



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
EESTI MEREAKADEEMIA  
Meremajanduse keskus

Mario Väin

**SOBIVA METOODIKA LEIDMINE JA ARENDAMINE  
POLÜETÜLEENIST PAADI KERE JÄIGASTUSTE  
KEEVITAMISEKS**

Lõputöö

Juhendaja: Vahur Veelaid

Kuussaare 2021

Olen koostanud töö iseseisvalt.

Töö koostamisel kasutatud kõikidele teiste autorite töödele, olulistele seisukohtadele ja andmetele on viidatud.

Mario Väin

.....

(allkiri, kuupäev)

Üliõpilase kood: 178751SDSR

Üliõpilase e-posti aadress: mario\_vain@hotmail.com

Kaasjuhendaja professor Mihkel Kõrgesaar:

Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele

.....

(allkiri, kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: professor Mihkel Kõrgesaar

Lubatud kaitsmisele

.....

(ametikoht, nimi, allkiri, kuupäev)

# Sisukord

Annotatsioon.....	5
Sissejuhatus .....	7
1 Polüetüleenide omadused ja kasutamine .....	9
1.1 Polüetüleenist materjali iseloomustus.....	9
1.2 Polüetüleenidest materjalide jagunemine .....	10
1.3 Polüetüleenide kasutamine erinevates valdkondades .....	12
1.4 Polüetüleenide veesõidukite ehituses .....	13
1.4.1 Polüetüleenpaatide ehitajad maailmas.....	15
2 Metoodiline osa .....	19
2.1 Sobiva meetodika leidmine ja arendamine polüetüleenist paadi kere jäigastuste keevitamiseks.....	19
2.1.1 Sobiva meetodika tehniline spetsifikatsioon .....	20
2.1.2 Polüetüleenist toodete valmistamise keevitamise viisid.....	22
2.1.3 Ekstruuderkeevitus .....	22
2.1.4 Kuuma gaasiga (kuuma õhuga) keevitus.....	25
2.1.5 Kuuma plaadiga põkk-keevitus .....	25
2.1.6 Vibratsioonkeevitus .....	29
2.1.7 Keevisliidete tüübid.....	31
2.2 Sobiva polüetüleenide ja keevituse eeltöötlemise leidmine .....	33
2.2.1 Katsemetoodika valik .....	34
2.2.2 Katsekehad ja nende parameetrid .....	34
2.2.3 Testkehade jagunemine ja hüpoteeside püstitamine.....	37
2.2.4 Tõmbekatsed.....	39
3 Tulemuste analüüs .....	41
3.1 Tehnoloogiline protsess kere jäigastuste keevitamiseks.....	41
3.1.1 Hindamismatriks ja järelendus .....	42
3.1.2 Lahendus.....	43
3.2 Testkehade tõmbekatsed graafiliselt ja tulemuste analüüs .....	44
3.2.1 Keevitatava detaili serva keemilise ettevalmistusega.....	45
3.2.2 Testkehad materjali tootmise päritolu järgi .....	46
3.2.3 Värskest toormest valmistatud sertifitseeritud ja keevitamata polüetüleen.....	47
3.2.4 Taaskasutatud sertifitseerimata tingimustes toodetud ja keevitamata polüetüleen .....	48

3.2.5	Koondvaade erinevate gruppide katsekehade katkepingest MPa.....	49
3.2.6	Järeldused .....	49
	Kokkuvõte .....	51
	Võõrkeelne lühikokkuvõte .....	52
	Viidatud allikad .....	53
	Lisa 1. Polüetüleeni enamlevinud margid .....	55
	Lisa 2. Katsekehade tõmbekatsed.....	57
	Lisa 3. Lihtlitsents .....	59

## Annotatsioon

Käesolev lõputöö käsitleb endas kahte teemapüstitust. Millest esimene on sobiva meetodika leidmine polüetüleenist paadi kere jäigastuste masinkeevitamiseks. Teises töö pooles teostatakse kolmes osas polüetüleenist katsekehadega tõmbekatseid. Selline töö käik toimub põhjusel, et välja selgitada, kuidas mõjutavad polüetüleeni kvaliteeti, erineva päritoluga ja ettevalmistusega polüetüleenist materjal. Ning kuidas see mõjutab materjali omadusi selle hilisemal kasutamisel. Töö käigus selgub, kuidas mõjutab erinev materjali pinna ettevalmistus keevise tugevust ja kvaliteeti. Esimese püstitatud probleemi eesmärk on välja selgitada, milline on kõige sobivam keevitusviis paadikere plaadistuse ja jäigastuse mehhaniseeritud keevitamiseks. On teada, et jäigastuste keevitamiseks tehniliselt õige materjali valimine on väikelaeva kere ehitusprotsessis väga oluline ülesanne. Sellepärast ongi töö teises osas tehtavatel tõmbekatsetel tähtis roll välja selgitada õige materjali valik, nii kere plaadistuseks, kui ka hilisemalt paadi kere jäigastuste masinkeevituseks. Sellest tulenevalt uuritakse töö teises osas ja püütakse jõuda järeldusele, milline on kõige optimaalsem pinnatöötlus. Selleks, et saavutada maksimaalselt tugevat keevisõmblust. Uuritakse ka seda, millist sorti polüetüleenist toorainet on kõige ohutum kasutada hilisematel keretöödel, nii keretöödeks, kui ka väikelaeva kere jäigastuste masinkeevitamiseks.

Teoreetilises osas hakatakse kirjeldama, milline laevaehitusmaterjal on polüetüleen, kus seda kõige rohkem kasutatakse, millised on polüetüleeni nõrkused ja tugevused. Veel käsitletakse põhjuseid, mis teeb polüetüleeni laevaehituses nii unikaalseks materjaliks, et viimasel viiel aastal on väikelaeva turul levima hakanud ekstruuderkeevitamise teel kõrgtihedast polüetüleenist toodetud väikelaevade ehitus.

Töö käigus hakatakse uurima, milliseid abivahendeid saaks veel kasutusele võtta, et kergendada polüetüleenist väikelaeva kere põhja keevitamist, kus tuleb ette raskesti ligipääsetavate kohtade keevitust. Lisaks hakatakse disainima kuumplaadi keevituse teostamiseks vajaminevat agregati. Selle disainimine ja hilisem kasutuselevõtt kergendaks omakorda Kuressaare ametikooli õpetajal ja õpilastel paadikere ehitustöid. Muidugi kiirendaks ja parandaks ehitusprotsessi kvaliteeti kohtadest, kus ligipääs on piiratud ja keerulise iseloomuga. Samuti hakatakse uurima kolmes erinevas katsekehade grupis polüetüleeni keevisliite mehaanilisi omadusi. Esimeses grupis on võrreldud keevitustsooni keemiliselt töödeldud ja töötlemata ning

teises grupis erinevate päritoludega polüetüleenide keemisõmbluse mehaanilisi omadusi. Kolmandas grupis olevaid testkehasid.

Võtmesõnad: polüetüleen, katsekehad, laevaehitus, jäigastused, masinkeevitus.

## Sissejuhatus

Viimastel aastatel on üle maailma hakanud populaarsust koguma poliüetüleenist väikelaevade tootmine. Selle vastu on pidevalt suurenenud väikelaeva tootjate, väikelaeva soetamisest huvitatud klientide, jõustruktuuride ja ka erafirmade huvi. Samuti on hakanud selle materjaliga väikelaeva ehitamise suund endast vaikselt märku andma ka Eestis. Esimesena hakkasid antud materjalist paate tootma Hollandi, Norra ja Taani väikelaevatootjad. Kuna laevade eksploatatsioonist tulenevalt esitakse laevakeredele kõrgendatud kvaliteedi nõudeid, on kvaliteedivigade vältimine ja varajane avastamine ülitähtis ülesanne igale väikelaevatootjale. Esimene püstitatud ülesanne on leida kergendatud, kvaliteetsem ja kiirem lahendus paadikere plaadistuse ja jäigastuste paigaldamiseks. Hakatakse analüüsima, millist keevitusviisi saaks kõige efektiivsemalt rakendada raskesti ligipääsetavates kohtades väikelaeva kere ehitusprotsessis; eriti seal kus ligipääs on kohati raskendatud või väga keeruline, näiteks kere jäigastuste keevitamisel. Proovitakse välja selgitada, milline keevitusmeetod on parim viis selliseks juhuks ja kas on võimalik juurde kavandada abistavat agregaat selle teostamiseks. Antud hetkel on kasutusel ekstruuderkeevitus, mille kasutamisega on teada, et tekib kõrvalekaldeid kvaliteetsest keevisliitest. Tänu sellele on raskesti ligipääsetavates kohtades kvaliteetse keevitusprotsessi teostamine raskendatud. Pärast sellele ülesandele lahenduse leidmist alustatakse tõmbekatsetega. Seeläbi tahetakse jõuda järeldusele, milline on kõige kvaliteetsem poliüetüleenist väikelaeva ehitamiseks kasutatav materjal. Ülesande läbiviimist teostatakse kolmes erinevas grupis, kus hakatakse tegema katsekehadele katsekeevitusi ja tõmbekatseid. Selle eesmärgiks on uurida keevisliite mehaanilisi omadusi, nagu näiteks varieeritud keevitussooni keemiline töötlemine ja materjali päritolust tulenevat mõju keevisliitele. Kõnealuste teemade kohta ei ole teadaolevalt Eestis tehtud varem katsetusi ja uurimustöid, mis kinnitaksid mingi teise keevitusmeetodi paremat efektiivsust ja viiks töö resultaadi kiirema, ootuspärasema ja kvaliteetsema keevisõmbluse saamiseni. Loodetakse, et sellise ülesande püstituse uurimine annab võimaluse mõista, millist materjali töötlemise käigus tekkivaid keevitusvigu ja millist vajaliku materjali valikut on vaja ehitusetapi varajases järgus vältida. Saadud teadmiste omamine parandab edaspidist töö teostamist ja annab võimaluse juba töö algprotsessis teha õiged valikud materjalidega. Sellega omakorda maandatakse riske, mis võivad välja tulla hilisema paadi eksploatatsiooni käigus. Väikelaeva ehitamise käigus tehtud vigadel võib olla väga ränk hind, mis väga tihti võib endaga kaasa tuua inimeste kaotuse ja tootja vastu kriminaalmenetluse alustamise. Sellega kaasneb tootmise kinnipanek ja majanduslik krahh. Selliste asjade käiguga ei saa ükski tootja riskida. Teostatud katsetega

loodetakse jõuda selgusele, kas tehtavad tõmbekatsed aitavad antud püstitatud küsimustele pakkuda lahendusi. Või siis selgub vastupidine tulemus ja tuleb tõdeda, et tehtud katsed ei saavuta oma oodatud eesmärki.



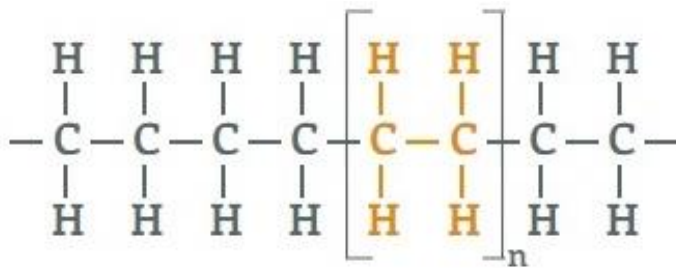
# 1 Polüetüleenil omadused ja kasutamine

Paremaks teema käsitlemiseks ja mõistmiseks on vajalik eelnevalt üle vaadata põhjalikult, mis materjal on polüetüleen, millised on tema eelised ja puudused, millistes valdkondades kasutatakse ja kuhu on välja jõutud väikelaeva ehituses antud materjali kasutamisega. Kuna maailmas on hetkel polüetüleenist väikelaevaehitus kiiresti populaarsust koguv, siis on Eestis veel vaba ruumi nii tootmisele, kui ka uutele huvilistele ja tootmise alustajatele. Hetkel teadaolevatel andmetel on ainuke antud materjalist väikelaevaehitusega tegelev institutsioon Kuressaare Ametikool ja kes seda teeb vastavalt oma võimalustele. Kui arvestada sellega, et polüetüleenil CO<sub>2</sub> emissioon on kordades väiksem kui seda on alumiiniumil, terasel ja erinevatel komposiitidel, sobiks polüetüleen suurepäraselt hetkel maailmas propageeritava rohelise suunamuutusega. Ka polüetüleenist ehitatud laevakered ei vaja mürkvärvidega iga-aastast hooldust. Tänu sellele võib antud materjali kindlalt näha, kui ühte tugevat alternatiivi praegusel hetkel kasutatavatele alumiiniumile, terastele ja komposiitidele. Milledest viimasele ei ole leitud peale nende vananemist mitte ühtegi alternatiivset ja mõistlikku kasutusideed. Polüetüleenist väikelaeva ehitusel näeb töö autor suurt potentsiaali ja tõenäoliselt on see ainult aja küsimus, millal Eestis alustatakse intensiivsemalt polüetüleenist väikelaevade ehitusega. Võrreldes praeguses väikelaevaehituse kasutatavate materjalidega on polüetüleen kõige rohelisema jalajäljega ja ka töötlemisel kõige paindlikum väikelaeva ehitusmaterjal.

## 1.1 Polüetüleenist materjali iseloomustus

Polüetüleen on kaasajal kõige laialdasemalt kasutatav plastmaterjal. Näiteks kasutatakse seda pakkematerjalide ja vahendite tootmisel, veetorustike ehitusel, tööstuslike toruliinide ehitusel, keemiatööstuses reaktsioonivannide ehitusel, geomembraanide valmistamisel ja masinaehituses. Igal aastal toodetakse orienteeruvalt 100 miljonit tonni polüetüleenil, mis on orienteeruvalt 1/3 kogu plasti tootmismahust [1].

Polüetüleenil on eri liike. Polüetüleenil üldine valem on  $(\text{CH}_2\text{H}_4)_n$  [2]. Polüetüleenil on segu etüleenil erinevate ahelapikkustega polümeeridest, nagu Joonisel 1 näidatud.



Molecular Structure of Polyethylene

Joonis 1. Polüetüleenide struktuur

Allikas: (<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-plastic>)

## 1.2 Polüetüleenidest materjalide jagunemine

Polüetüleen on kõige enam levinud erinevates tööstusvaldkondades kasutatud plastik ja sellel on suur variatsioon keemilisi sulameid ehk väga palju erinevaid tüüpe. Selles töö osas soovitakse selgusele jõuda, milline polüetüleenide sulam on kõige mõistlikum kasutamiseks väikelaevaehituses. Polüetüleenide odavus materjalina, tema väike CO<sub>2</sub> emissioon ja see, et polüetüleenide hankimiseks ei ole vaja rajada kaevandusi ja hävitada loodust, väärivad polüetüleenide, kui materjali põhjalikku ja sügavuti uurimist. Tuleb välja selgitada, milline polüetüleenide tüüp on kõige sobilikum väikelaeva kere ja teiste ehituseks vajalike kere ehituselementide valimiseks. Mis on selleks kõige parem just oma tehniliste parameetrite poolest. Kolm kõige tähtsamat polüetüleenide tüüpi võib jagada madala tihedusega polüetüleeniks (LDPE), keskmise tihedusega polüetüleeniks (MDPE), kõrgtihedaks polüetüleeniks (HDPE) ultra suure molekulmassiga polüetüleeniks (UHMWPE) Tabelis 1. näidatud kujul ja eelpoolmainitud sortide ristseotud vormideks (XLPE) [3].

Tabel 1. Polüetüleenide jagunemine

Polüetüleen	Molekulmass (g/mol)	Kristalliseerumise ulatus <sup>1</sup>	Tihedus (g/cm <sup>3</sup> )
LDPE	30,000–50,000	30–40	0.910–0.925
MDPE	60,000–100,000	50–60	0.926–0.940
HDPE	200,000–500,000	70–90	0.941–0.980
UHMWPE	4–6 miljonit	45–60	0.925–0.935

<sup>1</sup> Kristalliseerumise ulatus - polümeeride kristallisatsioon on protsess, mille käigus polümeeride ahelad moodustavad omavahel paralleelselt kulgevad struktuure (lamelle), mis omakorda moodustavad sfäärilisi struktuure (sferuliite).

Lisas 1 on välja toodud polüetüleenide enamlevinud margid.

Järgnevalt tuuakse Tabelis 2 välja polüetüleenini erinevused.

Tabel 2. Polüetüleenini erinevused

Omadus	LDPE	HDPE
Keemiline struktuur	Rohkem harusid polümeeri molekulide vahel	Vähem harusid polümeeri molekulide vahel, enam lineaarseid molekule
Tihedus	Madal tihedus	Kõrge tihedus
	910-940 kg/m <sup>3</sup>	950-970 kg/m <sup>3</sup>
Plastsus	plastne	jäik
Temperatuuri taluvus	Omaduste muutus temperatuuridel üle 20°C	Talub temperatuuri rohkem kui 100°C
Muutub pehmeks	~115°C	~135°C
Keemiline vastupidavus	Vastupidav enamikele alkoholidele, hapetele, alustele, madal vastupanu oksüdeerijatele ja mõnedele süsivesinikele.	Väga hea vastupidavus lahustitele, alkoholidele, hapetele, alustele. Madal vastupanu enamikele süsivesinikele.
Tugevus	Suhteliselt kõrge löögisitkus madalatel temperatuuridel.	Kõrge tõmbe ja eritugevus
Läbipaistvus	Kõrge	Madal

Allikas: [4]

Siit tabelist saab ülevaate polüetüleenisulamite HDPE ja LDPE eelistest ja puudustest, mille põhjal võib kindlalt väita, et HDPE polüetüleenisulamil on paremad tehnilised parameetrid, kui LDPE polüetüleenil.

Järgnevalt tuuakse Tabelis 3 välja polüetüleenini eelised ja puudused.

Tabel 3. Polüetüleenini eelised ja puudused

	LDPE	HDPE
Eelised	Laialdane kasutamine. Madal hind. Vastupidav hapetele ja alustele. Lihtne töödelda ja vormida. Hea elektriisolaator. Veekindel Tooded saavad olla läbipaistvad	Väga lai kasutusvaldkond. Madal hind. Suur tõmbetugevus. Talub madalaiud temperatuure. Suhteliselt tugev ja jäik. Veekindel. Hea elektriisolaator.
Puudused	Praguneb kergemini. Ei saa kasutada ekstreemsetes temperatuurides. Süsinik dioksiid ja teised gaasid imuvad läbi. Väike UV kindlus.	Võib praguneda pinge all. Suur valukahanemine. Väike UV kindlus

Polüetüleenide tähistussüsteem vastavalt standardile EN ISO 1872-1 (1994) koosneb viie andmekohaga allpool kirjeldatud tähisest [5].

Tabel 4. Polüetüleenide tähistussüsteem vastavalt standardile

Nimetus	Standard	Andmekoht 1	Andmekoht 2	Andmekoht 3	Andmekoht 4	Andmekoht 5
Termoplast	ISO 1872	PE	Määrab ettemääratud kasutusala ja/või töötlemismeetodid, olulisemad omadused, lisandid ja värvained	määrab tiheduse ja sulamassi voolekiiruse	positsioon üks määrab täiteaine/armatuuri liigi, positsioon kaks määrab tooraine oleku	valikuline, lisaväärtuste täpsustamiseks

### 1.3 Polüetüleenide kasutamine erinevates valdkondades

Kuna kõik erinevad polüetüleenide jäätmed on võimalik ümber töödelda väikelaeva kere ehitumaterjaliks, siis on vajalik tutvuda kõikide toodetega, mida polüetüleenist tehakse ja millest õige ümber töötlemise korral on võimalik toota väikelaevaehituseks kasutamiseks polüetüleenist toormaterjali. Toiduainetööstuses kasutatakse polüetüleenide pakkematerjalina. Suur osa pakkekilesid, toiduaine karpe ja pudeleid valmistatakse polüetüleenist. Masinaehituses leiab polüetüleen kasutamist liuglaagrite ja muude hõõrdepindade valmistamisel. Keemiatööstuses peamiselt tänu suurepärasele keemilisele vastupidavusele leiab kasutamist reaktsioonivannide ehituses ja ka kemikaalide konteineritena. Tsiviil- ja tööstusehituses leiab suurel määral kasutamist vee- ja kanalisatsioonitorustike ehitamisel. Mööblitööstuses leiab rohkelt kasutust kerge ja ilmastikukindla mööbli valmistamisel. Joonisel 2 on välja toodud tooted erinevatest valdkondadest.



Joonis 2. Polüetüleenist tooted erinevates valdkondades. (a) toiduainetööstus (b) masinaehitus (c) keemiatööstus (d) tsiviil- ja tööstusehitus (e) mööblitööstus  
 Allikad: (a) [6] (b) [7] (c) [8] (d) [9] (e) [10]

## 1.4 Polüetüleen veesõidukite ehituses

Üha laialdasemalt leiab polüetüleen kasutamist paadiehituses. Sellest annab tunnistust päris suur hulk erinevaid väikelaevaehitajaid üle maailma. Eesti on sellest voolust kahjuks puutumata jäänud. Esmalt hakati polüetüleenist valmistama veespordi vahendeid nagu kajakid, kanuud, SUP lauad ja seda rotatsioonivalu meetodil. Orienteeruvalt 10 aastat tagasi hakati polüetüleenist paate ehitama ka ekstruuderkeevitamise teel. Valminud paadid olid ülimalt vastupidavad ja merekindlad, mistõttu leidsid need kasutamist tööpaatidena ekstreemsetes tingimustes.

Mõlemast, nii rotatsioonivalu, - kui ka ekstruuderkeevitamise teel valmistatud paatidest, nagu Joonisel 3, on lähemalt kirjutatud allpool.



(a) - polüetüleenist valatud paat



(b) - polüetüleenist keevitatud paat

Joonis 3. Polüetüleenist paadid. (a) valamise teel toodetud (b) keevitamise teel toodetud

Allikad: (a) <https://outdeck.wordpress.com/2018/01/26/6-person-polyethylene-boat/>

(b) <https://tidemanboats.com/>

### **Polüetüleenist keevitatud paatide eelised:**

Hetkel Eesti väikelaevatootjad alahindavad polüetüleeni võimekust või ei ole seda enda jaoks veel avastanud kui odavat, kvaliteetset ja suurepärase tugevusomadustega väikelaeva ehitusmaterjali. Seetõttu on otstarbekas vaadata, milliseid eelised on antud materjalil väikelaeva ehituses. Antud töö osas käsitletakse ja tuuakse välja polüetüleeni suurepärase, nii keemilised, kui ka füüsikalised omadused.

1. Paat omab väga head ujuvust – materjal mida kasutatakse paadi ehituseks on veest kergem. HDPE (kõrgtihe polüetüleen) omab tihedust, mis on vahemikus 930 to 970 kg/m<sup>3</sup>. Selline paat on veest kergem ja uppumatu.
2. HDPE on materjalina täiesti korrosioonikindel. Polüetüleeniat paadi kere ei ole tundlik korrosioonile, sest ta on keemiliselt väga stabiilne. Puudub vajadus kere hoolduseks.
3. Polüetüleenile merefaunal ei ole võimalik kinnituda. Merefaunal puudub võimalus kinnituda polüetüleenipinnale, seega ei vajata mürgvärve ja paadi kere igaaastast hooldust. HDPE paat suudab säilitada oma kiirusomadused aastaringselt ja ei ole karta, et põhjale midagi kinnituks ja omakorda vähendaks kiirust. Sellega seoses puudub vajadus mürgvärvide järele.
4. Polüetüleen on keemiliselt väga stabiilne ja ükski teadaolev kemikaal ei kahjusta paadikeret ja kere sobib keemiatõrjealuseks.

5. Polüetüleen on heade ballistiliste omadustega. Polüetüleenist laevakere peab vastu tulirelvast laskmisele. Jahipüssi haavilaeng ei läbi laevakeret, vintrelva kuulist tekkinud auk tõmbub tunduvalt väiksemaks ja ei tekita leket. Kevlariga saab materjali muuta kuulikindlaks.
6. Radaris olematu jälg. Polüetüleen ei peegelda eriti radarikiiri. Paadid leiavad kasutust nii politseis kui sõjaväes.
7. Polüetüleenist laevakere kannatab lööke ja kivid ei ole ohuks. Kuna tegu on nii sitke materjaliga, pole karta, et kerele tekiks mingi kahju pärast karile sõitu.
8. Must HDPE ei karda UV (ultraviolet kiirgust) kiirgust. Must HDPE on tänu lisatud süsinikule UV kindel ja päike ei muuda seda rabedaks.
9. Tootmist saab muuta paidlikuks. Ekstruuderkeevituse teel toimub polüetüleenist paadi ehitus samasuguselt, nagu metallpaadi ehitus – kere ehitust alustatakse staaplist ja mudeleid saab kergelt muuta.
10. Kerge parandada. Polüetüleeni keevitamine on suhteliselt kerge ja keevitusseadmed ei ole kallid. Parandamine ja modifitseerimine on lihtne.
11. Väikse süsiniku emissiooniga. Polüetüleeni töötlemisel on süsiniku emissioon viis korda väiksem kui terasel ja alumiiniumil.
12. Polüetüleeni saab 100% taaskasutada. Saab uuesti üles sulatada ja ei ole vaja kaevandustega reostada loodust, ning ei teki materjali puudust [11].

#### **1.4.1 Polüetüleenpaatide ehitajad maailmas**

Järgnevalt uuritakse ja tutvustatakse erinevaid tootjaid maailmas. Järjest enam hoogustuv populaarsus polüetüleeni kasutamisel ja tänu tema tehniliste parameetritele on otstarbekas tutvust teha, millised tootjad kasutavad juba edukalt polüetüleeni paadiehituses, pakkumaks tugevat konkurentsi nii alumiiniumist, terasest kui ka komposiitmaterjalidest väikelaeva ehitajatele.

#### **TIDEMAN BOATS BV**

Tideman Boats BV asutajaks võib lugeda Bruno Joannes Tideman-i (1834 – 1883), kes oli modernse laevaehituse looja Hollandis. Oma innovaatiliste ideede eest laevaehituses sai ta ka kuningliku aumärgi. 2006 aastal lõi Bruno Joannes Tideman-i järeltulija Bruno Tideman

ettevõtte Tideman Boats BV. Tideman Boats BV paadid leiavad merenduses laia kasutamist. Joonisel 4 Tideman Boats.



Joonis 4. Tideman Boats BV poolt ehitatud paat  
Allikas: (<https://tidemanboats.com/>)

### **Arctic Boats OY**

Arctic Boats on Soome ettevõtte ja tegemist on Arctic Airboats Oy Ltd kaubamärgiga. Ettevõtte toodab polüetüleenist ja alumiiniumist paate alates aastast 2007. Arctic Boats HMW paadid on professionaalselt ja uutmoodi disainitud ning ehitatud. RHIB ja alumiiniumpaatide alternatiivina. HMWPE paadi (Joonisel 5) majanduslik eluiga on isegi üle 20 aasta.



Joonis 5. Arctic Boats OY poolt valmistatud HDPE paat  
Allikas: (<https://www.arcticboats.fi>)

### **DutchWorkboats BV**

DutchWorkboats on kuni 15 meetri pikkuste eritellimusel valmistatud tööpaatide disainer ja tootja. Nad kujundavad ja konstrueerivad nõudlikule kasutajale kvaliteetseid tööpaate, mis on



kohandatud vastavalt klientide konkreetsetele soovidele. Tuginedes ulatuslikele tööpaatide kujundamise ja ehitamise kogemustele, töötatakse välja nullist paat rätsepatööna vastavalt iga kliendi erisoovile. Tulemuseks on uuenduslikud kontseptsioonid ja konkurentsivõimelised hinnad ja paadid. Joonisel 6 DWB toodang.



Joonis 6. Dutchworkboat poolt ehitatud 5,5m pikkune paat  
Allikas: (<https://www.dutchworkboats.com/>)

### **Rhino Marine Products (Pty) Ltd**

Lõuna-Aafrika Vabariigi Kaplinnas asuv ettevõtte Rhino Marine Products (Pty) Ltd toodab HPDE paate tavaliste RIB-, alumiinium- ja GRP-kerega tööpaatide vastupidavamaks alternatiiviks alates 2003-st aastast. Rhino Craft-i kered on valmistatud kõrgtihedast polüetüleenist (HDPE) ning on disainitud, arendatud ja testitud tugevateks ja praktiliselt uppumatuteks töölaevadeks. Jõuallikaks kasutatakse nii päramootoreid, nii parda- kui ka reaktiivmootoreid. Viimase 11 aasta jooksul on kered osutunud vastupidavateks ja neid on katsetatud karmidel avamere tingimustel ja need paadid on ennast igast aspektist õigustanud. Käsitööna kasutatakse kere ehitamisele tavaliselt 15 mm paksust HDPE plaate. Joonisel 7 Rhino Craft-i toodang.



Joonis 7. Rhino Marine poolt ehitatud paat  
Allikas: (<https://www.rhinomarineboats.com/>)

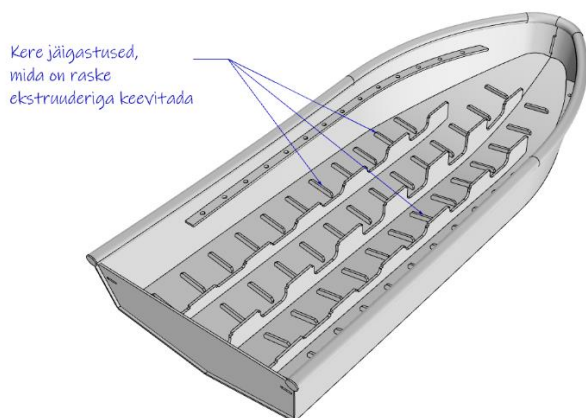
## **2 Metoodiline osa**

Eelnevalt käsitletud materjalide tehniliste omaduste ja informatsiooni põhjal veenduti, et polüetüleen on materjalina väikelaevaehituses laialdaselt kasutusel ja on juba ka suutnud õigustada läbi mitmete maade tootjate loomingu. Ja on kindlasti konkurentsi pakkuv ja tasemel tooraine teistel turul olevate materjalidega võrreldes. Nagu näiteks teras, alumiinium ja komposiitmaterjal ja omab nende suhtes palju eeliseid. Järgnevalt tehakse sissevaadet erinevate polüetüleenist väikelaevalaeva kerede valmistamis- ja keevitusmeetoditesse, nende tööpõhimõtetesse ja parameetritesse. Samuti erinevate keevisliidete tüüpidega ja standardites olevate nõudmistega. Selle kõige uurimine aitab veel paremini mõista ja veenduda polüetüleeni, kui väikelaevaehituse materjali unikaalsuses, odavuses ja tema tootmise lihtsuses. Kindlasti tuleks käsitleda eraldi materjali pika kasutusea plusse ja nendest tingitud võimaluste kasutamist väikelaevaehituses, Kuid etteantud aja ja sisu formaat, hetkel kahjuks seda ei võimalda. Küll aga oleks see hea teema edasiseks uurimiseks.

### **2.1 Sobiva metoodika leidmine ja arendamine polüetüleenist paadi kere jäigastuste keevitamiseks**

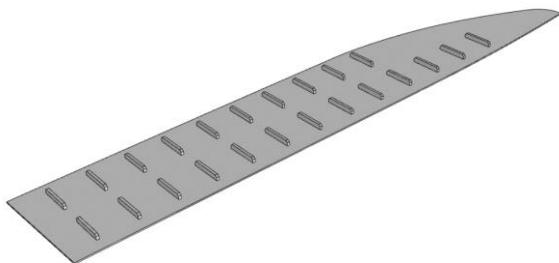
Sarnaselt metallpaatidele koosneb ka polüetüleenist paadi kere plaadistusest ja jäigastusest, nagu Joonisel 8 kuvatud.

Analoogselt metallpaadile on jäigastuse peamisteks elementideks kaared, girderid ja stringerid. Tulenevalt polüetüleeni keevitustehnoloogia eripärast (keevitusekstruuderi suurus) on ekstruuderkeevitus raskendatud ja kohati võimatu raskesti ligipääsetavates kohtades. Samuti on raske tagada lühikese pikkusega keevisõmbluste püsivat ja head kvaliteeti. Selleks on vajadus välja selgitada, milline keevitusmeetoditest sobiks kõige paremini antud probleemi lahendada.



Joonis 8. Polüetüleenpaadi kere jäigastused

Järgneval Joonisel 9 toodud jäigastuselemendid on võimalik põhjaplaadile keevitada juba eelnevalt. Seda enne põhjaplaatide asetamist staaplisse ning enne poordide lisamist. Kuna sarnased suhteliselt lühikesed jäigastuselemendid on universaalsed, leides kasutamist nii paadi põhja, paadi poordi, paadi teki, kui ka näiteks mahutite seinte jäigastamisel on vaja leida lahendus nende elementide kiireks ja robustseks keevitamiseks jäigastatavale plaadile.



Joonis 9. Paadi põhjaplaadi jäigastuselemendid, mida saaks paigaldada enne põhjaplaadi asetamist staaplisse

### 2.1.1 Sobiva meetodika tehniline spetsifikatsioon

Järgnevalt on Tabelis 5 välja toodud meetodika tehniline spetsifikatsioon.

Tehnilise spetsifikatsiooni ülesanne on leida ja visualiseerida seadme funktsioonid ja tehnilised tingimused. Millele projekteeritav toode peab kindlasti vastama. Samuti peab tehniline spetsifikatsioon vastama kindlatele küsimustele. Näiteks, kas antud funktsioon või tingimus on masina eksploatatsiooniks nõutav, või kõigest lihtsalt soovitatav. Tehnilise spetsifikatsiooni tabel on dünamiline dokument, mida saab ning tuleb uuendada toote disainimise erinevate etappide jooksul. Näiteks võib projekti edenedes mõne nõutava parameetri lahendamine ette

antud tingimustel osutada liialt kulukaks. Ning seetõttu võib tekkida vajadus tingimuste lihtsustamiseks.

Tabel 5. Metoodika tehniline spetsifikatsioon

	Nõutav	Soovitav
Funktsioon		
Keevisrada polüetüleenjäigastus polüetüleenist plaadile	X	
Tehnilised tingimused		
Jäigastuse maksimaalsed mõõtmed 500x20x500	X	
Plaadi maksimaalsed mõõtmed: 6000x1000x20	X	
Vaja keevitada vähemalt 30 jäigastust tunnis		X
Seadet teenindab maksimaalselt 1 operaator	X	
Käsitlemine		
Eluiga 10a	X	
Kuju ja disain		
Statsionaarne		X
Hoiustamine		
Sisetingimustes		X
Valmimisaeg		
2 kuud peale projekteerimise lõppu		X
Kulud		
Seadme omahind maksimaalselt 8000€		X

### Musta kasti diagramm

Musta kasti meetod (black box method/black box theory) nimetatakse meetodit, mille uurimisel rakendatakse musta kasti (black box) [12]. Mustaks kastiks loetakse süsteemi, objekti või seadet, mille tööprotsess on teadmata, seda saab aga vaadelda läbi sisendi, milleks on (input) ja väljudi, milleks on (output). Kasutusvaldkonnad on inseneeria, programmeerimine ja teadus. Uurimisobjekt algab inimese peaaigus ja lõppeb algoritmiga.

Joonisel 10 on skeem.



Joonis 10. Musta kasti diagrammi skeem

### 2.1.2 Polüetüleenist toodete valmistamise keevitamise viisid

Paadikere ehitusele kehtivad standardi järgi ettenähtud nõuded ja väikelaeva ehitajad peavad neid järgima. Kindlad nõuded on ette nähtud ka paadikerede keevitusprotsessile. Polüetüleeni keevitamine jaguneb põhiliselt kolmeks: ekstruuderkeevitus, kuuma õhu keevitus ja kuuma plaadiga keevitus. Järgnevalt antakse neist ülevaade ja arutletakse, kas ja kuidas saab neid kasutada paadikere jäigastuste keevitamisel. Ja milline keevitusviis on neist kõige kasumlikum propageerimiseks.

### 2.1.3 Ekstruuderkeevitus

Ekstruuderkeevitamise teel saab ühendada erineva paksusega polüetüleenlehti. Ekstruuderkeevitus on kindlasti polüetüleeni keevitusviisidest üks kõige enam kasutatud antud hetkel polüetüleenist toodete valmistamiseks olemas olevatest keevitusviisidest. Põhjus seisneb selle keevitusviisi teostamise lihtsuses. Seda tüüpi keevitusviisi on võimalik hakata kasutama väga minimaalse väljaõppega. Samuti on varustuse maksumus võrreldes teiste keevitusviiside vajalikest varustustest tunduvalt madalam. Kasutatakse spetsiaalset seadet – keevitusekstruuderit, nagu Joonisel 11 näidatud.

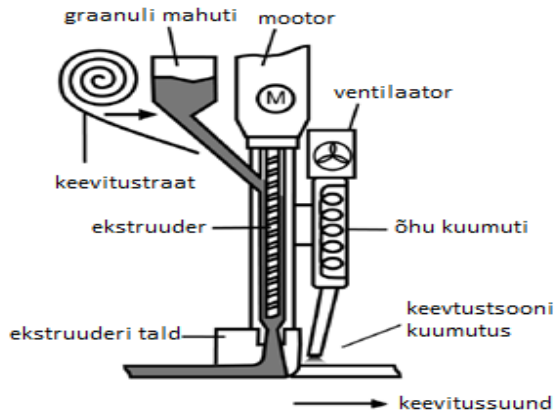


Joonis 11. Polüetüleeni ekstruuderkeevitus

Allikas: (<https://www.leister.ca/case-studies/pvc-welding-a-major-challenge>)

Ekstruuderkeevitus koosneb õhu kuumutajast (föönist), millega kuumutatakse ühendatavate detailide servad polüetüleeni sulamistemperatuurini. Ekstruuderist, kus toimub keevituse lisamaterjali (polüetüleen traadi või graanulite) kuumutamine sula olekusse, segamine homogeenseks massiks ja surumine keevitustsooni. Ekstruuderitallas, mis tagab sula

polüetüleeni vajaliku surve keevitustsoonis ning keevituse pinna hea kvaliteedi. Joonisel 12 on välja toodud keevitusekstruuderi tööpõhimõte [13].

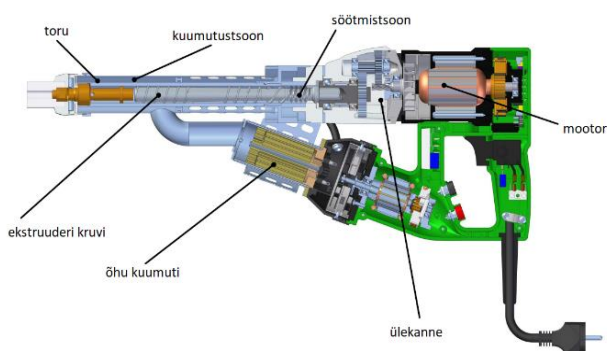


Joonis 12. Termoplastide keevitusekstruuderi tööpõhimõte

Allikas: (<https://www.leister.com/en/Extrusion-Welders#t=coveo50653d1d&layout=card>)

Termoplastide kõige populaarsem keevitusviis on kahtlemata ekstruuderkeevitus, see põhjus on tingitud asjaolust, et see keevitusprotsess on oma olemuselt kõige kergem ja lihtsamini õpitav. Keevitusvarustuse soetamine on peaaegu kõige odavam ja tema teostamise protsess on kõikidest teistest olemasolevatest peaaegu kõige kiirem.

Joonisel 13 on kuvatud ekstruuderkeevituse töövahend.



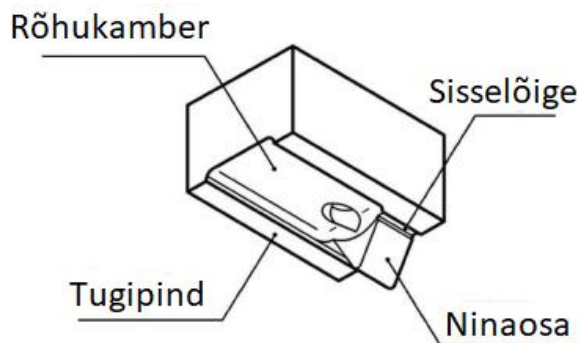
Joonis 13. Termoplasti keevitusekstruuderi ehitus

Allikas: (<https://www.leister.com/en/Extrusion-Welders#t=coveo50653d1d&layout=card>)

## Ekstruuderi taldmikud

Moodustamiseks sobiva geomeetriaga ja nõutud kvaliteediga õmblust on vajalik kasutada erinevate keevitustüüpide puhul erineva geomeetriaga keevitustaldmikke. Erinevad taldmikud aitavad teostada eri kujuga keevisõmblusi. Kevitustaldmikud valmistatakse polütetrafluoretüleenist PTFE (Teflon™, Fluon™) kas otse töökojas või siis tellitakse ekstruuderi tootjalt.

Taldmik (Joonisel 14.) koosneb tugipinnast ninaosast, rõhukambrist ja sisselõikest.



Joonis 14. Termoplasti keevitusekstruuderi taldmik  
Allikas: (ГОСТ Р 56155-2014)

Ekstruudkeevituse eelised:

- Odav, robustne ja kindel tehnoloogia

Ekstruudkeevituse puudused:

- pikk tsükliäeg
- nõuab keevitajalt kvalifikatsiooni
- keevitaja töö füüsiliselt raske
- kitsastes kohtades ei ole võimalik keevitada



## 2.1.4 Kuuma gaasiga (kuuma õhuga) keevitus

Kuuma gaasiga (õhuga) keevitatakse õhukeseid polüetüleenlehti (kilesid, geomembraane, põrandakatteid) [14]. Paraku standardne protsess ei ole rakendatav. Standardne protsess näeb ette keevitusala ja keevituse lisamaterjali kuumutamist kuumas õhujoas, kuuma lisamaterjali surumist keevitustsooni ja keevitusõmbluse jahtumist.



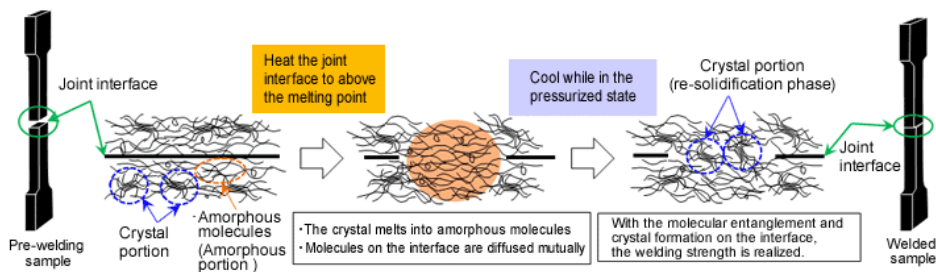
Joonis 15. Polüetüleeni kuuma gaasiga keevitus

Allikas: (<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/hot-gas-welding-of-plastics-part-1-the-basics-056>)

## 2.1.5 Kuuma plaadiga põkk-keevitus

Kuuma plaadiga põkk-keevitus leiab kasutamist torustike ehitusel ning ka suuregabariidiliste toodete valmistamisel. Protsessi olemus seisneb ettevalmistatud (puhastatud, kraabitsetud) pindade kuumutamises elektrienergiaga kuumutatud plaadiga etteantud temperatuurini ja seejärel nende pindade omavahel kokku surumises ette antud rõhuga ning pindade rõhu all koos hoidmises kuni keevise jahtumiseni vajaliku piirini. Kuuma plaadiga põkk-keevitus leiab väga laialdast kasutamist torustike ehitusel aga ka suuregabariidiliste toodete valmistamisel.

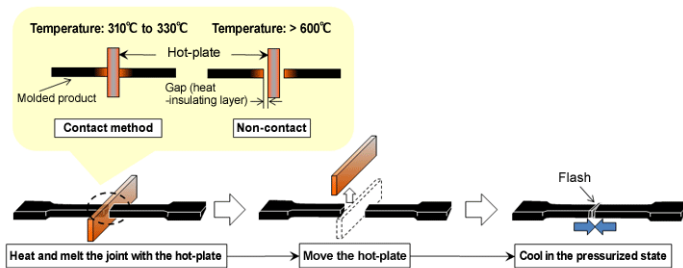
Kuuma plaadiga põkk-keevituse põhimõtet aitab selgitada allolev Joonis 16 [15].



Joonis 16. Kuuma plaadiga põkk-keevituse põhimõte

Allikas: ([https://www.toray.jp/plastics/en/torelina/technical/tec\\_026.html](https://www.toray.jp/plastics/en/torelina/technical/tec_026.html))

Kuuma plaadiga põkkkeevitus tundub jooniste ja selle keevituse parameetrite analüüsi põhjal, üks kergemaid teostatavatest keevituse liikidest. Hetkel käsitletud informatsiooni põhjal paistab kuuma plaadiga keevitus ka ajalises mõttes kõige kasumlikum lahendus oma kergusega, ehk ei vaja mingit erilist väljaõpet, nagu näiteks vibratsiooni keevitus. Keevitusprotsess ei ole ka aeganõudev tööprotsess. Joonisel 17 on toodud välja ülevaade tööprotsessist.



Joonis 17. Kuuma plaadiga põkk-keevituse protsess

Allikas: ([https://www.toray.jp/plastics/en/torelina/technical/tec\\_026.html](https://www.toray.jp/plastics/en/torelina/technical/tec_026.html))

Protsess koosneb järgnevatest tsüklitest:

1. Keevitatavate detailide asetamine spetsiaalsesse keevitusmasinasse
2. Servade ettevalmistus (freesimine, kaabitsemine)
3. Servade kuumutamine kuuma plaadiga servade ühtlustamiseks
4. Servade kuumutamine kuuma plaadiga servade sulatamiseks
5. Vahepaus
6. Keevitatavate detailide kuumutatud servade kokku surumine
7. Keevitatavate detailide koos hoidmine kuni liite jahtumiseni

Joonisel 18 on ülevaade perioodidest [16].

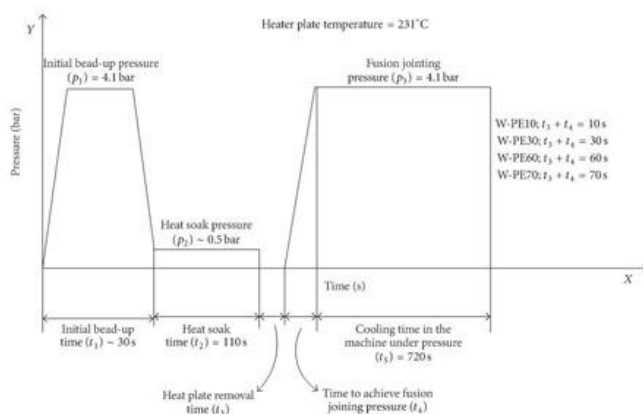


FIGURE 1: Schematic showing the butt fusion welding profile of HDPE pipes with the variation of fusion time.

Joonis 18. Kuuma plaadiga põkk-keevituse perioodid

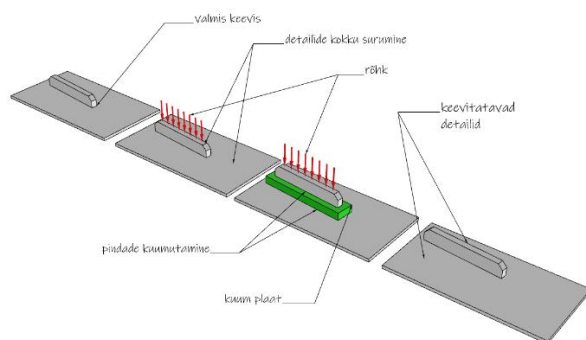
Allikas: (Microstructure and mechanical properties of the butt joint in high density polyethylene pipe  
Authors: Pashupati Pokharel, Yoonsang Kim and Sunwoong Choi)

Meetodi kasutamiseks on vajalik kindel aparatuur, mis sõltub keevitatavate detailide kujust. Üldiselt on laialdasemalt kasutuses torude ühendamiseks mõeldud kuuma plaadiga põkk-keevitus masinad ja plaatide ühendamiseks mõeldud kuuma plaadiga põkk-keevitus masinad.

Paadi kere jäigastuse keevitamiseks saab kasutada, kui tehnoloogiline protsess on järgnev:

- Keevitavate pindade ettevalmistus (kraabitsemine, atsetoon)
- Keevitavate pindade kuumutamine ja kokku surumine kuuma plaadiga pindade sobitamiseks
- Keevitavate pindade kuumutamine ja kokku surumine kuuma plaadiga pindade sulatamiseks
- Keevitavate pindade kokku surumine ja jahutamine

Joonisel 19 on lõputöö käigus koostatud potentsiaalne tehnoloogiline lahendus.



Joonis 19. Jäigastuse keevitamise protsess kuuma plaadiga keevitamisel

Protsessi parameetrid [17]

Kuuma plaadi temperatuur 160-280°C

Sobitamisrõhk 0,2-0,5MPa

Kuumutusaeg 10-60sek

Keevitamisrõhk 0,05-0,25MPa

Eelised:

- Odav, robustne ja kindel tehnoloogia
- Ei nõua keevitajalt kvalifikatsiooni
- Keevitaja töö füüsiliselt kerge

## Puudused

- Pikk tsükliäeg
- Vajab eraldi seadet

Joonisel 20 on näidatud torude põkk-keevituse masin.



Joonis 20. Torude põkk-keevituse masin

Allikas: (<https://www.leisterindia.com/products/ritmo-basic-160-butt-fusion>)

Suuregabariidiliste termoplastist toodete valmistamisel leiab kasutamist eraldi disainiga põkk-keevituse masin (Joonisel 21). Tööpõhimõttelt ja protsessi olemuselt on viimane küll sarnane torude keevitamiseks mõeldud masinaga.

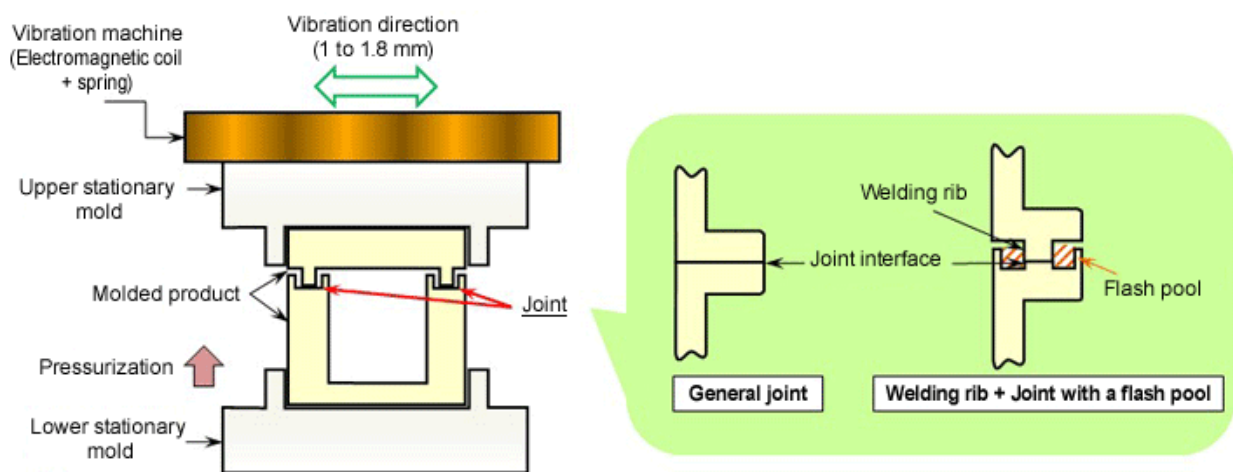


Joonis 21. Plaatide ühendamiseks mõeldud kuuma plaadiga põkk-keevituse masin

Allikas: ([https://www.alibaba.com/product-detail/ppr-plastic-pipe-hdpe-electrofusion-welding\\_62038706971.html?spm=a2700.7724857.normal\\_offer.d\\_image.5e6865cbzwOm8y](https://www.alibaba.com/product-detail/ppr-plastic-pipe-hdpe-electrofusion-welding_62038706971.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_image.5e6865cbzwOm8y))

## 2.1.6 Vibratsioonkeevitus

Vibratsioonikeevituse protsess koosneb fikseeritud detailist ja fikseerimata detailist, mis surutakse ette antud jõuga vastu esimest detaili ning mis samal ajal vibreerib külgsuunas, mille tulemusena hõõrde tõttu tekkinud kuumus sulatab ühenduses olevad keevitatavad pinnad ning tekib keevisõmblus. Üldjuhul vibratsiooni allikaks on elektromagneti nii nimetatud vedru tandem. Peamiselt on vibratsiooni amplituud 1-1,8mm ja sagedus 240Hz. Keevise sügavust, mis vastavalt nõutele peaks olema 1-2mm, reguleeritakse detaili number kaks vibratsiooni ajaga.



Joonis 22. Vibratsioonkeevituse tööpõhimõte

Allikas: ([https://www.toray.jp/plastics/en/torelina/technical/tec\\_026.html](https://www.toray.jp/plastics/en/torelina/technical/tec_026.html))

Kõrgtiheda polüetüleen vibratsioonkeevitust on 2013 aastal uurinud A. Kiszka, M. Lomozik ja jõudsid oma uurimistöös järgmistele järeldustele [18]:

1. Saavutamaks vibratsioonkeevituse kvaliteetset keevisliidet tuleb liidetavad pinnad väga põhjalikult ette valmistada.
2. Korralik ettevalmistus ja protsessi parameetrite järgimine annab väga hea keevisliite.
3. Vibratsioonkeevitus on kõrgtiheda polüetüleen keevitamiseks efektiivne ja kasulik protsess.

Vibratsioonkeevituse kasutamine paadiehituses on väga perspektiivikas ja vajab edaspidist rohkemat uurimist, kuid antud hetkel võimaldab mehhaniseerida väikesegabariidiliste detailide, eriti näiteks poordi ja põhja jäigastuste, lisamist suurematele detailidele.

Protsessi parameetrid peavad olema järgnevad:

- Keevitusrõhk 0,5-8,0MPa
- Vibratsiooni sagedus 240Hz
- Vibratsiooni amplituud 1-1,8mm

Eelised:

- Ei nõua keevitajalt kvalifikatsiooni
- Keeviataja töö füüsiliselt kerge

Puudused

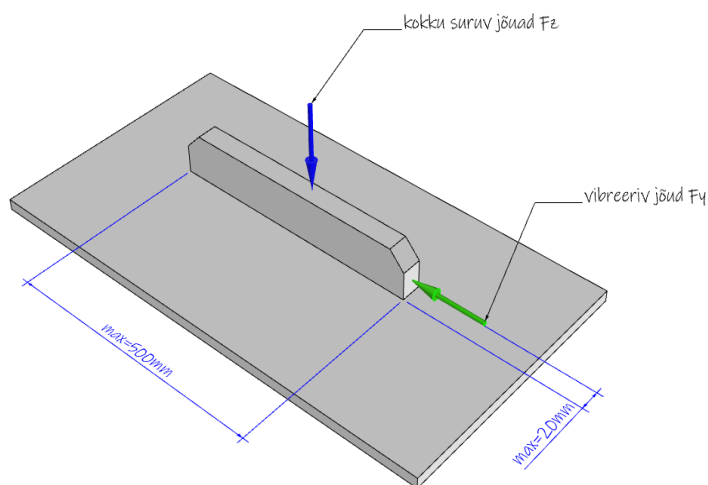
- Pikk tsükliäeg (kuni 60 sekundit)
- Vajab eraldi suure võimsusega kallist seadet

### Mehaanilise töö arvutus vibratsioonkeevitusel

Lähteandmed on toodud tabelis 5 ja lähteskeem Joonisel 23.

Tabel 6. Vibratsioonkeevituse lähteandmed

Jäigastuse kontaktpinna pikem telg, a	500mm
Jäigastuse kontaktpinna lühem telg, b	20mm
Polüetüleeni hõõrdetegur, $\mu$	0,15
Maksimaalne detailide kokku surumise rõhk, P	8 Mpa
Vibratsiooni amplituud (siire), s	1,8mm



Joonis 23. Vibratsioonkeevituse lähteskeem

Detalle kokku suruv jõud  $F_z$  avaldub:

Vibreeriv jõud  $F_y$  avaldub:

Hõõrdetöö  $W$  (1 tükkel) avaldub:

Hõõrdevõimsus avaldub:

Jäigastuse ja fiksaatori inertsit ületamiseks vajaliku võimuse arvutuseks vajalikud lähteandmed on toodud tabelis 6.

Tabel 7. Vibratsioonkeevituse lähteandmed

Jäigastuse ja fiksaatori eeldatav mass	5kg
Vibratsiooni sagedus, $f$	240Hz
Vibratsiooni amplituud, $x$	1,8mm

Vibratsiooni kiirendus avaldub valemiga:

$$a = -(2\pi * f) * \frac{x}{2} = -(2 * \pi * 240) * 0,9 = -1357m/s^2$$

Vibratsiooni jõud avaldub:

$$F_v = m * a = 5 * (-1357) = 6785N$$

Vibratsiooni töö avaldub:

$$W = F_v * s = 6785 * 0,0009 * 2 = 12,21J$$

Vibratsioonivõimsus avaldub:

$$P_v = \frac{W}{t} = \frac{12,21}{1/240} = 2930,4W$$

Koguvõimsus vibratsioonkeevitamisel avaldub:

$$P = P_h + P_v = 10348,8 + 2930,4 = 13279,2W$$

Arvutatud korrutatuna varuteguriga

Varutegur  $t_v=2$


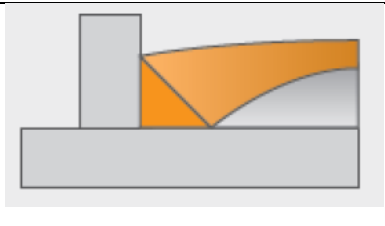
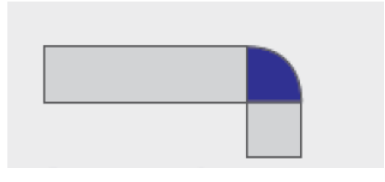
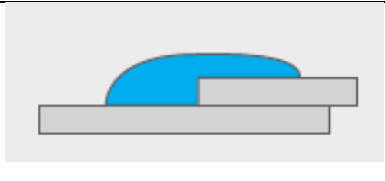
$$P_{tot} = P * t_v = 13279,2 * 2 = 26558,4W = ca 26kW$$

### 2.1.7 Keevisliidete tüübid

Töölisele, kes on varem keevitusega kokku puutunud on polüetüleeni keevitusele ümber õppida suhteliselt lihtne ja ajaliselt kiire.







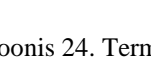
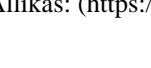



Tuleb tõdeda, et keevisliidete tüübid (Tabel 7) on analoogsed metalli ja alumiiniumi keevisliidete tüüpidele, keevituse metodoloogia on aga erinev protsess. Samuti keevituseks kasutatav varustus ja tehnika erinevad üksteisest [19].

Tabel 8. Keevisliidete tüübid

Põkkliide	
Nurkliide	
Välimine nurkliide	
Ülekandeliide	

Allikas: [19]

Erinevate liitetüüpide tarvis on vaja kasutada erineva geomeetriaga keevitustaldmikke. Allpool Joonisel 24 on tootja Leister poolt pakutavad erinevad ekstruuderi taldmikud.

	Welding shoe complete 146.239 54 x 40 x 52 mm blank welding shoe 146.240 74 x 50 x 58 mm blank welding shoe
	146.241 25 mm overlap
	146.706 35 mm overlap
	146.242 35 mm overlap
	145.899 40 mm overlap
	146.245 20 mm V-seam
	146.246 25 mm V-seam
	146.247 30 mm V-seam
	146.232 20 mm fillet weld seam (a = 14 mm*)
	146.233 25 mm fillet weld seam (a = 17.5 mm*)
	146.234 30 mm fillet weld seam (a = 21 mm*)
	146.230 Corner seam Ø 14 mm
	146.218 Corner seam Ø 20 mm

\* a = welding seam thickness

Joonis 24. Termoplasti keevitusekstruuderi taldmikud erinevate keevisetüüpide keevitamiseks  
Allikas: (<https://www.leister.com/en/Accessories#t=WeldingShoesCoveoTabId&layout=card>)



## 2.2 Sobiva polüetüleen ja keevituse eeltöötlemise leidmine

Selleks, et omada põhjalikumat ülevaadet polüetüleen puudutavatest erievatest parameetritest ja saada oodatavat selgust polüetüleen keevitusest, keevisliidetest, töötlemise võimalustest ja põhimõtetest, nii standardite järgi jagunemisest, kui ka standardi järgi keevitamisest, on järgneva informatsiooni välja toomine eesmärgiga proovida hoomata kogu polüetüleen puudutavat teavet. Koos tehniliste ja füüsikaliste parameetritega, kui ka keemilise koostisega. Enne iga materjaliga tööde teostamise alustamist on vajalik tutvuda, nendele materjalidele kehtivate standarditega. Standardid reguleerivad termoplastide keevitamist, samuti keevitamise teel saadud toodete disaini, kui ka nende testimist. Nii, et ilma standarditega tutvumist on polüetüleenist materjali töötlemine mõeldamatu. Sest standard näeb ette kindlad reeglid materjali töötlemise teostamiseks. Antud osas Tabelis 8 tutvutakse vastavate standarditega.

Tabel 9. Termoplastide keevitamise standardid

Keevitus	
EVS-EN 13705:2004	Welding of thermoplastics - Machines and equipment for hot gas welding (including extrusion welding) [20]
CEN/TS 16892:2015	Plastics - Welding of thermoplastics - Specification of welding procedures [21]
EVS-EN 13067:2020	Plastics welding personnel - Qualification of welders - Thermoplastics welded assemblies [22]
CEN/TR 16862:2015	Plastics welding supervisor - Task, responsibilities, knowledge, skills and competence [23]
Testimine	
EVS-EN 14728:2019	Imperfections in thermoplastic welds – Classification [24]
EVS-EN 13100-1:2017	Non destructive testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 1: Visual examination [25]
EVS-EN 12814-1:2000	Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 1: Bend test [26]
EVS-EN 12814-2:2000	Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 2: Tensile test [27]
EVS-EN 12814-4:2018/AC:2018	Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 4: Peel test [28]
Disain	
EVS-EN 12573-1:2001	Welded static non-pressurised thermoplastic tanks - Part 1: General principles [29]
EVS-EN 12573-3:2000	Welded static non-pressurised thermoplastic tanks - Part 3: Design and calculation for single skin rectangular tanks [30]
EVS-EN 1778:2000	Characteristic values for welded thermoplastic constructions - Determination of allowable stresses and moduli for design of thermoplastic equipment [31]

### **2.2.1 Katsetoodika valik**

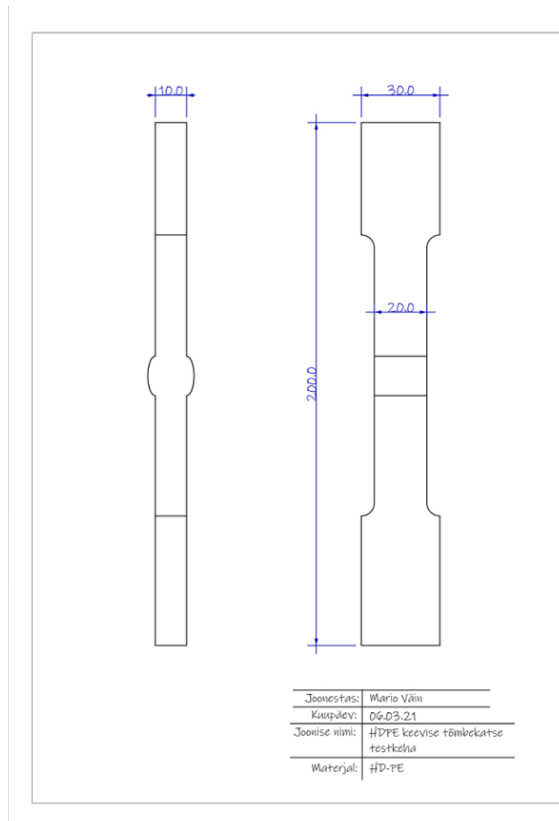
Katsetoodika valiti vastavalt standardile EVS-EN 12814-2:2021

Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 2: Tensile test'

Katseks valmistati ette erinevate parameetritega keevitatud katsekehad. Katsekehad tõmmati katseteimil Instron 5969 Tallinna Tehnikaülikooli Eesti Mereakadeemia Meremajanduse keskuse laboris 18.03.2021. Testimiseks venitatakse katsekeha piki selle vertikaaltelge konstantse kiirusega kuni murdumise või venimiseni. Protseduuri ajal mõõdetakse koormust, mis katsekehale mõjub. Testikeha lõigatakse risti keevituse suunale mitte varem, kui kaheksa tundi peale keevitust. Iga katsekeha peab olema markeeritud, et selle asukoht keevitatud detailis oleks identifitseeritav. Katsekaha ei tohi termotöödelda ega mehaaniliselt sirgestada. Katsekehade toorikute ja katsekehade dimensioonid vastavalt standardile EVS-EN 12814-2:2021 Tõmbekatseteks valmistati ette keevitustoorikud ja keevitati katsekehad vastavalt allolevatele joonistele.

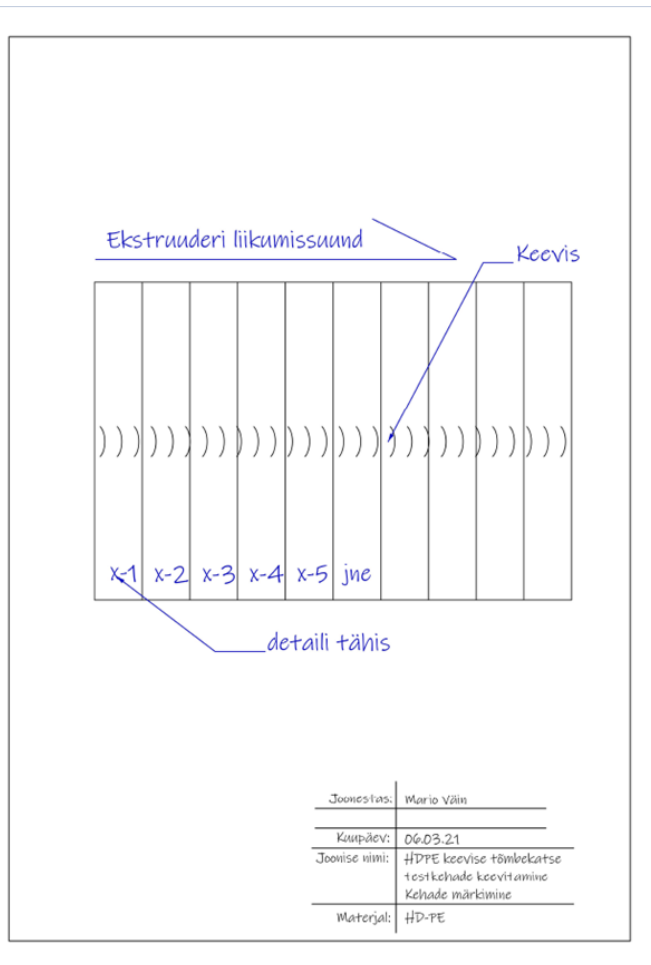
### **2.2.2 Katsekehad ja nende parameetrid**

Allolevatel joonistel on kujutatud katsekehi, millega teostati tõmbekatseid. Ülemisel joonisel (Joonis 25) on kujutatud katsekeha kuju ja tema tehnilised parameetrid. Alumisel projekteeritud joonisel (Joonis 26) kujutatakse ka ekstrudeerimise keevisõmbluse suund. Joonised on joonestatud projekteerimisprogrammiga Rhino. Katsekehad valmistati Kuressaare Ametikoolis vastavalt standardile ekstrudeerkeevitamise ja lõikamise protsessi läbi. Katsekehade valmistajateks olid Kuressaare Ametikooli õpetaja Vahur Veelaid ja Väikelaevaehituse õpitsuuna õpilased.



Joonis 25. Polüetüleenist keevitatud liitega katsekeha

Katsekehade valmistamine toimus Kuressaare Ametikoolis, kus see valmistamisprotsess võttis aega kaks päeva, kuna esimene kord tehti katsekehad, mis olid ilma kumeruseta. Siis arvatavasti tänu sellistele katsekehade kujule hakkasid katsekehad katsetamise käigus ükshaaval purunema tõmbeteimi kinnituste äärest ja kogu tehtav katse ja ka teemapüstitus ähvardasid läbi kukkuda. Kuna standardis oli luba kasutada kahte sorti katsekehi, prooviti minna esimesel korral kergema vastupanu teed ja tehti katsekehad kiiremini ja kergema vaevaga. Hilisemad katsekehad, mis uuesti valmistati, toodeti kumerusega. Pärast uute katsekehade valmimist ja nendega tõmbekatsete tegemist selgus, et katsekehad purunevad oodatud kohast ja püstitatud ülesande lahendamiseks oli võimalik edasi tegutseda. Kokku kulus katsekehade tootmiseks kaks päeva.



Joonis 26. Testkehade märgistus

Testkehade keevitamine toimus Kuressaare Ametikoolis

Testkehade keevitamiseks kasutatud keevitusekstruuder Lesite LST610A

Joonisel 27 antud keevitusekskruuder



Joonis 27. Keevitusekstruuder Lesite LST610A

Allikas: (<http://www.lesiteweld.com/PlasticExtrusionWelder/83.html>)

Keevitusekstruuderi tehnilised parameetrid:

- Tootja: Fuzhou Lesite Plastic Technology Co., Ltd.
- Tööpinge sagedus: 50Hz
- Kaal: 6,5kg
- Fööni võimsus: 1600W
- Ekstruuderi kuumutusvõimsus: 800W
- Ekstruuderi mootori võimsus: 800W
- Keevitusõhu temperatuur 20-600°C
- Ekstruuderi temperatuur: 200-380°C
- Tootlikkus: 2kg/h
- Keevitustraadi läbimõõt: 3-4mm
- Setifikaat: CE

### **2.2.3 Testkehade jagunemine ja hüpoteeside püstitamine**

Testkehad jagati (Tabelis 9) järgnevalt:

- Testkehade jagunemine keevitatavate detailide serva keemilise ettevalmistuse järgi.
- Testkehade jagunemine materjali tootmise päritolu järgi.
- Kontrolltestkehad jagunesid juveniilseks, sertifitseeritud polüetüleeniks mis oli keevitamata ja taaskasutatud sertifitseerimata tingimustes toodetud polüetüleeniks, mis oli ka keevitamata.
- Püstitati järgmised hüpoteesid, esimeses grupis olevad keemiliselt ettevalmistatud ja harjatud pindadega katsekehad on kokku keevitamisel ja hilisemalt tõmbekatse tegemisel tugevamad, kui keemiliselt ette valmistamata ja harjamata katsekehad.
- Teiseks pakuti, et teises grupis olevad taaskasutatud sertifitseerimata ja värskest toormest sertifitseeritud polüetüleenist katsekehadest purunevad kiiremini ja väiksema tõmbesurve all taaskasutatud sertifitseerimata toormest katsekehad.
- Kolmandas grupis kontrolliti katsekehade materjali tõmbetugevust ja nende vastavust polüetüleen tugevusele vastavalt materjali kuuluvusele. Ja vaadati kui kiiresti selles grupis katsekehad purunevad.

Kontroll testkehad:

Tabel 10. Testkehade jaotis ja tähistus

testkeha	tähistus
Testkehade jagunemine keevitatavate detailide serva ettevalmistuse järgi	
- Harjatud ja aktiveeritud	12.1-12.9
Testkehade jagunemine materjali tootmise päritolu järgi	
- Taaskasutatud sertifitseerimata tingimustes toodetud polüetüleen	14.1-14.9 ja 14-II-1 - 14-II-7
Kontroll testkehad	
- Juveniilne, sertifitseeritud polüetüleen, keevitamata	15
- Taaskasutatud sertifitseerimata tingimustes toodetud polüetüleen, keevitamata	16

## 2.2.4 Tõmbekatsed

Katsekehade tõmbekatsed viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Eesti Mereakadeemia Meremajanduse keskuse katselaboris 18.03.2021.

Tõmbekatseteks kasutati katseteimi Instron 5960.

Tõmbekatsete läbiviijateks olid Mario Väin ja Janar Kiik.

Tõmbekatsete läbiviimine kulges kaks päeva.

Instron 5960 parameetrid (Joonisel 28):

- Koormus: 50 kN
- Kiirus: 0,001-600 mm/min
- Võimalik katsetada mh vastavalt standarditele: ASTM C297, ASTM D790, ASTM D2344, ISO 14125, ISO 14130 and ISO 178



Joonis 28. Katseteim Instron

Allikas: (<https://www.instron.us/en-us/products>)

Kokku käesoleva lõputöö tarvis testiti 42 katsekeha, mis jaotati järgmistesse gruppidesse:

1. Testkehade jagunemine keevitatavate detailide keemilise ettevalmistuse järgi – 9 katsekeha, katsekehad tähistusega 12.1 – 12.9
2. Testkehade jagunemine materjali tootmise päritolu järgi – 16 katsekeha, katsekehad tähistusega 14.1 – 14-II-7
3. Kontroll testkehad – 17 katsekeha, katsekehad tähistusega 15 ja 16

Lisas 2 Tabelis 17 on välja toodud kõik tõmbekatsed eraldi. Selles tabelis on võimalik tutvuda kõikide töö käigus tehtud tõmbekatsetega. Kokku teostati laboris 127 tõmbekatset. Kõik katsekehad purunesid ettenähtud kohast.

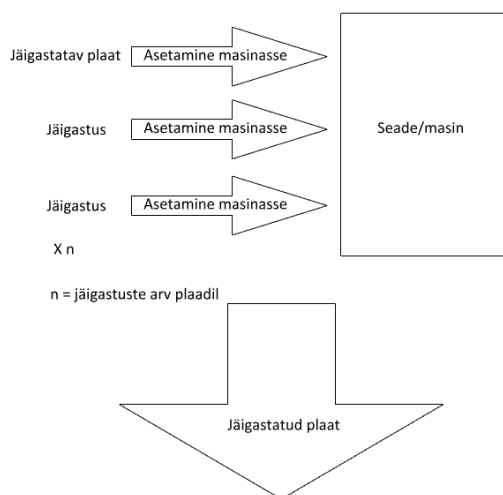


### 3 Tulemuste analüüs

Metoodiliste otsuste teostamiseks töös tehti järgnevad valikud. Testkehade kokku keevitamiseks otsustati kasutada Kuressaare Ametikooli töökojas olemasolevat keevitusekstruuderit Lesite LST610A. Tõmbekatsete teostamiseks otsustati kasutada Tallinna Tehnikaülikooli Eesti Mereakadeemia Meremajanduse keskuse katselaboris olemasolevat katseteimi Instron 5960. Katsekehad toodeti valmis ja lõigati ja keevitati Kuressaare Ametikooli töökojas. Otsustati koostada hindamismatriksi tabel, et välja selgitada parim võimalik keevitusmeetod. See on põhjuseks ka eelnevale nii põhjalikule erinevatele keevitusmeetodite käsitlemisele töös. Kuna töö autor puutus polüetüleeni, kui väikelaevaehitus materjaliga kokku esimest korda loeti vajalikuks, selline põhjalik ülevaade.

#### 3.1 Tehnoloogiline protsess kere jäigastuste keevitamiseks

Kere jäigastuste keevitamine on võimalik põhjaplaadile keevitada juba eelnevalt, enne põhjaplaatide asetamist staaplisse ning enne poordide lisamist. Kuna sarnased suhteliselt lühikesed jäigastuselemendid on universaalsed, leides kasutamist nii paadi põhja, paadi poordi, paadi teki, kui ka näiteks mahutite seinte jäigastamisel, oleks vaja leida lahendus nende elementide kiireks ja robustseks keevitamiseks jäigastatavale plaadile. Joonisel 29 on välja toodud tehnoloogilise protsessi skeem.



Joonis 29. Tehnoloogilise protsessi skeem

### 3.1.1 Hindamismatriks ja järelendus

Hindamismatriks koostati (Tabel 11) läbiviidud küsitluse põhjal. Kus vastajaks oli Kuressaare Ametikooli õpetaja Vahur Veelaid. Seda põhjusel, et temal on Eestis ainukesena kogemus polüetüleenist väikelaevade ehituses, teisi teemaga seotud inimesi ei suudetud tuvastada, samuti ei suudetud uurimise käigus tuvastada ka seda, et kusagil mujal Eestis veel tegeletakse polüetüleenist väikelaevade ehitamisega.

Tabel 11. Hindamismatriks

	Kuuma plaadiga keevitus	Kuuma gaasiga keevitus	Ekstruuderkeevitus	Vibratsiooni-keevitus	Kaalutegur
Maksumus	8	3	10	1	0,9
Eluiga	6	6	6	3	0,3
Ekspluatatsiooni kulukus	8	5	2	2	1
valmistamise lihtsus	10	5	3	1	1
Robustsus	10	10	5	1	1
Ohutus	8	8	8	8	0,5
Punkte kokku	41	28,5	24,8	9,8	
Keskmine hinne	8.3	6.1	5.6	2.6	
Hindamiskaala oli 1-10 punkti (1-madalaim, 10-kõrgeim) ja kaalutegurid olid valitud lähtuvalt süsteemile esitatud nõuetest ja piirangutest. Keskmine hinne saavutati, kõikide punktide kokku liitmisel ja jagamine nende kogusummaga.					

Vastavalt hindamismatriksile ja vastavalt keskmisele hindele on sobivaimaks keevitustehnoloogiaks kuuma plaadiga keevitus (*hot tool welding*). Samuti kõige kõrgema keskmise hinde sai kuuma plaadiga keevitus, seda põhjusel, et sellise keevitusviisiga töötades on kõige mugavam ja lihtsam ligipääs keerulistesse kohtadesse. Samuti pakub kuuma plaadiga keevitus kõige kiiremat töö teostust. Kuna kuuma gaasi keevitus on oma olemuselt nii spetsiifiline ja sellega saab keevitada ainult õhukeseid polüetüleenlehti (kilesid, geomembraane, põrandakatteid) on antud juhul sellega keevitamine välistatud. Vibratsiooni keevitus on liiga energiamahukas ja selle protsessi teostamiseks on vaja spetsiaalse ettevalmistusega töötajaid, sellepärast ei sobi ka see keevitusviis antud detailide kokku keevitamiseks. Ekstruuderkeevitusega on antud juhul keerukas pääseda raskesti ligipääsetavatesse kohtadesse. Nagu näiteks põhjaplaadi jäigastuselementide paigaldamine. Tänu sellele tekib töö käigus palju praaki, mis hilisema kontrolli käigus avastatakse. Paraku selle parandamine pikendab väikelaeva ehitusprotsessi ja suurendab kulusid. Hetkeliste uuringute järgi on kuuma plaadi keevitus kõige parem lahendus. Järgnevalt hakatakse disainima kuumutuselemendist agregaat, mis on alumiiniumist valmistatud

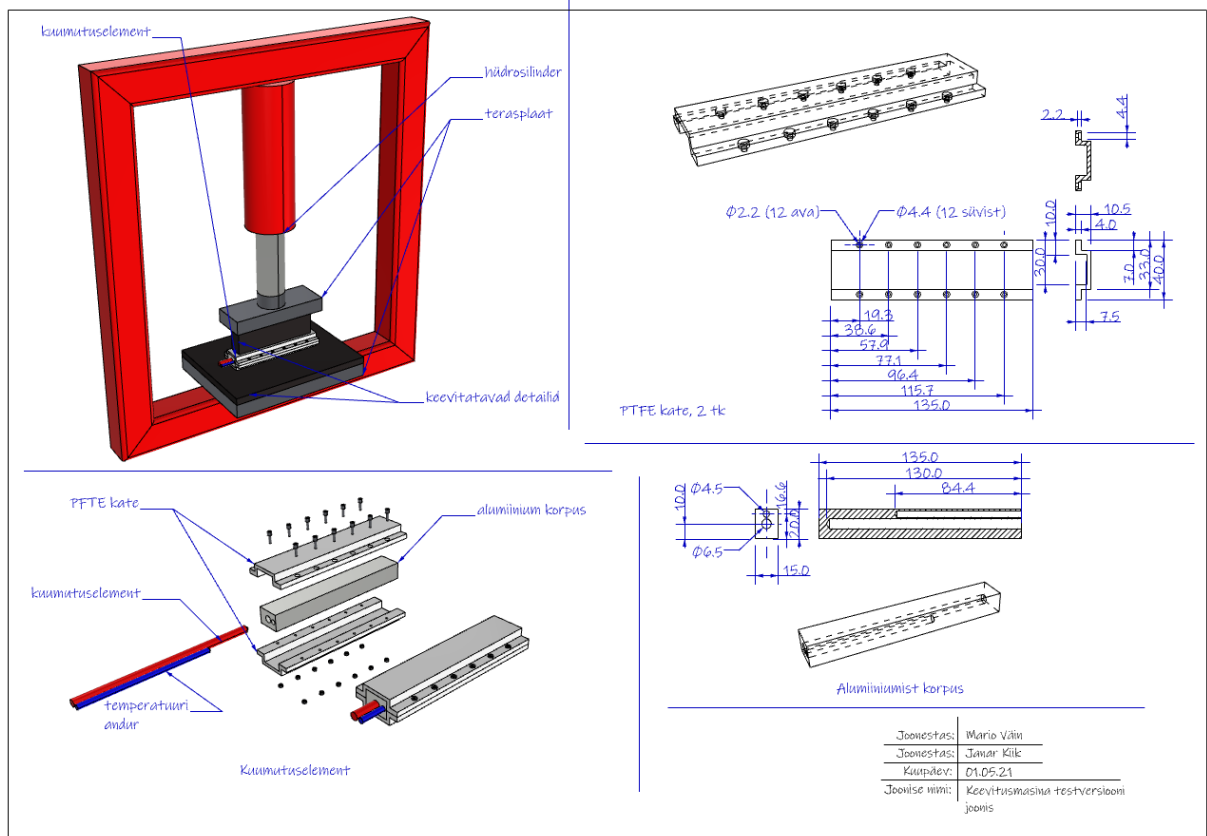
ja kahepoolselt kaetud tefloniga. Selle sisse on ehitatud elektriga kuumenev küttekeha, millega on antud tingimustes kõige kergem teostada kuuma plaadi keevitust.

Katseseadme disain kuuma plaadi kere jäigastuste keevitamiseks kuuma plaadiga keevitusseadmega:

- Protsessi parameetrid:
  - Kuuma plaadi temperatuur 160-280°C
  - Sobitamisrõhk 0,2-0,5MPa
  - Kuumutusaeg 10-60sek
  - Keevitamisrõhk 0,05-0,25MPa
- Tehnilised tingimused:
  - Kuum plaat peab taluma rõhku 0,25MPa
  - Kuum plaat peab polüetüleenile kleepimise vältimiseks olema kaetud polütetrafluoretüleeniga (Teflon™)
  - Seade võimalikult lihtne ja odav.

### 3.1.2 Lahendus

Masina katseprototüüp ehitada olemasoleva töökoja hüdraulilise lauapressi baasil. Seda saab koheselt kasutama hakata ja sellest muutub töö kvaliteet ning kiirus. Kuumutuselement valmistada alumiiniumist ja selle valmistamine on küllaltki odav ning lihtne, kuumutuskeha ja temperatuuri anduri pesad puurida alumiiniumploki võimalikult täpsed. Polütetraetüleenist pinnakate freesida ja kinnitada poltidega alumiiniumploki külge. Antud lahenduse toimimist kontrollitakse Kuressaare Ametikoolis pärast detaili valmimist. Ja kui katseprototüüp toimib, siis rakendatakse hilisemate tööde käigus, et lihtsustada tööde teostamist. Joonisel 30 on projekteeritud lahenduse protototüüp.



Joonis 30. Lahenduse prototüüp

Pärast sobiva keevitustüübi leidmise ja kuumutuselemendi disainimise põhjaplaadi jäigastute keevitamiseks ja selleks keevitusviisiks osutus kuuma plaadi keevitus.

Töö järgmine ülesanne oli leida õige materjal, millest saaks ehitada kere ülejäänud ehituseks vajalike elemente ka põhjaplaadi jäigastute keevitamiseks. Selle protsessi läbiviimiseks tehti valmis õiged katsekehad standardi järgi, erineva pinnatötlusega, erineva materjali päritoluga, nii sertifitseeritud, kui sertifitseerimata polüetüleenist. Katsekehade teostatati tõmbekatsed tõmbeteimil, lootuses leida vastus, kas materjalide servade erinev ettevalmistus ja erineva materjali valik mõjub mingil viisil keevise ja materjali tugevusele.

### 3.2 Testkehade tõmbekatsed graafiliselt ja tulemuste analüüs

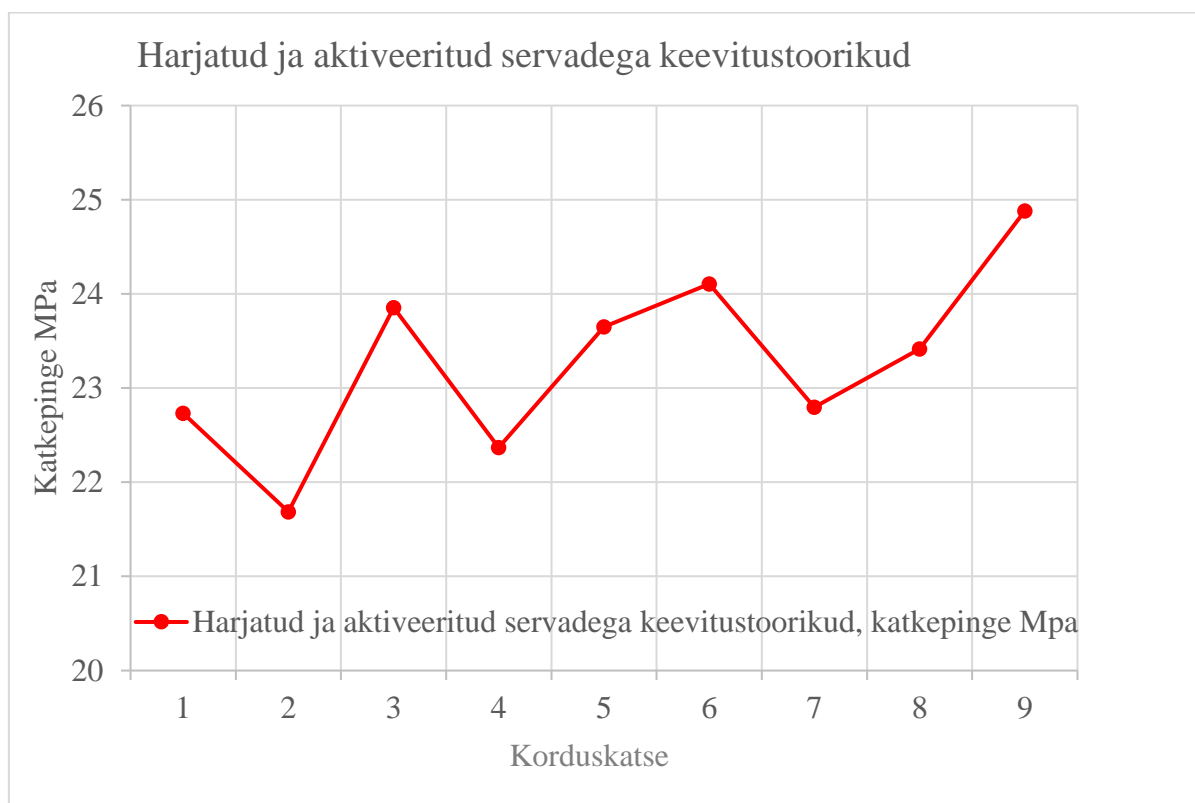
Antud tõmbekatsed teostati selleks et mõista, millist mõju avaldavad katsekehadele erinevad pinnatötlused ja erinev materjalide päritolu. Neid võrreldi üksteisega ja püüti mõista nende õigeaegse ja mitte õigeaegse purunemise põhjused. Samuti soovitakse veenduda, kas pindade

keemiline ettevalmistus ja harjamine avaldab mõju polüetüleenist keevise tugevusele. Kuidas mõjutab sertifitseeritud ja sertifitseerimata materjali valik keevise tugevust.

### 3.2.1 Keevitatava detaili serva keemilise ettevalmistusega

Katsekehad valmistati ette vastavalt reeglitele, harjati pinnas karedaks ja aktiveeriti atsetooniga. Kuna katsekehade ettevalmistus toimus vastavalt reeglitele toimusid kõik purunemised enam vähem vastavalt ootustele. Arvati, et keemiline ettevalmistus tugevdab keevist ja annab keevisele eelise võrreldes keemiliselt töötlemata ja harjamata katsekehade ees, kuid selles eksiti. Standardi järgi tuleb enne keevitusprotsessi teostamist alati pinnad nii harjata, kui ka keemiliselt ette valmistada.

Joonisel 31 on välja toodud tõmbekatsete tulemused graafiliselt.



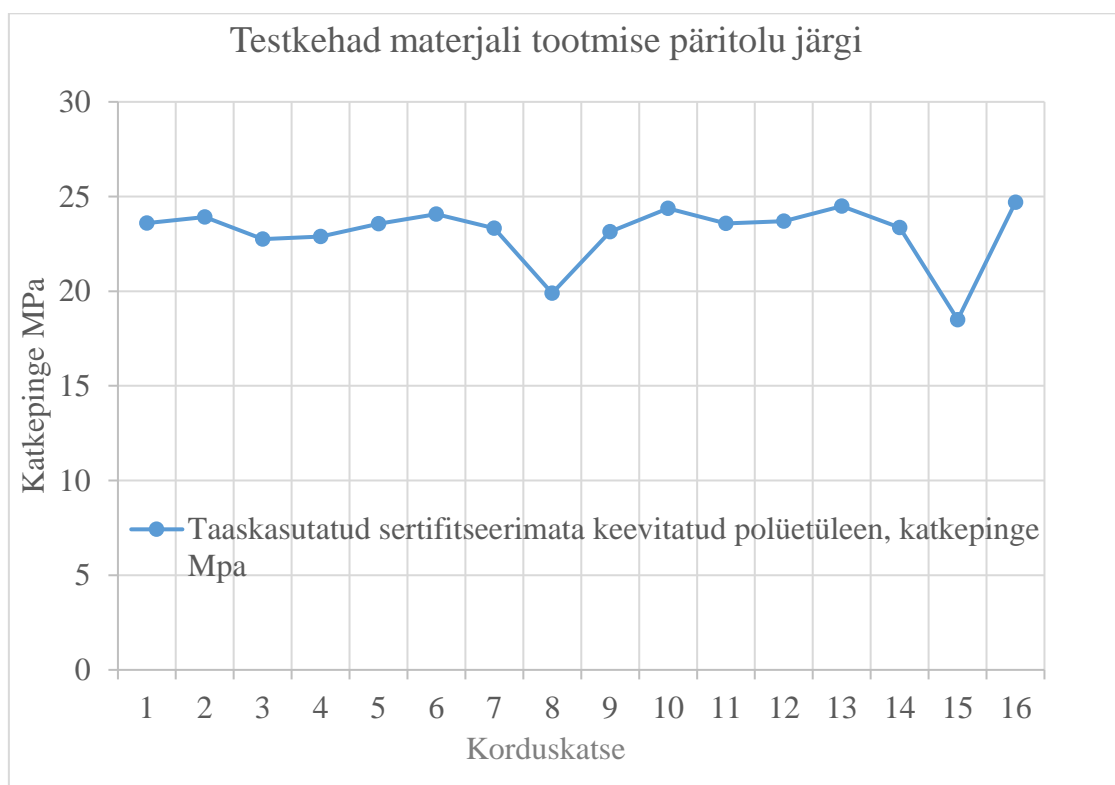
Joonis 31. Harjatud ja aktiveeritud servadega keevitustoorikute katkepinged

Vastupidiselt ootustele ei avaldanud keevitustoorikute serva ettevalmistus keevituse kvaliteedile märgatavat mõju, mis tuli katsete läbiviijatele üllatusena. Testkehadena kasutati keevitatava serva keemilise ettevalmistusega polüetüleenist valmistatud katsekehi selgitamaks, kas antud polüetüleen vastab oma tõmbetugevuselt nõuetele ning saamaks referentsväärtust ülejäänud

katsete tarvis. Antud osas oleks vaja läbi viia suuremahulisi katsekehade tõmbekatseid, erinevate tootjate polüetüleenist katsekehadega selgitamiseks välja kindla põhjuse. Antud töö maht ei võimalda sellise uurimistöö läbiviimist tänu oma piiratud ajale ja ressurssidele. Küll aga oleks antud tulemuse olemust huvitav uurida järgnevatel töodes ja suuremahulisemas formaadis.

### 3.2.2 Testkehad materjali tootmise päritolu järgi

Materjali tootmise päritolu järgi võrreldi kahte erinevat gruppi katsekehasid, ühed olid juveniilse sertifitseeritud polüetüleeni katsekehad ja teised olid sertifitseerimata polüetüleenist materjalist katsekehad. Mõlemad grupid katsekehi keevitati kokku ekskrudeerimise teel. Joonisel 32 on välja toodud tõmbekatsete tulemused graafiliselt.



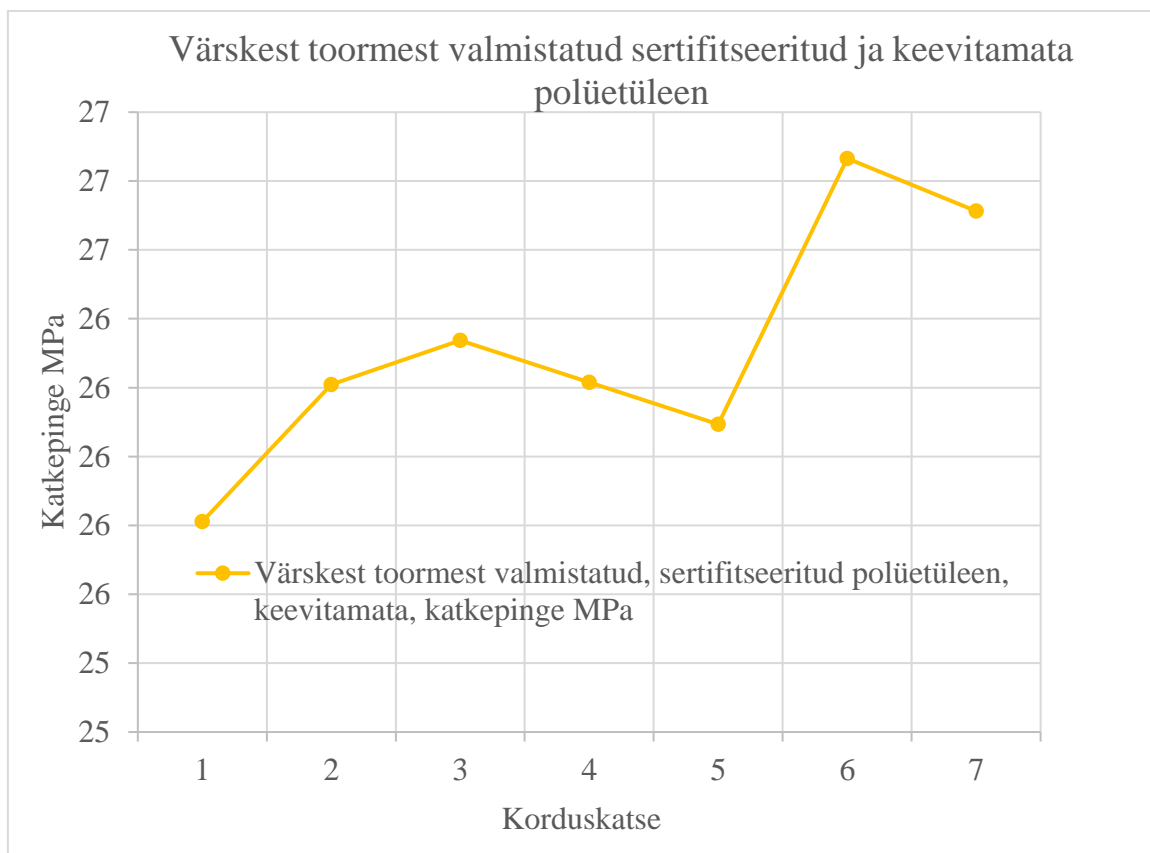
Joonis 32. Testkehad materjali tootmise päritolu järgi

Taaskasutatud sertifitseerimata keevitatud polüetüleenist purunesid kõik enam vähem samal tõmbetugevusel välja arvatud kaks katsekeha, sertifitseerimata polüetüleen ei tundu antud katses olema kehvemate mehhaaniliste parameetritega, kui seda on sertifitseeritud polüetüleeni katsekehad. Ootuspäraselt arvasid katsetegijad, et sertifitseerimata polüetüleenist katsekehad purunevad enne kui seda teevad sertifitseeritud polüetüleenist katsekehad. Täie selguse

saamiseks on aga vaja teha suuremahulised uuringud kõikide tootjate polüetüleeniga, mida antud töö formaat kahjuks ei võimalda.

### 3.2.3 Värskest toormest valmistatud sertifitseeritud ja keevitamata polüetüleen

Konkreetne värskest toorme polüetüleenist keevitatud katsekeha vastab oma tõmbetugevuselt nõutud tingimustele tingimustes toodetud polüetüleen on sama kvaliteediga sertifitseeritud tingimustes toodetud polüetüleeniga. Värskest toormest kasutatav materjal on põhiline, mida kasutatakse polüetüleenist väikelaeva ehituses, kuna taastoodetud ja sertifitseerimata materjalil võib esineda praaki. Joonisel 33 on välja toodud tõmbekatsete tulemused graafiliselt.

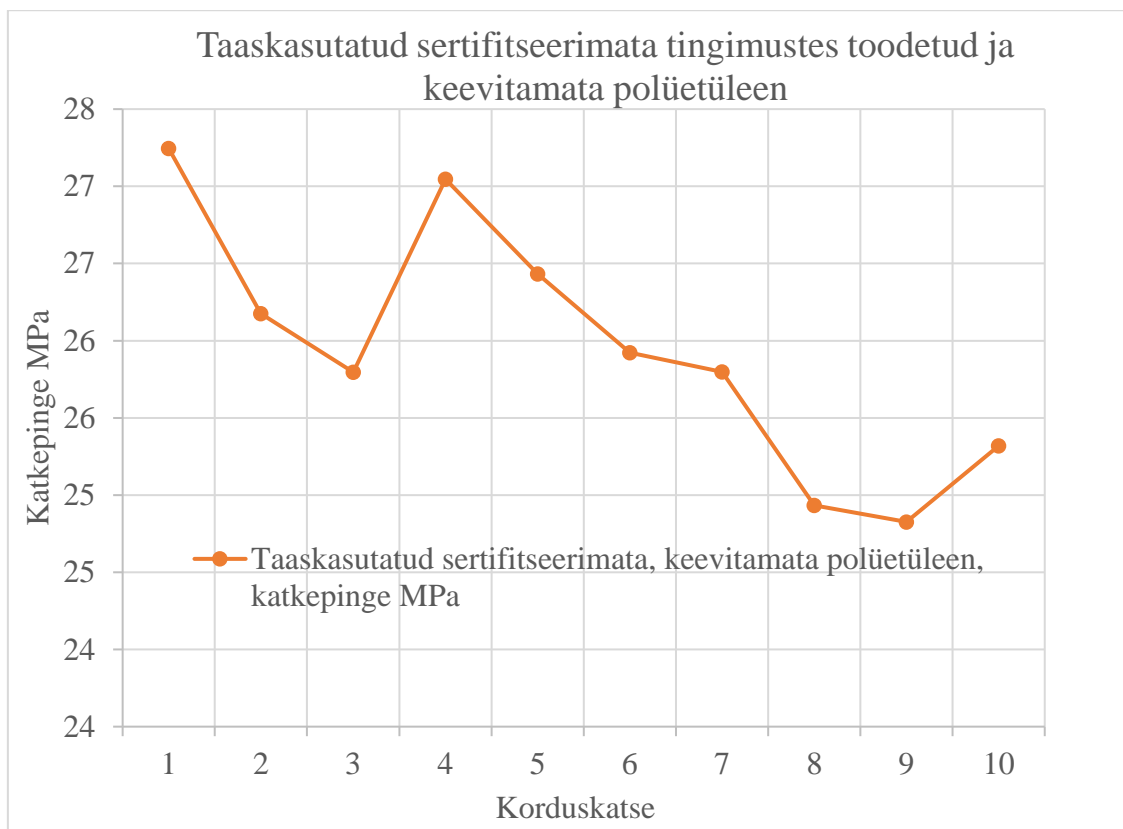


Joonis 33. Värskest toormest valmistatud sertifitseeritud ja keevitamata polüetüleeni katkepinged  
Allikas: (Lisa 2. Katsekehade tõmbekatsed)

Konkreetne värskest toormest polüetüleenist keevitamata katsekeha vastab oma tõmbetugevuselt nõutud tingimustele, kuid sellest ei saa teha järeldusi, et sertifitseerimata tingimustes toodetud polüetüleen on samaväärne sertifitseeritud tingimustes toodetud polüetüleeniga. Tegemaks laiapõhjalisi järeldusi sertifitseerimata polüetüleeni mehaanilistest omadustest peaks tegema hulgaliselt tõmbekatseid paljude tootjate polüetüleeniga.

### 3.2.4 Taaskasutatud sertifitseerimata tingimustes toodetud ja keevitamata poliütüleen

Taaskasutatud sertifitseerimata tingimustes toodetud ja keevitamata poliütüleen peaks oma olemuselt nõrgem, kui seda on sertifitseeritud poliütüleen. Taaskasutatud sertifitseerimata poliütüleeni kasutamist väikelaeva ehituses ei luba standardid. All olevast graafikust (Joonis 34) on näha, et purunemised toimuvad vastavalt katsete korraldaja ootustele.



Joonis 34. Taaskasutatud sertifitseerimata tingimustes toodetud ja keevitamata poliütüleeni katkepinged  
Allikas: (Lisa 2. Katsekehade tõmbekatsed).

Taaskasutatud, sertifitseerimata, keevitamata poliütüleeni tõmbetugevus oli 25,94MPa, mis on 0,38MPa ehk 1,4% väiksem kui juveniilsel sertifitseeritud poliütüleenil.

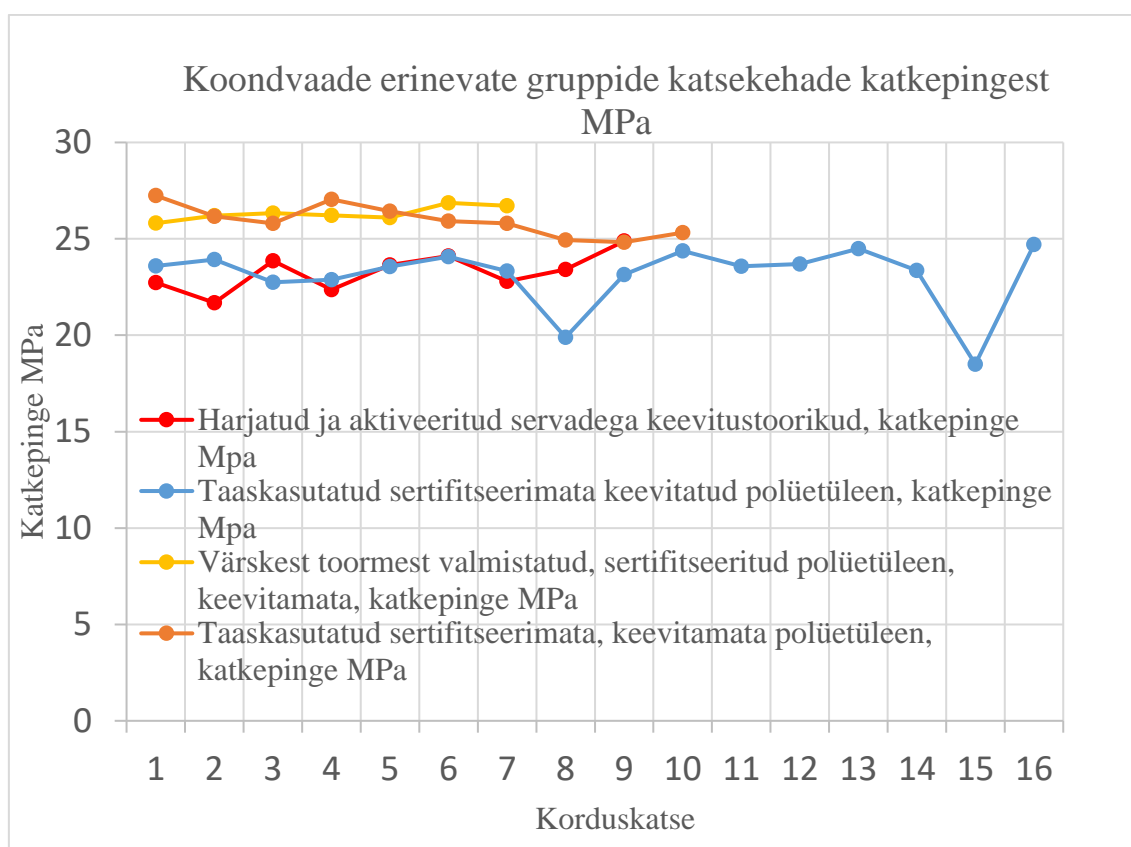
Antud sertifitseerimata poliütüleen vastab oma tõmbetugevuselt nõutud tingimustele, kuid sellest ei saa teha järeldusi, et sertifitseerimata tingimustes toodetud poliütüleen on samaväärne sertifitseeritud tingimustes toodetud poliütüleeniga.

Tegemaks laiapõhjalisi järeldusi sertifitseerimata poliütüleeni mehaanilistest omadustest peaks tegema hulgaliselt tõmbekatsed paljude tootjate poliütüleeniga.



### 3.2.5 Koondvaade erinevate gruppide katsekehade katkepingest MPa

Koondvaade graafiliselt on avaldatud Joonisel 35, millel on tõmbekatsed harjatud ja aktiveeritud servadega keevitustoorikud, taaskasutatud sertifitseerimata keevitatud polüetüleen, värskest toormest valmistatud sertifitseeritud polüetüleen keevitamata ja taaskasutatud sertifitseerimata keevitamata polüetüleen. Nagu jooniselt näha on katkemine enam vähem ühtlase tõmbepinge tagajärjel. Ainult taaskasutatud sertifitseerimata polüetüleen on kahel korral 18 MPa juures ja teisel korral 20 MPa juures.



Joonis 35. Koondvaade erinevate gruppide katsekehade katkepingest  
Allikas: (Lisa 2. Katsekehade tõmbekatsed)

### 3.2.6 Järeldused

Millegipärast ei avaldanud keevitustoorikute serva ettevalmistus keevituse kvaliteedile märgatavat mõju. Miks see on nii, saaks välja selgitada objektiivselt, kui antud osas saaks teostada suuremahulisi katsekehade tõmbekatseid. Erinevate tootjate materjalidega ja hulgaliste erinevate katsetega, nii sertifitseeritud, kui sertifitseerimata erinevate materjalidega selgitamaks paradoksi olemust ja objektiivset seletust. Kuna aeg ja ressursid on piiratud ei ole võimalik käsitletud töös suuremahulisi katseid läbi viia. Taaskasutatud, sertifitseerimata, keevitamata polüetüleeni

tõmbetugevus oli 25,94MPa, mis on 0,38MPa ehk 1,4% väiksem kui juveniilsel sertifitseeritud polüetüleenil. Antud katsetes kasutatud sertifitseerimata polüetüleen vastab oma tõmbetugevuselt nõutud tingimustele, kuid sellest ei saa teha järeldusi, et sertifitseerimata tingimustes toodetud polüetüleen on samaväärne sertifitseeritud tingimustes toodetud polüetüleeniga. Tegemaks laiapõhjalisi järeldusi sertifitseerimata polüetüleeni mehaanilistest omadustest peaks tegema hulgaliselt tõmbekatseid paljude tootjate polüetüleeniga.

Taaskasutatud, sertifitseerimata polüetüleeni keevitatud katsekehade tõmbetugevus ei erine märgatavalt juveniilsel, sertifitseeritud keevitatud polüetüleeni katsekehade tõmbetugevusest. Antud katsetes kasutatud sertifitseerimata polüetüleenist keevitatud katsekeha vastab oma tõmbetugevuselt nõutud tingimustele, kuid sellest ei saa teha järeldusi, et sertifitseerimata tingimustes toodetud polüetüleen on samaväärne sertifitseeritud tingimustes toodetud polüetüleeniga. Tegemaks laiapõhjalisi järeldusi sertifitseerimata polüetüleeni mehaanilistest omadustest peaks tegema hulgaliselt tõmbekatseid paljude tootjate polüetüleeniga. Antud katse tulemust tuleb paraku kahjuks selle tulemusena pidada subjektiivseks tulemuseks, kuna puudub võimalus teostada laiapõhiseid uuringuid, erinevate tootjate polüetüleenist materjalidega.

## Kokkuvõte

Esimeses töö osas otsiti ja leiti tehniline lahendus paadikere plaadistuse jäigastuste mehhaniseeritud keevitamiseks. Kuna ekstruuderkeevitusega oli keevituse kvaliteedi tagamine raskesti ligipääsetavatesse kohtades keevitades väga keeruline, oli vaja leida mingi teine keevitamise tüüp. Selleks, et kergendada ametikooli õpilaste ja õpetaja tööd ning tagada keevisele parim kvaliteet. Läbi meetoodilise projekteerimise avastati, et sobivaim tehnoloogia selleks oleks kuuma plaadiga keevitus. Töö käigus disainiti ka katseprototüüp kuuma plaadiga keevituse testimiseks jäigastuste kinnitamiseks paadi kere plaadistusele. Järeldati, et lihtsaim moodus on masina katseprotüüp ehitada olemasoleva töökoja hüdraulilise lauapressi baasil. Kuumutuselement valmistada alumiiniumist, milles sisse puuritud kanalitesse paigaldatakse elektriline küttekeha ja temperatuuriandur. Polüetüleenist pinnakate freesiti ja kinnitati poltidega alumiinium ploki külge. Esimene ülesande püstitus sai töös oodatud lahenduse. Pärast lahenduse leidmist tekkis vajadus välja selgitada, millise ettevalmistuse ja päritoluga materjalist hakatakse teostama edaspidiseid kereehitus töid. Otsustati hakata materjali ja keevise kvaliteeti kontrollima tõmbekatsetega.

Töö teises osas uuriti tõmbekatseid, mis teostati tõmbeteimiga Tallinna Tehnika Ülikooli ja Mereakadeemia Meremajanduse keskuse laboris, katseid oli kokku 127 tükki. Nendest uuriti antud töös 42 katset. Esimeste kastete grupis uuriti tõmbekehasid, mille pinnad olid harjatud ja ettevalmistatud ja aktiveeritud atsetooniga vastavalt reeglitele. Teises grupis olevatele kastekehadel puudus igasugune pinna ettevalmistus. Pärast tõmbekatseid, selgus kummaline tõsiasia, et antud katsete tulemused ei anna oodatud tulemust ja mõlema grupi kastekehad purunesid enam vähem sama tõmbetugevuse tagajärjel. Peab veelkord tunnistama, et saada täit selgust tuleks teha tõmbekatseid paljude erinevate tootjate materjalidega. Arvestades piiratud aega ja ressursse on hetkel teostamatu. Järgmises grupis vaadeldi taaskasutatud sertifitseerimata polüetüleeniga juveniilse sertifitseeritud polüetüleeniga. Samuti tuli tõdeda, et eelmainitud katsed oodatud tulemust ei andnud, kuna mõlemad katsekehad katkesid enam vähem sama tõmbetugevuse järel. Värskest toormest tehtud katsekehad purunesid kõik normi piires õigete tõmbenormide järgi. Sell pärast peab veelkord tõdema, selleks et saada täielikku selgust tuleks kindlasti teha tõmbekatseid erinevate tootjate ja erinevat päritolu polüetüleenist väikelaevaehitus materjaliga. Antud töös seoses piiratud aja ja ressursidega ei ole see kahjuks võimalik. Küll aga võimaldaks sama teemat palju põhjalikumalt edasi uurida ja arendada suure mahulisemate katsete läbiviimisel. Nii saades olukorrast veel selgema pildi ja arusaama. Selline lähenemine võimaldaks juba välja tulla kindlamate ja tõenduspõhisemate väidete ja faktidega antud teema kohta.

## Võõrkeelne lühikokkuvõte

The aim of this work is at first was to find a technical solution for mechanized welding of hull plating stiffeners, because extruded welding was very difficult to ensure welding quality in hard-to-reach places, it was necessary to find another type of welding to facilitate vocational students and teachers and ensure good weld quality. Through methodological design, it was found that the most suitable technology for this would be hot plate welding. In the course of the work, a test prototype was also designed to test hot plate welding to attach stiffeners to the boat hull plating.

It was concluded that the simplest way is to build a test prototype of the machine on the basis of an existing workshop hydraulic bench press. The heating element is made of aluminum, in which an electric heater temperature sensor is installed in the drilled ducts. Mill the polyethylene coating and bolt it to the aluminum block.

In the second part of the work, tensile tests were performed, which were performed with a tensile test in the laboratory of the Tallinn University of Technology and the Maritime Management Center of the Maritime Academy, a total of 127 tests were performed, of which 42 tests were studied. In the first group of dressings, tensile bodies with brushed and prepared surfaces, i.e. activated with acetone according to the rules, were studied. The irrigators in the second group did not have any surface preparation. After the tensile tests, it was revealed that it was strange that these tests did not give the expected result and that the dipsticks in both groups broke less as a result of the same tensile strength. Of course, in order to obtain full clarity, tensile tests should be performed on materials from many different manufacturers, which is currently not possible given the limited time and resources. The next group looked at recycled certified polyethylene with juvenile certified polyethylene. It should also be noted that this test did not give the expected result, as both test pieces were more or less broken after the same tensile strength. Again, in order to obtain complete clarity, tensile tests should be carried out on polyethylene material from different manufacturers. Unfortunately, this is not possible in this work due to limited time and resources. The test specimens made from fresh raw materials all broke within the normal range according to the correct tensile standards.

## Viidatud allikad

- [1] The Freedonia Group, „Reliable and unbiased industry market research,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.freedoniagroup.com/industry-category/plas/plastics-other-polymers.htm>.
- [2] „Omnexus The Material Selection Platform,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-plastic>.
- [3] „Matmatch,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://matmatch.com/learn/material/ldpe-vs-hdpe>.
- [4] „<https://matmatch.com/learn/material/ldpe-vs-hdpe>,“ 2021.
- [5] „iTeH, Inc,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4b83791e-9010-4c13-9ec2-4bccf5d0f34a/sis-iso-1872-1-1994>.
- [6] „<https://www.indiamart.com>,“ 2021.
- [7] „<https://kashimabearings.com/material/uhmw>,“ 2021.
- [8] „<https://esemag.com/>,“ 2021.
- [9] „<https://www.jmeagle.com/>,“ 2021.
- [10] „<https://www.archiproducts.com/>,“ 2021.
- [11] „Safe seas, safe shores,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.shmgroup.com/blog/exploring-hull-material-used-modern-ship-design/>.
- [12] „Sodiummedia.com,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://et.sodiummedia.com/4295835-black-box-model-block-diagram>.
- [13] „ГОСТ Р 56155-2014 Сварка термопластов,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://plastinfo.ru/content/file/gosts/59d2000017c6.pdf>.
- [14] „TWI,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge>.
- [15] „Toray Innovation by Chemistry,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.toray.jp/plastics/en/torelina/technical/tec\\_026.html](https://www.toray.jp/plastics/en/torelina/technical/tec_026.html).
- [16] „Microstructure and mechanical properties of the butt joint in high density polyethylene pipe,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/ijps/2016/6483295/>.
- [17] M. Troughton, Handbook of Plastics Joining.

- [18] „Vibration welding of high density polyethylene HDPE - Purpose, application, welding technology and quality of joints“.
- [19] Priit Kulu, Jakob Kübarsepp, Andres Laansoo, Renno Veinthal, MATERJALITEHNIKA II Konstruktsioonimaterjalide tehnoloogia.
- [20] EVS-EN 13705:2004, „Welding of thermoplastics - Machines and equipment for hot gas welding (including extrusion welding)“.
- [21] CEN/TS 16892:2015, „Plastics - Welding of thermoplastics - Specification of welding procedures“.
- [22] EVS-EN 13067:2020, „Plastics welding personnel - Qualification of welders - Thermoplastics welded assemblies“.
- [23] CEN/TR 16862:2015, „Plastics welding supervisor - Task, responsibilities, knowledge, skills and competence“.
- [24] EVS-EN 14728:2019, „Imperfections in thermoplastic welds - Classification“.
- [25] EVS-EN 13100-1:2017, „Non destructive testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 1: Visual examination“.
- [26] EVS-EN 12814-1:2000, „Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 1: Bend test“.
- [27] EVS-EN 12814-2:2000, „Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 2: Tensile test“.
- [28] EVS-EN 12814-4:2018/AC:2018, „Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 4: Peel test“.
- [29] EVS-EN 12573-1:2001, „Welded static non-pressurised thermoplastic tanks - Part 1: General principles“.
- [30] EVS-EN 12573-3:2000, „Welded static non-pressurised thermoplastic tanks - Part 3: Design and calculation for single skin rectangular tanks“.
- [31] EVS-EN 1778:2000, „Characteristic values for welded thermoplastic constructions - Determination of allowable stresses and moduli for design of thermoplastic equipment“.

## Lisa 1. Polüetüleenide enamlevinud margid

### PE-1000

PE-1000 on ultrakõrge molekulmassiga polüetüleen, keskmine molekulmass on 90000000g/mol.

PE-1000 väga hea kulumiskindlusega.

Kasutatakse liugpukside valmistamiseks

Tabel 12. PE-1000 omadused

Tihedus	g/cm <sup>3</sup>	0,93
Tõmbeelastsusmoodul	MPa	800
Kuulkõvadus	MPa	40
Lubatud töötemperatuur	°C	-260..80
Läbilöögipinge	KV/mm	44

Allikas: (<http://proplastik.ee/>)

### PE-500

PE 500 on kõrgtihe polüetüleen, millel keskmine molekul mass kuni 500 000 g/mol. PE-500 on hästi keevitav. PE-500 on kulumiskindel, heade libisemisomadustega.

Tabel 13. PE-500 omadused

Tihedus	g/cm <sup>3</sup>	0,95
Tõmbeelastsusmoodul	MPa	800
Kuulkõvadus	MPa	40
Lubatud töötemperatuur	°C	-50..80
Läbilöögipinge	KV/mm	47

Allikas: (<http://proplastik.ee/>)

### HDPE; PE-HD

HDPE on UV- stabiliseeritud välitingimustes kasutamiseks. Hästi termovormitav ja keevitav.

Kasutatakse konteinerite valmistamiseks, aparaadiehituses ja kanalisatsioonimahutiteks.

Tabel 14. HDPE, PE-HD omadused

Tihedus	g/cm <sup>3</sup>	0,95
Tõmbeelastsusmoodul	MPa	800
Kuulkõvadus	MPa	40
Lubatud töötemperatuur	°C	-50..80
Läbilöögipinge	KV/mm	47

Allikas: (<http://proplastik.ee/>)

## PE-HWST

Füsioloogiliselt aktsepteeritav. Põhiliselt kasutatakse toiduainetööstuses.

Tabel 15. PE-HWST omadused

Tihedus	g/cm <sup>3</sup>	0,95
Tõmbeelastsusmoodul	MPa	800
Kuulkõvadus	MPa	43
Lubatud töötemperatuur	°C	-50..80
Läbilöögipinge	KV/mm	50

Allikas: (<http://proplastik.ee/>)

## PE-1000R

PE 1000 R on regenereeritud ülikõrge molekulmassiga kõrgtihe polüetüleen, millel keskmine molekulmass kuni 9000000 g/mol. Võrrelduna PE 500-ga on antud tootel paremad löögisitkuse näitajad ning ka suurem kulumiskindlus. Kasutatakse põhiliselt konveieritel liugpindadeks.

Tabel 16. PE-1000R omadused

Tihedus	g/cm <sup>3</sup>	0,93
Tõmbeelastsusmoodul	N/mm <sup>2</sup>	600
Kuulkõvadus	N/mm <sup>2</sup>	38
Lubatud töötemperatuur	°C	-150..80
Kulumiskindlus	sand-slurry	80
Läbilöögipinge	KV/mm	45

Allikas: (<http://proplastik.ee/>)



## Lisa 2. Katsekehade tõmbekatsed

Tabel 17. Katsekehade tõmbekatsed

katsekeha ID	Katse nr	A (mm)	B (mm)	Katkepinge N	Purunemine liitest (0 vale, 1 tõene)	Tõmbetugevus Mpa
12.1	86	20,1	11,6	5300	0	22,73
12.2	87	20,2	11,3	4950	1	21,69
12.3	88	20,2	11,0	5300	1	23,85
12.4	89	20,0	11,4	5100	1	22,37
12.5	90	20,0	11,1	5250	1	23,65
12.6	91	19,6	10,9	5150	1	24,11
12.7	92	20,2	11,4	5250	0	22,80
12.8	93	20,2	11,1	5250	0	23,41
12.9	94	19,8	10,2	5025	1	24,88
14.1	95	19,7	11,4	5300	0	23,60
14.2	96	19,8	11,4	5400	0	23,92
14.3	97	19,9	11,6	5250	0	22,74
14.4	98	19,8	11,7	5300	0	22,88
14.5	99	19,7	11,2	5200	0	23,57
14.6	100	20,0	10,8	5200	1	24,07
14.7	101	19,7	11,1	5100	1	23,32
14.8	102	19,7	11,1	4350	1	19,89
14.9	103	19,9	11,4	5250	0	23,14
14-11-1	104	20,7	10,8	5450	0	24,38
14-11-2	105	21,2	11,1	5550	0	23,58
14-11-3	106	21,1	11,0	5500	0	23,70
14-11-4	107	20,6	10,8	5450	0	24,50
14-11-5	108	20,6	10,7	5150	1	23,36
14-11-6	109	20,4	10,6	4000	1	18,50
14-11-7	110	20,8	10,9	5600	0	24,70
15	111	20,5	10,3	5450	0	25,81
15	112	20,4	10,1	5400	0	26,21
15	113	20,3	10,1	5400	0	26,34
15	114	20,3	10,1	5375	0	26,22
15	115	20,3	10,1	5350	0	26,09
15	116	20,1	10,0	5400	0	26,87
15	117	20,2	10,1	5450	0	26,71
16	118	20,1	10,5	5750	0	27,24
16	119	20,6	10,2	5500	0	26,18
16	120	20,7	10,3	5500	0	25,80
16	121	20,3	10,2	5600	0	27,05
16	122	20,4	10,2	5500	0	26,43
16	123	20,6	10,3	5500	0	25,92
16	124	20,5	10,4	5500	0	25,80

16	125	21,0	10,6	5550	0	24,93
16	126	20,9	10,6	5500	0	24,83
16	127	20,5	10,5	5450	0	25,32

## Lisa 3. Lihtlitsents

rektori 07.04.2020 käskkirjale nr 1-8/17

### **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Mario Väin

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Sobiva metodika leidmine ja arendamine poliütüleenist paadi kere jäigastute keevitamiseks,

mille juhendaja on Vahur Veelaid,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

24.05.2021 (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.