata Euroopas kasutusel oleva terasnaaglitel põhineva muljumistugevuse katsetoodika sobivust puitnaaglitega katsetamiseks ning anda vajadusel soovitusi uue katsetoodika loomiseks;
2. katsetulemuste põhjal proovida tuletada valem, millega oleks võimalik arvutada puitnaagli ja alusmaterjali muljumistugevust võrreldes katsetulemusi Eurokoodeks 5-ga arvutatud terasnaaglite ning USA puitnaaglitega liite standardi TFEC 1-2012 arvutustulemustega;
3. katsete põhjal analüüsida, mis saab määravaks naagli purunemisel.

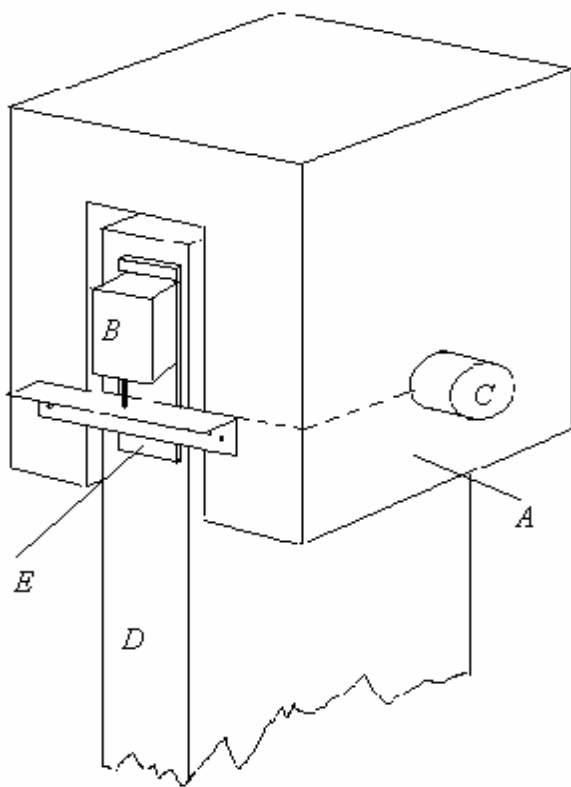


### 3 Materjal ja metoodika

#### 3.1 Katsemetoodika

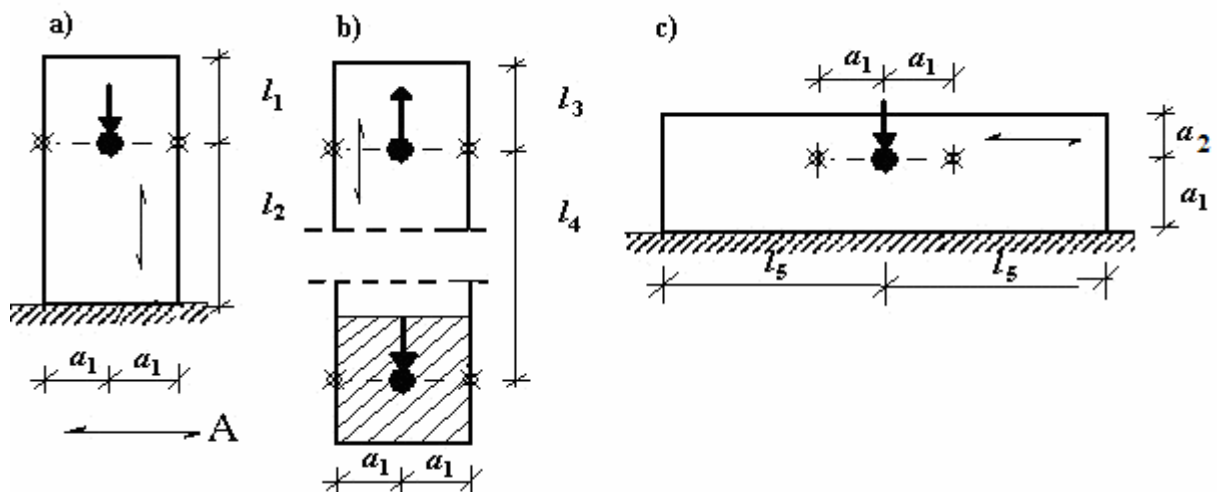
Katse tuleb läbi viia naagliga kasutades katseskeemi, mis on näidatud joonisel 3.1. Katse tuleb sedasi konstrueerida, et oleks välistatud naagli läbipaine katse ajal.

Puitnaaglit koormatakse läbi terasrakise, mis peab olema risti puitnaagli telje suhtes. Koormus ja deformatsioon mõõdetakse vastavalt katseskeemile. Katsekeha kas surutakse (joonis 3.2. a) või tõmmatakse (joonis 3.2. b). Massiiv- ja liimpuitu koormatakse kas paralleelselt (joonis 3.2. a ja b) või ristikiudu (joonis 3.2 c). [5]



A - terasrakis, B - nihke mõõtesead, C – puitnaagel, D – katsekeha, E – liist

**Joonis 3.1.** Katseskeem



A - puiduki suund,  $\square$  - mõõtepunkt

**Joonis 3.2.** a) survekatse pikikiudu, b) tõmbekatse pikikiudu, c) survekatse ristikudu

### 3.2 Katsekehad

Katsekehaks on puidust või puidupõhisest plaatmaterjalist, mille sisse on asetatud puitnaigel, mis on risti katsekeha pinnaga. Katsekehade mõõtmed on antud tabelis 3.1. Katsekeha paksus  $t$  peaks olema vahemikus  $1,5d$  kuni  $4d$ , et katseskeemi põhimõte oleks täielik. [5]

**Tabel 3.1.** Katsekehade mõõtmed

Mõõtmed	Naelad ettepuurimata aukudega	Naelad ettepuuritud aukudega	Poldid, tüüblid, naaglid	Katsekeha materjal
$a_1$	5d	5d	3d	Puit või
$l_1$	20d	12d	7d	puidu
$l_2$	20d	12d	7d	põhised
$l_3$	20d	12d	7d	plaat
$l_4$	40d	40d	30d	materjalid
$a_1$	5d	5d	5d	Puit või
$a_2$	5d	5d	5d	puidu
$l_5$	20d	20d	20d	põhised
				plaat
				materjalid
				ühe kiu
				suunaga

Antud magistritöös on kasutatud männipuidust katsekehi, mille tugevusklass on vähemalt C24. Katsekehade (alusmaterjalid) joonised ja mõõtmed on toodud lisa 1.

### 3.3 Katseseade

Katserakis peab olema selline, et katserakise ja katsekehade vahel poleks hõõrdumist, mis võiks mõjutada mõõtmistulemusi.

Lisaks katsekehade (naaglid, alusmaterjalid) geomeetria mõõtmistele, niiskussisalduse ja tiheduse mõõtmisele peaks olema tagatud järgmised asjad:

- 1) katseseadeldis peab olema võimeline koormama katsekeha pidevalt ja mõõtma jõudu  $\pm 1\%$  täpsusega katsekehale rakendatavast jõust. Jõud, mis on väiksemad kui 10% maksimum jõust, peab olema mõõdetud täpsusega  $\pm 0,1\%$  maksimum jõust;
- 2) katseseade peab olema varustatud mõõteseadega, mis mõõdab pidevalt kinniti deformatsiooni täpsusega  $\pm 1\%$  kogu deformatsioonist või vähem kui 2 mm deformatsioonide puhul täpsusega  $\pm 0,02$  mm. [5]

Katseseadmena kasutati INSTRON 3369. Katserakis valmistati terasest S275. Katserakise joonis koos lisadetailidega on toodud lisa 2.

### 3.4 Katsekehade ettevalmistus

Enne katsete läbiviimist peab katsematerjal seisma keskkonnas, kus suhteline niiskus on  $65\pm 5\%$  ja temperatuuril  $20\pm 2^\circ\text{C}$ , et katsekehad saavutaks konstantse massi. Pärast katsetamist katsekehad tuleb hoida samas keskkonnas. Konstantne mass loetakse saavutatuks, kui kaalumistulemused ei erine rohkem kui 0,1% ja on läbi viidud kuue tunnise intervalliga. [5]

### 3.5 Protseduur

#### 3.5.1 Katseseadme kalibreerimine

Esimesena peaks määrama katseseadme paindejäikuse. Katserakise vahele peab asetama terasest proovikeha, mis on sama läbimõõduga, mis on katsekeha ning koormama proovikeha samamoodi nagu on kirjeldatud punktis 3.5.6. [5]

Kuna antud magistritöös katsetati puitnaagleid, siis katseseadme paindejäikuse määramine polnud vajalik.

### 3.5.2 Naagli asetamine katsekehasse

Naagli diameeter ja katsekeha paksus tuleb mõõta millimeetrites täpsusega 1%. Naagel tuleb katsekehasse asetada sama viisil nagu seda tehakse ehituses (nt. naelte puhul kas auk puuritakse ette või mitte, tüüblite puhul peab auk hästi tihe saama, poltide puhul peab auk suurem olema, kui poldi läbimõõt). [5]

### 3.5.3 Katsekeha asetamine katseseadmesse

Katserakis koos alusmatrejaliga ja naagliga tuleb katseseadmesse asetada sümmeetriliselt. Katsekeha tuleb koormata läbi katsekeha telje. [5]

### 3.5.4 Mõõteseadme asukoht

Suhteline deformatsioon tüübel tüüpi kinniti puhul tuleb mõõta katserakise, mis hoiab naaglit ja katsekeha äärmiste punktide vahel, mis asuvad naagli keskpunktiga samal kõrgusel. Kasutatakse kahte mõõteseadet, mis asuvad vastas külgedel (vt. joonis 3.1). [5]

Katsete teostamisel kasutati kahte mõõteseadet, mis mõõtsid deformatsiooni terasest katserakise ja katsekeha vahel.

### 3.5.5 Eeldatav maksimum jõud

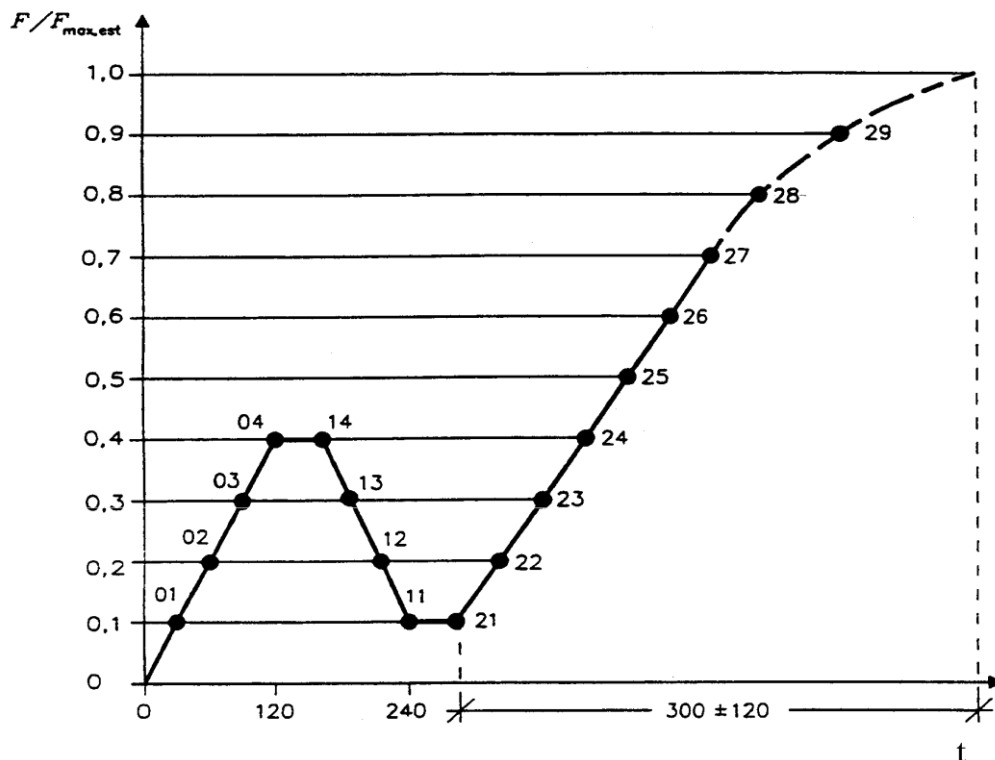
Eeldatav maksimum koormus  $F_{\max,est}$  tuleb kindlaks määrata kogemuste, arvutuste või esialgsete katsete põhjal. [5]

Enne katseid arvutati eeldatav maksimum jõud välja ning tehti ka proovikatseid, millega saada kinnitust, kas arvutused peavad paika. Tulemused on välja toodud tabelis 3.3. Proovikatsete põhjal selgus, et kõige täpsemini sobivad alusmaterjali enda muljumistugevuse väärtused. Edasised katsed viidi läbi tabelis 3.3 toodud  $F_{3, katse,0}$  väärtuste alusel.

### 3.5.6 Koormuse rakendamine

Joonis 3.3 kirjeldab, kuidas peaks koormamisprotsess välja nägema. Kõigepealt peab koormuse tõstma 40% maksimumini eeldatavast koormusest. Peale seda hoidma 30

sekundit selle koormuse juures ning peale seda peab koormuse langetama 10%-ni ja hoidma jälle 30 sekundit sama koormust. Peale seda tõstetakse koormust kuni maksimumini. Katse peab lõpetama kui deformatsioon läheb suuremaks kui  $w_0=5$  mm või kui naaglile on omistatud maksimum koormus. Katseseade peab katserakisele avaldama konstantselt suurenevat (vähenevat) jõudu. Maksimum jõud peaks saabuma  $300\pm 120$  sekundiga. [5]



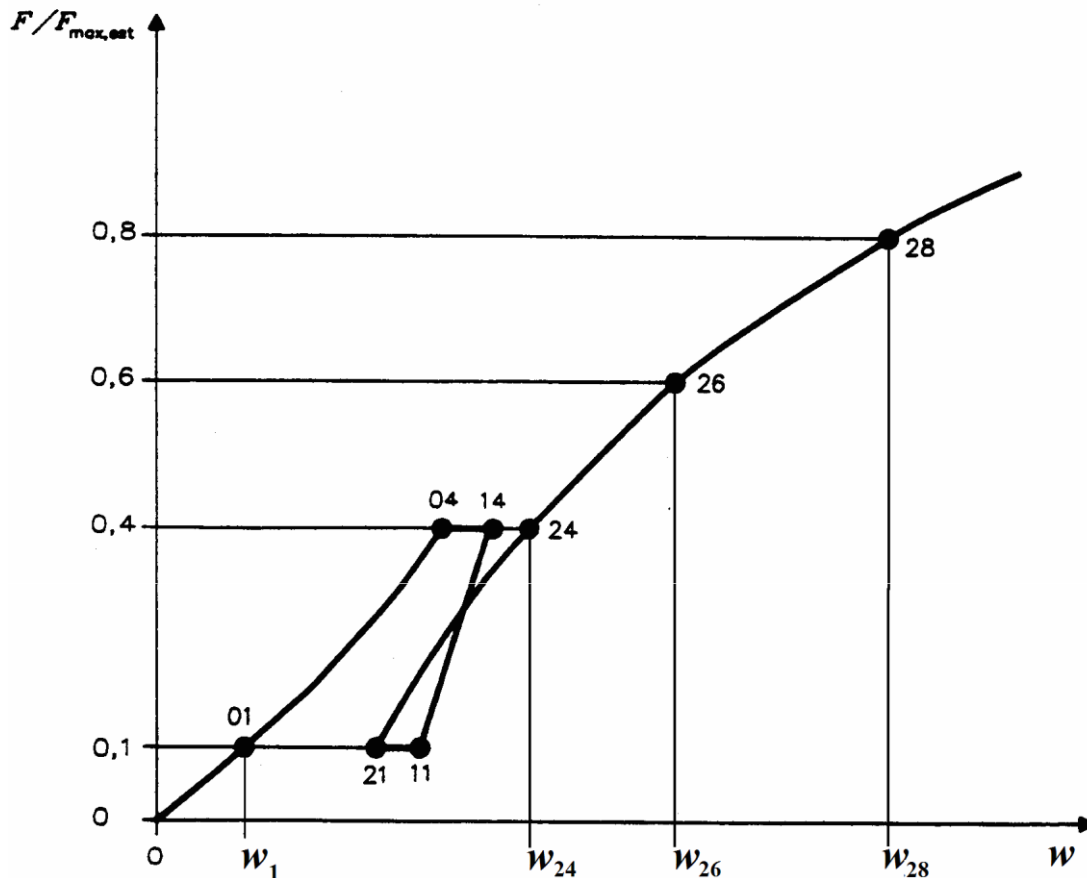
**Joonis 3.3.** Katseseadme koormamisprotsess

Kuna katseseade ei võimaldanud antud koormamisprotsessi rakendada, siis koormati katsekeha ja naaglit ühtlaselt suureneva jõuga kuni naagli purunemiseni.  $0,1F_{\max,est}$  saavutati 30 sekundiga ja maksimum eeldatav koormus saavutati 300 sekundiga.

### 3.5.7 Deformatsioonide salvestamine

Joonisel 3.4 on näidatud deformatsioonid  $w_{01}$ ,  $w_{04}$ ,  $w_{11}$ ,  $w_{21}$ ,  $w_{24}$ ,  $w_{26}$  ja  $w_{28}$ , mis vastavad punktidele 01, 04, 11, 21, 24, 26 ja 28 peab registreerima kahe mõtteseade keskmise tulemuse järgi, et saada kätte deformatsiooni kõverat. Deformatsioon maksimaalse koormuse puhul tuleb samuti registreerida. [5]

Kuigi täpset koormamisprotsessi järgida ei suudetud, siis ei saanud ka jälgida konkreetset deformatsiooni mõõtmist. Deformatsioone mõõdeti iga sekundi tagant, seega on olemas kõik vajalikud väärtused saamaks deformatsiooni kõverat iga 30 sekundi tagant. Iga 30 sekundi tagant võetud deformatsioon vastab  $0,1 F_{\max,est}$ -le.



t – aeg, w – deformatsioon

**Joonis 3.4.** Idealiseeritud koormus-deformatsiooni kõver ja mõõtmised

### 3.5.8 Tiheduse ja niiskussisalduse määramine

Määrata tuleb katsekehade ja naaglite tihedused ning niiskussisaldused. [5] Tabelis 3.2 on välja toodud naaglite ja katsekehade keskmised tihedused ning niiskussisaldused.

**Tabel 3.2.** Naaglite ja alusmaterjali keskmised tihedused ja niiskussisaldused

Puiduliik	Niiskussisaldus (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Tamm	10,58	700,8
Saar	10,40	687,3
Kuusk	10,40	527,9
Mänd	11,62	433,4

## 3.6 Tulemused

### 3.6.1 Arvutused

Muljumistugevus ja esialgne muljumistugevus  $f_{h,est}$  peab arvutama 1%-lise täpsusega kasutades järgmist valemit [5]:

$$f_h = \frac{F_{max}}{d * t} \quad (3.1)$$

$$f_{h,est} = \frac{F_{max,est}}{d * t}, \quad (3.2)$$

kus  $f_h$  on muljumistugevus, N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{h,est}$  on eeldatav muljumistugevus, N/mm<sup>2</sup>  
 $F_{max}$  on maksimum jõud, N  
 $F_{max, est}$  on eeldatav maksimum jõud, N  
 $d$  on augu läbimõõt  
 $t$  on katsekeha paksus.

### 3.6.2 Reguleerimine

Kui katsete käigus tuleb välja, et maksimum (purustav) koormuste keskmine jõud hälbub rohkem kui 20% eeldatavast jõust, siis koormusi tuleb vastavalt muuta järgnevate testide jaoks. Maksimum koormuse väärtused, millel pole vaja teha muutusi võib lugeda lõplikeks tulemusteks. [5]

## 3.7 Katse raport

Katse raport peaks sisaldama järgmisi asju [5]:

- 1) proovikatsete protseduur,
- 2) materjali spetsifikatsioon ja omadused: liik, tihedus, kiudude suund ja tugevusnäitajad,
- 3) naagli läbimõõtu ja tugevus karakteristikuid,
- 4) katsekehade parameetreid, augu läbimõõtu ja viisi kuidas naagel on asetatud katsekehasse,

- 5) katsekehade hoidmine enne ja pärast katsetamist, niiskussisalduse mõõtmine testi ajal.

### 3.8 Katse materjal

Katsete teostamiseks kasutati kolme erineva diameetriga ( $d=20$  mm,  $d=25$  mm ja  $d=28$  mm) puitnaagleid. Naagli pikkus oli 100 mm. Naagleid valmistati kolmest erinevast puuliigist. Nendeks olid harilik tamm, harilik saar ja harilik kuusk. Naaglite valmistamisel välditi okslikku ja kahjustatud puitu. Alusmaterjalid valmistati männi puidust. Materjali kvaliteeti hinnati visuaalselt. Arvutuste aluseks hinnati alusmaterjali tugevusnäitajad võrdseks C24 väärtustega ja naaglite puhul vähemalt D30 tugevusnäitajatega.

Harilik tamm ehk *Quercus robur* levib Põhja-Euroopas allpool  $60^{\circ}\text{N}$  laiuskraadi. Tamme puit on raske, kõva, elastne, heade tugevusomadustega, kergelt lõhestatav ja töödeldav. Samas on tammepuitu raske kuivatada. Lülipuit on üks vastupidavamaid põhjamaade puuliike, sellest tulenev ka suur kulumiskindlus. Puitu on kerge aurutada ja painutada. [3] Keskmine kuiv tihedus  $720 \text{ kg/m}^3$ . [4] Tamm valiti katse materjaliks, kuna tamme puitu on traditsiooniliselt kasutatud naaglite valmistamiseks ning tamme tihedus ja koormustaluvus on Eestis kasvavatest puiduliikidest üks suuremaid.

Harilik saar ehk *Fraxinus excelsior* kasvab põhja poolkeral allpool  $60^{\circ}\text{N}$ . Saar on väärtuslik puiduliik samas on puit suhteliselt raske, kõva ja sitke. [3] Puidu tunnusteks on veel jäme struktuur, sirgekiulisus, lõhenemis- ja löögikindlus ning hea töödeldavus. Sobib suurepäraselt auruga painutamiseks. Keskmine kuiv tihedus  $710 \text{ kg/m}^3$ . [4] Kuna harilik saar on üks paremate tugevusomadustega Eestis kasvav puit ja teda on kasutatud ajalooliselt puitnaaglite valmistamiseks, siis valiti saar naaglite valmistamis materjaliks.

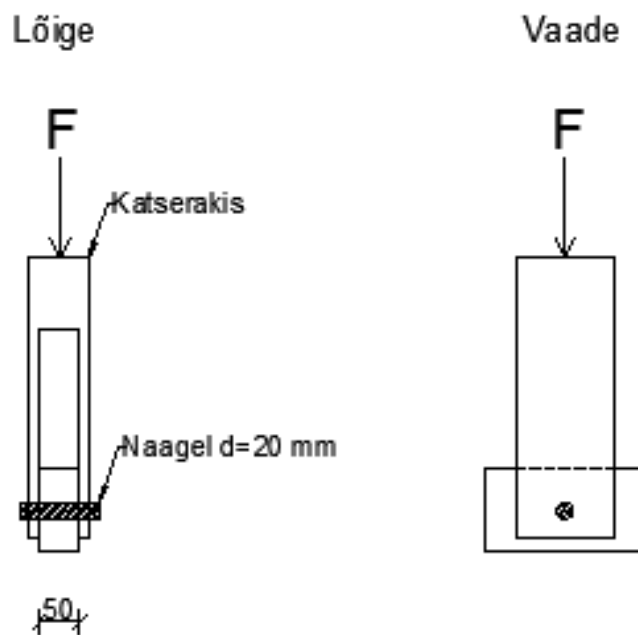
Harilik kuusk ehk *Picea abies* kasvab Euroopas (väljaarvatud Lõuna-Euroopas) ja Venemaal. Kuuse puitu on kerge lõhestada, viimistleda ja töödelda. Puit on kerge ja suhteliselt tugev. [3] Kuuse keskmine kuiv tihedus  $450 \text{ kg/m}^3$ . [4] Kuna kuuseokstest on traditsiooniliselt tehtud naagleid, siis katsetati ka kuusenaagleid.

Katseseerias kasutatavad naaglid olid tehtud saematerjalist, sest okstest saadud naagleid polnud võimalik saada.



### 3.9 Eeldatava maksimum jõu arvutamine

Eeldatava maksimum jõu arvutamisel lähtuti puitnaagliga katseskeemist, mis on esitatud joonisel 3.5. Arvutused on esitatud olukorras, kus naigel ja katsekeha on tehtud okaspuidust. Teistest puuliikidest naaglite korral on tulemused esitatud koondtabelis 3.3. Arvutustes on arvestatud, et liide on kinnitatud ühe naagliga. Leitakse eeldatav naaglit purustav jõud.



Joonis 3.5. Puitnaagliga ühendatud katseskeem

Andmed:

Alusmaterjal C24

Naigel C30

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

$$D = 20 \text{ mm}$$

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

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

$$t_2=45 \text{ mm}$$

$$t_1=12 \text{ mm}$$

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

Kuna katseseadme koormus on lühiajaline ja puitmaterjali tugevusomadused olenevad koormuse kestvusest, siis arvutustes kasutatakse modifikatsiooni tegurit lühiajalisel koormamisel  $k_{mod} = 1,1$ .

Esmalt arvutatakse katse eeldatav purustav jõud lähtudes naagli nihkekandevõimest.

Naaglile mõjuv põikjõud on arvutatav järgmise valemiga:

$$Q = \frac{f_{v,k} * I_y * D}{S_{pool}}, \quad (3.3)$$

kus  $f_{v,k}$  on normatiivne nihketugevus,  $N/mm^2$

$I_y$  on ringi inertsimoment,  $mm^2$

$D$  on naagli läbimõõt,  $mm$

$S_{pool}$  on poolringi staatiline moment,  $mm^2$ .

$$Q = \frac{4 * 7853,98 * 20}{659,74} = 952,37N = 0,95 \text{ kN}$$

Ringi inertsimoment on arvutatav järgmise valemiga:

$$I_y = \frac{\pi * D^4}{64} \quad (3.4)$$

$$I_y = \frac{\pi * 20^4}{64} = 7853,98mm^2$$

Poolringi staatiline moment on arvutatav järgmise valemiga:

$$S_{pool} = z_1 * \frac{A_r}{2}, \quad (3.5)$$

kus  $z_1$  - on poolringi raskuskeskme koordinaat,  $mm$

$A_r$  - on ringi pindala,  $mm^2$ .

$$S_{pool} = 4,2 * 157,08 = 659,74mm^2$$

$$z_1 = 0,21 * D \quad (3.6)$$

$$z_1 = 0,21 * 20 = 4,2mm$$

$$\frac{A_r}{2} = \frac{\pi * D^2}{4 * 2}$$

$$\frac{A_r}{2} = \frac{\pi * 20^2}{4 * 2} = 157,08 \text{ mm}^2$$

Kuna katse on kahelõikeline, siis naaglit purustava põikjõu kohta kehtib järgmine valem:

$$F_{1,katse} = k_{mod} * 2 * Q \quad (3.7)$$

$$F_{1,katse} = 1,1 * 2 * Q = 1,1 * 2 * 0,95 = 2,09 \text{ kN}.$$

Katseseadme koormus naagli muljumistugevusest ristikiudu on arvatav järgmise valemiga:

$$F_{2,katse,alg} = f_{c,90,k,C} * A_1, \quad (3.8)$$

kus  $A_1$  – naagli muljutava pinna pindala,  $\text{mm}^2$ .

$$A_1 = 2 * t_1 * D, \quad (3.9)$$

kus  $t_1$  – on katserakise teraslehe paksus, mm.

$$A_1 = 2 * 12 * 20 = 480 \text{ mm}^2$$

$$F_{2,katse,alg} = 2,7 * 480 = 1296 \text{ N} = 1,296 \text{ kN}$$

$$F_{2,katse} = k_{mod} * F_{2,katse,alg} \quad (3.10)$$

$$F_{2,katse} = 1,1 * 1,296 = 1,426 \text{ kN} \approx 1,43 \text{ kN}$$

Alusmaterjali puhul tehakse eeldus, et pingete jaotus alusmaterjalis on lineaarne, sellisel puhul on katseseadme koormus alusmaterjali muljumistugevusest pikikiudu arvatav järgmise valemiga:

$$F_{3,katse,alg} = \frac{f_{c,0,k} * A_{al}}{2}, \quad (3.11)$$

kus  $A_{al}$  – alusmaterjali muljutava pinna pindala,  $\text{mm}^2$ .

$$A_{al} = t_2 * D, \quad (3.12)$$

kus  $t_2$  - on katsekeha paksus, mm.

$$t_2 = 45 \text{ mm}$$

$$A_{al} = 45 \cdot 20 = 900 \text{ mm}^2.$$

$$F_{3,katse,alg} = \frac{21 \cdot 900}{2} = 9450 \text{ N} = 9,45 \text{ kN}$$

$$F_{3,katse,0} = k_{mod} \cdot F_{3,katse,alg}$$

$$F_{3,katse,0} = 1,1 \cdot 9,45 = 10,40 \text{ kN}$$

Katseseadme prognoositav koormus alusmaterjali muljumistugevusest ristikiudu on arvutatav järgmise valemiga:

$$F_{4,katse,alg} = \frac{f_{c,90,k} \cdot A_{al}}{2} \quad (3.13)$$

$$F_{4,katse,alg} = \frac{2,5 \cdot 900}{2} = 1125 \text{ N} = 1,13 \text{ kN}$$

$$F_{4,katse,90} = k_{mod} \cdot F_{4,katse,alg}$$

$$F_{4,katse,90} = 1,1 \cdot 1,13 = 1,24 \text{ kN}$$

**Tabel 3.3.** Eeldatavad maksimaalsed katseseadme koormused

<b>Läbimõõt (mm) ja puidu liik</b>	<b>F<sub>1,katse</sub> (kN)</b>	<b>F<sub>2,katse</sub> (kN)</b>	<b>F<sub>3,katse,0</sub> (kN)</b>	<b>F<sub>4,katse,90</sub> (kN)</b>
Ø20 okaspuit	2,09	1,43	10,40	1,24
Ø20 lehtpuit	2,09	4,22	10,40	1,24
Ø25 okaspuit	3,30	1,78	13,00	1,54
Ø25 lehtpuit	3,30	5,28	13,00	1,54
Ø28 okaspuit	4,11	2,00	14,56	1,73
Ø28 lehtpuit	4,11	5,91	14,56	1,73

Arvutuste põhjal saadud tulemustest valiti esmaseks katsetamiseks arvutustega saadud maksimaalsed väärtused  $F_{3,katse,0}$  järgi. Proovikatsetega hinnati arvutatud tulemuste paika pidavust ja selgus, et tuli mõnevõrra vähendada katseseadme eeldatavat purustavat jõudu, kuid väärtus jäi oluliselt suuremaks arvutuslikest väärtustest  $F_{1,katse}$ ,  $F_{2,katse}$  ja  $F_{1,katse,90}$ .

## 4 Katsetulemused ja analüüs

### 4.1 Katse käik

Võttes aluseks standardit EN 383:2007 „Timber structures – Test methods – Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners“ ja eelnevas peatükis arvatatud maksimaalse purustava jõu, viidi Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituudi puidulaboris läbi katsed. Katseseadmeks oli INSTRON 3369 (joonis 4.1).



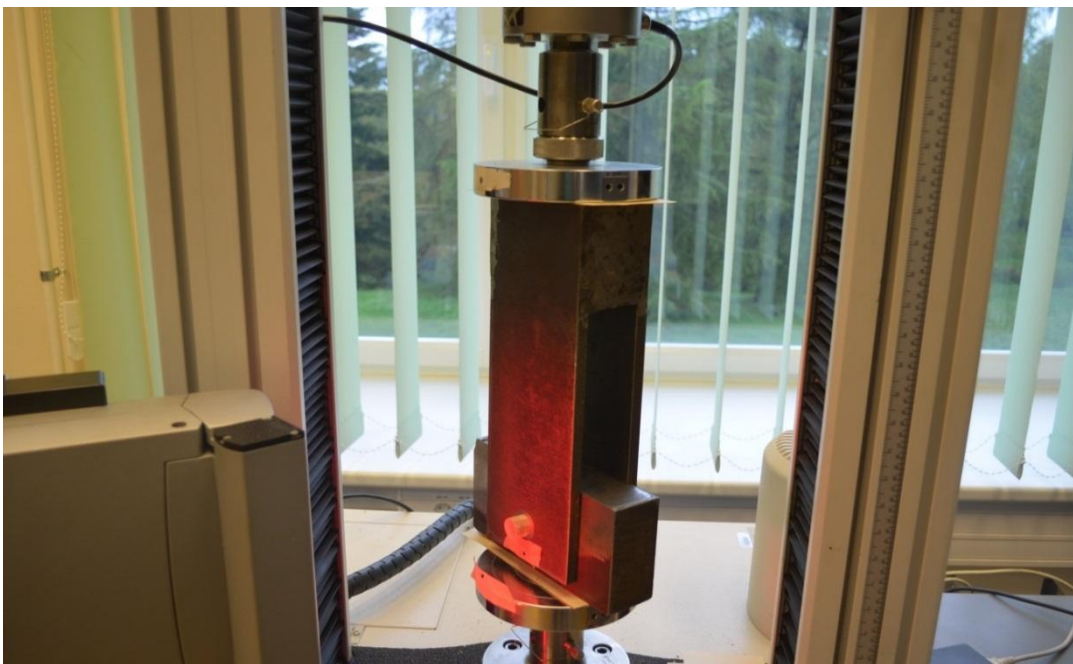
**Joonis 4.1.** Katseseade INSTRON 3369

Enne naaglite katserakisesse asetamist teostati naaglite diameetri, pikkuste ning niiskussisalduste mõõtmine. Seejärel asetati naagel läbi katserakise ja alusmaterjali või terasdetaili ning paigutati see katseseadme vahele nii, et see oleks sümmeetriliselt jõupeadega (joonis 4.2). Enne katse alustamist tuli paika panna koormamise kiirus vastavalt tabelis 3.3 saadud tulemuste järgi ja eelnevalt tehtud proovikatsete alusel ning fikseerida punktid jõupea ja katserakise vahel (joonis 4.3.). Punktid fikseeris

infrapunakaamera, mis katse käigus registreeris katsekehade deformatsioonid. Kaamera oli ühendatud lauarvutiga, mis salvestas kõik deformatsioonid ja vastavad koormused ning koostas koormus-deformatsiooni graafikud. Katse lõpetati kui naigel purunes.



**Joonis 4.2.** Katserakis ja katsematerjalid asetatud sümmeetriliselt katseseadmesse



**Joonis 4.3.** Katserakisel ja jõupeal on kaamera abil fikseeritud punktid

## 4.2 Katsed ja katse tulemused

Kokku tehti 81 katset. Katsetes kasutati 27 tamme, 27 saare ja 27 kuuse naaglit. Naaglid olid läbimõõduga  $d=20$  mm(27 tk),  $d=25$  mm (27 tk) ja  $d=28$  mm (27 tk). Katsete alusmaterjaliks olid männist katsekehad ja terasest katsekeha (vt. lisa 2, terasdetail 2). 54 katset tehti männist alusmaterjaliga, neist 27 sooritati nii, et jõud kandus naaglit edasi pikikiudu ning ülejäänud 27 nii, et jõud kandus naaglit edasi ristikiudu ning 30 katset sooritati terasest katsekehaga. Naaglid valmistati koostöös Tartu Kutsehariduskeskuse puiduosakonnaga.

## 4.3 Katsetulemuste põhjal nihketugevuse, muljumistugevuse ja paindetugevuse leidmine

Tulemused on võetud naagli T7 tulemuste põhjal. Tegemist on tamme naagliga ning katsetati terasdetailiga, kus purustavaks jõuks oli  $F_{katse} = 9257,10$  N. Katsetulemuste alusel hinnanguliste normatiivsete tugevusnäitajate arvutamisel jäetakse materjali osavarutegur arvestamata ehk selle väärtus võetakse 1,0 ja normsuuruseid ei suurendata.

Arvutustes kasutatavad lähteandmed:

$$k_{mod} = 1,1$$

$$D = 20 \text{ mm}$$

$$\gamma_m = 1,0$$

$$m_1 = 11,7 \text{ kg}$$

$$t = 24 \text{ mm}$$

$$g = 9,81 \text{ N/kg}$$

Lõplik purustatav jõud on arvutatav valemiga:

$$F_{katse, lõplik} = F_{katse} + F_{katserakis}, \quad (4.1)$$

kus  $F_{katserakis}$  on katserakise omakaal, N.

Katserakise kaal on arvutatav valemiga:

$$F_{katserakis} = m_1 * g, \quad (4.2)$$

kus  $m_l$  on katserakise kaal, kg

$g$  on raskuskiirendus, N/kg.

$$F_{katserakis} = 11,7 * 9,81 = 114,78 \text{ N}$$

$$F_{katse,lõplik} = 9257,10 + 114,78 = 9371,88 \text{ N}$$

Naaglile mõjuv põikjõud on arvutatav valemitega:

$$Q = \frac{f_{v,d} * I_y * D}{S_{pool}} \quad \text{ja} \quad Q = \frac{F_{katse,lõplik}}{2}$$

Võrdsustades eelpool toodud põikjõu valemid, on võimalik tuletada nihketugevuse valem, mis näeb välja järgmiselt:

$$f_{v,d} = \frac{\frac{F_{katse,lõplik}}{2} * S_{pool}}{I_y * D} = \frac{F_{katse,lõplik} * 0,02625 * \pi * D^3 * 64}{2 * \pi * D^4 * D} = \frac{0,84 * F_{katse,lõplik}}{D^2}$$

Staatilise momendi teoreetiline valem

$$S_{pool} = z_1 * \frac{A}{2} = 0,21 * D * \frac{\pi * D^2}{8} = 0,02625 * \pi * D^3$$

$$z_1 = 0,21 * D$$

$$\frac{A_r}{2} = \frac{\pi * D^2}{4 * 2}$$

Ringi inertsimoment

$$I_y = \frac{\pi * D^4}{64}$$

$$f_{v,d} = \frac{0,84 * 9371,881}{20^2} = 19,681 \text{ N/mm}^2$$

Normatiivne nihketugevus on arvutatav järgmiselt:

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} * f_{v,k}}{\gamma_m} \rightarrow f_{v,k} = \frac{\gamma_m * f_{v,d}}{k_{mod}} \quad (4.3)$$

$$f_{v,k} = \frac{1,0 * 19,681}{1,1} = 17,89 \text{ N/mm}^2$$



Naagli muljumistugevus on arvutatav järgmise valemiga:

$$f_{h,d} = \frac{F_{katse,lõplik}}{D * t} \quad (4.4)$$

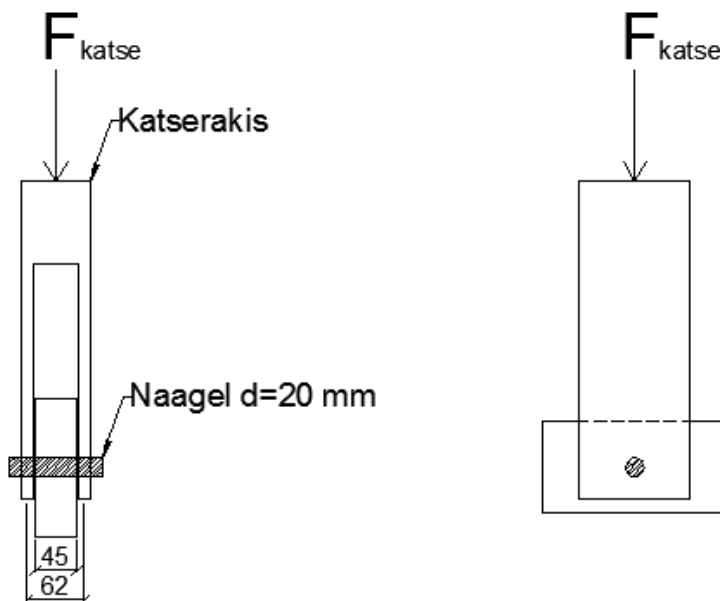
$$f_{h,d} = \frac{9371,881}{20 * 24} = 19,525 \text{ N/mm}^2$$

Naagli normatiivne muljumistugevus on arvutatav järgmise valemiga:

$$f_{h,d} = \frac{k_{mod} * f_{h,k}}{\gamma_m} \rightarrow f_{h,k} = \frac{\gamma_m * f_{h,d}}{k_{mod}} \quad (4.5)$$

$$f_{h,k} = \frac{1,0 * 19,525}{1,1} = 17,75 \text{ N/mm}^2$$

Kuna risti- ja pikikiudu koormamisel esines paindemoment ja purunemine paindele, siis selle arvutamiseks võeti aluseks naagli T4 maksimum purustav jõud. Naagli T4 puhul oli lõplikuks purustavaks jõuks  $F_{katse, lõplik} = 9334,84 \text{ N}$ . Sisejõudude õlg on  $l = 62 \text{ mm}$  (vt. joonist 4.4).



Joonis 4.4. Katseskeem koormamisel ristikiudu

Naaglile mõjuv paindemoment on arvutatav valemiga:

$$M_{Rd} = \frac{F_{katse}}{2} * \frac{l}{2} = \frac{F_{katse} * l}{4}, \quad (4.6)$$

kus  $l$  on teraslehtede keskpunktide vahekaugus ehk sisejõudude õlg, mm.

$$M_{Rd} = \frac{9334,84 * 62}{4} = 144690,02 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Naagli normatiivne paindemoment on arvutatav valemiga:

$$M_{Rd} = \frac{k_{mod} * M_{Rk}}{\gamma_m} \rightarrow M_{Rk} = \frac{\gamma_m * M_{Rd}}{k_{mod}} \quad (4.7)$$

$$M_{Rk} = \frac{1,0 * 144690,02}{1,1} = 131536,44 \text{ N} \cdot \text{mm}.$$

Tabelites 4.1 kuni 4.3 on välja toodud kõigi katsetatud naaglite vastavad arvutused. Lahter „Kiu suund ja alusmaterjal“ näitab, mis oli alusmaterjaliks, ja missugune on puidust alusmaterjali korral koormuse mõjumise suund puidu kiudude suhtes. Eelpool kirjeldatud lahtris kasutatavate sõnade seletus on järgmine:

- 1) „piki“ tähendab, et alusmaterjaliks oli männist katsekeha ja naaglilt kandus koormus alusmaterjalile pikikiudu.
- 2) „risti“ tähendab, et alusmaterjaliks oli männist katsekeha ning naaglilt kandus jõud alusmaterjalile ristikiudu.
- 3) „teras“ tähendab, et alusmaterjaliks oli terasest katsekeha.

Lahtris „Nr“ on esitatud naaglite tähistust. T, S ja K tähitavad puuliikide esimesi tähti ehk tamm, saar ja kuusk. Punasega tähitatud väljad, on need jõud, kus liite deformatsioon ületas 5 mm.

Terasdetailiga katsete puhul tähendab  $f_{h,k}$  väärtused naagli muljumistugevust ning kiu suuna puhul risti või piki tähendab  $f_{h,k}$  väärtused vastavalt alusmaterjali muljumistugevust risti- või pikikiudu.

**Tabel 4.1.** Läbimõõduga 20 mm puitnaaglite katsetulemuste põhjal arvutatud tugevusnäitajad

Nr.	D mm	$F_{katse}$ N	$F_{katse, lõplik}$ N	$f_{v,d}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,k}$ N/mm <sup>2</sup>	$M_{R,d}$ N*mm	$M_{R,k}$ N*mm	$F_{katse, w=5mm}$ N	$f_{h,d}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{h,k}$ N/mm <sup>2</sup>	Kiu suund ja alusmaterjal
T1	20	7130,63	7245,41	15,22	13,83	112303,81	102094,37	7245,41	8,05	7,32	piki
T2	20	7934,51	8049,29	16,90	15,37	124763,96	113421,79	8049,29	8,94	8,13	piki
T3	20	9555,68	9670,46	20,31	18,46	149892,07	136265,52	9670,46	10,74	9,77	piki
T4	20	9220,06	9334,84	19,60	17,82	144690,08	131536,44	9334,84	10,37	9,43	risti
T5	20	8182,63	8297,41	17,42	15,84	128609,78	116917,98	8297,41	9,22	8,38	risti
T6	20	7465,60	7580,38	15,92	14,47	117495,89	106814,45	7580,38	8,42	7,66	risti
T7	20	9257,10	9371,88	19,68	17,89			9371,88	19,52	17,75	teras
T8	20	8248,69	8363,47	17,56	15,97			8363,47	17,42	15,84	teras
T9	20	9266,39	9381,17	19,70	17,91			9381,17	19,54	17,77	teras
S1	20	11462,27	11577,05	24,31	22,10	179444,28	163131,16	11577,05	12,86	11,69	piki
S2	20	11095,14	11209,92	23,54	21,40	173753,76	157957,96	11209,92	12,46	11,32	piki
S3	20	11799,31	11914,09	25,02	22,75	184668,40	167880,36	11914,09	13,24	12,03	piki
S4	20	9536,48	9651,26	20,27	18,43	149594,53	135995,03	8941,71	9,94	9,03	risti
S5	20	12220,89	12335,67	25,90	23,55	191202,89	173820,80	12335,67	13,71	12,46	risti
S6	20	10704,62	10819,40	22,72	20,66	167700,70	152455,18	10798,20	12,00	10,91	risti
S7	20	12077,43	12192,21	25,60	23,28			12192,21	25,40	23,09	teras
S8	20	13537,95	13652,73	28,67	26,06			13652,73	28,44	25,86	teras
S9	20	13180,82	13295,60	27,92	25,38			13295,60	27,70	25,18	teras
K1	20	7947,35	8062,13	16,93	15,39	124963,06	113602,78	8062,13	8,96	8,14	piki
K2	20	6240,26	6355,04	13,35	12,13	98503,17	89548,33	6355,04	7,06	6,42	piki
K3	20	7091,12	7205,90	15,13	13,76	111691,42	101537,65	7205,90	8,01	7,28	piki
K4	20	7538,29	7653,07	16,07	14,61	118622,63	107838,76	7653,07	8,50	7,73	risti
K5	20	8197,97	8312,75	17,46	15,87	128847,61	117134,19	8269,87	9,19	8,35	risti
K6	20	6297,61	6412,39	13,47	12,24	99392,06	90356,42	6271,51	6,97	6,33	risti
K7	20	7666,53	7781,31	16,34	14,86			7521,20	15,67	14,24	teras
K8	20	8616,06	8730,84	18,33	16,67			8330,93	17,36	15,78	teras
K9	20	7951,05	8065,83	16,94	15,40			8065,83	16,80	15,28	teras

**Tabel 4.2.** Läbimõõduga 25 mm puitnaaglite katsetulemuste põhjal arvutatud tugevusnäitajad

Nr.	D mm	F <sub>katse</sub> N	F <sub>katse, lõplik</sub> N	f <sub>v,d</sub> N/mm <sup>2</sup>	f <sub>v,k</sub> N/mm <sup>2</sup>	M <sub>R,d</sub> N*mm	M <sub>R,k</sub> N*mm	F <sub>katse, w=5mm</sub> N	f <sub>h,d</sub> N/mm <sup>2</sup>	f <sub>h,k</sub> N/mm <sup>2</sup>	Kiu suund ja alusmaterjal
T10	25	18461,65	18576,43	24,97	22,70			18576,43	30,96	28,15	teras
T11	25	20997,45	21112,23	28,37	25,80			21112,23	35,19	31,99	teras
T12	25	16099,38	16214,16	21,79	19,81			16214,16	27,02	24,57	teras
T13	25	14044,71	14159,49	19,03	17,30	219472,10	199520,09	14159,49	12,59	11,44	piki
T14	25	11757,60	11872,38	15,96	14,51	184021,89	167292,63	11872,38	10,55	9,59	piki
T15	25	12555,16	12669,94	17,03	15,48	196384,07	178530,97	12669,94	11,26	10,24	piki
T16	25	14394,46	14509,24	19,50	17,73	224893,22	204448,38	13472,16	11,98	10,89	risti
T17	25	12953,44	13068,22	17,56	15,97	202557,41	184143,10	12975,05	11,53	10,48	risti
T18	25	15110,29	15225,07	20,46	18,60	235988,59	214535,08	14148,80	12,58	11,43	risti
S10	25	21252,36	21367,14	28,72	26,11			21367,14	35,61	32,37	teras
S11	25	19232,48	19347,26	26,00	23,64			19347,26	32,25	29,31	teras
S12	25	20342,65	20457,43	27,49	25,00			20457,43	34,10	31,00	teras
S13	25	18784,77	18899,55	25,40	23,09	292943,03	266311,84	18899,55	16,80	15,27	piki
S14	25	19319,89	19434,67	26,12	23,75	301237,39	273852,17	19434,67	17,28	15,70	piki
S15	25	17100,40	17215,18	23,14	21,03	266835,29	242577,54	17215,18	15,30	13,91	piki
S16	25	15148,45	15263,23	20,51	18,65	236580,07	215072,79	13740,52	12,21	11,10	risti
S17	25	15290,21	15404,99	20,70	18,82	238777,35	217070,31	13919,33	12,37	11,25	risti
S18	25	11739,56	11854,34	15,93	14,48	183742,27	167038,43	11854,34	10,54	9,58	risti
K10	25	10981,93	11096,71	14,91	13,56			11096,71	18,49	16,81	teras
K11	25	8818,66	8933,44	12,01	10,92			8933,44	14,89	13,54	teras
K12	25	11039,29	11154,07	14,99	13,63			11154,07	18,59	16,90	teras
K13	25	7867,59	7982,37	10,73	9,75	123726,80	112478,91	7982,37	7,10	6,45	piki
K14	25	7375,45	7490,23	10,07	9,15	116098,60	105544,18	7490,23	6,66	6,05	piki
K15	25	9205,01	9319,79	12,53	11,39	144456,81	131324,37	9319,79	8,28	7,53	piki
K16	25	8404,78	8519,56	11,45	10,41	132053,20	120048,36	8128,02	7,22	6,57	risti
K17	25	7886,72	8001,50	10,75	9,78	124023,23	112748,40	7738,46	6,88	6,25	risti
K18	25	7934,25	8049,03	10,82	9,83	124760,01	113418,19	7767,10	6,90	6,28	risti

**Tabel 4.3.** Läbimõõduga 28 mm puitnaaglite katsetulemuste põhjal arvutatud tugevusnäitajad

Nr.	D mm	F <sub>katse</sub> N	F <sub>katse, lõplik</sub> N	f <sub>v,d</sub> N/mm <sup>2</sup>	f <sub>v,k</sub> N/mm <sup>2</sup>	M <sub>R,d</sub> N*mm	M <sub>R,k</sub> N*mm	F <sub>katse, w=5mm</sub> N	f <sub>h,d</sub> N/mm <sup>2</sup>	f <sub>h,k</sub> N/mm <sup>2</sup>	Kiu suund ja alusmaterjal
T19	28	17385,08	17499,86	18,75	17,05			17499,86	26,04	23,67	teras
T20	28	16247,44	16362,22	17,53	15,94			16362,22	24,35	22,14	teras
T21	28	15369,80	15484,58	16,59	15,08			15484,58	23,04	20,95	teras
T22	28	12980,87	13095,65	14,03	12,76	202982,58	184529,61	13095,65	10,39	9,45	piki
T23	28	18229,53	18344,31	19,65	17,87	284336,81	258488,00	18344,31	14,56	13,24	piki
T24	28	17533,11	17647,89	18,91	17,19	273542,30	248674,81	17647,89	14,01	12,73	piki
T25	28	14335,77	14450,55	15,48	14,08	223983,53	203621,39	14098,71	11,19	10,17	risti
T26	28	15294,04	15408,82	16,51	15,01	238836,71	217124,28	15408,82	12,23	11,12	risti
T27	28	13173,86	13288,64	14,24	12,94	205973,92	187249,02	12126,50	9,62	8,75	risti
S19	28	20966,74	21081,52	22,59	20,53			21081,52	31,37	28,52	teras
S20	28	17894,26	18009,04	19,30	17,54			18009,04	26,80	24,36	teras
S21	28	24227,71	24342,49	26,08	23,71			24342,49	36,22	32,93	teras
S22	28	20058,97	20173,75	21,61	19,65	312693,13	284266,48	20173,75	16,01	14,56	piki
S23	28	18387,81	18502,59	19,82	18,02	286790,15	260718,31	18502,59	14,68	13,35	piki
S24	28	20246,26	20361,04	21,82	19,83	315596,12	286905,56	20361,04	16,16	14,69	piki
S25	28	17114,67	17229,45	18,46	16,78	267056,48	242778,61	15205,06	12,07	10,97	risti
S26	28	18797,32	18912,10	20,26	18,42	293137,55	266488,68	15310,81	12,15	11,05	risti
S27	28	12444,40	12559,18	13,46	12,23	194667,29	176970,26	11465,39	9,10	8,27	risti
K19	28	7294,58	7409,36	7,94	7,22			7409,36	11,03	10,02	teras
K20	28	8134,88	8249,66	8,84	8,04			8249,66	12,28	11,16	teras
K21	28	6702,53	6817,31	7,30	6,64			6817,31	10,14	9,22	teras
K22	28	6619,73	6734,51	7,22	6,56	104384,83	94895,30	6734,51	5,34	4,86	piki
K23	28	7916,54	8031,32	8,60	7,82	124485,38	113168,53	8031,32	6,37	5,79	piki
K24	28	5642,94	5757,72	6,17	5,61	89244,61	81131,47	5757,72	4,57	4,15	piki
K25	28	8809,47	8924,25	9,56	8,69	138325,83	125750,75	6911,00	5,48	4,99	risti
K26	28	8429,84	8544,62	9,15	8,32	132441,63	120401,48	7319,19	5,81	5,28	risti
K27	28	8776,49	8891,27	9,53	8,66	137814,69	125286,08	8485,77	6,73	6,12	risti

## 4.4 Terasnaagliga olukorras arvutused Eurokoodeks 5 järgi

Arvutused on esitatud ainult terasnaagli järgi läbimõõduga 20 mm. Teiste läbimõõtudega arvutused on toodud tabelis 4.4.

### 4.4.1 Muljumistugevus

Eurokoodeks 5 järgi arvutatakse norm-muljumistugevus pikikiudu valemi 1.6 järgi. Võttes tabelist 3.2 alusmaterjali tiheduseks  $\rho = 433,4 \text{ kg/m}^3$  ja naagli läbimõõduks 20 mm, siis valemiga 1.6 muljumistugevuse väärtus pikikiudu on:

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01 * 20) * 433,4 = 28,43 \text{ N/mm}^2$$

Norm-muljumistugevus ristikiudu on arvutatav valemi 1.7 järgi

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} * \sin^2\alpha + \cos^2\alpha} = \frac{28,43}{1,65 * \sin^2 90 + \cos^2 90} = 17,23 \text{ N/mm}^2$$

### 4.4.2 Voolavuspiirile vastava paindemomendi leidmine

Teras naaglite ja poltide puhul tuleb voolavuspiirile vastava paindemomendi normväärtus leita järgmise valemiga:

$$M_{y,Rk} = 0,3 * f_{u,k} * d^{2,6}, \quad (4.8)$$

kus  $f_{u,k}$  on normatiivne tõmbetugevus,  $\text{N/mm}^2$ .

Poldi tugevusklassiks võetakse 4.8 (tõmbetugevus  $f_{u,k}=400 \text{ N/mm}^2$ ).

$$M_{y,Rk} = 0,3 * 400 * 20^{2,6} = 289640,46 \text{ N} * \text{mm}$$

**Tabel 4.4.** Alusmaterjali muljumistugevused piki- ja ristikiudu ning voolavuspiirile vastav paindemoment terasnaagli korral

	<b>d=20</b>	<b>d=25</b>	<b>d=28</b>
$f_{h,0,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	28,43	26,65	25,59
$f_{h,90,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	17,23	16,15	15,51
$M_{y,R,k}$ (N*mm)	289640,46	517398,62	694691,73

#### 4.5 Puitnaagli arvutused USA puitnaaglitega standardi TFEC 1-2012 järgi

TFEC 1-2012 on USA standard puitnaaglitega kinnitatud liite projekteerimiseks. Kuna antud standardit kirjanduse ülevaates pole välja toodud, siis ümber teisendatud valemid on toodud tabelis 4.5. TFEC 1-2012 standardis esitatud valemid on mõeldud muljumistugevus väärtuste arvutamiseks olukorras, kus koormusi kannab edasi puidust naagel. Tabelis 4.6 on toodud kõigi puuliikide muljumistugevuste väärtused piki- ja ristikiudu koormamisel.

**Tabel 4.5.** Muljumistugevuste valemid piki- ja ristikiudu. [9]

	<b>Eurokoodeks 5</b>	<b>TFEC 1-2012</b>
$f_{h,0,k}$	$0,082(1 - 0,01 * d) * \rho_k$	$33,51 * 10^{-4} * \rho_{k,n}^{1,32}$ (4.9)
$f_{h,90,k}$	$\frac{0,082(1 - 0,01 * d) * \rho_k^*}{(1,35 + 0,015d)}$	$98,3 * 10^{-5} * \rho_{k,n} * \rho_k^{0,5}$ (4.10)
* Valem kehtib okaspuidu korral $\rho_k$ on põhielemendi ehk tapipesa või –keele tihedus (kg/m <sup>3</sup> ) 12% niiskuse juures $\rho_{k,n}$ on puitnaagli tihedus (kg/m <sup>3</sup> ) 12% niiskuse juures		

Puitnaagli tiheduseks võetakse katsetes osalenud tamme naaglite keskmine tihedus ning see teisendatakse ümber tiheduseks 12% niiskuse juures.

$$\rho_{\text{kesk,tamm}} = 700,8 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{\text{kesk,tamm}} = 10,58\%$$

Tamme naaglite keskmine vee sisaldus on arvutatav järgmiselt:

$$\gamma_{\text{vesi}} = \frac{\rho_{\text{kesk,tamm}} * W_{\text{kesk,tamm}}}{100\%}$$

$$\gamma_{vesi} = \frac{700,8 * 10,58}{100} = 74,14 \text{ kg/m}^3$$

Kui 10,58% juures on niiskuse sisaldus 74,14 kg/m<sup>3</sup> kohta, siis 12% juures on see arvatav järgmiselt:

$$\gamma_{vesi,12} = \frac{\gamma_{vesi} * 12\%}{w_{kesk,tamm}}$$

$$\gamma_{vesi,12} = \frac{74,14 * 12}{10,58} = 84,1 \text{ kg/m}^3$$

Tiheduseks 12% niiskuse juures saadakse

$$\rho_{k,n} = \rho_{kesk} - \gamma_{vesi} + \gamma_{vesi,12}$$

$$\rho_{k,n} = 700,8 - 74,14 + 84,1 = 710,76 \text{ kg/m}^3$$

Valemi 4.9 korral on muljumistugevus pikikiudu arvatav järgmiselt:

$$f_{h,0,k} = 33,51 * 10^{-4} * 710,76^{1,32} = 19,47 \text{ N/mm}^2$$

Alusmaterjali tiheduseks võetakse männist katsekehade keskmine tihedus ning teostatakse sarnased arvutused leidmaks  $\rho_k$ .

$$\rho_{kesk,mänd} = 433,4 \text{ kg/m}^3$$

$$w_{kesk,mänd} = 11,62\%$$

$$\gamma_{vesi} = \frac{433,4 * 11,62}{100} = 50,36 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{vesi,12} = \frac{50,36 * 12}{11,62} = 52,01 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_k = 433,4 - 50,36 + 52,01 = 435,05 \text{ kg/m}^3$$

Valemi 4.10 alusel on muljumistugevus ristikiudu arvatav järgmiselt:

$$f_{h,90,k} = 98,3 * 10^{-5} * 710,76 * 435,05^{0,5} = 14,57 \text{ N/mm}^2$$



**Tabel 4.6.** Muljumistugevused piki- ja ristikiudu TFEC 1-2012 järgi

	<b>Tamm</b>	<b>Saar</b>	<b>Kuusk</b>
$f_{h,0,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	19,47	19,02	13,43
$f_{h,90,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	14,57	14,32	11,00

#### 4.6 Muljumistugevuse normväärtus

Eurokoodeks 5 järgi sõltub alusmaterjali muljumistugevus koormamisel läbi terasnaagli pikikiudu (valem 1.6) alusmaterjali tihedusest ja naagli läbimõõdust. TFEC 1-2012 standardi valemi 4.9 kohaselt sõltub puitnaagliga liite muljumistugevus ainult naagli materjali tihedusest.

Muljumistugevuse määramine koormamisel läbi terasnaagli ristikiudu (valem 1.7) sõltub Eurokoodeks 5 alusel samuti alusmaterjali tihedusest ja naagli läbimõõdust. USA standardi järgi sõltub puitnaagli muljumistugevus koormamisel alusmaterjali ristikiudu (valem 4.10) nii alusmaterjali kui naagli tihedusest. Lisaks pole nii risti- kui pikikiudu koormamisel täheldatud muljumistugevuse sõltuvust naagli läbimõõdust.

Tabelis 4.7 T, S ja K tähendab puuliigi esimest tähte ehk tamm, saar ja kuusk ning number tähe taga tähistab naagli läbimõõtu. Muljumistugevuse indeksis tähistab sõna „teras“ katse olukorda, kus puitnaagel läbis terasest alusmaterjali, ja antud muljumistugevus kirjeldab naagli muljumist ristikiudu. Tabelis 4.7 on toodud muljumistugevuste aritmeetilised keskmised katsetulemuste põhjal.

**Tabel 4.7** Keskmised muljumistugevused katseandmete põhjal

	<b>T20</b>	<b>T25</b>	<b>T28</b>	<b>S20</b>	<b>S25</b>	<b>S28</b>	<b>K20</b>	<b>K25</b>	<b>K28</b>
$f_{h,0,k,kesk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	8,41	10,42	11,81	11,68	14,96	14,20	7,28	6,68	4,94
$f_{h,90,k,kesk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	8,49	10,93	10,01	10,80	10,64	10,10	7,47	6,37	5,46
$f_{h,teras,k,kesk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	17,12	27,73	22,25	24,71	32,23	28,60	15,10	14,47	10,14

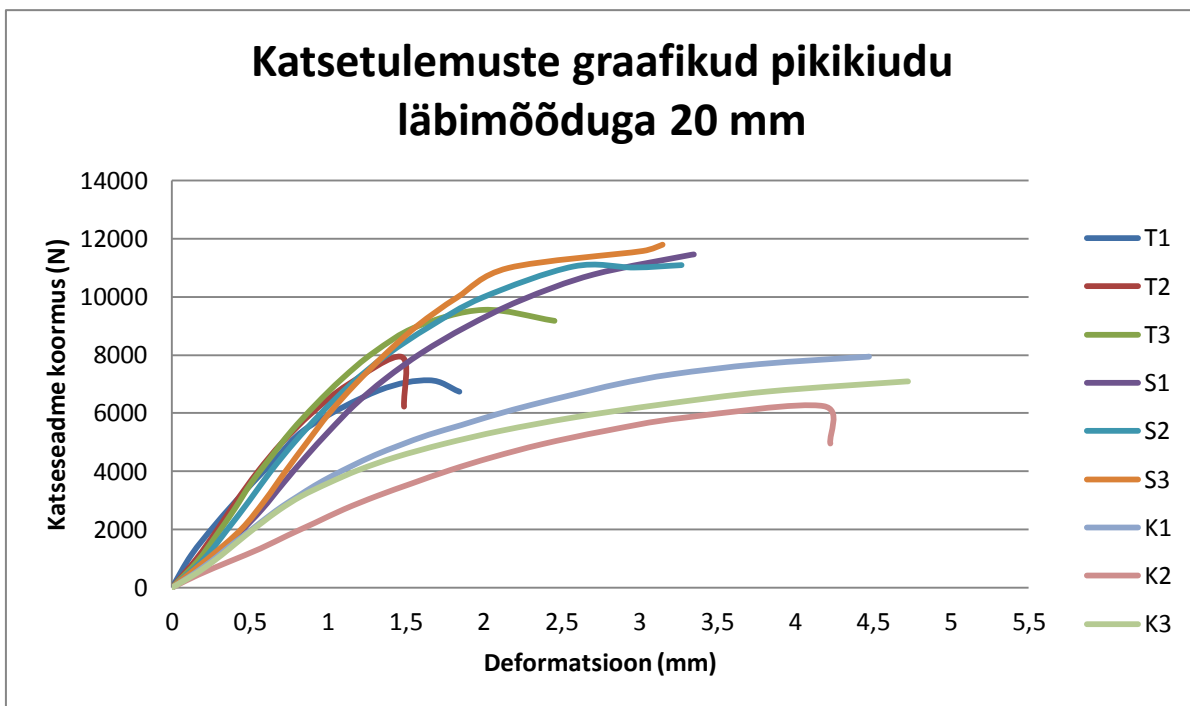
Kui võrrelda Ameerika standardi järgi arvatud puitnaagli muljumistugevuse väärtust  $f_{h,0,k}$  (vt. tabel 4.6) katseliselt saadud väärtusega  $f_{h, teras,k,kesk}$  (vt. tabel 4.7), siis on näha, et peaaegu iga puuliigi ja läbimõõdu puhul on TFEC 1-2012 järgi arvatud väärtused suuremad väljaarvatud kuuse naaglit läbimõõduga 28, kus keskmine muljumistugevus jääb standardi väärtusele alla. Mitmetel puhkudel on katseliselt saadud puitnaagli muljumistugevus enam kui 2,2 korda suurem (nt. saare naagel läbimõõduga 20 mm) Ameerika standardiga arvatud normväärtusest..

Alusmaterjali pikikiudu katsetulemuste põhjal arvatud muljumistugevused  $f_{h,0,k,kesk}$  on võrreldes Eurokoodeksiga arvatud  $f_{h,0,k}$  väärtustega kõvasti väiksemad, mõnel puhul isegi kaks korda väiksemad, kui standardi põhjal arvatud. See on tingitud sellest, et katserakise ja alusmaterjali vahel jäi kummalegi poole 2,5 mm vahet, mis tekitas painet naaglis ning naagel purunes oodatust varem. Lisaks on terasnaagel puitnaaglist jäigem.

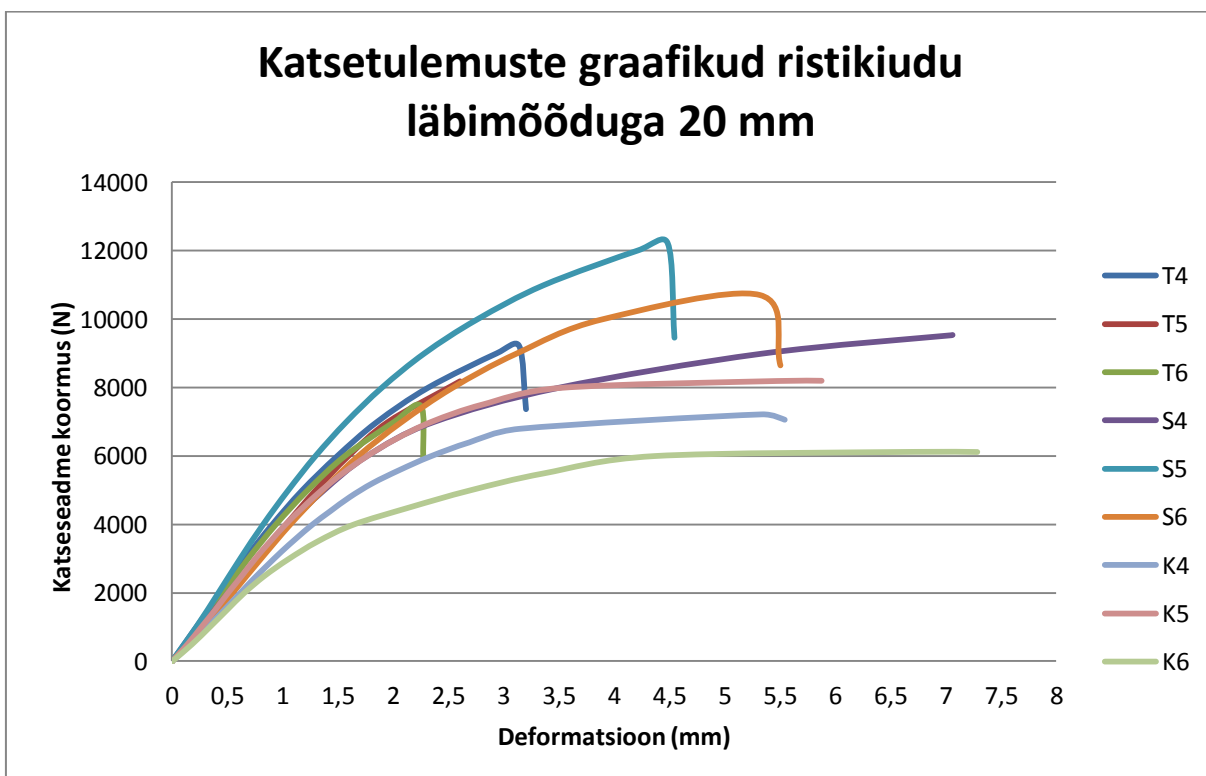
Alusmaterjali ristikiudu muljumistugevusi katsetulemuste põhjal saab võrrelda Eurokoodeks 5 ja TFEC 1-2012 arvatud  $f_{h,90,k}$  väärtustega. Tabelist 4.4 ja 4.6 selgub, et standardi TFEC 1-2012 järgi arvatud tulemused on väiksemad kui Eurokoodeks 5 järgi arvatud. Ameerika standardi järgi arvatud muljumistugevuste ja katsetulemuste põhjal arvatud muljumistugevuste erinevused on seevastu kõige väiksemad. Kõige suurem erinevus esineb kuuse naagliga läbimõõduga 28 mm juures, kus erinevuseks on arvutuslikult  $11-5,46 = 5,54 \text{ N/mm}^2$ . Ristikiudu koormamisel tekkis samuti naaglis paine, mistõttu on muljumistugevuse näitajad vähenenud.

#### **4.7 Katsetulemuste põhjal naaglit purustava jõu analüüs**

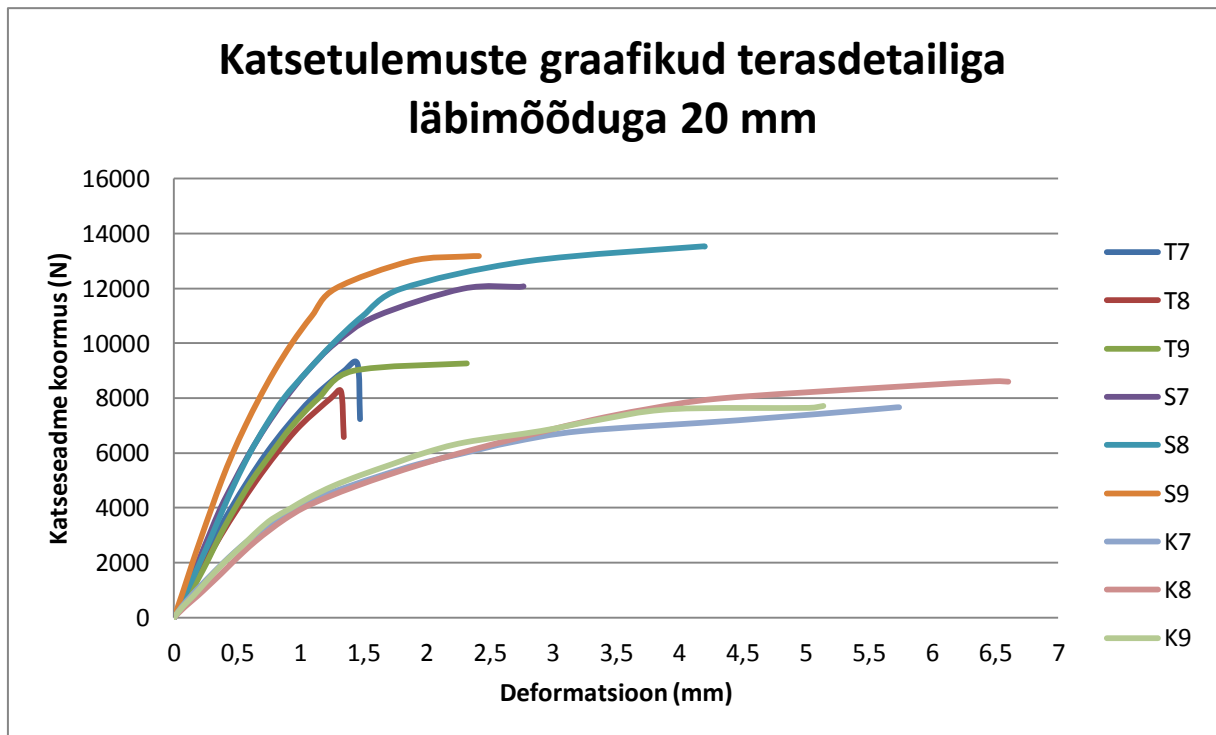
Joonistel 4.5 - 4.7 on näha naaglite koormus-deformatsiooni graafikud. Graafikutelt on näha, et tamme naaglid purunevad suhteliselt järsku ja väikese deformatsiooni juures. See tuleneb sellest, et tamm puruneb hapralt. Samas on näha, et kuusepuit kannatab suhteliselt suuri deformatsioone enne kui puruneb. Kuusk on väga pehme puit ja seetõttu esinevad suured deformatsioonid.



Joonis 4.5. Katsetulemuste graafikud pikikiudu läbimõõduga 20 mm



Joonis 4.6. Katsetulemuste graafikud ristikiudu läbimõõduga 20 mm



**Joonis 4.7.** Katsetulemuste graafikud terasdetailiga läbimõõduga 20 mm

Eeldatavatest purustavatest jõududest jäid katsetega kättesaamatuks ainult katse seadme koormus, mis oli arvatud muljumistugevuse järgi pikikiudu koormamisel alusmaterjali. Katse käigus tekkinud paine kindlasti vähendas naagli kandevõimet. Terasdetailist alusmaterjaliga ja saare naaglitega läbi viidud katsed annavad kõige lähedasema tulemuse  $F_{3,katse,0}$  väärtustele. Läbimõõduga 20 mm puhul oli  $F_{3,katse,0} = 10,40$  kN (vt. tabel 3.3). Lisas 3 on toodu välja ka ülejäänud graafikud, kus on näha, et terasdetailiga katsetamisel ületatakse mõningatel juhtudel  $F_{3,katse,0}$  väärtus, seda saare ja tamme naaglite puhul.

Terasdetailiga alusmaterjali katsete puhul on purustavaks jõuks põikjõud, sest selle katse puhul naaglisse painet ei tekkinud ning naagel töötab lõikele. Piki- ja ristikiudu koormamisel alusmaterjali vähendas naaglit purustavat jõudu kindlasti naaglisse tekkinud paine. Sellises olukorras katse käigus naagel purunes paindele.

Katsekehade vastava paindekandevõime normväärtused lähtudes vastupanumomendist ja eelmisel aastal tudengi Liisi Must poolt katsetega määratud paindetugevuste järgi on arvatavad järgmise valemiga:

$$M_{y,Rk} = W_d * f_m, \tag{4.11}$$

kus  $W_d$  on vastupanumoment,  $\text{mm}^3$

$f_m$  on paindetugevus,  $\text{N}/\text{mm}^2$ .

Vastupanumoment on arvutatav järgmise valemiga:

$$W_d = \frac{\pi * d^3}{32} \quad (4.12)$$

$$W_d = \frac{\pi * 20^3}{32} = 785,4 \text{ mm}^3$$

$$M_{y,Rk} = 785,4 * 97,7 = 76733,6 \text{ Nmm}$$

Ülejäänud väärtused teiste naagli diameetrite puhul on välja toodud tabelis 4.8.

**Tabel 4.8.** Katsekehade paindekandevõime normväärtused lähtudes katseliselt varasemalt määratud paindetugevusest

<b>Puiduliik</b>	<b>Diameeter d mm</b>	<b>Paindetugevus f<sub>m</sub> N/mm<sup>2</sup></b>	<b>Vastupanu moment W<sub>d</sub> mm<sup>3</sup></b>	<b>Paindekandevõime M<sub>y,Rk</sub> Nmm</b>
<b>Tamm</b>	20	97,7	785,4	76733,6
<b>Tamm</b>	25	97,7	1534	149871,8
<b>Tamm</b>	28	97,7	2155,1	210553,3
<b>Saar</b>	20	105	785,4	82467
<b>Saar</b>	25	105	1534	161070
<b>Saar</b>	28	105	2155,1	226285,5
<b>Kuusk</b>	20	80,2	785,4	62989,1
<b>Kuusk</b>	25	80,2	1534	123026,8
<b>kuusk</b>	28	80,2	2155,1	172839

Kuna varasemalt tehti naaglite paindekatsed, siis praeguste katsetulemuste järgi arvutatud puitnaaglite paindekandevõimed on üldiselt natuke suuremad. Erandiks on üksikud hälbed puitnaaglite läbimõõtude 25 ja 28 korral.

## 5 Arutelu ja järeldused

### 5.1 Standardi EN 383:2007 katsemetoodiga sobivus puitnaaglitega liite muljumistugevuste määramiseks

Antud standard on mõeldud terasnaaglitega kinnitatud liidete muljumistugevuste määramiseks. Puitnaaglite jaoks see päris ei sobi. Katseskeem jääks samaks, kuid katserakise teraslehtede paksus peaks olema summaarselt sama suur või suurem kui alusmaterjali paksus, sest terasnaagli puhul ei teki naagli muljumist, aga puitnaagli elastsusomadused on oluliselt nõrgemad terasega võrreldes. Et saada puitnaaglite täpsemaid muljumistugevuse väärtusi, on oluline, et muljutava pinna pindala peab olema suurem. Suurema muljutava pinna puhul on muljumistugevus väiksem ja liitele rakendatav jõud suureneb.

Katsete käigus tekkis olukord, kus alusmaterjali piki- ja ristikiudu koormamisel tekkis naaglisel paine. Edaspidistes katsetes tuleks seda vältida, sest see vähendab naagli kandevõimet ning pole võimalik määrata alusmaterjali täpset muljumistugevust.

### 5.2 Puitmaterjali nihketugevused naagelliite korral

Eurokoodeks 5 antud puidu normatiivsed nihketugevused on antud suurte ristlõigete korral. Nende nihketugevuste puhul võiks väita, et puitnaagel läheb puruks suhteliselt väikeste koormuste korral (vt. tabelist 3.3  $F_{1,katse}$  väärtusi). Tabelites 4.1 kuni 4.3 arvatud nihketugevusi vaadates võib väita, et katseliselt saadud nihketugevused on maksimaalselt  $16,67/4 = 4,17$  korda suuremad kuuse ja kuni  $26,11/4 = 6,53$  korda suuremad saare naagli korral. Samuti ilmneb seos, et väiksemate ristlõigete puhul on puidu defektid väiksemad ja seetõttu on puidu tugevusnäitajad nihkel suuremad. Väiksemate ristlõigete jaoks tuleks katsete teel määrata uued tugevusnäitajad kindlate ristlõike mõõtmete puhul ja vastavad väärtused esitada puidust naaglitega puitliidete arvutusjuhistes.

### 5.3 Muljumistugevuse normväärtus

Muljumistugevuse väärtus pikikiudu koormamisel puitnaaglitega liites sõltub naagli tihedusest, metallnaagli puhul aga alusmaterjali tihedusest. Metallnaagli puhul toimub esmalt alusmaterjali muljumine, sest metall on oluliselt tugevam kui puit. Puitnaagli puhul saab määravaks naagli tihedus, sest naaglit surutakse puidukiududega risti, aga alusmaterjali pikikiudu. Puidu survetugevus pikikiudu on oluliselt suurem (ligikaudu 8 korda) kui ristikiudu, seega esmalt hakkab muljuma puitnaagel ja alles seejärel alusmaterjal. Järelikult peaks muljumistugevus pikikiudu olenema naagli tihedusest.

Koormamisel ristikiudu puitnaaglitega liidet on naagli ja alusmaterjali kiu suund samasugused. Järelikult on nii naagli kui alusmaterjali tugevusnäitajad samas suurusjärgus. Seega muljumistugevus sõltub naagli ja alusmaterjalide tihedusest. TFEC 1-2012 standardi arvutusvalem 4.10 võtab arvesse eelpool kirjeldatud asjaolu. Metallnaagli puhul toimub jällegi puidu muljumine, sest metall on kordades tugevam kui puit. Järelikult peab puitnaagli puhul ristikiudu muljumistugevus sõltuma naagli ja alusmaterjali tihedusest.

Katsete põhjal saab järeldada, et pikikiudu koormamisel hakkas naagel muljuma enne kui alusmaterjal ja ristikiudu koormamisel muljusid nii alusmaterjal kui naagel. Ristikiudu koormamisel muljus lehtpuidust naagli korral alusmaterjal rohkem kui okaspuidu korral, see on selgitatav sellega, et lehtpuidu tihedus on suurem kui okaspuidul (vt. tabel 3.2). Järelikult peab pikikiudu alusmaterjali koormamisel muljumistugevus sõltuma naagli tihedusest ja ristikiudu alusmaterjali koormamisel sõltuma naagli ja alusmaterjali tihedusest.

Katsete käigus tuli välja, et saare naaglite muljumistugevuse väärtused olid kõige suuremad. Järgnesid tammest ja kuusest naaglid. Sellised tulemused on loogilised analüüsides puidu tugevusväärtusi.

## KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös analüüsiti puitnaaglitega kinnitatud liidete muljumistugevust nii puitnaaglil kui alusmaterjalil. Kuna praeguse seisuga Euroopas puuduvad puitnaaglite arvutusosalused, siis on traditsiooniliste ja vanade puitnaaglitega kinnitatud liidete ning uute puitkonstruktsioonide liidete dimensioneerimine piiratud, sest sellisel juhul jääb liite kandevõime arvutused inseneri vastutusele. Sellises olukorras saab selge eelise metallnaagel, sest metallist naaglite jaoks on Euroopas olemas arvutusosalused. Terasnaaglite arvustusteooriad on katsete teel tõestatud.

Katsete aluseks võetud standard EN 383:2007 on mõeldud terasnaaglitega kinnitatud liidete muljumistugevuse määramiseks ja ei sobi puitnaaglitega kinnitatud liite muljumistugevuste määramiseks. Katsete käigus selgus, et katserakise teraslehtede summaarne laius peaks olema vähemalt sama suur või suurem kui katses kasutataval alusmaterjalil.

Nii Eurokoodesks 5 põhjal kui ka TFEC 1-2012 põhjal arvatud muljumistugevuste väärtused erinesid katse tulemuste põhjal arvatud muljumistugevustest väga palju. Alusmaterjali muljumistugevuse täpset teoreetilist lahenduskäiku oli antud katsetulemuste põhjal võimatu tuletada, sest puitnaagel purunes paindel. Seetõttu tuleb valemil tuletamiseks teha arvukalt katseid kasutades puitnaagli jaoks kohendatud katsemetoodikat. Standardite valemide uurides selgus, et liites ristikiudu koormamisel sõltub alusmaterjali muljumistugevus nii naagli kui ka alusmaterjali tapipesa tihedusest. Pikikiudu koormamisel sõltub muljumistugevus naagli tihedusest. Sama saab järeldada ka katsekehade uurimisel. Antud magistritöös katsetatud naaglitest näitasid kõige suuremaid muljumistugevuse näitajaid saare naaglid, millele järgnesid tamme ja kuuse naaglid.

Antud katseid oli liiga vähe ja erinevaid parameetreid liiga palju (3 erinevat läbimõõtu, puiduliiki ja koormamise suunda), et luua lõplike teooriaid. Antud katsetulemusi saab kindlasti võtta aluseks järgnevateks uurimustöödeks.

Võib öelda, et antud magistritöö täitis eesmärgi, katsed tõid välja meetoodika vead, mida võiks muuta, et saada korrektseid muljumistugevuse väärtusi. Lisaks näitasid katsed ära, et nii väheste katsete arvu puhul ei saa luua usaldusväärseid arvutusosaluseid. Loodetavasti saadakse antud magistritööst ideid ja innustust, et puitnaaglitega liite arvutusosaluseid edasi arendada. Projekteerimisnormide olemasolul leiaks puitnaagel kindlasti kasutust

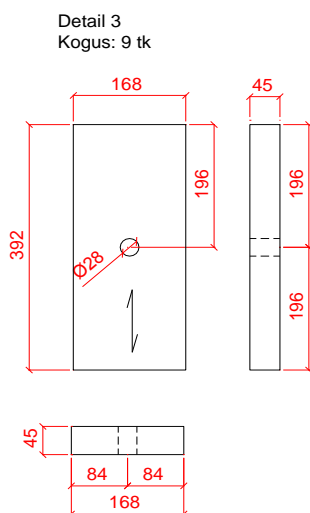
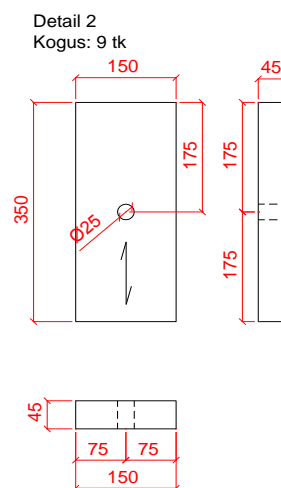
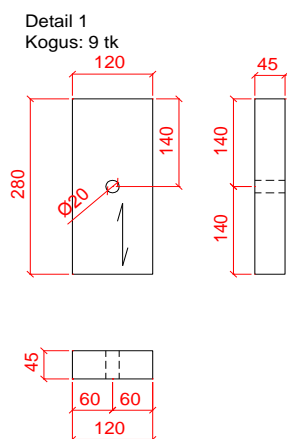


traditsiooniliste ja vanade liidete kandevõime hindamisel kui ka uute liidete projekteerimisel. Kuna puitnaagel on kasutusel olnud sajandeid ja töötanud liidetes väga edukalt, siis ei tohiks puitnaaglit aegade hämarusse jätta.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Allikas, L., Kulbach, V. Puitkonstruktsioonid. – Tallinn: Eesti riiklik kirjastus, 1962. – 414 lk.
2. Just, E. Puitkonstruktsioonid. Tallinn, 2013. – 188 lk.
3. Saarman, E., Veibri, U. Puiduteadus. – Tartu: Eesti Metsaselts, 2006. – 560 lk.
4. Day, D., Jackson, A. Puutöömeistri käsiraamat. – Tallinn: TEA kirjastus, 2006. – 352 lk
5. BS EN 383:2007. Timber structures – Test methods – Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. 2007. Eesti Standardikeskus
6. Allikas, L. Puit- ja plastmasskonstruktsioonid. – Tallinn: Valgus, 1985. – 360 lk.
7. Veski, A. Puitehituse käsiraamat. – Tartu: Teaduslik kirjandus, 1940. – 264 lk.
8. Mõrd, L. Puit-puiduga liidete kasutamine ja projekteerimine ehitistes. Magistritöö. Eesti Maaülikool, Maaehituse osakond. – Tartu: EMÜ, 2012. 78 lk.
9. Must, L. Puidust naaglitega puit-puiduga kahelõikeliste liidete arvutusteooriate analüüs. Magistritöö. TTÜ Tartu Kolledž, Säätva tehnoloogia õppetool. – Tartu: TTÜ, 2013. 77 lk.
10. EVS-EN 1995-1-1/NA:2007+A1:2008/NA:2009. Eurokoodeks 5: puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. 2009. Eesti Standardikeskus.
11. Sobon, J. Historic American timber joinery. – Alstead: Timber Framers Guild, 2011. 53 lk.
12. Noll, T. Puitühenduste piibel. – Tallinn: Sinisukk, 2007. – 192. lk

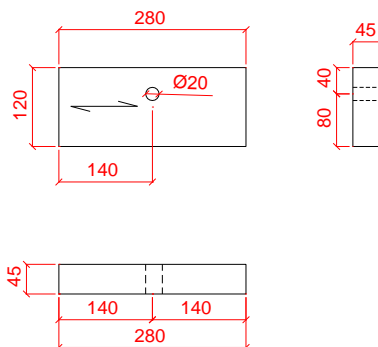
## Lisa 1. Alusmaterjalite joonised



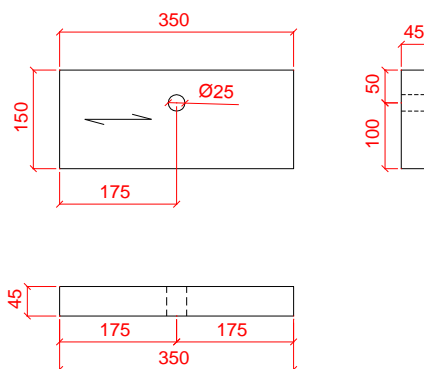
Märkused:  
1) Puitmaterjal C24

Projekt: Lõputöö		Formaat: M1:10		
Teostas	Joosep Järvpõld	Nimetus: <b>Puitdetailid 1-3</b>		
Kontrollis	Illimar Kalk			
Kinnitas				
TTÜ Tartu Kolledž		Leht: 1	Tähis: NAEI092624	Formaat: A4

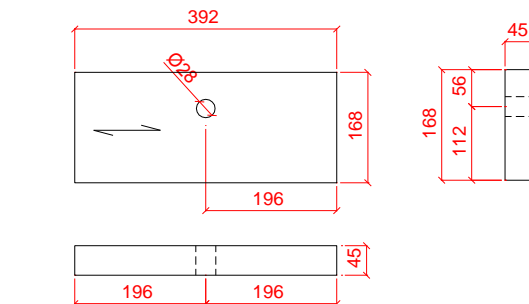
Detail 4  
Kogus: 9 tk



Detail 5  
Kogus: 9 tk

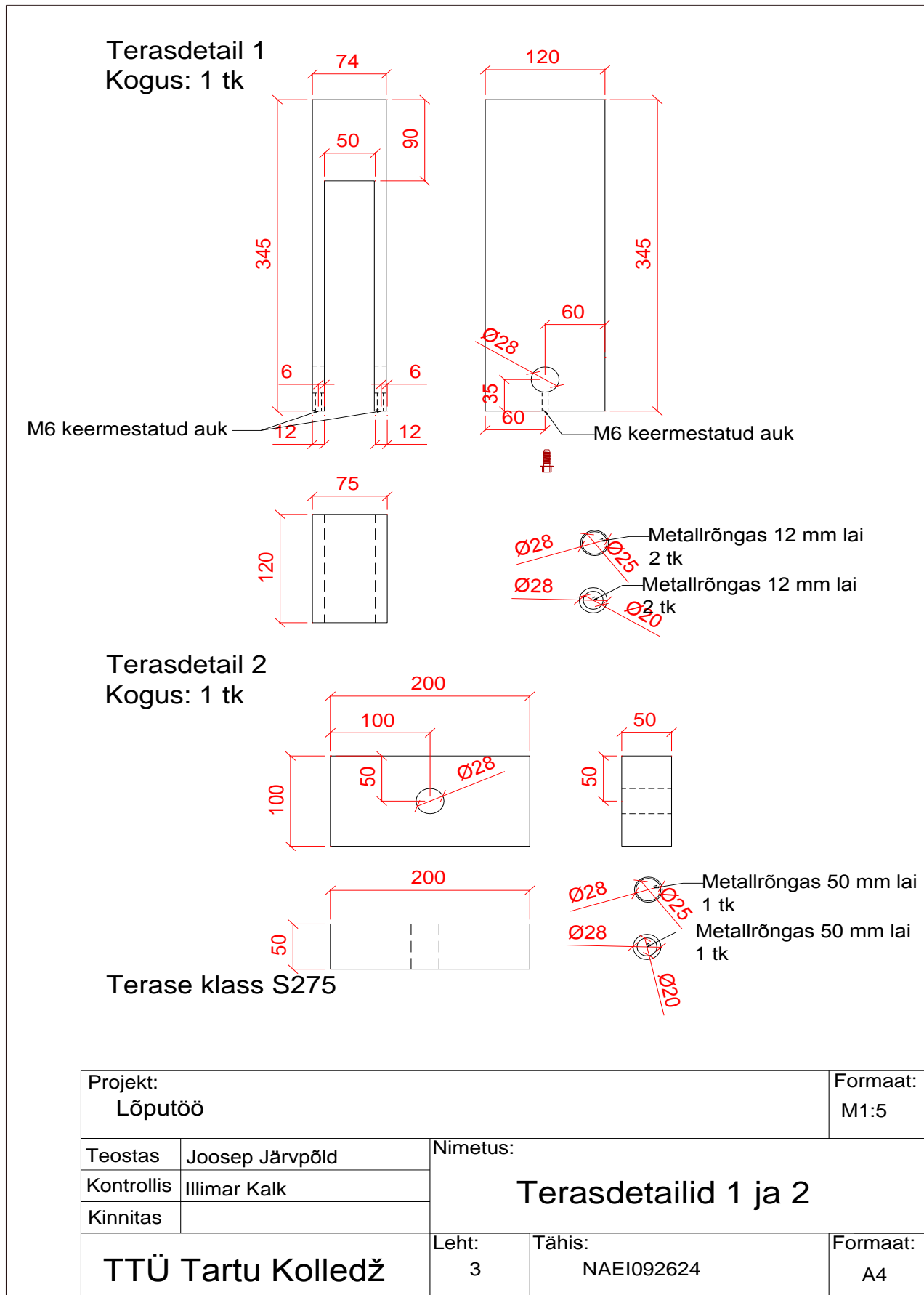


Detail 6  
Kogus: 9 tk

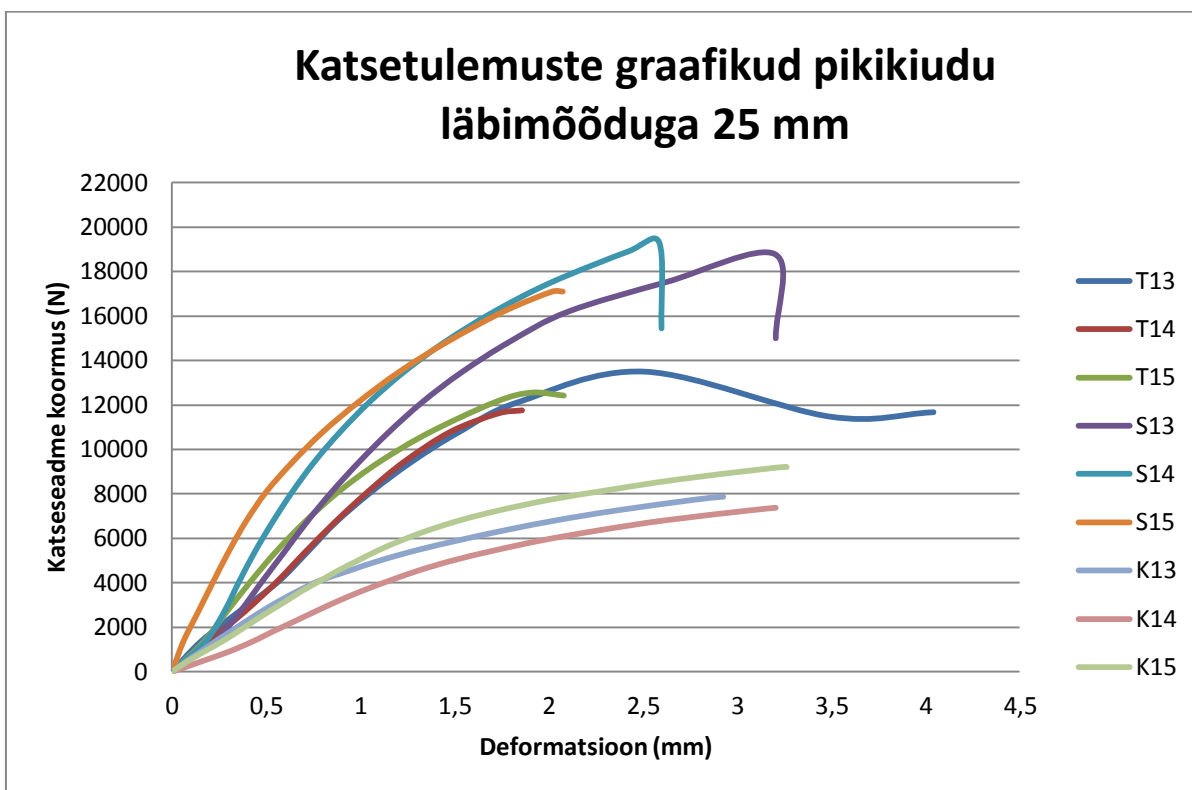


Projekt: Lõputöö		Formaat: M1:10	
Teostas	Joosep Järvpõld	Nimetus: <b>Puitdetailid 4-6</b>	
Kontrollis	Illimar Kalk		
Kinnitas			
TTÜ Tartu Kolledž		Leht: 2	Tähis: NAEI092624
		Formaat: A4	

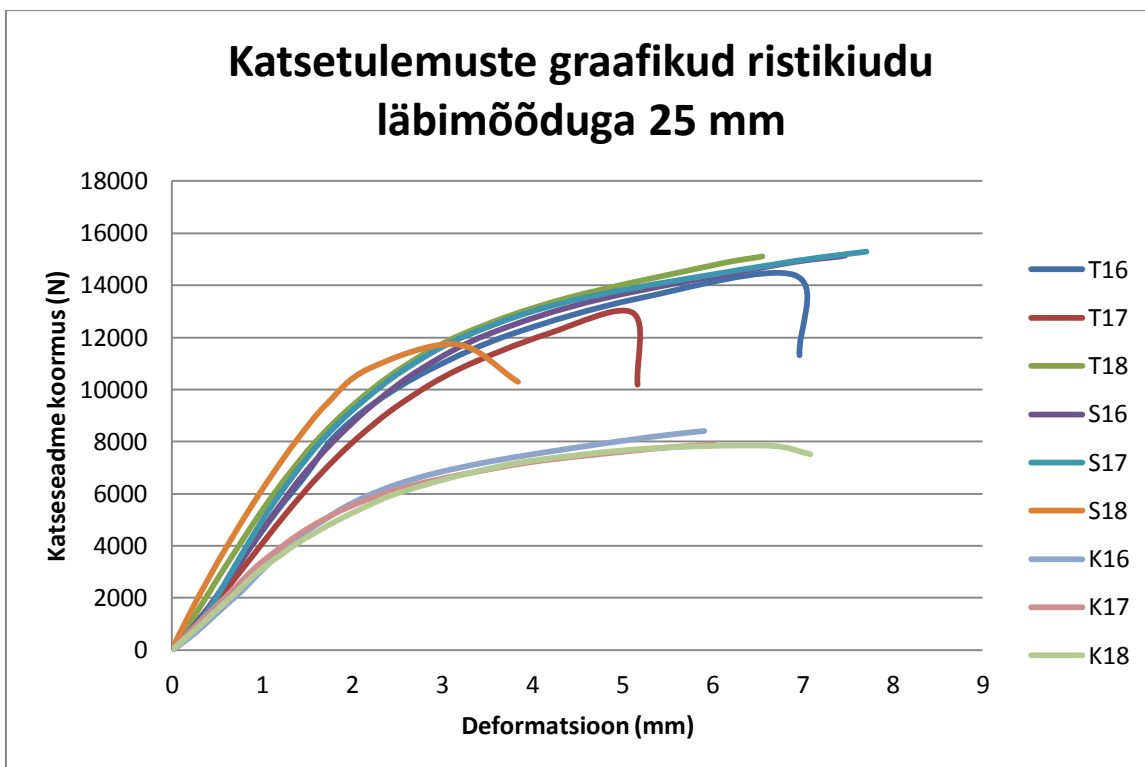
## Lisa 2. Terasdetailide joonised



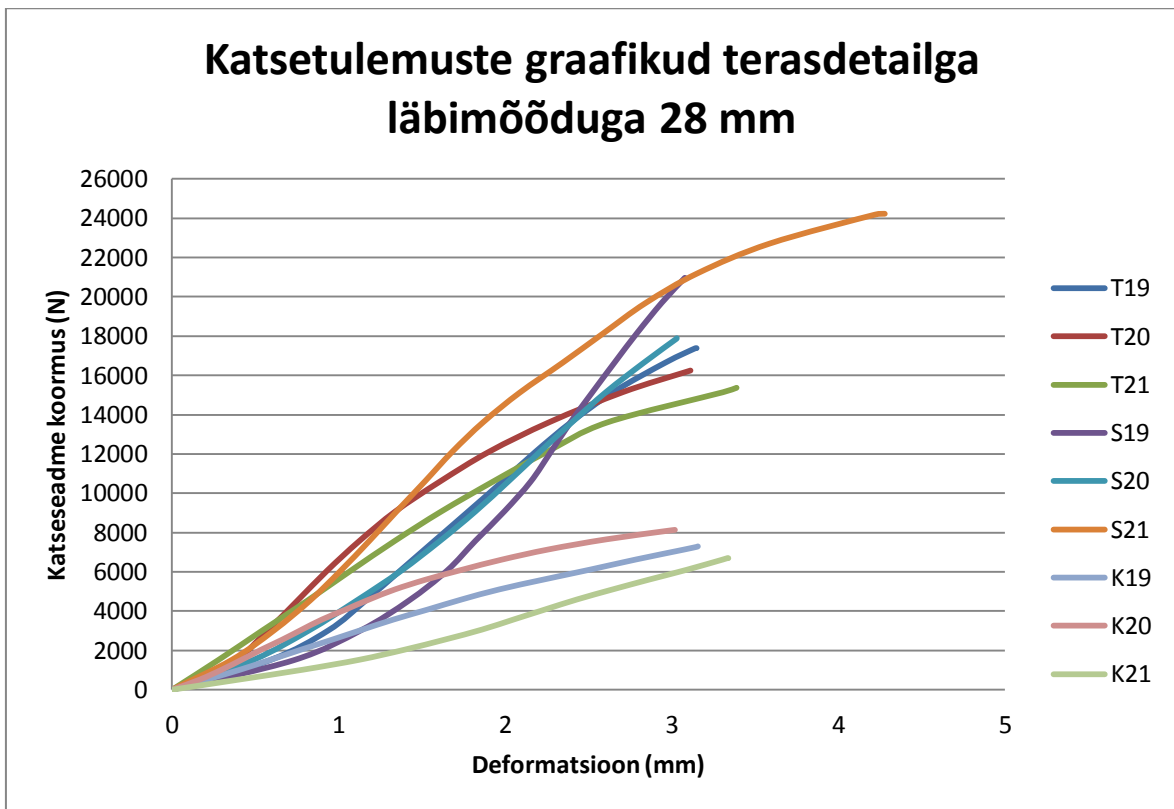
### Lisa 3. Katseseeriade tulemused graafikutena



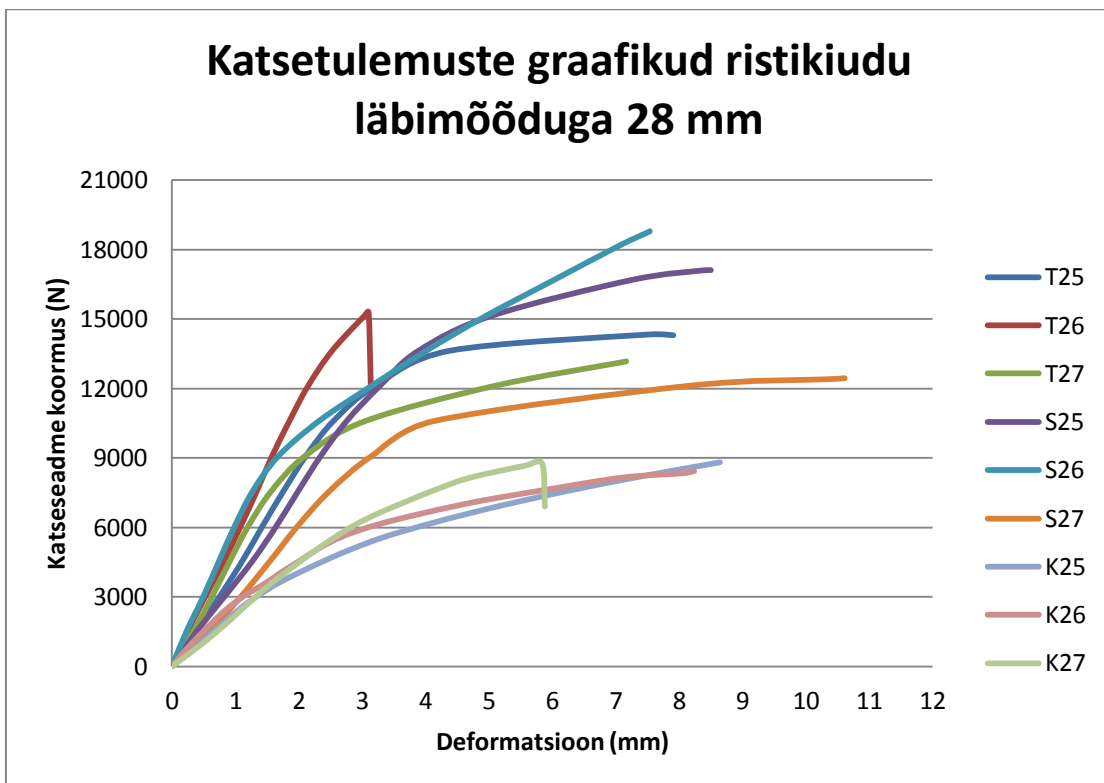
Joonis L3.1. Katsetulemuste graafikud pikikiudu läbimõõduga 25 mm



Joonis L3.2. Katsetulemuste graafikud ristikiudu läbimõõduga 25 mm



**Joonis L3.3.** Katsetulemuste graafikud terasdetailiga läbimõõduga 28 mm



**Joonis L3.4.** Katsetulemuste graafikud ristikiudu läbimõõduga 28 mm

## Lisa 4. Katse joonised



**Joonis L4.1.** Katseteks ettevalmistatud naaglid



**Joonis L4.2.** Katse käigus purunenud naaglid





**Joonis L4.3.** Alusmaterjali tapipesa ristikiudu muljumine



**Joonis L4.4.** Metallrõngad