



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
EESTI MEREAKADEEMIA
Keskuse nimetus

Janar Kiik

**POLÜETÜLEENI KEEVISLIIDETE MEHAANILISTE
OMADUSTE UURIMINE EKSTRUUDERKEEVITAMISEL**

Lõputöö

Juhendaja: Vahur Veelaid

Kaasjuhendaja: professor Mihkel Kõrgesaar

Kuressaare 2021

Olen koostanud töö iseseisvalt.

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

Janar Kiik

/allkirjastatud digitaalselt/

(allkiri, kuupäev)

Üliõpilase kood: 178759SDSR

Üliõpilase e-posti aadress: janar.kiik@gmail.com

Juhendaja Vahur Veelaid:

Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele

/allkirjastatud digitaalselt/

(allkiri, kuupäev)

Kaasjuhendaja professor Mihkel Kõrgesaar:

Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele

.....

(allkiri, kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: professor Mihkel Kõrgesaar

Lubatud kaitsmisele

.....

(ametikoht, nimi, allkiri, kuupäev)

Sisukord

Annotatsioon.....	4
Sissejuhatus	5
1 Teoreetiline osa.....	7
1.1 Polüetüleenis iseloomustus ja kasutamine paadiehituses	7
1.1.1 Polüetüleenpaatide ehitajad maailmas	9
1.2 Ekstruuderkeevituse olemus	11
1.3 Tehnilised nõuded ekstruuderkeevitamisel	16
1.3.1 Polüetüleentoodete disainimist, tootmist ja testimist reguleerivad standardid	17
1.4 Hüpooteeside püstitamine	18
2 Metoodiline osa.....	20
2.1 Katsete meetodika valik.....	20
2.2 Tõmbekatsed.....	24
3 Tulemuste analüüs.....	28
3.1 Katsegruppide tulemused ja järeldused.....	29
3.1.1 Nominaalsete parameetritega keevitatud sertifitseeritud polüetüleen	29
3.1.2 Nominaalsetest parameetritest erineva gaasi temperatuuriga liited	30
3.1.3 Nominaalsetest parameetritest erineva ekstruuder temperatuuriga liited	32
3.1.4 Madala keevitustöökoja temperatuuriga liited	34
3.1.5 Erineva serva ette valmistusega liited.....	35
3.1.6 Taaskasutatud sertifitseerimata keevitamata polüetüleen	38
Kokkuvõte	40
Võõrkeelne lühikokkuvõte - Short summary in English.....	42
Viidatud allikad	44
Lisa 1. Polüetüleenis enamlevinud margid.....	47
Lisa 2. Katsekehade tõmbekatsete tabel.....	49
Lisa 3. Tõmbekatsete koondülevaade graafiliselt.....	52
Lisa 4. Lihtlitsents.....	53

Annotatsioon

Käesolev lõputöö on keskendunud polüetüleen keevisliidete mehaaniliste omaduste uurimisele. Ekstruuderkeevitus on praegusel ajal peamine viis polüetüleenpaatide valmistamisel. Tegemist on kasvava trendiga. Viimasel ajal on paraku hakanud ilmema kvaliteedi langust paadikere keevisliite kohtades. Kuna veesõidukitele on esitatud ohutusest tulenevalt kõrgendatud nõudmised, siis oli vajalik probleem üle vaadata. Otsiti selgitust, millest kvaliteedivead võivad tekkida ja kuidas neid ennetada. Selle tarbeks uuriti, mis materjal on polüetüleen ja kuidas sellest ekstruuderkeevitamise teel tooteid valmistatakse. Paremaks probleemi uurimiseks loodi testkehade katsegrupid, kus üks haaval viidi parameetreid sihilikult ettenähtust kõrvale. Vastavalt sellele valmistati katsekehad, mida asuti tõmbekatsedega analüüsima. Selle käigus selgus, millist mõju avaldab ühe või teise parameetri rikkumine keevisliite tugevusele. Veenduti, et läbi eriala kirjanduse etteantud nominaalsed parameetrid on õigustatud ja neid on kvaliteedi seisukohast oluline järgida. Lisaks selgus asjaolu, et pärast polüetüleen keevitust ei ole materjali tõmbetugevus enam sama, mis enne keevitust. Sellegipoolest on tegu väga hea materjaliga, mida paadiehituses kasutada.

Võtmesõnad: HDPE, polüetüleen, polüetüleenpaat, ekstruuderkeevitus, katsekehad, tõmbekatsed, tõmbetugevus, graafikud

Sissejuhatus

Viimasel kümnel aastal on maailmas tekkinud ekstruuderkeevitamise teel polüetüleenist tööpaatide tootmise trend, mis viimasel paaril aastal on levinud ka Eestisse. Esimesena hakkasid antud meetodil paate tootma Hollandi, Norra ja Taani paaditootjad. Eestis on sellega algust teinud Kuressaare Ametikool, kus on aastast 2019 tegeletud polüetüleenist tööpaatide ehitamise eriala arendamisega ja selle aja jooksul on valminud kolm paadimudelit.

Ekstruuderkeevituse teel toimub polüetüleenist paadi ehitus sarnaselt metallpaadi ehitusele. Paat ehitatakse staaplistse, plaadistuse ja jäigastuselementide lisamise ja keevitamise teel. Sellest tulenevalt on paadi mudelivalik lihtsa vaevaga modifitseeritav ning võimalik on ka teha kliendile paadiehitust rätseptööna.

Keevitamise teel valmistatakse paate pikkusega enamasti kuni kümme meetrit, aga on näiteid ka pikematest alustest. Oma olemuselt on ekstruuderkeevitus lihtne ja kergesti õpitav protsess, kuid probleemiks on saanud keevitusparameetrite rikkumisest ja materjali ebaõigest valikust tulenevad kvaliteedivead, mis halvimal juhul avalduvad alles eksploatatsiooni käigus.

Polüetüleeni keevitamine on iseenesest lihtne. Keevitamine toimub spetsiaalse seadme – keevitusekstruuderiga abil, mis ühelt poolt kuumutab keevitatavate toorikute servad etteantud polüetüleeni sulamistemperatuurini ning teisalt surub keevitustsooni sula polüetüleeni ning hoiab viimast teatud aja surve alla. Kvaliteetseks keevituseks on tarvis järgida keevitusgaasi ja keevitusekstruuderiga temperatuuri ning keevitatavate detailide servade kvaliteeti.

Mõningate tingimuste rikkumine ei too tingimata kaasa keevituse visuaalset muutust. Keevitusprotsessi kvaliteedi järgimine ainuüksi keevise visuaalse vaatluse teel on aga paraku võimatu. Visuaalselt ilus ja kvaliteetne keevis võib olla tehtud kasutades ebaõigeid keevitusparameetreid ning ette valmistamata servadega liide. Seega võib olla keevitus, mis on teostatud täiesti nõuetele vastamata, välja nägemiselt täiesti kvaliteetne. Kuna veesõiduki konstruktsioonile oma eksploatatsioonist tulenevalt esitatakse kõrgendatud kvaliteedinõudeid, on kvaliteedivigade vältimine ja avastamine eluliselt tähtis ülesanne.

Antud lõputöö eesmärgiks on selgitada keevitusparameetrite, keevitatavate detailide serva ettevalmistamise ja keevituskeskkonna mõju keevise kvaliteedile. Üritatakse leida vastused

küsimustele, kuivõrd drastilisi muutusi keevituse kvaliteedis ehk siis keevise mehaanilistes omadustes toob kaasa ühe või teise keevitusparameetri rikkumine.

Töö läbiviimiseks uuritakse, mis materjal on polüetüleen ja millised on tema omadused. Vaadatakse, kus kõnealust materjali kasutatakse ja milline on tema ajalugu veesõidukite suhtes. Selgitatakse, millised on polüetüleenpaadi eelised võrreldes alternatiivsete materjalidega. Uuritakse, milline on ekstruuderkeevituse masinlik ehitus ja tööpõhimõte. Vaadatakse üle, milliseid nõudeid tuleb järgida, et keevitamise teel kvaliteetsete liidetega tooteid saada ja selgitatakse, millised on ohud, kui neid ei täideta. Ehitatakse üles lähtudes standartidest katsemetoodika ja uuritakse läbi eriala kirjanduse välja, millised on nominaalsed tingimused polüetüleeni ekstruuderkeevitamiseks. Püstitatakse hüpoteesid, milles eeldatakse, et nominaalsed parameetrid ja etapid ekstruuderkeevitamisel parimad valikud kvaliteetse keevisliite saamiseks. Valmistakse ekstruuderkeevitamise teel erinevates tingimustes polüetüleenist testkehad, millede tõmbetugevusi hakatakse tõmbekatssetega määrama ja graafikutel vastu hüpoteese analüüsima.

1 Teoreetiline osa

Antud lõputöös esmalt tutvutakse, mis materjal on polüetüleen, millised on tema omadused ja kus seda kasutatakse. Vaadatakse üle, milline on tema ajalugu veesõidukite suhtes ja kust see on alguse saanud. Selgitatakse, millised on polüetüleenpaadi eelised võrreldes alternatiivsete materjalidega. Tuuakse välja tuntumad polüetüleenist paatide tootjad ja vaadatakse üle, kuhu on kohalikud ettevõtmised selles vallas jõudnud. Tehakse tutvust tänaseks päevaks kõige populaarsema polüetüleenist paatide tootmisviisiga, milleks on ekstruuderkeevitus. Uuritakse, milline on ekstruuderkeevituse masinlik ehitus ja tööpõhimõte. Vaadatakse üle, milliseid nõudeid tuleb järgida, et keevitamise teel kvaliteetsete liidetega tooteid saada ja selgitatakse, millised on ohud, kui neid ei täideta. Tehakse tutvust standartidega, mis reguleerivad polüetüleentoodete disainimist, tootmist ja testimist. Püstitatakse hüpoteesid tuginedes valdkonna teooriale ja uuringutele, mida erinevaid andmematerjale läbi töötades leiti.

1.1 Polüetüleeni iseloomustus ja kasutamine paadiehituses

Polüetüleen on väga levinud plastmaterjal, mida kasutatakse laialdaselt masinaehituses, pakkematerjalide ja -vahendite tootmises, veetorstike ehituses, tööstuslike torutrasside ehituses, keemiatööstuses reaktsioonivannide ehitusel ja geomembraanide valmistamisel. Igal aastal toodetakse orienteeruvalt 100 miljonit tonni polüetüleeni, mis on ligikaudu 1/3 kogu plasti tootmismahust [1].

Polüetüleeni leiutasid Reginald Gibson ja Eric Fawcett (Imperial Chemical Industries, UK) 1933. a. Polüetüleen saadakse lähtemonomeeri etüleeni katalüütilisel polümeriseerimisel [2]. Polüetüleene on eri liike. Polüetüleeni üldine valem on $(\text{CH}_2\text{H}_4)_n$ [3]. Polüetüleen on segu etüleeni erinevate ahelapikkustega polümeeridest. Suures plaanis võib polüetüleeni jagada madala tihedusega polüetüleeniks (LDPE), keskmise tihedusega polüetüleeniks (MDPE), kõrgtihedaks polüetüleeniks (HDPE) ultra suure molekulmassiga polüetüleeniks (UHMWPE) ja eelpoolmainitud sortide ristseotud vormideks (XLPE). Lisas 1 Tabelites 2 – 6 on välja toodud polüetüleeni enamlevinud margid.

Üha laialdasemalt leiab polüetüleen kasutamist paadiehituses. Esmalt hakati polüetüleenist valmistama rotatsioonivalu meetodil veespordi vahendeid, nagu kajakid, kanuud, väiksemad sõudepaadid ja SUP-i lauad [4]. Ligikaudu kümme aastat tagasi hakati polüetüleenist paate

ehitama ka ekstruuderkeevitamise teel. Valminud paadid olid ülimalt vastupidavad ja merekindlad, mistõttu leidsid need kasutamist tööpaatidena ekstreemsetes tingimustes.

Polüetüleenist keevitatud paadi eelised [5]:

- Väga hea ujuvus – paadi ehituseks kasutatav materjal on veest kergem. HDPE ehk kõrgtiheda polüetüleeni tihedus on vahemikus 930 kuni 970 kg/m³. Seega on polüetüleenist alus veest kergem ning tänu sellele ka uppumatu.
- HDPE on sada protsenti korrosioonikindel. Kuna polüetüleen on keemiliselt väga stabiilne, siis ei ole HDPE paadi kere tundlik korrosioonile. Seega puudub ka vajadus kere hooldada ja paigaldada korrosiooni vähendavaid protektoreid.
- Merefauna ei suuda kinnituda polüetüleenpinnale, seega puudub vajadus mürkvärvide ja paadi kere iga-aastase hoolduse järele. HDPE paat säilitab oma kiirusomadused terve hooaja jooksul, pole karta, et põhjale kinnitunud merikasvust väheneb paadi kiirus või suureneb kütusekulu. Väheneb ka merereostus, kuna puudub vajadus mürkvärvide järele.
- Polüetüleen on keemiliselt väga stabiilne ja seetõttu ei kahjusta kemikaalid paadikere. See teeb materjali väga heaks ja puudub vajadus keemia tõrjet teha aluste ehitamisel.
- Väga hea löögisitkus – pole vaja karta teravaid kive. Kuna polüetüleen on ülimalt sitke ei ole vaja karta paadi kere purunemist sõites vastu teravaid kive või muid veealuseid objekte. See teeb paadi väga turvaliseks kivises rannikuvees.
- Must HDPE on tänu lisatud süsinikule UV (ultravioletti kiirguse) kindel ja seega ei muutu päikese käes rabedaks.
- Tootmise paindlikkus. Ekstruuderkeevituse teel toimub polüetüleenist paadi eitus analoogselt metallpaadi ehitusele. Paat ehitatakse staaplisse, plaadistuse ja jäigastuselementide lisamise ja keevitamise teel. Sellest tulenevalt on paadi mudelivalik lihtsa vaevaga modifitseeritav ning on võimalik kliendile teha meelepärane paat rätsepatööna.
- Lihtne parandada. Polüetüleeni keevitamine on lihtsasti õpitav ning ka keevitusseadmed ei ole kallid. See teeb paadi parandamise ja modifitseerimise lihtsaks ning teostatavaks ka paadiomaniku enese poolt.
- Väike süsiniku emissioon. Polüetüleeni tootmise süsiniku emissioon on viis korda väiksem kui alumiiniumil ja kordades väiksem kui terasel.

- Polüetüleen on sada protsenti taaskasutatav. Peale ekspluatatsioonija lõppu saab polüetüleeni ümber sulatada ja kasutada uute toodete valmistamiseks. Siinpuhul avaldub eelis eriti komposiitmaterjalist toodete (paatide) ees, kuna oma aja ära elanud komposiitmaterjalist toodetele ei ole seni leitud mõistlikku ja majanduslikult tasuvat taaskasutust ega ka hävitamist.
- Head ballistilised omadused. Polüetüleeni leht on võrdlemisi vastupidav tulirelvast laskmisele. Tavalise jahipüssiga lastud haavilaeng ei suuda läbida 12mm polüetüleenlehte. Vintrelvast lastud kuul läbib küll polüetüleeni, kuid laskeava tõmbub peale kuuli läbimist mõnevõrra kokku ja seega ei tekita suurt leket läbi poordi, võrrelduna näiteks komposiit või metall-laevaga. Kevlariga armeeritud polüetüleen on kuulikindel materjal.
- Väike radari jälg, kuna polüetüleen peegeldab halvasti radarikiiri. Seega saab paate kasutada sõjalistes- ja politseioperatsioonides.

1.1.1 Polüetüleenpaatide ehitajad maailmas

Tideman Boats BV Hollandis asuv HDPE paatide valmistaja. Nende asutajaks võib lugeda Bruno Joannes Tidemani (1834 – 1883), kes oli modernse laevaehituse looja Hollandis. Oma innovaatiliste ideede eest laevaehituses sai ta ka kuningliku aumärgi. 2006 aastal lõi Bruno Joannes Tidemani järeltulija Bruno Tideman ettevõtte Tideman Boats BV. Nende paadid leiavad merenduses laia kasutamist. Alates 2006. aastast on paljud organisatsioonid kasutanud Tidemani paate oma mere-, avamere- või sõjaliste jõudluste parandamiseks. Bruno Tideman alustas ettevõtet, kui leidis ja ehitas ideaalse kiire tööpaadi rasketes oludes, milleks oli hävimatult Tidemani RBB – jäik ujvuspaat. Eluiga palju pikem kui tavalistel tööpaatidel. Väga madala süsinikdioksiidi jalajäljega ning 100% taaskasutatav. Nende polüetüleenpaadid on uppumatud. Tideman Boats on üks juhtivaid HDPE tööpaatide ehitamise ettevõtteid maailmas [5].

DutchWorkboats BV Hollandis asuv HDPE paatide valmistaja. Nad ehitavad tööpaate professionaalsetele kasutajatele üle kogu maailma. Alates Hollandi süvendajatest Prantsuse mereinsenerideni, Kaug-Ida piiripatrullini. Nad on spetsialiseerunud uuringupaatidele, meeskonnaveo ja tugipaatidele [6].

Rhino Marine Products (Pty) Ltd. Lõuna-Aafrika Vabariigi HDPE paatide tootja. Kaplinnas asuv ettevõtte toodab polüetüleenpaate tavaliste RIB-paatide, alumiinium- ja klaasist tugevdatud

plastkeregaga tööpaatide vastupidavamana asendajana alates 2003. aastast. Rhino Craft'i kered on valmistatud kõrgtihedast polüetüleenist ning on kavandatud, arendatud ja testitud tugevate ja praktiliselt hävimatute tööpaatide loomiseks kasutamiseks nii päramootoritel kui ka parda- või paiskurmootoritel. Viimase 11 aasta jooksul on nende paadikered tõestanud end karmides avamere tingimustes. Nende paatides kasutatakse 15 mm paksuste seintega polüetüleenitorusid, mis on täidetud vahtpolüstürooliga, et muuta veesõidukid praktiliselt uppumatuks [7].

Arctic Boats OY on Arctic Airboats Oy Ltd kaubamärk. Tegemist on Soome ettevõttega, mis alustas polüetüleenist ja alumiiniumist paatide tootmist aastal 2007. Nad avastasid, et polüetüleenist valmistatud paadid on piisavalt tugevad, et töötada jääl, purustatud jääl, lumes ja vees. Seetõttu nad keskendusid oma toodanguga erihalduspiirkondadele, rannavalvele ja sõjaväele. Nad on ehitanud otsingu- ja päästepaate Soome, Saksamaale, Rootsi ja Kreekasse. Lisaks sellele on nad teinud ka Eestisse patrullpaate [8].

TS Marine on Eesti polüetüleenkonstruktsioonide ja väikeste polüetüleenpaatide tootja. TS Marine on kaasaegne innovaatiline ettevõtte, mis pakub tehnilisi lahendusi plasttoodete tootmisel. Ettevõtte nimi kajastab selle üldist tegevust: TS Marine tähendab tehnilisi lahendusi meretööstusele, kuid nende teenuseid saab kasutada ka muudes valdkondades. Nende põhitegevuseks on happe mahutid, mageveepaagid, kütusepaagid, erinevad kaitsekarbid (pumbakastid, akukarbid, elektrikappide kastid), torude paigaldamised ja süsteemid, pontoonid ja nendega seonduvad tooted. Nende toodang ei reosta keskkonda, kuna plastijääke kogutakse ja taaskasutatakse [9].

DGS DEFENSE on maailma kõige arenenum hübriid termoplastiliste paatide disaini pioneer ja insener, kes on pühendatud sõjaväe- ja erilaevade ehitamisele. Tulemus on ainulaadne ja see on välja töötatud vastavalt iga kliendi konkreetsetele operatiivsetele ja logistilistele vajadustele. Rohkem kui 12-aastase rahvusvahelise kogemusega on nad ehitanud enam kui sada paati mitmesugustel eesmärkidel, näiteks ÜRO missioonideks, Antarktika mandrile ja riigipiiride kaitseks. Joonisel 1 on näide nende Monster 23-st [10].



Joonis 1. Näide keevitatud polüetüleenpaadist [10]

Eestis on polüetüleenist paatide tootmisega algust teinud Kuressaare Ametikool. Alates aastast 2019 on tegeletud polüetüleenist tööpaatide ehitamise eriala arendamisega. Selle aja jooksul on valmistatud kolm paadimudelit ektstruudekeevitamise teel. Olmetingimused selleks on piiratud ja seetõttu on oluline antud lõputööga vajalikud tingimused üle vaadata. Joonisel 2 on näide.



Joonis 2. Polüetüleenist valmiv 5,2m pikkune tööpaat

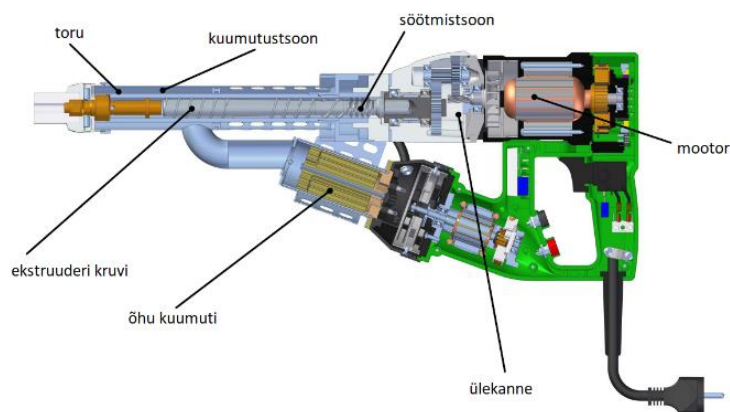
1.2 Ekstruuderkeevituse olemus

Plastide ekstruuderkeevitus leiutati eelmise sajandi kuuekümnendatel [11]. Ekstruuderkeevitus koosneb õhu kuumutajast (föönist), millega kuumutatakse ühendatavate detailide servad polüetüleenil sulamistemperatuurini. Ekstruuderist, kus toimub keevituse tarbeks lisamaterjali (polüetüleenitraadi või graanulite) kuumutamine sulaks olekusse ja segamine homogenseks massiks,

mis surutakse keevitustsooni. Ekstruuderi tallast, mis tagab sula polüetüleenile vajaliku surve keevitustsoonis, lisamaterjali ja keevitavate pindade ühenduse ning keevituse pinna hea kvaliteedi.

Keevitamine toimub reeglina ühe läbimisega ja seda ka küllaltki paksude materjalide korral. Seetõttu on protsess kiire ja väikese töömahuga. Näiteks võrreldes kuuma gaasi keevitusega, on 1m pikkuse keevituse tegemiseks 25mm paksuse HDPE plaadi ühendamiseks ekstruuderkeevitusega orienteeruvalt kuus korda kiirem, kui kuuma gaasiga keevitusel.

Ekstruuderkeevitamise teel saab ühendada erineva paksusega polüetüleenlehti. Keevitamiseks kasutatakse spetsiaalset seadet, mida kutsutakse keevitusekstruuderiks. Joonisel 3 on keevitusekstruuder ja selle ehitusest ülevaade.



Joonis 3- Keevitusekstruuderi ehitus [12]

Polüetüleeni ekstruuderkeevitamine on väga lihtne protsess, kui on piisavalt ruumi ja hea ligipääs liitekohale. Keevitamine toimub keevitusekstruuderi abil, mis ühelt poolt kuumutab keevitavate toorikute servad etteantud polüetüleeni sulamistemperatuurini ning teisalt surub keevitustsooni sula polüetüleeni ning hoiab viimast teatud aja surve all. Joonisel 4 on näide ekstruuderkeevitamisest.



Joonis 4. Ekstruuderkeevitamine [12]

Ekstruuderkeevitamise protsess sisaldab järgmisi samme:

1. Detailide ettevalmistus ja puhastus
2. Fikseerimine ja punktkeevitus
3. Masina ettevalmistus
4. Keevitus
5. Detailide puhastus ja jahutus

Detailide ettevalmistus kujutab endast detaili servade faasimist, üldjuhul 45° nurga alla, kraabitsemist ja puhastamist atsetooniga. Detailid tuleb enne keevitamist korralikult fikseerida, et detailid ei nihkuks keevitamise ajal keevitusekstuuderi surve või keevitusdeformatsioonide tõttu. Kuna polüetüleeni soojuspaisumine on väga suur (teadaolevalt on lineaarse soojuspaisumise koefitsient $\alpha = 108 \cdot [10 - 6\text{m/m } ^\circ\text{C}]$) [13], siis detailide fikseerimine keevitamiseks on ülimalt oluline. Keevituse ajal tekkivad deformatsioonid soojuspaisumisest võivad detaili servad teineteisest eemale nihutada ning keevituse rikkuda.

Ka detailide punktkeevitus võib osutada vajalikuks. Seda just suuremate detailide korral, mille fikseerimine näiteks pitskruvide ja klambritega on raskendatud. Detailide ajutist punktkeevitust tehakse ekstruuderkeevitusega kasutades spetsiaalset keevitustaldmikki, mis on kujutatud Joonisel 5.



Joonis 5. Punktkeevituse taldmik [12]

Keevitustaldmikku puudumisel on võimalik punktkeevitused teostada kuuma gaasiga keevitusega, nagu Joonisel 6 näidatud.

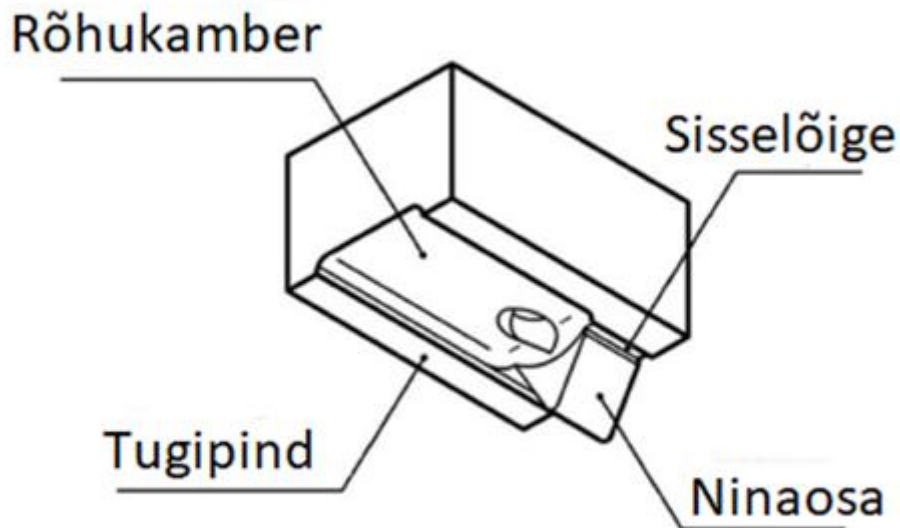


Joonis 6. Kuuma gaasiga keevitus [14]



















Masina ettevalmistus kujutab endast keevitusmasina sisselülitamist, sobiva keevitusparameetri (gaasi ja ekstruuderi temperatuuri) valimist ning ootamist, kuni masin on saavutanud etteantud keevitusparameetrid. Kaasaegsed keevitusekstruuderid omavad sisse ehitatud kaitsemehhanismi, mis ei lase masinat käivitada enne, kui ette seatud keevitusparameetrid ei ole saavutatud.

Samuti tuleb ekstruuderisse sööta sobiv keevitustraata või graanul. Tuleb tähele panna, et keevituse lisamaterjal (traata või graanul) oleks puhas, kuiv, tolmu ja õlivaba. Keevituse lisamaterjal peab olema sama koostisega, mis keevitav materjal.

Keevitamise etapis surub keevitusoperaator keevitusekstruuderi keevitustsooni ja käivitab masina. Küllaldane taldmiku surve keevitustsoonile on väga oluline, kuna see tagab lisamaterjali püsimise keevitustsoonis ette antud surve all. Joonisel 7 on ülevaade keevitusekstruuderi taldmiku tööpõhimõttest ja Joonisel 8 võimalikest taldmikest erineva keevisetüübi saamiseks.



Joonis 7. Termoplasti keevitusekstruuderi taldmik [15]

		146.239 Welding shoe complete 54 × 40 × 52 mm blank welding shoe
		146.240 74 × 50 × 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 8. Termoplasti keevitusekstruuderi taldmikud erinevate keevisetüüpide keevitamiseks [12]

Keevitusekstuuder liigub mööda keevisõmblust lisamaterjali surve tõttu, ekstuuderi liigutamiseks peab operaator tegema minimaalselt pingutusi (see sõltub küll mõnevõrra keevituse asendist). Koheselt keevitamise järel on vaja ära lõigata ekstruuderi taldmiku vahelt välja surutud üleliigne lisamaterjal. Keevitamisele järgneb jahutuse etapp, mille käigus ei tohi detaili keevitusdeformatsioonide vähendamiseks fiksaatorite vahelt vabastada.

1.3 Tehnilised nõuded ekstruuderkeevitamisel

Ekstruuderkeevitamisel tuleb silmas pidada järgmisi parameetrid:

- Kuuma õhu temperatuur on oluline, tagamaks keevitatavate detailide servade kuumutamist sula olekusse nõutud ulatuses.
- Ekstruuderi temperatuur on oluline, tagamaks keevituse lisamaterjali sula olekut ning korraliku läbisegamist. Ekstruuderist peab väljuma keevituse lisamaterjal sulas olekus ning ilma gaasimullideta.
- Keevituskiirus on oluline, tagamaks keevitustsoonis piisavat survet, et tekiks molekulaarne difusioon põhi- ja lisamaterjali vahel.
- Detailide ettevalmistus on oluline tagamaks detailide servade puhtus ning keevituse nõuetele vastav geomeetria. Keevitavate pindade ettevalmistuse alla kuulub servade faasimine 45° nurga alla, pindade kaabitsemine ja puhastamine atsetooniga.

Üleüldiselt on nõuded, mida tuleb järgida polüetüleeni ekstruuderkeevitamisel järgmised:

1. Keevitavad pinnad ja keevitustraat peavad olema puhtad, õli- ja tolmuvabad.
2. Enne keevitamist tuleb keevitatavad pinnad faasida, seejärel kraabitseda või harjata ning aktiveerida atsetooniga
3. Keevitamisel tuleb järgida:
 - a. keevitustsooni puhutava kuumutusõhu temperatuuri
 - b. ekstruuderist väljuva massi temperatuuri
 - c. ekstruuderi taldmiku temperatuuri
 - d. ekstruuderi liikumiskiirust
 - e. survet, mida avaldab ekstruuder keevitatavatele pindadele

Enamuse eelpoolmainitud tingimuste rikkumine ei too tingimata kaasa keevituse visuaalset muutust. Seega võib iga keevitus välja näha kvaliteetne, mis on teostatud täiesti nõuetele vastamata. Et nii ei juhtuks, tuleb järgida kehtivad standardeid, mis reguleerivad termoplastide keevitamist, keevitamise teel saadud toodete disainimist ja testimist

1.3.1 Polüetüleenitoodete disainimist, tootmist ja testimist reguleerivad standardid

Termoplastidest ning siinhulgas ka polüetüleenist keevitatud mahutite disaini reguleerivad järgmised standardid:

EVS-EN 12573-1:2001 - Welded static non-pressurised thermoplastic tanks - Part 1: General principles [16].

Standard kehtestab üldnõuded termoplastidest keevitatud mahutite disainile.

EVS-EN 12573-3:2000 - Welded static non-pressurised thermoplastic tanks - Part 3: Design and calculation for single skin rectangular tanks [17].

Standard kehtestab protseduurid termoplastidest keevitatud ühekordse seinaga ristkülikukujulise profiiliga mahutite disainimisele.

EVS-EN 1778:2000 - Characteristic values for welded thermoplastic constructions - Determination of allowable stresses and moduli for design of thermoplastic equipment [18].

Standard kehtestab meetoodika termoplastidest keevitatud struktuuride piirpõngete leidmiseks.

Termoplastidest ning siinhulgas ka polüetüleenist keevitatud toodete testimist reguleerivad järgmised standardid:

EVS-EN 14728:2019 - Imperfections in thermoplastic welds – Classification [19].

Standard kehtestab termoplastide keevitamisel võimalike tekkivate keevitusvigade kataloogi.

EVS-EN 13100-1:2017 – Non destructive testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 1: Visual examination [20].

Standard kehtestab protseduuri termoplastide keevitusvigade visuaalseks tuvastamiseks ja klassifitseerimiseks.

EVS-EN 12814-1:2000 - Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 1: Bend test [21].

Standard kehtestab protsetuurid termoplastidest keeviste paindekatseseks.

EVS-EN 12814-4:2018/AC:2018 - Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 4: Peel test [22].

Standard kehtestab protsetuurid termoplastidest keeviste rebimiskatseteks.

Termoplastide ning siinhulgas ka polüetüleen keevitamist reguleerivad järgmised standardid: EVS-EN 13705:2004 - Welding of thermoplastics - Machines and equipment for hot gas welding (including extrusion welding) [23].

Standard kehtestab kataloogi termoplastide kuuma gaasiga keevitamiseks mõeldud seadmetele. CEN/TS 16892:2015 - Plastics - Welding of thermoplastics - Specification of welding procedures Standard kehtestab kataloogi termoplastide keevitusprotsessidele [24].

EVS-EN 13067:2020 - Plastics welding personnel - Qualification of welders - Thermoplastics welded assemblies [25].

Standard kehtestab nõuete kataloogi termoplastide keevitusega tegelevatele töötajatele CEN/TR 16862:2015 - Plastics welding supervisor - Task, responsibilities, knowledge, skills and competence [26].

Standard kehtestab nõuete kataloogi termoplastide keevituse kvaliteedikontrollidele.

1.4 Hüpoteeside püstitamine

- Taaskasutatud, sertifitseerimata polüetüleen ja sertifitseeritud, värskest toormest toodetud polüetüleen, keevitatud. Vastavalt uuringutele [27] peaks värskest toormest toodetud polüetüleen ületama tõmbetugevuselt taaskasutatud toormest toodetud polüetüleen mehaanilisi omadusi. See on tingitud taaskasutatud materjalis esinevate vörkehade sattumisest polüetüleen ning faktist, et taaskasutatud polüetüleenis ei esine pikki makromolekule. Taaskasutatud polüetüleen tõmbetugevus väheneb kuid samal ajal plastsus suureneb. Uuringus jõuti järgmistele väärtustele, mis on välja toodud Joonisel 9.

Sample code	Young's Modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	strain at break (%)	Strain at ultimate stress
PE100, a	750 (± 23)	30.5 (± 0.7)	13% (± 1)	9.1% (± 0.2)
HDPE-M, b	935 (± 40)	26.7 (± 0.2)	22% (± 1)	9.1% (± 0.2)
HDPE-R, c	870 (± 34)	26.7 (± 0.3)	23% (± 3)	9.6% (± 0.3)
HDPE-P, d	670 (± 49)	24.8 (± 0.2)	76% (± 16)	10.5% (± 0.1)

Joonis 9. HDPE materjalide mehaanilised omadused ja näidiskoodid [27]

- Keevitusgaasi temperatuuri modifitseerimise mõju keevise tõmbetugevusele. Keevitusgaasi ülesanne on viia keevitatavate detailide servad keevitustsoonis, enne lisamaterjali surumist keevitustsooni, teatud sügavuseni sula olekusse, tagamaks

molekulaarset sidet keevituse lisamaterjali ja põhimaterjali vahel. Juhul, kui keevitustsooni puhutav geevitusgaasi ei ole piisava temperatuuriga, ei teki keevitatavatel detailidel piisava paksusega sulas olekus materjali kihti ning keevitus jääb mehaanilistelt omadustelt nõutule alla. Teisalt, kui keevitusgaas on liiga kuum, tekib keevitustsoonis polüetüleenil lagunemine, mis mõjutab samuti keevituse mehaanilisi omadusi negatiivses suunas [28]. Vastavalt uuringutele on ekstruuderkeevituse kvaliteet määratud peamiselt just baasmaterjali sula kihi omadustega [29].

- Ekstruuderi temperatuuri modifitseerimise mõju keevise tõmbetugevusele. Liialt madal ekstruuderi temperatuur põhjustab lisamaterjali jõudmist keevitustsooni liiga külmana ning mitte homogeensena. Liialt kõrge ekstruuderi temperatuur põhjustab lisamaterjali liigset voolavust, mis omakorda toob kaasa liiga madala rõhu keevitustsoonis. Samuti hakkab kõrgetel temperatuuridel lisamaterjal oksüdeeruma. Lisaks võib liialt kõrge lisamaterjali temperatuur põhjustada keevisõmbluses gaasimulle. Mõlemad, nii liiga kõrge kui liiga madal ekstruuderi temperatuur põhjustavad keevise kvaliteedi langust.
- Töökoja temperatuuri mõju keevise tõmbetugevusele. Töökoja temperatuuri mõju avaldub läbi kuuma gaasi toime keevitatavate detailide servale. Juhul, kui töökoja temperatuur on liiga madal, ei suuda kuum gaas keevitatavate detailide servi piisavas mahus sulatada, ning keevituse kvaliteet ei vasta eelduste kohaselt nõuetele.
- Keevitatava detaili serva ettevalmistamise modifitseerimise mõju keevise tõmbetugevusele. Keevitatavate detailide servade ettevalmistus keevituseks koosneb järgmistest etappidest: Servade faasimine, seejärel kraabitsimine või harjamine roostevaba harjaga (kui faasimisest on möödunud rohkem kui tund) ning pärast seda servade aktiveerimine atsetooniga. Kõik need etapid on vajalikud nõutava tugevusega keevise saamiseks.

2 Metoodiline osa

Järgnevas osas mõtestatakse lahti, milline peab olema katsemetoodika, et selles eksisteeriks selgelt eristatav erinevus ning põhineks loogilisel ülesehitusel. Selle tarbeks koostatakse grupid ja need koondatakse vastavalt konkreetse parameetri muutumisele, et vältida liigset liigitamist iga nominaalsusest kõrvale kalde tõttu. Järgitakse, et tegevus oleks kooskõlas standartidega ja koostatakse selle tarbeks juhised. Selgitatakse testkehade liitmiseks vajalikud parameetrid, et ekstruudeerkeevitus algaksid nominaalsete tingimustega, mida hiljem hakatakse varieerima. Koostatakse tabel ja markeerimissüsteem, et testkehad, nende asukoht plaadil ja grupp oleksid hiljem identifitseeritavad.

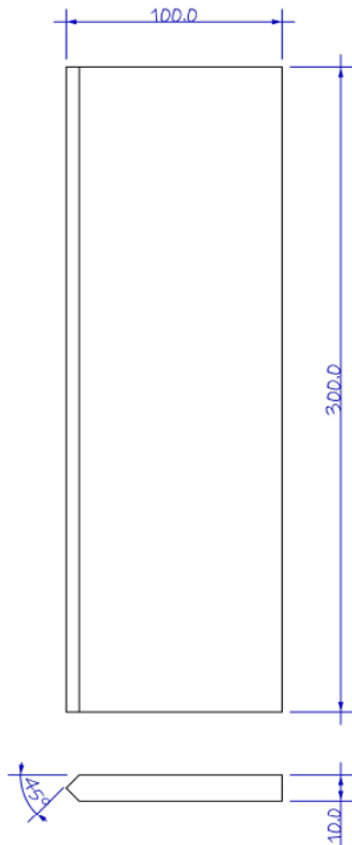
2.1 Katsemetoodika valik

Katsemetoodika valikuks otsustati planeerida ekstruuderkeevitamise teel valmistada polüetüleenist testkehad, mille keevisliite tugevusi saaks hiljem tõmbekatssetega määrata. Esmalt uuriti välja, millised peavad olema nominaalsed parameetrid ja töövõtted. Seejärel oli võimalik nende nimiväärtusi ja töövõtteid hakata sihilikult üks haaval ettenähtust ühes või teises suunas mööda planeerima. Selle tarbeks koostati grupid ja need koondati vastavalt konkreetse parameetri muutumisele. Iga grupi sisse planeeriti veel omakorda põhiparameetri muutumine baasväärtuselt ühes või teises suunas. Töövõtete gruppi planeeriti varieerimist vajalike etappide üks haaval vahele jätmist.

Eeltoodust tulenevalt otsustati katsekeevitused teha järgnevates gruppides:

1. Keevituskatsed vastavalt kõikidele tingimustele
2. Keevituskatsed, kus varieeritakse kuuma gaasi temperatuuri
3. Keevituskatsed, kus varieeritakse ekstruuderist tuleva massi temperatuuri
4. Keevituskatsed, kus varieeritakse töökoja sisetemperatuuri
5. Keevituskatsed, kus varieeritakse keevitustsooni mehaanilist ettevalmistust

Adekvaatsemate tulemuste saamiseks otsustati iga eripära tarvis valmistada üheksa testkeha. Selle tarvis hangiti polüetüleenist lehtplaadid ja need valmistati ette vastavalt Joonisele 10.



Joonis 10. Keevitustooriku plaat

Keevitustooriku servad faasiti 45 kraadise nurga all. Toorikud keevitati kasutades keevitusekstruderit Lesite LST610A (Joonis 11).



Joonis 11. Keevitusekstruder Lesite LST610A [30]

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
- Sertifikaat: CE

Testkehade plaadid keevitati ja keevituse nominaalsed parameetrid olid järgmised [11] [14]:

Ekstruuderi temperatuur, °C: 200-300

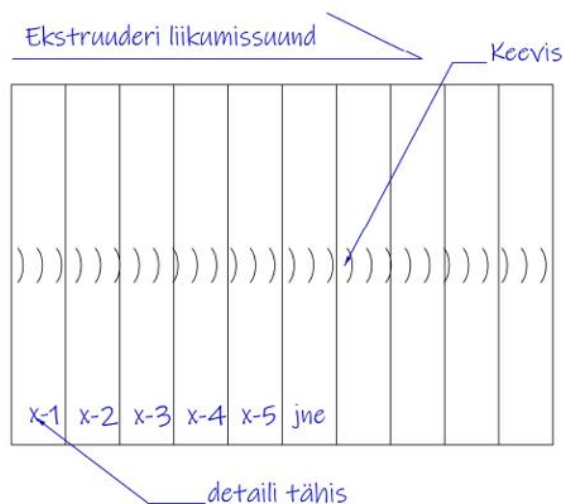
Kuuma õhu temperatuur, °C: 250-300

Töökoja temperatuur, °C: > 18

Õhuvoolu hulk, L/min: > 300

Ekstrudeerimise kiirus, kg/h: kuni 2

Tagamaks keevituse testkehade jälgitavust markeeriti testkehad enne plaatide keevitamist vastavalt keha grupile ja keha asukohale toorikus. Joonisel 12 on kirjeldatud testkehade markeerimissüsteemi.



Joonis 12. Testkehade markeerimissüsteem

Testkehade markeerimine on vajalik, et tuvastada testkeha suhteline keevitusaeg grupis. Näiteks, tihtipeale on keevituse algfaasis raske tagada optimaalseid keevituse parameetreid (ekstruuderi pea on näiteks liiga kuum või külm).

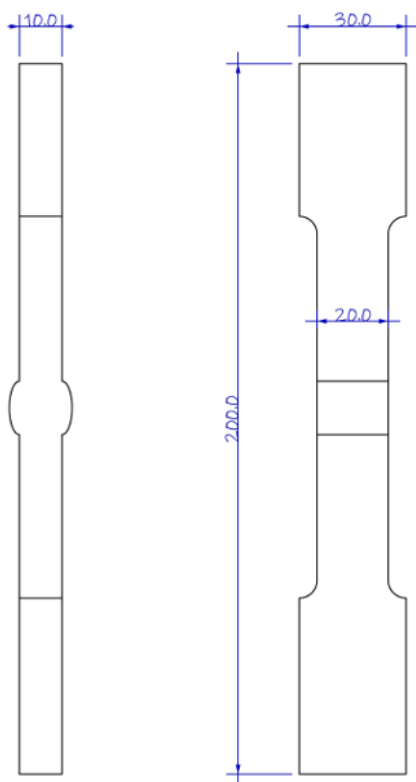
Testkehade markeerimise kord on ära toodud tabelis 1.

Tabel 1. Testkehade markeerimissüsteem

<i>Testkeha iseloomustus</i>	<i>Testkeha grupp</i>	<i>Testkeha tähistus</i>
Testkehade jagunemine keevitusgaasi (õhu) temperatuuri järgi		
- Keevitusgaasi temperatuur ($t_{\text{gnom}} \text{ C}^\circ$) (nominaalne temperatuur)	1	1.2.1-1.2.9
- Keevitusgaasi temperatuur ($t_{\text{gnom}} - 50 \text{ C}^\circ$) C°	2	2.1-2.9
- Keevitusgaasi temperatuur ($t_{\text{gnom}} + 50 \text{ C}^\circ$) C°	3	3.1-3.9
Testkehade jagunemine ekstrusiooni (lisamaterjali) temperatuuri järgi		
- Ekstrusiooni temperatuur ($t_{\text{exnom}} - 50 \text{ C}^\circ$) C°	5	5.1-5.9
- Ekstrusiooni temperatuur ($t_{\text{exnom}} + 50 \text{ C}^\circ$) C°	6	6.1-6.9
Testkehade jagunemine keevitatavate detailide serva ettevalmistuse järgi		
- Ettevalmistamata	9	9.1-9.9
- Harjatud	10	10.1-10.9
- Kraabitud	11	11.1-11.9
Kontroll testkehad		
- Taaskasutatud sertifitseerimata tingimustes toodetud polüetüleen, keevitamata	16	16

Testikehad lõigatati risti keevituse suunale mitte varem, kui kaheksa tundi peale keevitust. Järgitati, et iga katsekeha oleks markeeritud ja tema asukoht keevitatud plaadil identifitseeritav. Katsekehi ei tohtinud termotöödelda ega mehaaniliselt sirgestada.

Keevitatud plaadid saeti formaatsael ning freesiti ülafreesiga tõmbekatsete toorikuteks vastavalt Joonisele 13.



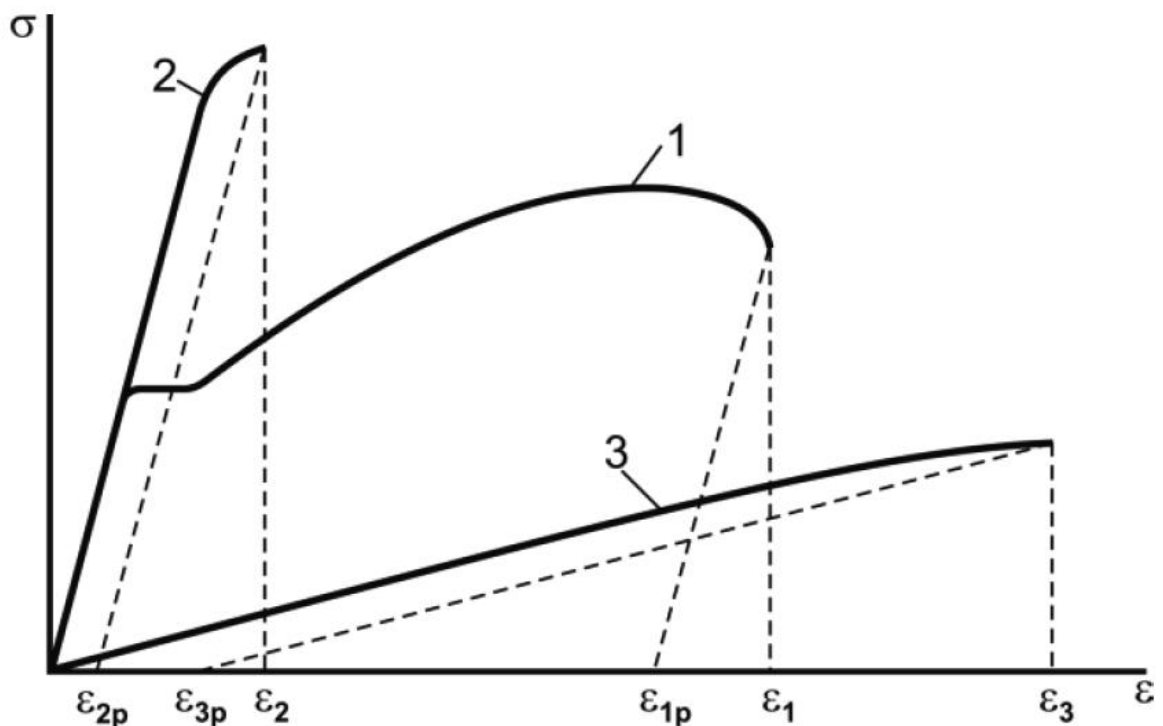
Joonis 13. Testkeha mõõtmed

2.2 Tõmbekatsed

Tõmbekatses määratakse tõmbeteimil materjali tugevusnäitajad, milleks on voolepiir ja tõmbetugevus. Tõmbeteim on katsestend, millel määratakse materjalide mehaanilised omadused neid staatiliselt koormates ja samal ajal mõõtmisi teostades. Tõmbeteimil kasutatakse üldjuhul mehaanilist või hüdraulilist ajamit. Tõmbeteimil tehtav tõmbekatses kujutab endast haaratsite vahele või rakisesse kinnitatud katsekeha staatilist koormamist kuni selle purunemiseni. Katse ajal mõõdetakse pidevalt katsekehale rakendatavat jõudu ja katsekeha pikenemist. Tugevusnäitajad antakse pingehüvikes, enamasti N/mm² või ka MPa. Tugevusnäitajatega samaaegselt määratakse

ka materjali plastsusnäitajad, mis antakse suhtelise deformatsioonina purunemise hetkel. Katkevenivus, s.o suhteline pikenemine pärast katkemist ja katkeahenemine, s.o suhteline ahennemine pärast katkemist.

Mõõtmiste tulemused esitab katsestendi arvutiprogramm graafikuna, millelt on võimalik lugeda materjali tugevusnäitajad. Joonisel 14 on metallide, mis antud juhul sobivad ka polüetüleeniga, tüüpilised tõmbediagrammid koordinaadistikus pinge-deformatsioon erinevate materjalide korral. Deformatsioonid ε_1 , ε_2 ja ε_3 vastavad kogudeformatsioonidele; ε_{1p} , ε_{2p} ja ε_{3p} – plastsetele (jäävatele) deformatsioonidele [31] [32].



Joonis 14. Metallide tüüpilised tõmbediagrammid: 1 – plastne materjal, 2 – habras materjal, 3 – kõrgelastne materjal (võrdluseks näiteks elastomeer)

Antud lõputöö katsekehade tõmbekatsed viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Eesti Mereakadeemia Meremajanduse keskuse katselaboris Kuressaares 18.03.2021. Katsemetoodika valiti vastavalt standardile EVS-EN 12814-2:2021 Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 2: Tensile test [33]. Testimiseks venitati katsekeha piki selle vertikaaltelge konstantse kiirusega kuni materjali katkemiseni. Protseduuri ajal mõõdeti eelkõige koormust, mida katsekehale talus. Tõmbekatseteks kasutati katsesteimi Instron 5969 (Joonisel 15), mida viimati oli kalibreeritud 21.01.2020.

Instron 5960 parameetrid:

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



Joonis 15. Katseteim Instron [34]

Kokku testiti 95 katsekeha. Katsekehad olid jagatud gruppidesse vastavalt alljärgnevale:

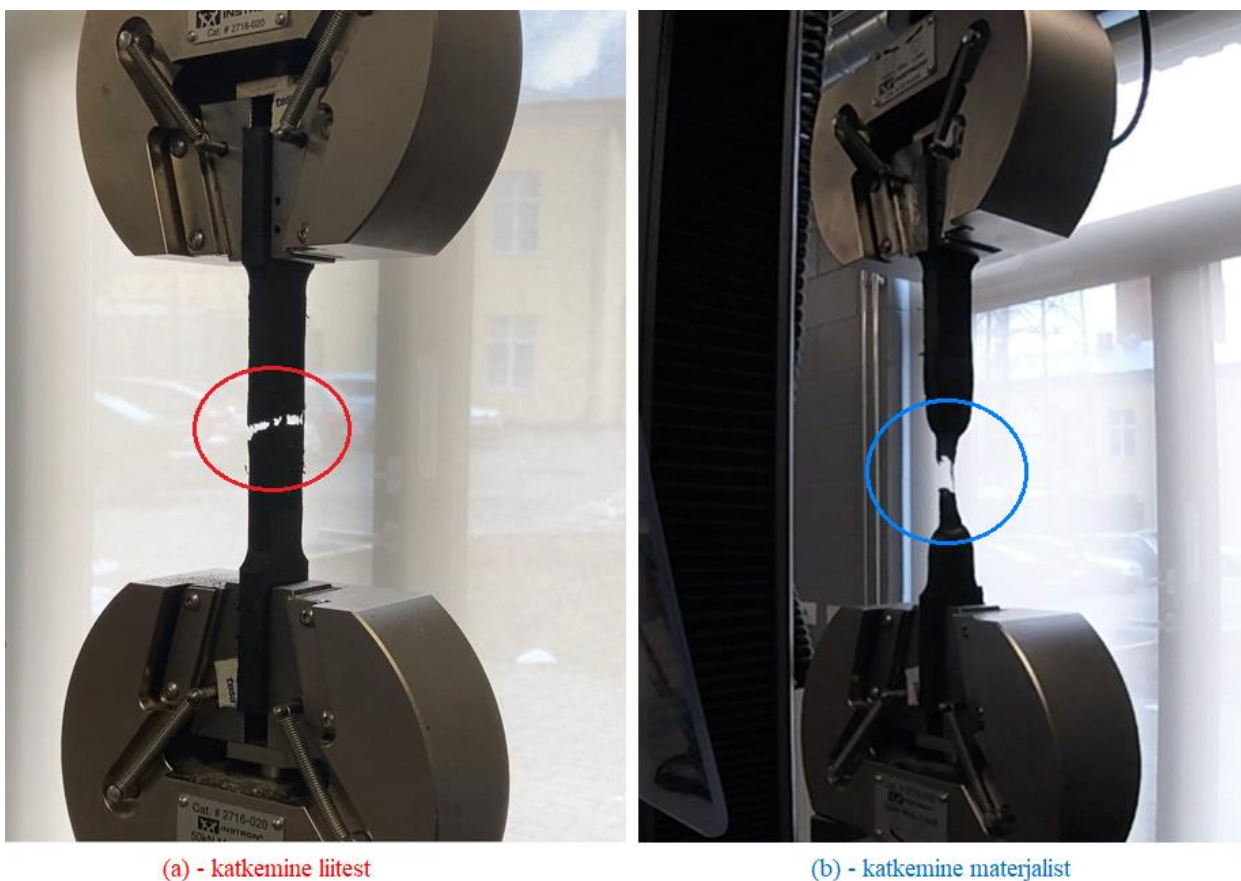
- Testkehade jagunemine keevitusgaasi (õhu) temperatuuri järgi – 31 katsekeha, katsekehad tähistusega 1.2.1 – 3.9
- Testkehade jagunemine ekstrusiooni (lisamaterjali) temperatuuri järgi – 18 katsekeha, katsekehad tähistusega 5.1 - 6.9
- Testkehade jagunemine töökoja temperatuuri järgi – 9 katsekeha, katsekehad tähistusega 7.1 – 7.9

- Testkehade jagunemine keevitatavate detailide serva ettevalmistuse järgi – 27 katsekeha, katsekehad tähistusega 9.1 – 11.9
- Kontroll testkehad – 10 katsekeha, ID tähistusega 16

3 Tulemuste analüüs

Tõmbekatseid läbis üheksakümmend viis katsekeha ja katsetega samaaegselt peeti tabelit (Lisa 2. Tabel 8. Katsekehade tõmbekatsete tabel). Tabelisse sisestati katsekeha ID, katse number, keevisõmbluse pikkus A (mm), laius B (mm), tõmbetugevus N ehk maksimaalse jõule vastav pinge ning katsekeha purunemise koha tähis. Vaatluse all olid katsed numeratsiooniga 5 kuni 85 ehk keevisliidetega sertifitseeritud polüetüleenist katsekehad ja 118 kuni 127, mis olid keevisliideteta katsekehad sertifitseerimata polüetüleenist.

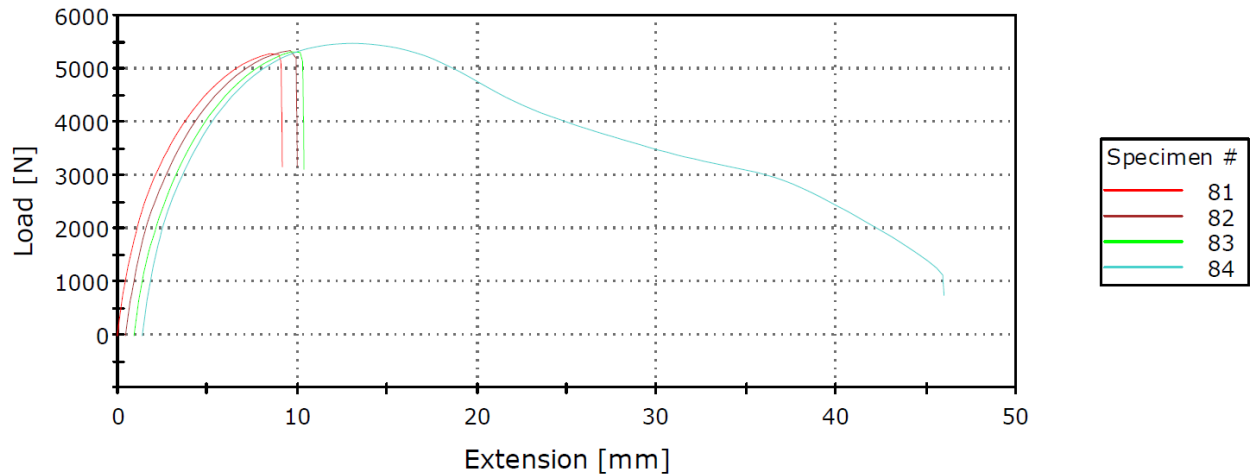
Nelikümmend viis katsekeha katkesid liitest (Joonis 15 – näide *a*) ja viiskümmend materjalist (Joonis 16 – näide *b*).



Joonis 16. Testkehade purunemise kohad. (a) liitest (b) materjalist

Mõlemal juhul esmalt katsekehad pikenesid ja seejärel katkesid. Liitest purunemisel oli katsekeha pikenemine ja ahenemine väiksem ning materjalist purunemise korral pikenemine ja ahenemine suurem (näide Joonis 17 Speciman 81 ja 84, Lisa 2 Tõmbekatsete tabelis katsed nr 81 ja 84)).

Specimen 81 to 84



Joonis 17. Katsestendi Instron 5969 raporti väljavõte katsetest 81 kuni 84

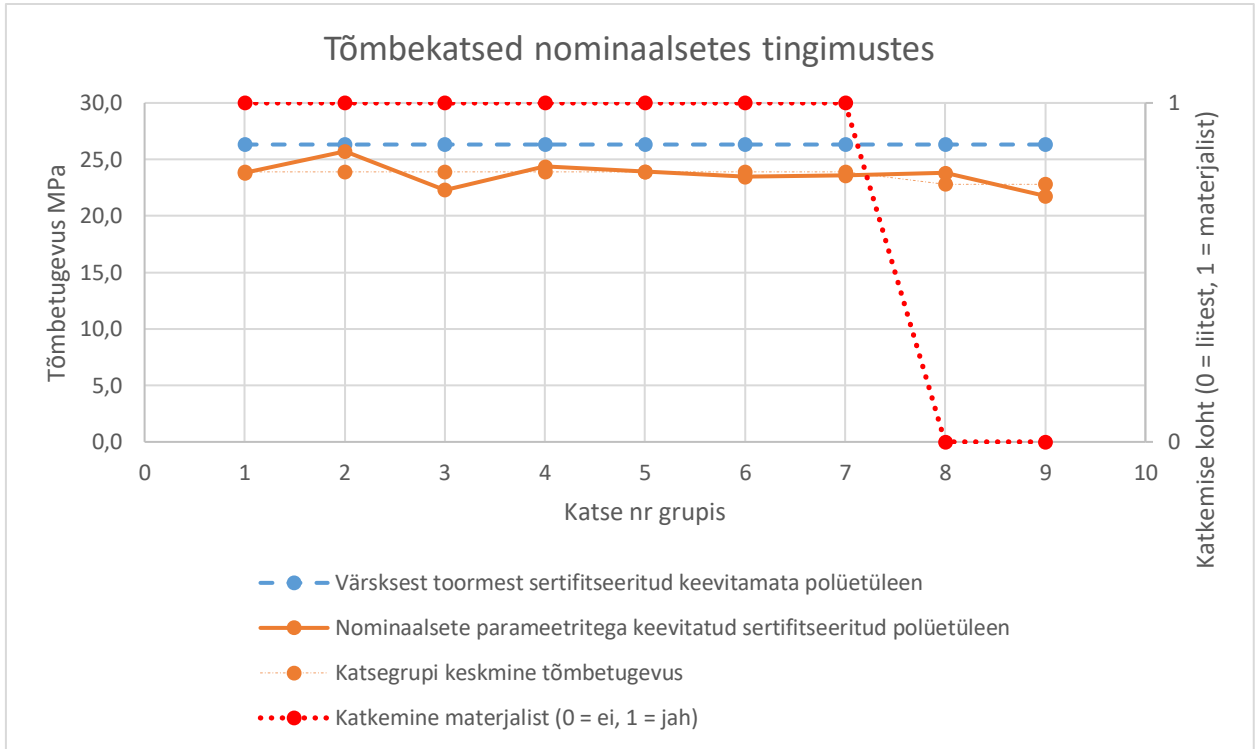
3.1 Katsegruppide tulemused ja järeldused

Järgnevalt analüüsitakse igat katsegruppi eraldi graafikute abil, kus primaarsel vertikaalteljel on tõmbetugevuse skaala Megapaskalites (MPa), primaarsel horisontaalteljel katse nr grupis ja sekundaarsel vertikaalteljel katkemise koht. Igal graafikul vaatlusalune grupp on tähistatud pideva joonega, mida samaaegselt võrreldakse keevitamata (sinine kriipsjoon) sertifitseeritud polüetüleeniga keskmise tõmbetugevusega ja nominaalsetes tingimustes keevitatud (oranž kriipsjoon) sertifitseeritud polüetüleenist katsekehade tõmbetugevustega. Punane punktiirjoon näitab vastavalt katse numbrile katsekeha purunemise kohta. Kui punktiirjoon asub väärtusel 0, siis katsekeha katkes liitest ja kui väärtusel 1, siis katkemine toimus väljaspool liidet ehk materjalist. Nendel juhtudel, kus punane punktiirjoon asub vaatlusaluse grupi ehk pidevast joonest kõrgemal oli keevisõmbluse tugevus materjali omast suurem. Nendel juhtudel, kus punktiirjoon asub allpool pidevat joont, toimus katkemine liitest ehk keevisõmbluse tõmbetugevus jäi materjali omale alla. Koondülevaade tõmbekatsetest graafiliselt on Lisas 3 Joonisel 28.

3.1.1 Nominaalsete parameetritega keevitatud sertifitseeritud polüetüleen

Esimene grupp ehk värskest toormest toodetud sertifitseeritud polüetüleenist valmistatud katsekehad numeratsiooniga 1.2.1 – 1.2.9. Liidetud ekstrudeerimisega nominaalsetest tingimustes (kuuma õhu temperatuur 250-300°C, ekstruuderite temperatuur: 200-300°C, õhuvoolu hulk suurem kui 300L/min, ekstrudeerimise kiirus kuni 2 kg/h). Kokku üheksa katsekeha, millest

1.2.1 – 1.2.7 saavutasid keskmiseks tõmbetugevuseks 23,9 MPa ja katkesid materjalist. Viimased kaks katsekeha numeratsiooniga 1.2.8 – 1.2.9 saavutasid keskmiseks tõmbetugevuseks 22,8 MPa ja katkesid liitest (Joonis 18).



Joonis 18. Nominaalsete parameetritega keevitatud sertifitseeritud polüetüleenide tõmbetugevus

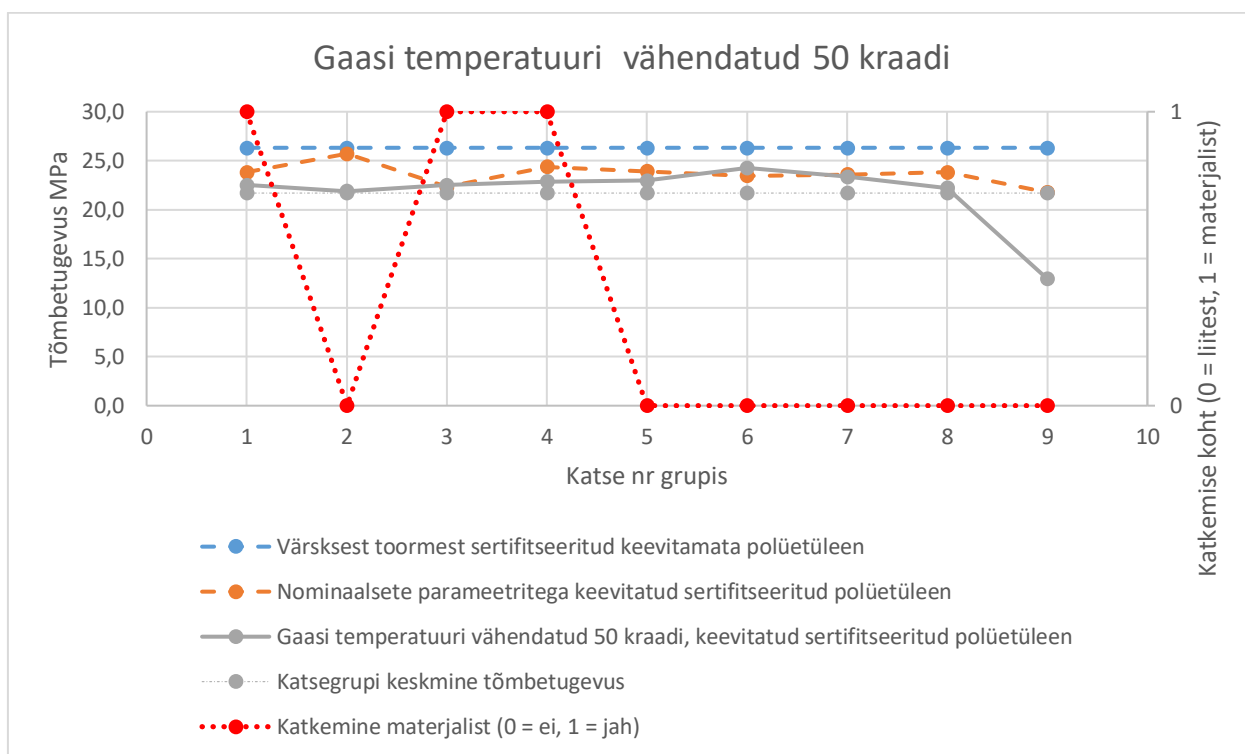
Hüpoteesi, kus kõik keevitatavate detailide servade ettevalmistuse etapid on vajalikud nõutava tugevusega keevise saamiseks, saab pidada tõeseks. Seitsmel juhul oli keemisõmbluse tugevus kõrgem materjali omast ning viimase kahe katsekeha puhul võis leida aset materjali liigne kuumenemine, mis avaldus keemisõmbluses tõmbetugevuse vähenemisega.

Tähelepanuväärne on, et nominaalsetes tingimustes keevitatud polüetüleenide tõmbetugevus väljaspool keevisliidet ei ole enam samaväärne, mis keevitamata polüetüleenil. Tõenäoliselt pärast ekstruuderkeevitust ehk materjaliosa sulamistemperatuurini jõudmist on toimunud sama olukord, mis metallidel, kus pärast kuumutamist väheneb kõvadus ja tugevus ning suureneb plastsus [31].

3.1.2 Nominaalsetest parameetritest erineva gaasi temperatuuriga liited

Teises grupis, kus nominaalsetest tingimustest oli langetatud gaasi temperatuuri 50 kraadi võrra, olid katsekehad numeratsiooniga 2.1 – 2.9. Esimesel, kolmandal ja neljandal katsel ületas

keevisliite tugevus materjali oma, kuid kõikidel ülejäänutel katsetel oli keevisliite tõmbetugevus materjali omast nõrgem. Joonisel 19 on välja toodud katsegrupi tõmbekatsed graafiliselt.

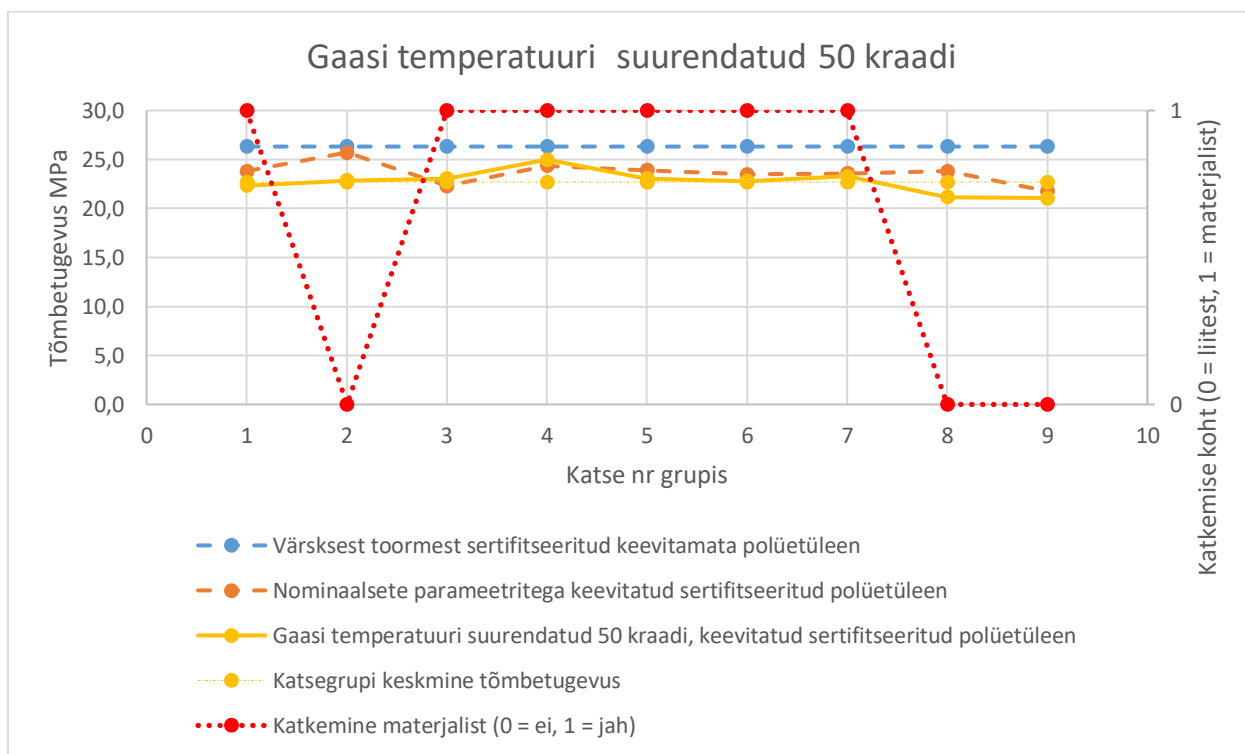


Joonis 19. Gaasi temperatuuri vähendatud 50 kraadi, keevitatud testkehade tõmbetugevus

Hüpotees, kui keevitstsooni puhutav geevitusgaasi ei ole piisava temperatuuriga, ei teki keevitatavatel detailidel piisava paksusega sulas olekus materjali kihti ning keevitus jääb mehaanilistelt omadustelt nõutule alla, leidis enamus katsete näol kinnitust. Miks esimene, kolmas ja neljas katse sellest erinesid, võis olla tingitud katsekehade paiknemist plaadil. Esimese testkeha juures võis veel gaasi temperatuur mitte olla langenud uue väärtuseni, kui ekstruuder tuli eelmise grupi keevitamisest. Kolmanda ja neljanda katse puhul võis mängida rolli katsekehade asetus plaadi keskosas ning samal ajal võis ekstruuderit nominaalne temperatuur kompenseerida gaasi temperatuuri puudujääki. Lisaks, kui vaadelda viimast katsekeha, mis asus plaadi lõpus, kuhu ekstruuderit nominaalne temperatuur kompenseerima ei ulatanud, oli tõmbetugevus erakordselt madal. Seetõttu langes ka kogu grupi tõmbekatsete keskmine tugevus väärtusele 21,7MPa.

Kolmandas grupis, kus nominaalsetest tingimustest oli suurendatud gaasi temperatuuri 50 kraadi võrra, olid katsekehad numeratsiooniga 3.1 – 3.9. Esimesel ja kolmandal kuni seitsmenda kaitseni ületas keevisliite tugevus materjali oma, kuid teisel ja kahel viimasel katsetel oli keevisliite

tõmbetugevus materjali omast nõrgem. Joonisel 20 on välja toodud katsegrupi tõmbekatsed graafiliselt.

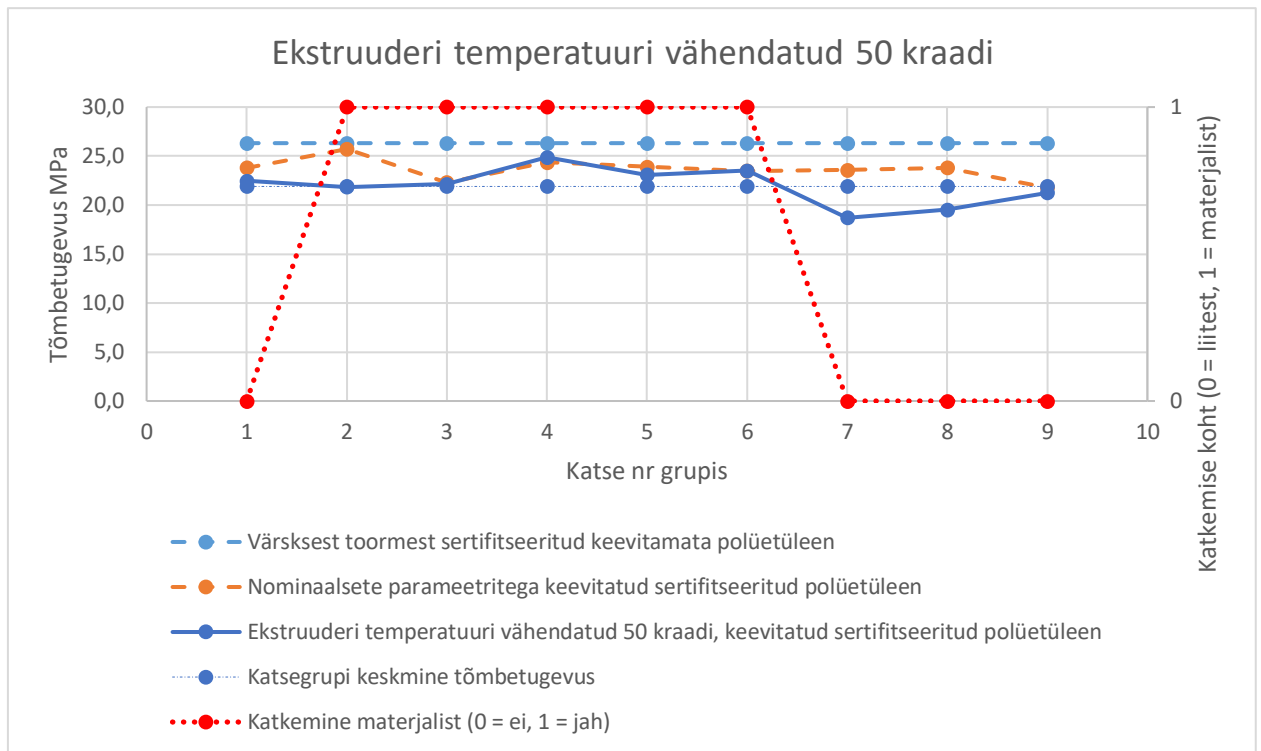


Joonis 20. Gaasi temperatuuri suurendatud 50 kraadi, keevitatud testkehade tõmbetugevus

Hüpotees, kui keevitusgaas on liiga kuum, tekib keevitustsoonis polüetüleeni lagunemine, mis mõjutab samuti keevituse mehaanilisi omadusi negatiivses suunas võis mängida rolli plaadi äärtel, nagu teise ja kahe viimase katse puhul. Plaadi keskosas võis materjali enda temperatuur ja asetus tasakaalustada suurenenud gaasi temperatuuri ära. Kuna kogu katsegrupi keskmine tõmbetugevus on 22,7MPa, mis on 0,9MPa väiksem nominaalsetes tingimustest, siis empiirilisel võib hüpotees olla tõene.

3.1.3 Nominaalsetest parameetritest erineva ekstruuderi temperatuuriga liited

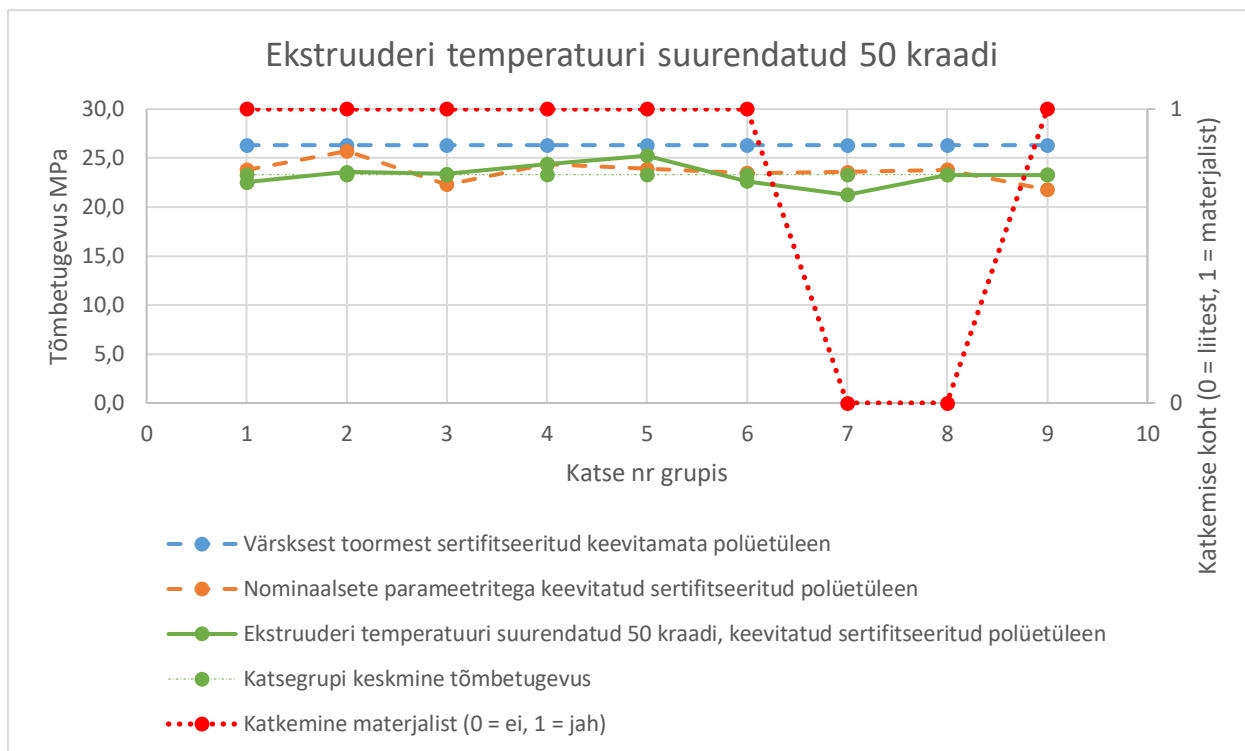
Neljandas grupis, kus nominaalsetest tingimustest oli vähendatud ekstruuderi temperatuuri 50 kraadi võrra, olid katsekehad numeratsiooniga 5.1 – 5.9. Teisel kuni kuuendal katsel ületas keeviliite tugevus materjali oma, kuid esimesel ja kolmel viimasel katsetel oli keeviliite tõmbetugevus materjali omast nõrgem. Joonisel 21 on välja toodud katsegrupi tõmbekatsed graafiliselt.



Joonis 21. Ekstruuderi temperatuuri vähendatud 50 kraadi, testkehade tõmbetugevus

Hüpoteesi, kus liialt madal ekstruuderi temperatuur põhjustab lisamaterjali jõudmist keevitustsooni liiga külmana ning mitte homogeensena võis leida aset plaadi äärealadel ehk esimese ja kolme viimase testkeha juures. Plaadi keskosas võis omakorda kompenseerida gaasi nominaalne temperatuur ekstruuderi temperatuuri puudujääki. Kuna kogu katsegrupi keskmine tõmbetugevus on 21,9MPa, mis on 1,7MPa väiksem nominaalsetes tingimustest, siis empiiriliselt võib hüpoteesi pidada tõeseks.

Viiendas grupis, kus nominaalsetest tingimustest oli suurendatud ekstruuderi temperatuuri 50 kraadi võrra, olid katsekehad numeratsiooniga 6.1 – 6.9. Esimesel kuni kuusandal ja viimasel katsel ületas keeviliite tugevus materjali oma, kuid seitsmendal ja kaheksandal katsel oli keeviliite tõmbetugevus materjali omast nõrgem. Joonisel 22 on välja toodud katsegrupi tõmbekatsed graafiliselt.

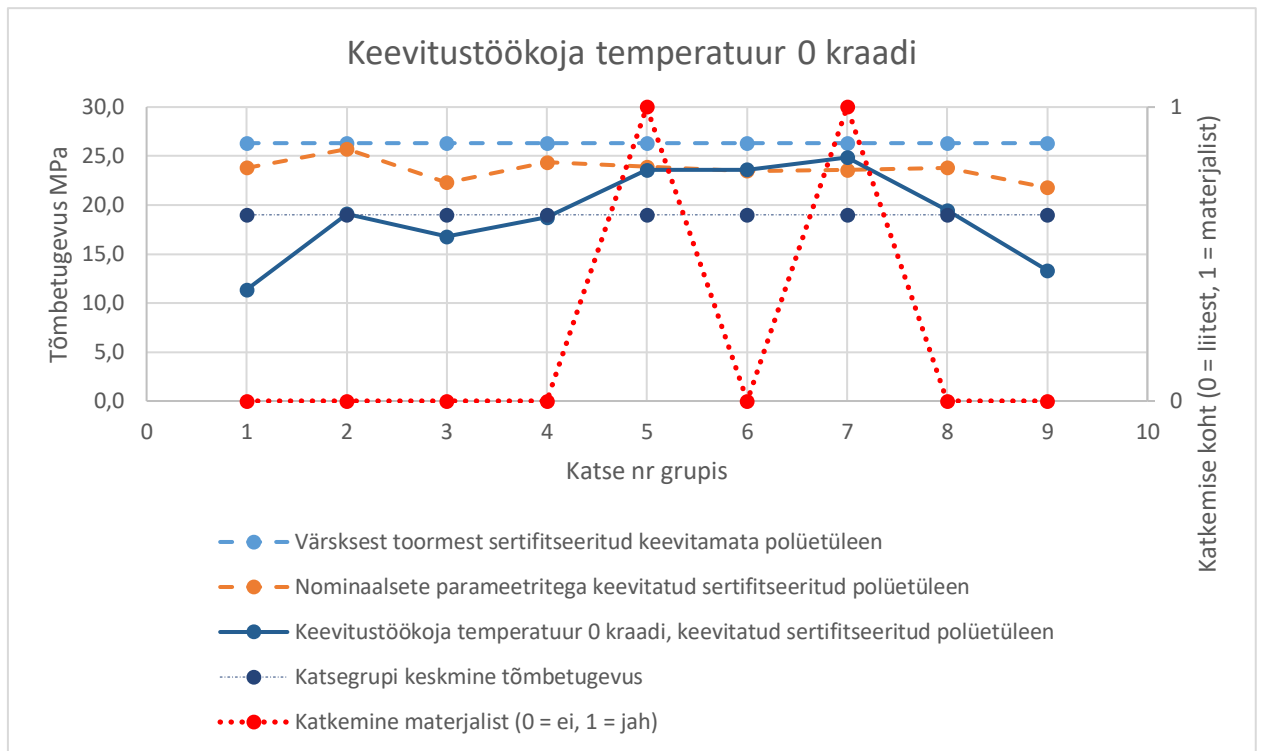


Joonis 22. Ekstruuderi temperatuuri suurendatud 50 kraadi, testkehade tõmbetugevus

Hüpoteesi, kus liialt kõrge ekstruuderi temperatuur põhjustab lisamaterjali liigset voolavust, mis omakorda toob kaasa liiga madala rõhu keevitustsoonis või hakkab lisamaterjal kõrgetel temperatuuridel oksüdeeruma või gaasimulle tekitama, ei saa paraku antud katsegrupi puhul kinnitada ega ümber lükata. Visuaalselt keevisõmblustes ühtegi puudujääki ei tuvastatud. Kogu katsegrupi keskmine tõmbetugevus on 23,3MPa, mis on 0,3MPa väiksem nominaalsetest tingimustest, mis näitab küll kerget langevat trendi, aga tõenäoliselt ei olnud 50 kraadi kõrgem ekstruuderi temperatuur liialt kõrge hüpoteesi avaldumiseks.

3.1.4 Madala keevitustöökoja temperatuuriga liited

Kuuendas grupis, kus nominaalsetest tingimustest oli töökoja temperatuur vähendatud 0 kraadini, olid katsekehad numeratsiooniga 7.1 – 7.9. Viiendal ja seitsmendal katsel ületas kevisliite tugevus materjali oma, kuid kõigil ülejäänutel katsetel oli kevisliite tõmbetugevus materjali omast märgatavalt nõrgem. Joonisel 23 on välja toodud katsegrupi tõmbekatsed graafiliselt.

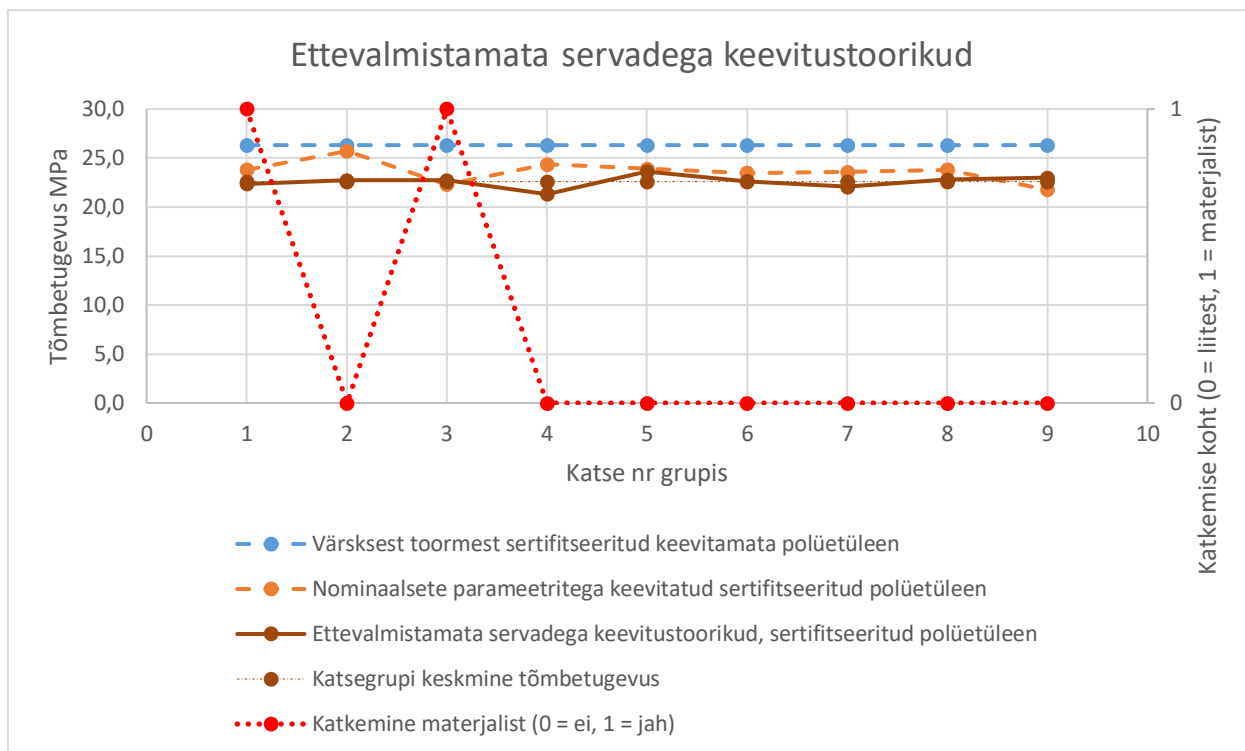


Joonis 23. Keevitustöökoja temperatuur 0 kraadi, testkehade tõmbetugevus

Hüpotees, kus töökoja temperatuur on liiga madal ning seetõttu ei suuda kuum gaas keevitatavate detailide servi piisavas mahus sulatada ja nõuetele vastavat keevituse kvaliteeti tagada, osutus tõseks. Miks viiendal ja seitsmendal katsel leidis katkemine aset materjalist, võib seletada tänu katsekehade asetusele plaadi keskosas, kus gaasi ja ekstruuderi temperatuur jõudsid kompenseerida madalat töökoja temperatuuri. Sama näitab ka tõmbekatsete graafiku pidevjoon, mis äärtes on madalamal ja keskosas kõrgemal.

3.1.5 Erineva serva ette valmistusega liited

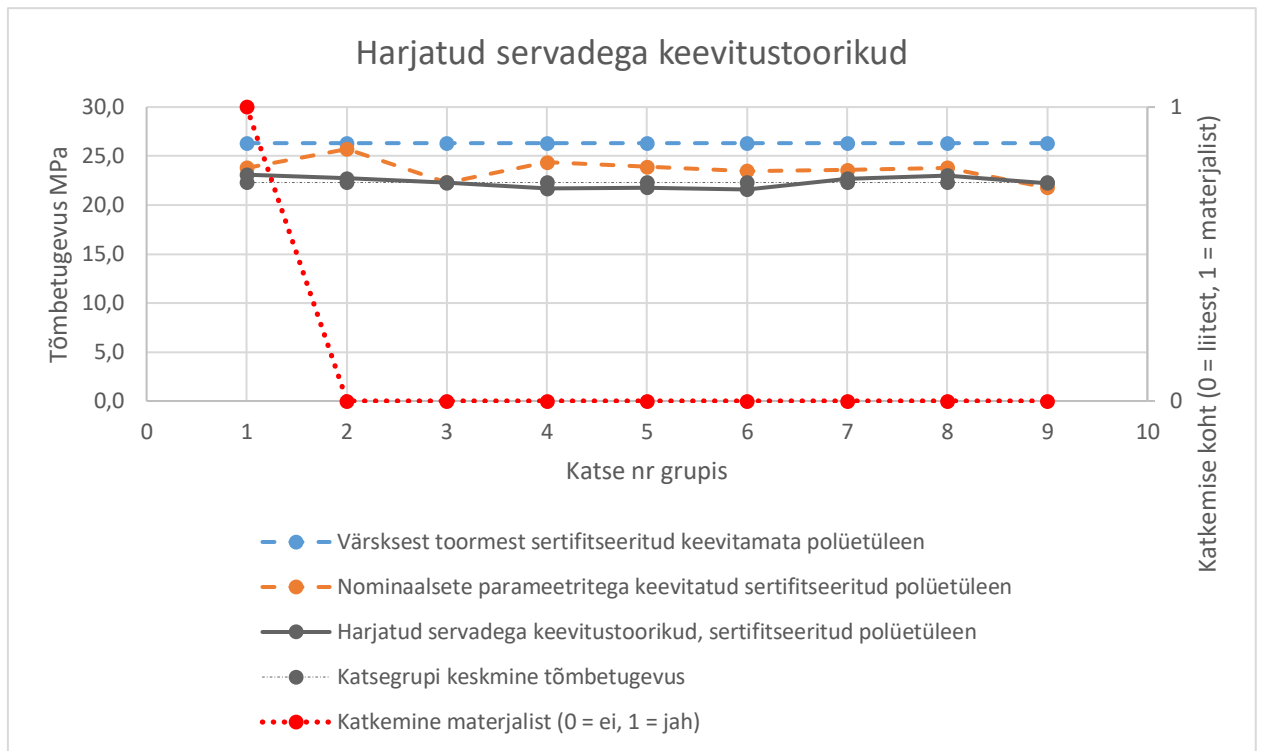
Seitsmendas grupis, kus liidetavate detailide servad jäeti ette valmistamata, olid katsekehad numeratsiooniga 9.1 – 9.9. Esimesel ja kolmandal katsel ületas keevisliite tugevus materjali oma, kuid kõigil ülejäänutel katsetel oli keevisliite tõmbetugevus materjali omast nõrgem. Joonisel 24 on välja toodud katsegrupi tõmbekatsed graafiliselt.



Joonis 24. Ettevalmistamata servadega keevitustoorikud, tõmbetugevus

Hüpoteesi, kus kõik keevitatavate detailide servade ettevalmistuse etapid on vajalikud nõutava tugevusega keevise saamiseks, võib pidada tõeseks. Antud katsegrupis jäeti liidetavate detailide servad ette valmistamata ning tõenäoliselt seetõttu toimus enamus katkemisi liitest. Katsegrupi keskmine tõmbetugevus oli 22,6MPa, mis on 1MPa võrra madalam nominaaltingimustest.

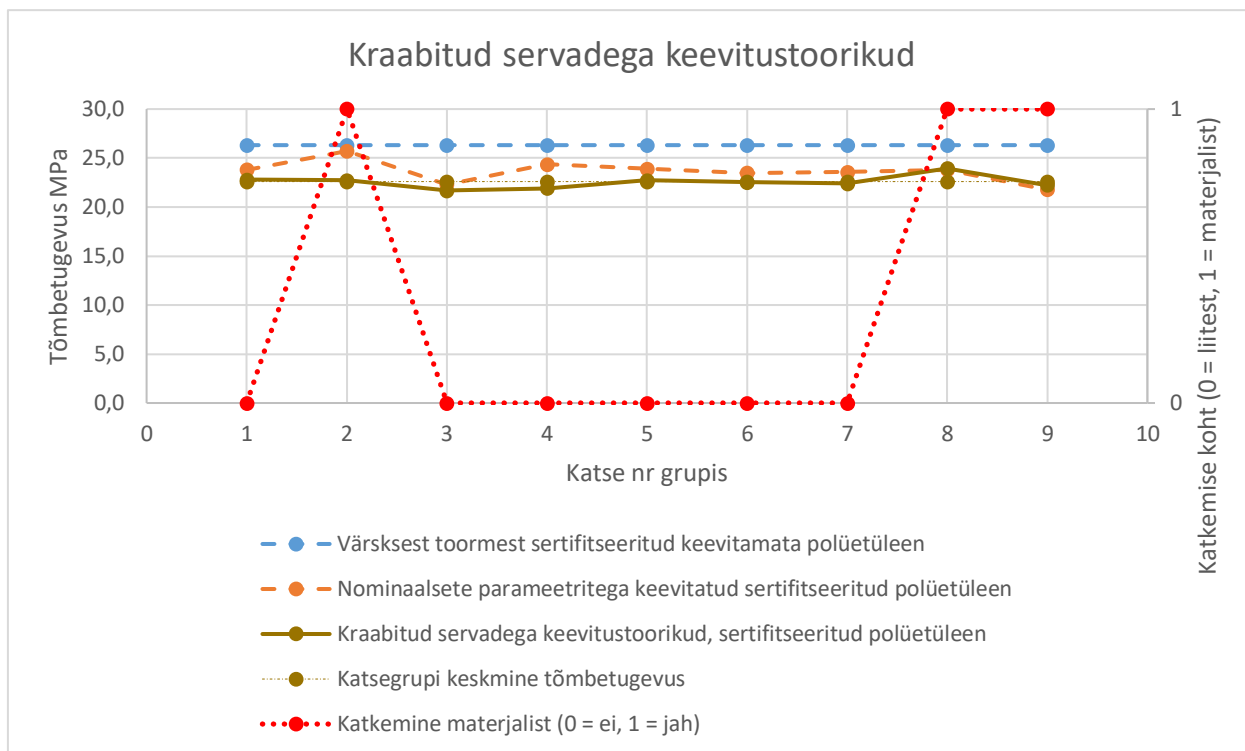
Kaheksandas grupis, kus liidetavate detailide servad harjati, olid katsekehad numeratsiooniga 10.1 – 10.9. Esimesel katsel ületas keevisliite tugevus materjali oma, kuid kõigil ülejäänutel katsetel oli keevisliite tõmbetugevus materjali omast nõrgem. Joonisel 25 on välja toodud katsegrupi tõmbekatsed graafiliselt.



Joonis 25. Harjatud servadega keevitustoorikud, tõmbetugevus

Hüpoteesi, kus kõik keevitatavate detailide servade ettevalmistuse etapid on vajalikud nõutava tugevusega keevise saamiseks, võib pidada tõeseks. Antud katsegrupis liidetavate detailide servad küll harjati, aga jäeti eelnevalt 45-kraadise nurga alla faasimata ja ka pärast harjamist atsetooniga aktiveerimata. Tõenäoliselt seetõttu toimus enamus katkemisi liitest. Katsegrupi keskmine tõmbetugevus oli 22,3MPa, mis on 1,3MPa võrra madalam nominaaltingimustest.

Üheksandas grupis, kus liidetavate detailide servad kraabiti, olid katsekehad numeratsiooniga 11.1 – 11.9. Esimesel ja kahel viimasel katsel ületas keevisliite tugevus materjali oma, kuid kõigil ülejäänutel katsetel oli keevisliite tõmbetugevus materjali omast nõrgem. Joonisel 26 on välja toodud katsegrupi tõmbekatsed graafiliselt.

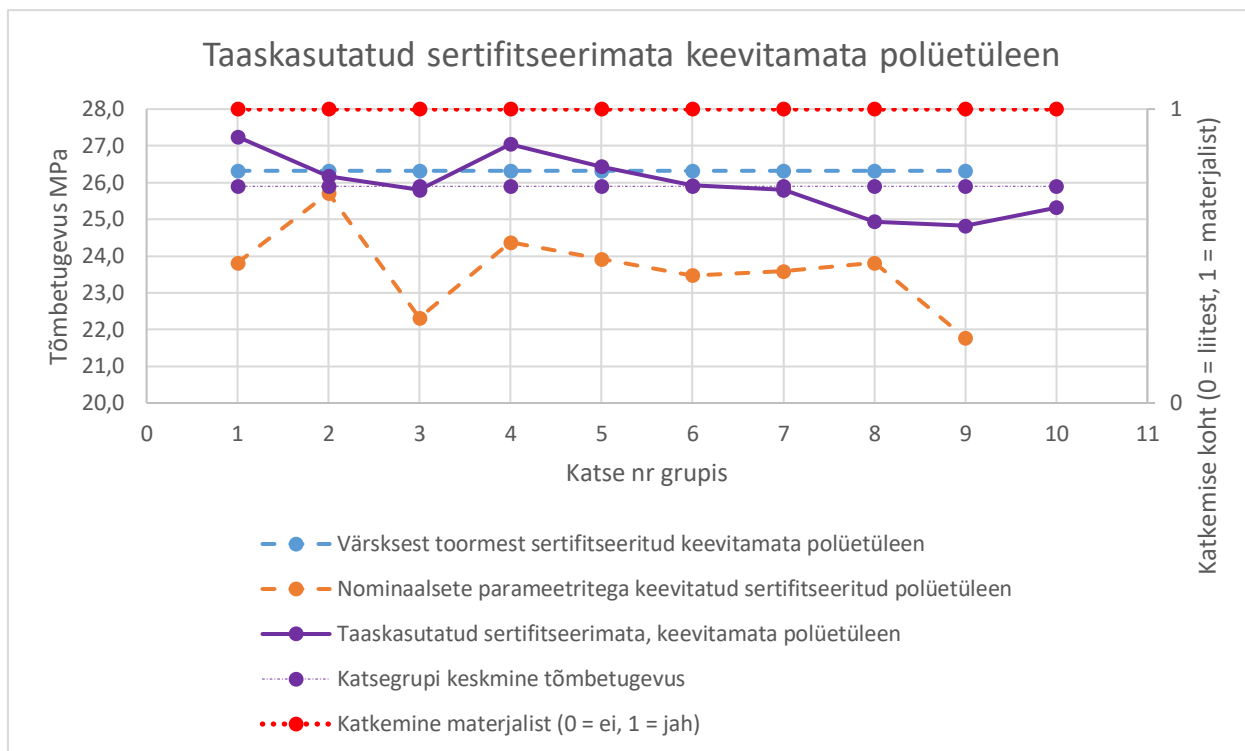


Joonis 26. Kraabitud servadega keevitustoorikud, tõmbetugevus

Hüpoteesi, kus kõik keevitatavate detailide servade ettevalmistuse etapid on vajalikud nõutava tugevusega keevise saamiseks, võib pidada tõeseks. Antud katsegrupis liidetavate detailide servad küll kraabiti, aga jäeti eelnevalt 45-kraadise nurga alla faasimata ja ka pärast harjamist atsetooniga aktiveerimata. Tõenäoliselt seetõttu toimus enamus katkemisi liitest. Katsegrupi keskmine tõmbetugevus oli 22,6MPa, mis on 1,0MPa võrra madalam nominaaltingimustest. Samas selle katsegrupi keskmine tõmbetugevus oli 0,3MPa võrra kõrgem kui eelmisel grupil, mida võib seletada sellega, et servade kraapimine aitas kaasa kergele faasi tekkimisele.

3.1.6 Taaskasutatud sertifitseerimata keevitamata polüetüleen

Viimases ehk kümnendas grupis, kus materjaliks oli taaskasutatud sertifitseerimata ja keevitamata polüetüleen, olid katsekehad numbriga 16. Seal täpsem numeratsioon ehk testkeha asetus plaadis ei olnud oluline, kuna ilma keevitamata materjalil termomõjusid ei saa toimuda. Seega kõik testkehad katkesid keevisliite puudumise tõttu materjalist. Joonisel 27 on välja toodud katsegrupi tõmbekatsed graafiliselt.



Joonis 27. Taaskasutatud sertifitseerimata, keevitamata polüetüleen. Tõmbetugevus

Testkehadena kasutati taaskasutatud toormest toodetud sertifitseerimata keevitamata polüetüleenist valmistatud katsekehi selgitamiseks, kas antud polüetüleen vastab oma tõmbetugevuselt nõuetele ning saamaks referentsväärtust ülejäänud katsete tarvis. Polüetüleen pärines Saaremaa ettevõttest Ösel Plastic OÜ. Ettevõtte kasutab taaskasutatud polüetüleenist lehe valmistamiseks Hiina Rahvavabariigis toodetud seadet.

Viimase grupi puhul leidis ka hüpoteesi kinnitust, et taaskasutatud sertifitseerimata polüetüleenile tõmbetugevus jääb alla värskelt toormest toodetud polüetüleenile. Keskmine tõmbetugevus oli selles grupis 25,95MPa, mis on 0,37MPa ehk 1,4% väiksem kui värskelt toormest toodetud sertifitseeritud polüetüleenil.

Antud sertifitseerimata polüetüleen vastab küll oma tõmbetugevuselt nõutud tingimustele, kuid sellest ei saa teha järeldusi, et sertifitseerimata tingimustes toodetud polüetüleen on alati peaaegu samaväärne sertifitseeritud tingimustes toodetud polüetüleeniga.

Tegemaks laiapõhjalisi järeldusi sertifitseerimata polüetüleenile mehaanilistest omadustest peaks tegema hulgaliselt tõmbekatseid paljude tootjate poolt toodetud polüetüleeniga.

Kokkuvõte

Antud lõputöö eesmärgiks oli selgitada keevitusparameetrite, keevitatavate detailide serva ettevalmistamise ja keevituskeskkonna mõju keevise kvaliteedile. Üritati leida vastused küsimustele, kuivõrd drastilisi muutusi keevituse kvaliteedis ehk siis keevise mehaanilistes omadustes toob kaasa ühe või teise keevitusparameetri rikkumine.

Selle tarvis vaadati üle, mis materjal on polüetüleen, millised on tema omadused ja kus seda kasutatakse. Otsiti seoseid ja ajalugu seoses veesõidukitega ning märgiti ära tuntumad polüetüleenist paatide tootjad. Toodi välja, millised on polüetüleenpaadi eelised võrreldes alternatiivsete materjalidega. Tehti tutvust tänaseks päevaks kõige populaarsema polüetüleenist paatide tootmisviisiga ehk ekstruuderkeevitusega. Uuriti, milline on ekstruuderkeevituse masinlik ehitus ja tööpõhimõte. Vaadati üle, milliseid nõudeid tuleb järgida, et keevitamise teel kvaliteetsete liidetega tooteid saada ja selgitati välja, millised on ohud, kui neid ei täideta. Tehti tutvust standartidega, mis reguleerivad polüetüleentoodete disainimist, tootmist ja testimist.

Ehitati üles katsemetoodika ja uuriti läbi eriala kirjanduse välja, millised on nominaalsed tingimused polüetüleeni ekstruuderkeevitamiseks. Otsustati neid üks haaval muutma hakata, et imiteerida võimalikke kõrvalekaldeid, tänu millele hiljem tõmbekatsetega välja selgitada, kuidas ühe või teise parameetri muutmine avaldab mõju katsekeha keevisliite tõmbetugevusele.

Loodi konkreetsete parameetrite muutumise järgi testkehade grupid. Järgiti, et tegevus oleks kooskõlas standartidega ja koostati selle tarbeks juhised. Võeti kasutusele tabel ja markeerimissüsteem, et testkehade grupp ja paiknemine oma grupis oleksid tagasiulatuvalt identifitseeritavad. Püstitati hüpoteesid tuginedes valdkonna teooriale ja varasematele uuringutele, mida erinevaid andmematerjale läbi töötades leiti.

Valmistati ekstruuderkeevitamise teel polüetüleenist testkehad ja veenduti ka ise selles, et mõningate tingimuste rikkumine ei too tingimata kaasa keevituse visuaalset muutust. Viidi läbi tõmbekatsed ja fikseeriti iga testkeha tõmbetugevus, mille abil koostati graafikud ja analüüsid vastu püstitatud hüpoteese.

Empiiriliselts leidsid kinnitust järgmised hüpoteesid:

- Kõik keevitatavate detailide servade ettevalmistuse etapid on vajalikud nõutava tugevusega keevise saamiseks.
- Kui keevitustsooni puhutav geevitusgaas ei ole piisava temperatuuriga, ei teki keevitatavatel detailidel piisava paksusega sulas olekus materjali kihti ning keevitus jääb mehaanilistelt omadustelt nõutule alla.
- Kui keevitusgaas on liiga kuum, tekib keevitustsoonis polüetüleenil lagunemine, mis mõjutab samuti keevituse mehaanilisi omadusi negatiivses suunas.
- Liialt madal ekstruuderil temperatuur põhjustab lisamaterjali jõudmist keevitustsooni liiga külmana ning mitte homogeenina, mis mõjutab samuti keevituse mehaanilisi omadusi negatiivses suunas.
- Liiga madal töökoja temperatuuri korral ei suuda enam kuum gaas keevitatavate detailide servi piisavas mahus sulatada ja nõuetele vastavat keevituse kvaliteeti tagada.
- Taaskasutatud sertifitseerimata polüetüleenil tõmbetugevus jääb alla värskelt toormest toodetud polüetüleenile.

Kinnitust ei leidnud hüpotees, kus liialt kõrge ekstruuderil temperatuur põhjustab lisamaterjali liigset voolavust, mis omakorda toob kaasa liiga madala rõhu keevitustsoonis. Lisamaterjal pidavat hakkama kõrgetel temperatuuridel oksüdeeruma või gaasimulle tekitama, mis pidi mõjutama keevituse mehaanilisi omadusi negatiivses suunas. Kogu katsegrupi keskmine tõmbetugevus oli 0,3MPa väiksem nominaalsetest tingimustest, mis näitas küll kergelt langevat trendi, aga tõenäoliselt ei olnud 50 kraadi kõrgem ekstruuderil temperatuur liialt kõrge hüpoteesi avaldumiseks.

Tähelepanuväärne oli veel, et mistahes tingimustes keevitatud polüetüleenil tõmbetugevus väljaspool keeviliidet ei olnud enam samaväärne, mis keevitamata polüetüleenil. Seda omakorda kinnitas kõrgete tõmbetugevuste väärtustega taaskasutatud sertifitseerimata testkehade grupp, mida keevitamise teel ei liidetud. Tõenäoliselt pärast ekstruuderkeevitust ehk materjaliosa sulamistemperatuurini jõudmist on toimunud sama olukord, mis metallidel, kus pärast kuumutamist väheneb kõvadus ja tugevus ning suureneb plastsus.

Kokkuvõtvalt on tegu väga hea materjaliga, mida paadiehituses kasutada, kuid tuleb olla hoolas õigete parameetrite seadmisel ja töövõtetel.

Võõrkeelne lühikokkuvõte - Short summary in English

An author named Janar Kiik wrote a thesis in Estonian on 53 pages the topic: „Investigation of mechanical properties of polyethylene welding joint in extrusion welding.“ Keywords: HDPE, polyethylene, polyethylene boat, extruder welding, test specimens, tensile tests, tensile strength, graphs. The thesis include 28 figures, 7 tables, 3 attachments and 30 references. The aim of this thesis was to explain the effect of welding parameters, edge preparation of welded parts and welding environment to weld quality. Attempts were made to find answers to the questions to what extent trastic changes in the quality of welding, i.e. the mechanical properties of the weld, are caused by the violation of one or another welding parameter.

To achieve the purpose it was examined which material is polyethylene, what its properties are and where it is used. The connections and history of the craft were searched and the best known polyethylene boat manufacturers were identified. The advantages of a polyethylene boat over alternative materials were highlighted. The mechanical construction and working principle of extruder welding were studied. The requirements were reviewed in order to obtain products by welding with high-quality joints and the risks of non-compliance were identified. Standards governing the design, manufacture and testing of polyethylene products were introduced.

The test methodology was developed and the nominal conditions for extruded polyethylene welding were investigated through the literature. It was decided to change them one by one in order to simulate possible deviations; due to which it was later determined by tensile tests how changing one or the other parameter affects the tensile strength of the welded joint of the test piece. Groups of test pieces were created according to changes in specific parameters. Compliance with the standards was followed and guidelines were developed. A table and marking system were used so that the group of test pieces and their location in their group could be identified retrospectively. Hypotheses were made based on the theory of the field and previous research found during the processing of various data materials.

Polyethylene test specimens were prepared by extrusion welding and it was also verified that non-compliance with some conditions did not necessarily lead to a visual change in the welding. Tensile tests were performed and the tensile strength of each test piece was recorded, graphs and analyzes were made against the hypotheses.

The following hypotheses were empirically confirmed:

- All stages of preparation of the edges of welded parts are necessary to obtain a weld of the required strength.
- If the welding gas blown into the welding zone is not at a sufficient temperature, the welded parts will not form a layer of molten material of sufficient thickness and the welding will be below the required mechanical properties.
- If the welding gas is too hot, polyethylene will decompose in the welding zone, which will also adversely affect the mechanical properties of the weld.
- Too low extruder temperature causes the additional material to reach the welding zone too cold and not homogeneous, which also affects the mechanical properties of the welding in a negative direction.
- If the workshop temperature is too low, hot gas is no longer able to melt the edges of the welded parts to a sufficient extent and ensure the required welding quality.
- The tensile strength of recycled non-certified polyethylene is lower than of polyethylene produced by raw materials.

The hypothesis which was not confirmed. Too high extruder temperature will cause the additive overflow, which in turn will result in too low a pressure in the welding zone. The additive material starts to oxidize or create gas bubbles at high temperatures, which also negatively affects the mechanical properties of the weld. The average tensile strength of the whole experimental group was 0.3 MPa lower than the nominal conditions, which showed a slight downward trend, but probably 50 degrees higher than nominal temperature was not enough to find confirmation to this hypothesis.

It was also remarkable that the tensile strength of the polyethylene welded under any conditions outside the welded joint was no longer equivalent to that of the non-welded polyethylene. This in turn was confirmed by a group of re-used non-certified test specimens with high tensile strength values that were not joined by welding. Likely after extrusion welding, i.e. when the melting temperature of the material part has reached, the same situation has been achieved as for metals when after heating the hardness and strength decrease and the plasticity increases.

In conclusion polyethylene is a very good material to use in boat building but attention must be taken in setting the right parameters and techniques.

Viidatud allikad

- [1] Freedonia Group, „World Polyethylene,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.freedoniagroup.com/industry-study/world-polyethylene-3210.htm>. [Kasutatud 7 veebruar 2021].
- [2] Eesti Füüsika Selts, „Polüetüleen,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://opik.fyysika.ee/index.php/book/section/2359>. [Kasutatud 7 veebruar 2021].
- [3] Omnexus The material selection platform, „Polyethylene (PE),“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-plastic>. [Kasutatud 7 veebruar 2021].
- [4] Priit Kulu, Jakob Kübarsepp, Andres Laansoo, Renno Veinthal, MATERJALITEHNIKA II Konstruktsioonimaterjalide tehnoloogia, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2015.
- [5] Tideman Boats, TIDEMAN BOATS BV, [Võrgumaterjal]. Available: <https://tidemanboats.com/hdpe-the-new-plastic-10-reasons-to-choose-a-hdpe-workboat/>. [Kasutatud 13 mai 2021].
- [6] Geo-matching, „DutchWorkboats B.V.,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://geo-matching.com/dutchworkboats-b-v>. [Kasutatud 13 mai 2021].
- [7] Linked in, „Rhino Marine Products (Pty) Ltd,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://za.linkedin.com/company/rhino-marine-products-pty-ltd>. [Kasutatud 13 mai 2021].
- [8] Arctic Boats, Arctic Airboats Oy, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.arcticboats.fi/>. [Kasutatud 13 mai 2021].
- [9] TS Marine, OÜ TS Marine, [Võrgumaterjal]. Available: <https://tsmarine.ee/>. [Kasutatud 13 mai 2021].
- [10] DGS Defense Corp., „DGS Monster,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.dgsmonster.com/>. [Kasutatud 13 mai 2021].
- [11] D. Grewell, *Plastics and Composites Welding Handbook*, Hanser Gardener, 2003.
- [12] Leister, „Extrusion Welders,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.leister.com/en/Extrusion-Welders#t=coveo50653d1d&layout=card>. [Kasutatud 6 märts 2021].

- [13] The Engineering ToolBox, „Temperature Expansion Coefficients for some common Piping Materials,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/pipes-temperature-expansion-coefficients-d_48.html. [Kasutatud 7 veebruar 2021].
- [14] C. U. The Welding Institute, Handbook of Plastics Joining, Elsevier Inc. All, 2008.
- [15] ГОСТ P 56155-2014, *СВАРКА ТЕРМОПЛАСТОВ*, 2016.
- [16] EVS-EN 12573-1:2001, „Welded static non-pressurised thermoplastic tanks - Part 1: General principles,“ 1 märts 2001. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12573-1-2001>.
- [17] EVS-EN 12573-3:2000, „Welded static non-pressurised thermoplastic tanks - Part 3: Design and calculation for single skin rectangular tanks,“ 1 oktoober 2000. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12573-3-2000>.
- [18] EVS-EN 1778:2000, „Characteristic values for welded thermoplastic constructions - Determination of allowable stresses and moduli for design of thermoplastic equipment,“ 15 veebruar 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-1778-2000>.
- [19] EVS-EN 14728:2019, „Imperfections in thermoplastic welds - Classification,“ 1 märts 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-14728-2019>.
- [20] EVS-EN 13100-1:2017, „Non destructive testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 1: Visual examination,“ 2 juuni 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-13100-1-2017>.
- [21] EVS-EN 12814-1:2000, „Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 1: Bend test,“ 1 aprill 2000. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12814-1-2000>.
- [22] EVS-EN 12814-4:2018/AC:2018, „Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 4: Peel test,“ 1 august 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12814-4-2018-ac-2018>.
- [23] EVS-EN 13705:2004, „Welding of thermoplastics - Machines and equipment for hot gas welding (including extrusion welding),“ 8 november 2004. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-13705-2004>.
- [24] CEN/TS 16892:2015, „Plastics - Welding of thermoplastics - Specification of welding procedures,“ 5 jaanuar 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/cen-ts-16892-2015>.

- [25] EVS-EN 13067:2020, „Plastics welding personnel - Qualification of welders - Thermoplastics welded assemblies,“ 15 september 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-13067-2020>.
- [26] CEN/TR 16862:2015, „Plastics welding supervisor - Task, responsibilities, knowledge, skills and competence,“ 8 juuli 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/ca323676-29b7-406e-82a8-c6130634062f/cen-tr-16862-2015>.
- [27] Mathias Alzerreca, Michael Paris, Olivier Boyron, Dominique Orditz, Guy Louarn, Olivier Correc, „Mechanical properties and molecular structures of virgin,“ 2015.
- [28] O. Balkan, H. Demirer, H. Yildirim, „Morphological and mechanical properties of hot gas welded PE, PP and PVC sheets,“ 2008.
- [29] P. Michel, „An analysis of the extrusion welding process,“ 1989.
- [30] Lesite Plastics Welding Technology, „Plastic Extrusion Welder,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.lesiteweld.com/PlasticExtrusionWelder/>. [Kasutatud 6 märts 2021].
- [31] Priit Kulu, Jakob Kübarsepp, Andres Laansoo, Renno Veinthal, MATERJALITEHNIKA I Tehnomaterjalid, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2015.
- [32] U. Muiste, „Materjaliõpetus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://opiobjektid.tptlive.ee/Materjaliopetus/tmbeteim.html>. [Kasutatud 24 mai 2021].
- [33] EVS-EN 12814-2:2021, „Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products - Part 2: Tensile test,“ 15 veebruar 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12814-2-2021>.
- [34] Instron, „5900 Series Universal Testing Systems,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/universal-testing-systems/low-force-universal-testing-systems/5900-series-universal-testing-systems-up-to-50-kn>. [Kasutatud 19 märts 2021].
- [35] Proplastik, „Polüetüleen,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://proplastik.ee/toostusplast/poluetuleen/>. [Kasutatud 7 veebruar 2021].

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 2. PE-1000 omadused [35]

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

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 3. PE-500 omadused [35]

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

HDPE; PE-HD

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

Kasutatakse konteinerite valmistamiseks, aparaadiehituses ja kanalisatsioonimahutiteks.

Tabel 4. HDPE, PE-HD omadused [35]

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

PE-HWST

Füsioloogiliselt aktsepteeritav. Põhiliselt kasutatakse toiduainetööstuses.

Tabel 5. PE-HWST omadused [35]

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

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 6. PE-1000R omadused [35]

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

Lisa 2. Katsekehade tõmbekatsete tabel

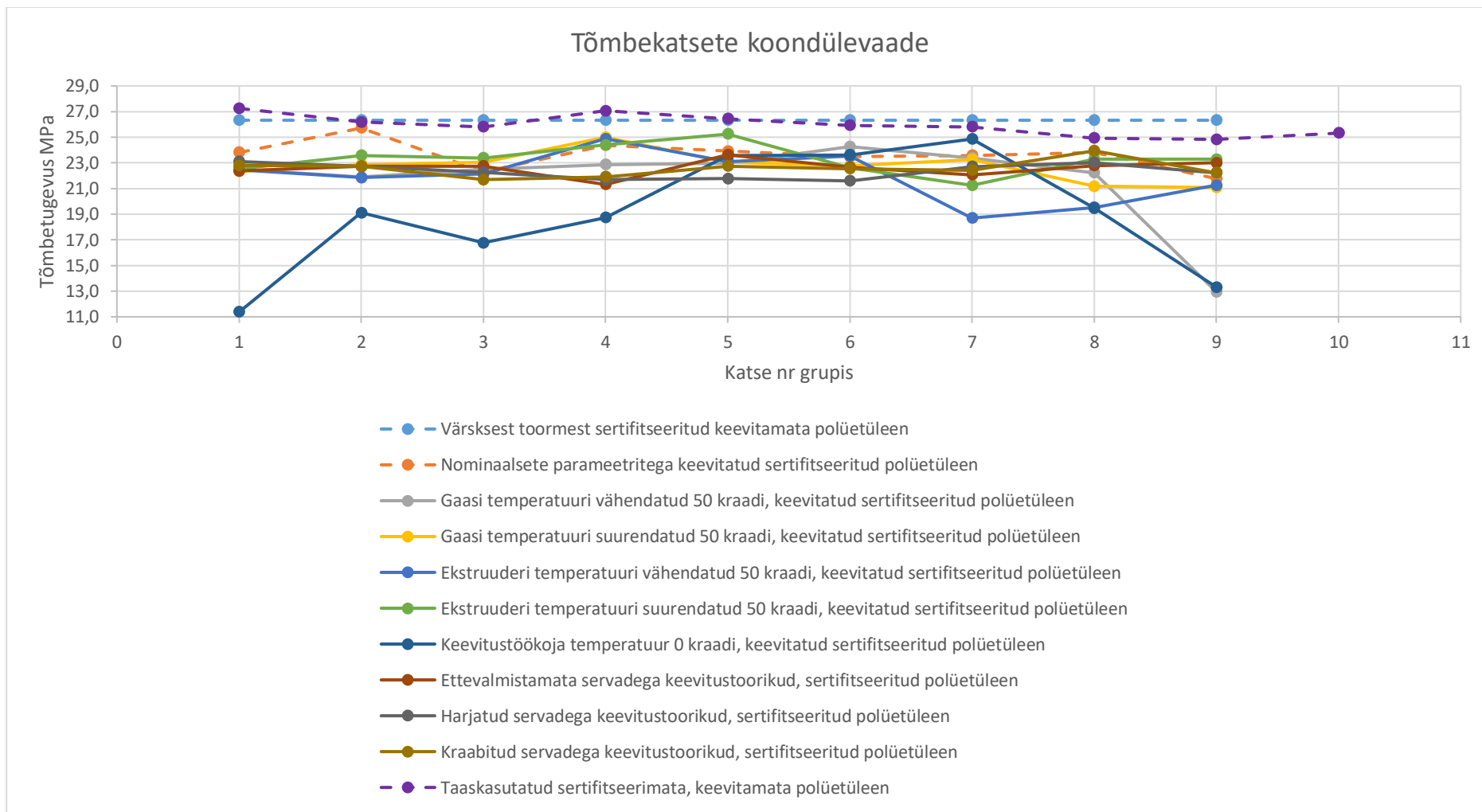
Tabel 7. Katsekehade tõmbekatsete tabel

Katsekeha ID	Katse nr	A (mm)	B (mm)	Tõmbepinge N	Katkemine materjalist (0 = ei, 1 = jah)	Tõmbetugevus MPa
1.2.1	5	21,0	11,0	5500	1	23,8
1.2.2	6	21,0	10,0	5400	1	25,7
1.2.3	7	22,0	11,0	5400	1	22,3
1.2.4	8	21,1	10,5	5400	1	24,4
1.2.5	9	21,3	10,6	5400	1	23,9
1.2.6	10	21,7	10,6	5400	1	23,5
1.2.7	11	21,2	10,8	5400	1	23,6
1.2.8	12	21,0	10,0	5000	0	23,8
1.2.9	13	21,0	10,5	4800	0	21,8
2.1	14	21,2	10,9	5200	1	22,5
2.2	15	21,6	11,0	5200	0	21,9
2.3	16	21,2	11,0	5250	1	22,5
2.4	17	21,1	11,4	5500	1	22,9
2.5	18	20,8	11,3	5400	0	23,0
2.6	19	20,8	10,7	5400	0	24,3
2.7	20	22,0	10,5	5400	0	23,4
2.8	21	20,5	11,3	5150	0	22,2
2.9	22	21,3	10,7	2950	0	12,9
3.1	23	20,8	11,3	5250	1	22,3
3.2	24	20,3	11,1	5150	0	22,9
3.3	25	20,5	11,0	5200	1	23,1
3.4	26	20,8	10,1	5250	1	25,0
3.5	27	20,7	11,0	5250	1	23,1
3.6	28	20,2	11,3	5200	1	22,8
3.7	29	20,7	10,9	5250	1	23,3
3.8	30	20,4	11,0	4750	0	21,2
3.9	31	20,9	10,9	4800	0	21,1
5.1	32	20,3	11,4	5200	0	22,5
5.2	33	20,2	11,9	5250	1	21,8
5.3	34	20,3	21,8	5300	1	12,0
5.4	35	20,1	10,6	5300	1	24,9
5.5	36	20,3	11,2	5250	1	23,1

Katsekeha ID	Katse nr	A (mm)	B (mm)	Tõmbepinge N	Katkemine materjalist (0 = ei, 1 = jah)	Tõmbetugevus MPa
5.6	37	20,3	11,1	5300	1	23,5
5.7	38	20,3	11,2	4250	0	18,7
5.8	39	20,3	10,6	4200	0	19,5
5.9	40	20,5	10,9	4750	0	21,3
6.1	41	21,2	11,1	5300	1	22,5
6.2	42	21,0	10,6	5250	1	23,6
6.3	43	20,8	10,8	5250	1	23,4
6.4	44	20,3	10,5	5200	1	24,4
6.5	45	20,2	10,2	5200	1	25,2
6.6	46	21,3	11,0	5300	1	22,6
6.7	47	20,7	10,8	4750	0	21,2
6.8	48	20,3	11,0	5200	0	23,3
6.9	49	20,5	10,9	5200	1	23,3
7.1	50	20,6	11,1	2600	0	11,4
7.2	51	20,3	11,6	4500	0	19,1
7.3	52	20,6	11,0	3800	0	16,8
7.4	53	20,5	11,2	4300	0	18,7
7.5	54	21,2	11,0	5500	1	23,6
7.6	55	20,4	11,0	5300	0	23,6
7.7	56	20,3	10,9	5500	1	24,9
7.8	57	20,6	11,1	4450	0	19,5
7.9	58	20,5	11,0	3000	0	13,3
9.1	59	20,6	11,4	5250	1	22,4
9.2	60	20,8	11,0	5200	0	22,7
9.3	61	20,8	11,1	5250	1	22,7
9.4	62	20,5	11,1	4850	0	21,3
9.5	63	20,0	10,9	5150	0	23,6
9.6	64	20,3	11,1	5100	0	22,6
9.7	65	20,8	11,0	5050	0	22,1
9.8	66	20,9	10,5	5000	0	22,8
9.9	67	20,1	10,6	4900	0	23,0
10.1	68	20,9	11,6	5600	1	23,1
10.2	69	21,0	10,9	5200	0	22,7
10.3	70	21,3	11,6	5500	0	22,3
10.4	71	21,1	11,8	5400	0	21,7
10.5	72	20,8	11,7	5300	0	21,8
10.6	73	21,0	11,8	5350	0	21,6
10.7	74	21,0	10,7	5100	0	22,7
10.8	75	21,1	10,6	5150	0	23,0

Katsekeha ID	Katse nr	A (mm)	B (mm)	Tõmbepinge N	Katkemine materjalist (0 = ei, 1 = jah)	Tõmbetugevus MPa
10.9	76	19,0	11,6	4900	0	22,2
11.1	77	20,8	11,6	5500	0	22,8
11.2	78	20,7	11,8	5550	1	22,7
11.3	79	20,6	11,3	5050	0	21,7
11.4	80	21,2	11,3	5250	0	21,9
11.5	81	20,6	11,1	5200	0	22,7
11.6	82	21,0	11,2	5300	0	22,5
11.7	83	21,1	11,1	5250	0	22,4
11.8	84	20,7	11,1	5500	1	23,9
11.9	85	20,6	11,9	5450	1	22,2
16	118	20,1	10,5	5750	1	27,2
16	119	20,6	10,2	5500	1	26,2
16	120	20,7	10,3	5500	1	25,8
16	121	20,3	10,2	5600	1	27,0
16	122	20,4	10,2	5500	1	26,4
16	123	20,6	10,3	5500	1	25,9
16	124	20,5	10,4	5500	1	25,8
16	125	21,0	10,6	5550	1	24,9
16	126	20,9	10,6	5500	1	24,8
16	127	20,5	10,5	5450	1	25,3

Lisa 3. Tõmbekatsete koondülevaade graafiliselt



Joonis 28. Tõmbekatsete koondülevaade

Lisa 4. Lihtlitsents

rektori 07.04.2020 käskkirjale nr 1-8/17

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Janar Kiik

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

Polüetüleen keevisliidete mehaaniliste omaduste uurimine ekstruuderkeevitamisel,

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)

¹ 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 loomingulise 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.