

Opinnäytetyö (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

2026

Sara Uusitalo

Kierrätysmuovit lisäävän valmistuksen raaka-aineena huoltovarmuuden tueksi

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Bio- ja kemiantekniikka

2026 | 58 sivua, 25 liitesivua

Sara Uusitalo

Kierrätysmuovit lisäävän valmistuksen raaka-aineena huoltovarmuuden tueksi

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia polyeteenin prosessointia 3D-tulostettavaksi filamentiksi huoltovarmuuden tueksi. Lisäävän valmistuksen kehittyminen on tuonut mahdollisuuksia tuoda tuotanto lähemmäksi käyttäjiä ja lisännyt joustavuutta tuotantoketjuihin. Tuotantoketjun varmistaminen on huoltovarmuuden kannalta keskeinen tekijä, sillä se mahdollistaa yhteiskunnan toiminnan ja ihmisten arjen jatkuvuuden myös häiriötilanteissa. Lisäävällä valmistuksella voidaan paikata tuotantoketjun heikkoja kohtia ja tuottaa kriittisiä osia perinteisen tuotannon tueksi.

Teoriaosassa perehdyttiin siihen, miten lisäävää valmistusta voidaan hyödyntää huoltovarmuuden parantamiseksi. Kokeellisessa osassa polyeteenistä valmistettiin filamenttia ekstruuderilla, ja sen halkaisijaa arvioitiin tasaisuuden ja laadun perusteella. Itse valmistetusta filamentista tulostetuista testisauvoista tutkittiin taipusominaisuuksia ja tulostettavuutta, joita verrattiin kaupallisen filamentin tuloksiin. Lisäksi filamenteista tulostettiin nielunäytepuikkoja konkreettisiksi esimerkeiksi huoltovarmuudesta. Filamentin halkaisija oli epätasainen ja liian ohut, mikä vaikutti tulostettavuuteen. Filamentin taipusominaisuudet vastasivat polyeteenin kirjallisuusarvoja, mutta tulostettavuus oli heikkoa erityisesti tarttuvuuden, kutistumisen ja vääntymisen vuoksi.

Tutkimus osoitti, että polyeteeni ei ole optimaalinen materiaali filamentin valmistukseen tai 3D-tulostukseen. Prosessi on sinänsä toimiva, mutta sen käyttöönotto huoltovarmuuden tueksi on aikaa vievää. Prosessin eri vaiheet on optimoitava materiaalin ominaisuuksien, käyttötarkoituksen, tulostettavan kappaleen ja materiaalikierron näkökulmasta. Jatkossa tulisi testata muitakin hylkymuovimateriaaleja sekä kartoittaa tulostettavaksi sopivia huoltovarmuutta parantavia osia.

Asiasanat:

3D-tulostus, huoltovarmuus, kiertotalous, HDPE, filamentti

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Biotechnology and Chemical Engineering

2026 | 58 pages, 25 appendix pages

Sara Uusitalo

Recycled plastics as raw material for additive manufacturing to support supply security

The objective of the thesis was to examine the processing of polyethylene into 3D printable filaments to support security of supply. The development of additive manufacturing has furthered the possibilities of bringing manufacturing closer to consumers and increasing supply chain resilience. Ensuring the production chain is a key factor for the national security of supply, as it enables the continued functioning of society and the continuity of people's everyday lives even in disruptive situations. Additive manufacturing can be used to address weak points in the production chain and produce critical parts in support of traditional manufacturing.

The theoretical section examined how additive manufacturing can be utilized to improve security of supply. In the experimental section, filament was produced from polyethylene using an extruder, and its diameter was evaluated based on uniformity and quality. The flexural properties and printability test bars printed from the self-produced filament were examined and compared with the results of commercial filament. In addition, throat swabs were printed from the filaments as a concrete example of security of supply. The diameter of the filament was uneven and too thin, which affected printability. The flexural properties of the filament corresponded to the literature values for polyethylene, but its printability was poor, especially due to adhesion issues, shrinkage, and warping.

The study showed that polyethylene is not an optimal material for manufacturing filaments or for 3D printing. The process itself is functional, but its implementation in support of security of supply is time-consuming. The various stages of the process must be optimized from the perspective of material properties, intended use, the printed part, and material circulation. In the future, other waste plastic materials should also be tested, and components suitable for 3D printing that improve security of supply should be identified.

Keywords:

3D printing, security of supply, circular economy, HDPE, filament

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	8
2 Huoltovarmuus	10
2.1 Lisäävä valmistus	10
2.1.1 Huoltovarmuus tuotannossa	14
2.1.2 Humanitaarinen apu	16
2.2 Lisäävän valmistuksen vaikutus tuotantoketjuun	17
2.3 Standardit lisäävässä valmistuksessa	19
2.4 Kiertotalous materiaalin saatavuuden varmistamisessa	20
3 Polyeteeni huoltovarmuuden raaka-aineena	22
3.1 Ominaisuudet ja käyttökohteet	23
3.2 Kierrätys	24
3.2.1 Filamentin valmistus	25
3.3 Lisäävä valmistus HDPE-filamentilla	27
4 Filamentin valmistus	29
4.1 Filament Maker 2	29
4.2 Materiaalin hankinta ja käsittely	31
4.3 Filamentin tuotanto	32
5 Lisäävä valmistus	37
5.1 Funmat HT -tulostin	37
5.2 Kappaleen CAD-malli	38
5.3 Kappaleen tulostaminen	39
5.4 Taivutuslujuustesti	43
6 Tulosten tarkastelua	46
6.1 Filamentit	46
6.2 Tulostetut kappaleet	48
6.3 Taivutuslujuustesti	49

7 Yhteenveto	51
8 Lähdeluettelo	54

Liitteet

Liite 1. Taivutuslujuustestitulokset ja näytteiden mitat	
Liite 2. Filament Maker 2 ekstruusion tulokset jäykkyysasetus 4	
Liite 3. Filament Maker 2 ekstruusion tulokset jäykkyysasetus 1	
Liite 3. Filament Maker 2 ekstruusion tulokset jäykkyysasetus 3	

Kuvat

Kuva 1 FDM-menetelmällä tulostus Funmat HT -tulostimella.	12
Kuva 2 Muovin molekyyliketjujen rakenteen kiteinen alue ja amorfinen (epäjärjestäytynyt) alue (3Devo, 2024).	27
Kuva 3 Tuulettimien aiheuttama filamentin muodonmuutos (3Devo, 2026).	27
Kuva 4 Filament Maker 2 -laitteen kokoonpano (3Devo, 2026).	30
Kuva 5 Filament Maker 2 käyttöönotto PLA:lla.	31
Kuva 6 Intamsys Funmat HT 3D-tulostin (Intamsys, ei pvm.).	38
Kuva 7 Testisauvan CAD-malli Intamsuite Neo -ohjelmistossa.....	38
Kuva 8 Nielunnäytepuikko CAD-malli Intamsuite Neo -ohjelmistossa.....	39
Kuva 9 Kaupallisella (sininen) ja itse valmistetulla (valkoinen) filamentilla tulostetut testisauvat.	41
Kuva 10 Kaupallisesta filamentista tulostetut nielunäytepuikot (sininen) ja itse valmistetusta filamentista tulostetut nielunäytepuikot (valkoinen).	42
Kuva 11 Kolmipistetaitavutus standardin ISO 178 mukaan (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2019).	43

Kuviot

Kuvio 1 3D-tulostusmenetelmien käytön suosio osien valmistuksessa (HUBS, 2023).....	13
Kuvio 2 3D-tulostuksen käyttökohteet (HUBS, 2023).....	13
Kuvio 3 Muovin kierrätysprosessi.....	24
Kuvio 4 HDPE-filamentin halkaisija, kun kiristinjäykkyyssasetus on 4.	33
Kuvio 5 HDPE-filamentin halkaisija, kun kiristinjäykkyyssasetus on 1.	34
Kuvio 6 HDPE-filamentin halkaisija, kun kiristinjäykkyyssasetus on 3.	35
Kuvio 7 HDPE-filamenttien halkaisijoiden keskiarvot.	35
Kuvio 8 Kaupallisella ja itse valmistetulla filamentilla tulostettujen testisauvojen taivutusjännitys.	44
Kuvio 9 Kaupallisella ja itse valmistetulla filamentilla tulostettujen testisauvojen taivutuskerroin.....	45

Taulukot

Taulukko 1 HDPE:n eri alojen käyttökohteet (Laird plastics, 2025).	23
Taulukko 2 HDPE:n ekstruusioajon prosessiparametrit.	32
Taulukko 3 Kaupallisen ja itse valmistetun filamentista valmistettujen testisauvojen tulostusparametrit.	40
Taulukko 4 Kaupallisen ja itse valmistetun filamentin nielunäytepuikkojen tulostusparametrit.	41

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

3D-tulostus	Kolmiulotteinen tulostus, lisäävä valmistus
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer-aided design)
DMLS	Metallien jauhepetisulatus (direct metal laser sintering), 3D-tulostustekniikka (Ahert, 2019)
FAME	Finnish Additive Manufacturing Ecosystem, suomalainen lisäävän valmistuksen teollisuusekosysteemi
FDM	Materiaalin pursotusmenetelmä (fused deposition modeling), 3D-tulostustekniikka (Ahert, 2019)
FTIR	Fourier-transform infrared spectroscopy, kemiallinen analyysimenetelmä
HDPE	Suuritiheyspolyeteeni (High density polyethylene)
MJF	jauhepetisulatus (MJF, multi jet fusion), 3D-tulostustekniikka (Ahert, 2019)
PLA	Polylaktidi (Polylactic acid)
PE	Polyeteeni (Polyethylene)
PETG	Polyeteenitereftalaattiglykoli (Polyethylene terephthalate glycol-modified)
SLS	Jauhepetisulatus (selective laser sintering), 3D-tulostustekniikka (Ahert, 2019)
SLA	Valokovetusallasmenetelmä (stereolithography), 3D-tulostustekniikka (Ahert, 2019)
TGA	Termogravimetrinen analyysi, kemiallinen analyysimenetelmä

1 Johdanto

Tuotantoketjut ovat nykyisin vahvasti kansainvälisesti yhteen kytkeytyneitä, minkä takia mahdollisiin häiriötilanteisiin on tärkeää varautua. Häiriötila voi syntyä esimerkiksi pienestä logistiikkaongelmasta, sodan aiheuttamasta epävarmuudesta tai pandemiasta, mikä keskeyttää tuotannon laajasti. Lisäävällä valmistuksella tuotanto voidaan tuoda lähemmäs ja tehdä siitä joustavampaa. COVID-19-pandemian aikana terveysalalla ilmeni puutteita suojaus- ja lääketieteen välineistä, kun tarvikkeita ei voitu tuottamaan tai kuljettamaan ulkomailta. Osa tarvikkeista pystyttiin kuitenkin tuottamaan paikallisesti 3D-tulostamalla (Salmi ym., 2020). Neitseellisen muovin valmistusta pyritään vähentämään sen ekologisten ja ympäristövaikutusten vuoksi. Jotta valmistusta voidaan vähentää, muovin kierrätys ja uudelleenkäyttö tuotantoketjussa on välttämättömiä. Kierrätetyn muovin valmistaminen filamentiksi on yksi tapa saada muovi tehokkaasti uudelleenkäyttöön.

Polyeteeni on yksi maailman yleisimmistä muoveista, joten sen saatavuus kierrätykseen olisi korkea myös kriisitilanteissa. HDPE:tä käytetään laajasti sen hyvien mekaanisten ja kemiallisten ominaisuuksien vuoksi. Filamenttia voidaan valmistaa ekstruuderilla (Shiferaw ym. 2023). Toisaalta HDPE:n ominaisuudet tekevät siitä haastavaa 3D-tulostusmateriaalina, minkä vuoksi sitä käytetään tulostuksessa harvemmin. Filamentista voidaan valmistaa teollisessa tuotannossa tai humanitaarisen avun yhteydessä 3D-tulostettavia tuotteita tai lisäosia (Ketola, 2025). Jotta tällainen prosessi voisi toteutua, on arvioitava lisäävän valmistuksen soveltuvuutta huoltovarmuuskäyttöön ja sen vaikutusta huoltovarmuuteen.

Opinnäytetyö sisältää teorialarkastelun lisäävän valmistuksen roolista huoltovarmuudessa ja polyeteenin kierrätyksestä raaka-aineeksi 3D-tulostukseen. Työn tavoitteena on valmistaa HDPE-filamenttia 3D-tulostusta varten. Filamentista tulostetaan testisauvoja ja huoltovarmuuden tukena nielunäytepuikkoja. Tulostetuilla testisauvoilla suoritetaan taivutuslujuustesti, ja tuloksia verrataan kaupalliseen filamenttiin. Saatujen tulosten ja

kirjallisuustiedon perusteella arvioidaan prosessin soveltuvuutta huoltovarmuuden tukemiseen.

2 Huoltovarmuus

Huoltovarmuus tarkoittaa varautumista kriiseihin ja häiriötilanteisiin, joissa turvataan toimintoja, jotka pyörittävät yhteiskuntaa turvallisella tavalla.

Huoltovarmuutta toteutetaan yhteistyössä yksityisellä, julkisella ja kolmannella sektorilla. Varautuminen keskittyy kriittisiin palveluihin ja tuotantoihin.

Huoltovarmuuden painopisteet vaihtelevat eri maiden tarpeiden ja erityispiirteiden mukaan. Suomessa erityispiirteitä ovat kylmä ilmasto, syrjäinen sijainti, merikuljetukset, energiantensiivinen talousrakenne ja pitkät kuljetusetäisyydet. Huoltovarmuus rakentuu toimialakohtaisesti, joilla on omat tehtävät ja vastualueet. Esimerkiksi energiahuollon tehtävänä on varmistaa energian saatavuus, varautua energiamarkkinoiden muutoksiin ja osallistua huoltovarmuuteen liittyviin päätöksentekoihin. Suomen huoltovarmuudesta vastaa Huoltovarmuuskeskus, joka toimii työ- ja elinkeinoministeriön hallinnonalalla (Huoltovarmuus, 2026).

Huoltovarmuudessa lisäävässä valmistuksessa tarkastellaan, miten lisäävää valmistusta voidaan hyödyntää varautumisessa kriiseihin ja häiriötilanteisiin. Lisäävällä valmistuksella on mahdollista vähentää tuotantoketjuissa ilmeneviä häiriöitä, kun paikallinen valmistus pienentää etäisyyksistä aiheutuvia riskejä ja logistisia ongelmia (Naghshineh ja Carvalho, 2021, s.1–2). Lisäävä valmistus lisää tuotannon joustavuutta ja parantaa tuotannon jatkuvuutta tuotantoketjujen haasteista huolimatta. Valmistus on nopeaa, eikä se vaadi pitkiä odotusaikoja tai suuria varastointikustannuksia (Ketola, 2025).

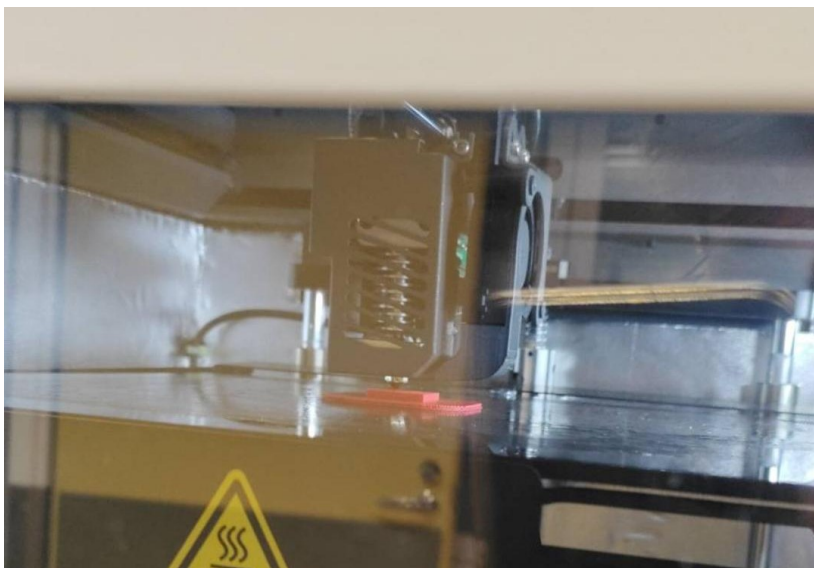
2.1 Lisäävä valmistus

Lisäävä valmistus tarkoittaa valmistusmenetelmää, jossa materiaalia lisätään kerros kerrokselta kappaleeseen tietokoneohjelman ohjauksen kautta.

Lisäävässä valmistuksessa on erilaisia valmistusmenetelmiä ja -tekniikoita, jotka vaikuttavat siihen, miten materiaali muodostuu. Tämä puolestaan

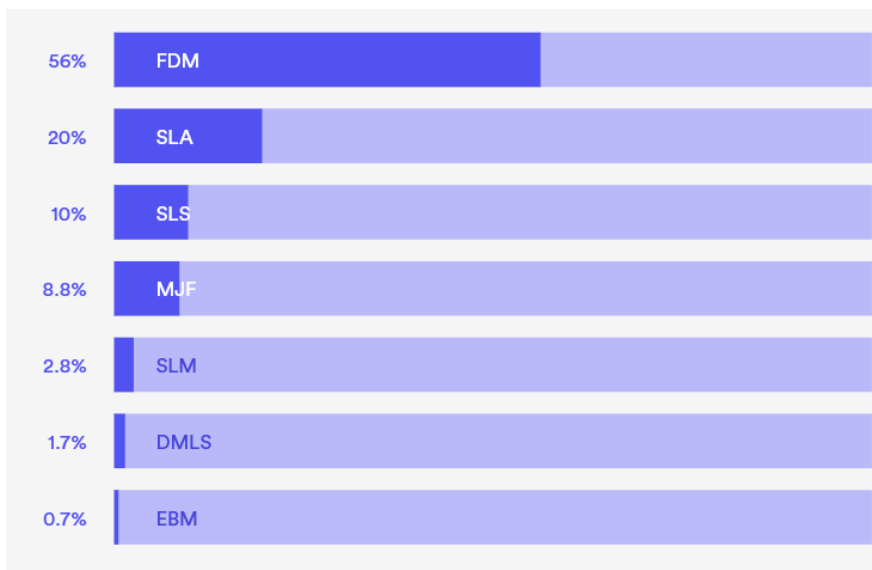
vaikuttaa materiaalin valintaan, pinnan laatuun, mekaanisiin ominaisuuksiin, valmistuksen nopeuteen ja kustannuksiin (Ahert, 2019).

Materiaalin pursotusmenetelmä (FDM, fused deposition modeling tai fused filament modeling) sulattaa muovifilamentin ekstruuderissa ja pursottaa muovin tulostuspinnalle kerros kerrokselta (Kuva 1). Menetelmä on halpa ja nopea. Se soveltuu hyvin prototyyppien valmistukseen. Tulostuksen pinnan laatu on usein karhea, mikä voi vähentää käyttömahdollisuuksia. Valokovetusallasmenetelmä (SLA, stereolithography) kovettaa nestemäisen valokovettuvan hartsin UV-laserin avulla. Tekniikka edellyttää tukirakenteita kappaleen valmistuksessa. Kappaleen pinta on sileä ja mittaustarkkuus on korkea, minkä vuoksi menetelmää käytetään lääketieteessä. Jauhepetisulatuksessa (SLS, selective laser sintering) laser sulattaa nylonpohjaisia jauheita kiinteiksi kappaleiksi. Tuotteet ovat kestäviä ja soveltuvat hyvin toiminnalliseen testaukseen ja tuotannon osiksi. Tekniikka ei edellytä tukia tulostukseen. Toisessa jauhepetisulatusmenetelmässä (MJF, multi jet fusion) sidosaineet levitetään nylonpohjaiseen jauheeseen mustesuihkutekniikan avulla. Jokainen kerros lämmitetään, jotta kerrokset sitoutuvat toisiinsa. Mekaaniset ominaisuudet ovat tasaisempia SLS-menetelmään verrattuna. Myös pinnan laatu on hyvä ja tulostus on nopeaa. Metallien jauhepetisulatuksessa (DMLS, direct metal laser sintering) laser sulattaa metallijauheen kerros kerrokseltaan. Se mahdollistaa moniosaisista metallikokoonpanoista luopumisen valmistamalla yksiosaisia tai onttoja rakenteita. Menetelmää käytetään prototyyppien ja tuotannon valmistuksessa, esimerkiksi lääketeollisuudessa (Ahert, 2019).



Kuva 1 FDM-menetelmällä tulostus Funmat HT -tulostimella.

FDM, SLA, SLS ja MJF ovat suosituimpia muovin 3D-tulostusmenetelmiä, joista FDM on suosituin. DMLS on suosituin metallien tulostuksessa (Kuvio 1). Prototyypit ja käyttötarkoitukset ovat lisäävän valmistuksen yleisimpiä käyttökohteita (Kuvio 2). Prototyyppien tulostus nopeuttaa tuotteen kehittelyä. Lisäävä valmistus soveltuu pienivolyymiseen tuotantoon, sillä se ei vaadi muotteja eikä suuria varastoja, toisin kuin monet perinteiset valmistusmenetelmät. Lisäävää valmistusta käytetään erityisesti avaruus-, auto- ja lääketeollisuudessa. Avaruusteollisuudessa lisäävää valmistusta hyödynnetään pienten tuotantovolyymien ja kevyiden rakenteiden valmistuksessa ja mallien vapaassa räätälöinnissä. Autoteollisuudessa lisäävää valmistusta käytetään prototyypeissä, työkaluissa, räätälöinnissä, varaosissa ja sarjatuotannossa. Lääketeollisuudessa lisäävää valmistusta käytetään implanttien ja proteesien valmistuksessa, kirurgisissa ohjureissa, instrumenteissa, anatomisissa malleissa ja hammashoitotuotteissa (HUBS, 2023, s. 9–14).



Kuvio 1 3D-tulostusmenetelmien käytön suosio osien valmistuksessa (HUBS, 2023).



Kuvio 2 3D-tulostuksen käyttökohteet (HUBS, 2023).

Lisäävän valmistuksen immateriaalioikeuksiin ja tietoturvaan liittyy erityisiä haasteita, sillä suuri osa tuotannosta perustuu digitaalisiin ratkaisuihin, kuten CAD-malleihin ja datan hallintaan. Tämä on merkittävä riski erityisesti aloille, kuten avaruusteollisuudelle, joissa immateriaalioikeuksien suojaaminen on

kriittisen tärkeää. Mallitiedostot, prosessointidata ja verkotetut 3D-tulostimet ovat alttiita tietoturvariskeille ja mahdolliselle hyväksikäytölle. Tietojen vuotaminen tai luvaton muokkaaminen voi johtaa mallien varastamiseen sekä laaturiskeihin, mikä saattaa lisätä yritysten epäröintiä tuotannon laajentamisessa tai ulkoistamisessa (Authentise, 2025).

FAME (Finnish Additive Manufacturing Ecosystem) on suomalainen teollisuusekosysteemi, joka edistää lisäävän valmistuksen roolia Suomessa ja tukee yrityksiä käyttämään lisäävää valmistusta tehokkaasti liiketoiminnan kannalta. FAME:ssa yritykset ja organisaatiot tekevät yhteistyötä lisäävän valmistuksen kehittämiseksi ja tutkimuksien edistämiseksi. FAME:n jäseniin kuuluvat mm. Wärtsilä, Vilpe ja Puolustusvoimat. Lisäksi useat korkeakoulut kuuluvat FAME:n tutkimusorganisaatioihin, kuten Turku AMK ja Aalto-yliopisto (Fame, 2025).

2.1.1 Huoltovarmuus tuotannossa

Tuotannossa huoltovarmuus keskittyy kriittiseen teollisuustuotantoon, rakentamiseen ja materiaalien saatavuuteen. Huoltovarmuuden varmistamiseksi koko tuotantoketjua tulee tarkastella kokonaisuutena ja varmistaa palvelujen toimivuus häiriötilanteissa. Tärkeimpänä tehtävänä tuotannossa on kriittisten hyödykkeiden ja palvelujen tuotanto. Teollisuusyrityksillä ei ole lakisääteistä velvoitetta varmistaa tuotantoa häiriötilanteissa, joten niihin varautuminen on omaehtoista ja perustuu sopimukseen muiden yritysten kanssa. Osilla sektoreilla on kuitenkin lakisääteinen velvoite, esimerkiksi lääketeollisuudessa on laki lääkkeiden velvoitevarastoinnista (979/2008), jonka tarkoituksena on lääkkeiden saatavuuden varmistus kriisitilanteissa. Tuotannon jatkuvuus kaikissa tilanteissa on keskeistä yhteiskunnan hyvinvoinnin kannalta. Huoltovarmuuden ylläpitämisessä korostuvat jatkuva kehittäminen, varautuminen ja suunnittelu. Jotta kriittistä tuotantoa voidaan ylläpitää, raaka-aineiden varastoinnin ja kierron on oltava vakiintuneita. Lisäävällä valmistuksella voidaan tuottaa kriittisiä hyödykkeitä ja palveluja lähellä käyttökohdetta, mikä vähentää häiriötilanteiden

vaikutuksen tuotantoon. Lisäävään valmistukseen tarvittavat materiaalit ovat helposti varastoitavissa, koska ne ovat tyypillisesti filamentin tai jauheen muodossa (Huoltovarmuuskeskus, 2026).

Lisäävällä valmistuksella voidaan lisätä tuotantoketjun joustavuutta, sietokykyä ja ohjattavuutta häiriötilanteita vastaan. Lisäävällä valmistuksella on myös vaikutus itse tuotantoon, sillä työkalujen ja muottien tarve vähenee, tuotteiden malleja voidaan räätälöidä joustavasti ja pienivolyymisten tai matalan kysynnän tuotteiden valmistus on kustannustehokasta. Lisäävällä valmistuksella ei voida eikä tule korvata kaikkea, vaan se täydentää valmistusta muun tuotannon ohella. Jotta osa tai tuote voidaan tulostaa, sen on oltava tulostettavuuden kannalta sopiva. Sopivuudelle ei ole yksiselitteistä määritelmää, vaan käyttöönottoon vaikuttavat useat tekijät, kuten kustannus, viimeistelyn laatu, koulutus, käyttöoikeudet ja tarpeellisuus (Foshammer ym, 2022, s. 1–2).

Foshammer ym. (2022) tutkivat puolustusalan koneenosien soveltuvuutta 3D-tulostukseen. Tutkimuksessa käytettiin kahta lähestymistapaa: asiantuntija- ja käyttäjähaastatteluja sekä algoritmipohjaista analyysia, jossa osien tulostettavuutta arvioitiin kodifioidun datan ja kirjallisuuden perusteella. Algoritmin mukaan panssarilevyn olisi teknisesti parhaiten tulostettava osa, mutta sen korkea hinta heikensi sen soveltuvuutta. Algoritmin tuloksista parhaaksi vaihtoehdoksi valittiin jarrupoljin, joka on kriittinen osa ja altis vahingolle. Lisäksi jarrupoljin soveltuu useisiin eri ajoneuvoihin, mikä lisää sen käyttöpotentiaalia. Käyttäjäkokeuksiin perustuvassa tarkastelussa suurimmaksi potentiaaliksi tunnistettiin elektroniikan suojakotelot. Elektroniikan jatkuva kehittyminen edellyttää suojakotelojen säännöllistä uusimista, minkä seurauksena eri muotoisia kuoria tarvitaan jatkuvasti. Myös kuorien kiinnitystavat saattavat muuttua sen mukaan, mihin varusteeseen ne liitetään. Tutkimus ehdottaa, että algoritmipohjainen menetelmä soveltuu paremmin tulostettavien huolto-osien etsimiseen ja haastattelupohjainen menetelmä tukee osien uudelleenmallintamista ja käyttäjälähtöistä kehittymistä (s. 2–11).

2.1.2 Humanitaarinen apu

Huoltovarmuudella ei aina pystytä estämään häiriötilanteiden kaikkia vaikutuksia, varsinkin, kun häiriötilanne on valtionlaajuinen kriisi, joka ei vaikuta ainoastaan tuotantoketjuun. Luonnonkatastrofeja tapahtuu yhä enemmän ilmastonmuutoksen takia, minkä vuoksi asianmukainen varautuminen on entistä tärkeämpää. Toimiva infrastruktuuri, kuten tiet, pelastuspalvelut ja varoitusjärjestelmät, helpottaa pelastusoperaatioiden toteuttamista ja evakuoointeja. Lisäksi kansalaisten kouluttaminen evakuointisuunnitelmiin ja kriisitilanteissa toimimiseen on keskeistä. Varautuminen voi sisältää kohtaamispaikojen ennakkosuunnittelua ja myrskysuojien rakentamista. Tehokkaalla sadon ja maan hallintamekanismilla voidaan osaltaan ehkäistä kuivuuden aiheuttamaa ruuantuotannon alijäämää (Holmes, 2024).

Ulkopuolisia toimenpiteitä tarvitaan silti, jotta normaali elämä voi jatkua kriisitilanteissa. Ongelmana ulkopuolisessa avussa on avun nopeus ja tarvikkeiden kuljettaminen. Tukilaitoksien varastoista avustustarvikkeet kuljetetaan katastrofialueille. Mitä lähempänä nämä varastot sijaitsevat, sitä tehokkaampi apu on. Tukilaitoksien on varauduttava etukäteen varastoimalla monenlaisia tarvikkeita, sillä kriisit voivat olla keskenään erilaisia. Tästä huolimatta varastojen sisältö ei aina vastaa todellista tarvetta. Lisäävän valmistuksen tuominen näihin tukilaitoksiin saattaa helpottaa tätä ongelmaa. Lisäävä valmistus tuo samanlaisia etuja humanitaariseen apuun kuin teollisuustuotannon huoltovarmuuteen. Lisäävällä valmistuksella voidaan valmistaa monipuolisia tarvikkeita, kuten työkaluja, varusteita ja suojia. Tulostuksia voidaan räätälöidä tarpeen mukaan. 3D-tulostusasemat vaativat merkittävästi vähemmän tilaa käyttöön ja varastointiin kuin perinteiset tukilaitosvarastot. Kriisin tapahtuessa tarvikkeiden tarve tunnistetaan, jolloin tulostusasemat voivat aloittaa tuotannon. Jotta tämä olisi mahdollista, tulostusasemien sijainnit on valittava siten, että ne ovat riittävän lähellä, mutta samalla turvallisella etäisyydellä itse katastrofeista. Materiaalit tulee jakaa asemille ennakkoon suunnitelmien mukaan. 3D-tulostukseen liittyvät tuotanto-

ja kuljetussuunnitelmat mahdollistavat resurssien tehokkaan toimittamisen katastrofialueille (Sun ym, 2025, s. 1–3).

Kansalaishuoltovarmuus voi tulla kyseeseen, kun valtion järjestämä huoltovarmuus ei ole riittävä. Tällöin paikallis- ja internettiyhteisöt toimivat yhdessä ongelmien ratkaisemiseksi. Tämä saattaa olla mahdollista 3D-tulostuksen avulla, sillä 3D-tulostimien yksityishankinta ja käyttö ovat yleistyneet. Lisäksi tulostimia on saatavilla yhteiskäytössä esimerkiksi kirjastoissa tai kouluissa. Kun valmistus tapahtuu paikallisesti katastrofialueilla, reagointinopeus saattaa olla nopeampaa kuin muut ratkaisut. Toisaalta tulostuksen sijainti liian lähellä katastrofipaikkaa tuo omat ongelmat, jos tarvikkeiden kuljettaminen ei ole mahdollista tai turvallista. Paikallinen valmistus ei myöskään poista muun ulkopuolisen avun tarvetta, vaan se toimii ulkopuolisen avun täydentävänä ratkaisuna. Tulostettavia malleja voidaan jakaa netissä globaalisti, jotta kuka tahansa voi osallistua avun tuottamiseen. Tämä edellyttää riittävää koulutusta ja avoimia oppimateriaaleja laitteistojen ja materiaalien käytöstä. Poliittinen ja yhteiskunnallinen tuki on keskeistä, jotta kansalaishuoltovarmuutta tukevia hankkeita voidaan rahoittaa ja kehittää (Ketola, 2025). Covid-19:n aikana erilaisia suojaustarvikkeita, kuten visiirejä ja muita tärkeitä lääketieteen tarvikkeita, 3D-tulostettiin, kun tuonti ulkomailta ei ollut enää mahdollista. 3D-tulostus toimi ratkaisuna tarvikkeiden puutteeseen ja auttoi suojaamaan lääkäreiden ja potilaiden henkiä (Agarwal, 2022, s. 1-3).

2.2 Lisäävän valmistuksen vaikutus tuotantoketjuun

Peron ym. (2025) tutkivat, miten lisäävä valmistus vaikuttaa tuotantoketjun ominaisuuksiin ja heikkouksiin. Tutkimus toteutettiin perehtymällä kirjallisuuteen ja keräämällä asiantuntijoiden lausuntoja. Lisäävän valmistuksen vaikutukset voivat olla positiivisia tai negatiivisia, ja ne kohdistuvat eri tekijöihin eri voimakkuudella. Tutkimuksen mukaan lisäävällä valmistuksella on merkittävä positiivinen vaikutus sopeutumiskykyyn, tehokkuuteen ja kytkeytymiskykyyn. Sen sijaan vaikutukset olivat selvästi negatiivisia hankinnan joustavuuteen ja riippuvuuteen erikoislähteistä. Molemmat negatiiviset vaikutukset liittyvät raaka-

ainehankinnan rajoittumiseen 3D-tulostukseen soveltuviin erikoismateriaaleihin. Asiantuntijoiden mielipiteet vaihtelivat osin vaikutuksien voimakkuudesta, mikä selittyy asiantuntijoiden erilaisilla taustoilla ja toimintaympäristöillä. Eri toimialoilla raaka-aineiden saatavuus vaihtelee, mikä vaikutti suoraan asiantuntijoiden näkemyksiin hankinnan joustavuuden ja resurssien rajallisuuden vaikutusten voimakkuudesta. Tutkimus korostaa, että negatiivisiin vaikutuksiin on pyrittävä vastaamaan tarkoituksenmukaisilla ratkaisuilla. Korjaustoimenpiteet vaihtelevat pienistä ja halvoista toimenpiteistä laajempiin ja kalliimpiin investointeihin vaikutuksen laajuuden mukaan. Esimerkkinä ratkaisuista mainitaan ICT-järjestelmien kehittäminen, tietokantojen laajentaminen, uusien teknologioiden hankinta sekä työntekijöiden ja korkeakoulujen lisäävän valmistuksen koulutuksen vahvistaminen (s. 9–18).

Corsini ym. (2022) tutkivat, miten lisäävä valmistus vaikuttaa humanitaarisen avun tuotantoketjuun. Tutkimuksessa tarkasteltiin, nopeuttaako ja parantaako 3D-tulostusasemien käyttö humanitaarisen avun toteuttamista. Tutkimuksessa havaittiin, että mitä lähempänä avun käyttäjiä 3D-tulostus tapahtui, sitä paremmin tulostustoiminta vastasi käyttäjien todellisia tarpeita ja vähemmän tietoa väärentyi. Paikallinen valmistus tehostaisi logistiikkaa, mutta se tuo haasteita raaka-aineiden saatavuuteen ja infrastruktuuriin liittyen. Hyödyn määrä riippuu myös siitä, mitä tulostetaan, sillä eri tilanteet edellyttävät erilaisia ratkaisuja. Vaikka tuotanto on paikallinen, raaka-aineet joudutaan usein hankkimaan ulkopuolelta, mikä voi aiheuttaa ongelmia. Jotta järjestelmä voisi toimia itsenäisesti paikallisella tasolla, raaka-ainekierto ja kiertotalous on oltava riittävän kehittynyt. Lisäävä valmistus tuo etuja humanitaarisen avun verkostoihin, hallintoon, prosesseihin ja tuotteisiin, mutta sen käyttöönotto on erittäin haasteellista tuotantoketjulle. Lisäävä valmistus ei voi itse kokonaan korvata muita humanitaarisia avun menetelmiä, vaan se toimii niiden täydentävänä ratkaisuna yksinkertaistamalla jo valmiina olevaa tuotantoketjua (s. 8–10).

2.3 Standardit lisäävässä valmistuksessa

Standardissa (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021) käsitellään lisäävään valmistukseen liittyvää termistöä ja yleisperiaatteita. Lisäävän valmistuksen prosessit jaetaan seitsemään eri kategoriaan: sideaineen suihkutetus, suorakerrostus, pursotus, materiaalin ruiskutus, jauhepetisulatus, laminointi ja valokovetus altaassa (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2015).

Standardissa (SFS-EN ISO/ASTM 52927:2024) käsitellään lisäävällä valmistusprosessilla tuotettujen osien testaukseen sovellettavia vaatimuksia. Standardilla tunnistetaan raaka-aineiden ja valmistettujen osien laatuominaisuudet ja näitä vastaavat testausmenetelmät. Testikappaleiden 3D-tulostamiseen määritellään tarkat prosessit. Standardia voivat hyödyntää 3D-tulostimien valmistajat, raaka-aineiden ja varaosien toimittajat ja kaikki lisäävää valmistusta käyttävät toimijat. Valmistetut osat testataan eri osa-alueilla, kuten pinnan ja muodon laatu, mekaaniset vaatimukset, rakennevaatimukset, fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet, metallurginen analyysi ja sietokyky (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2024).

Jotta lisäävällä valmistuksella voidaan valmistaa käyttötarkoitussosia, tuotannon ja tuotteiden laatu edellyttää standardisointia. Standardit auttavat insinöörejä viitearvoilla ja lisäävät luottamusta siihen, että valmistusprosessit täyttävät asetetut laatuvaatimukset. Koska lisäävällä valmistuksella voi tuottaa hyvin erilaisia tuotteita, yritysten ja organisaatioiden on usein laadittava omat standardit. Valmiita standardeja on kuitenkin olemassa, ja niiden soveltuvuus riippuu käytettävästä materiaalista, valmistusmenetelmästä ja käyttökohteesta (Stratasys Direct, 2018). Esimerkiksi ISO/IEC 3532-1:2023 määrittelee vaatimukset lääketieteellisen kuvapohjaisen mallinnuksen 3D-tulostusta varten lääketieteellisissä sovelluksissa (ISO, 2023). Ennen kuin 3D-tulostettuja tuotteita tai osia voidaan hyödyntää huoltovarmuuden tukena, niiden tuotanto pitää standardisoida. Tuotteiden ja osien on toimittava luotettavasti käyttötarkoituksessaan, sillä virheellisesti toimivat osat voivat kriisitilanteissa aiheuttaa enemmän haittaa kuin hyötyä. Tämä korostuu erityisesti

odottamattomissa kriisitilanteissa, joissa tuotteille ei ole ollut aikaa tehdä laajoja lisätestauksia tai korjauksia.

2.4 Kiertotalous materiaalin saatavuuden varmistamisessa

Kiertotalouden tavoitteena on saada tuotanto ja kulutus maan kantokyvyn rajoihin. Kiertotalouden tärkeä piirre on uusitumattomien luonnonvarojen käytön vähentäminen, kuten neitseellisen muovin valmistamisen ja käytön vähentäminen. Tämän takia muovin kierrätys organisaatioiden, yrityksien ja valtioiden sisällä on tärkeää, jotta resurssit voidaan turvata myös tulevaisuudessa (Ympäristöministeriö, ei pvm.). Tärkeänä kiertotaloudessa pidetään materiaalin uudelleenkäyttöä, mutta tällä hetkellä vain 9 % materiaalivirroista käytetään useammin kuin kerran (Levä, ei pvm.). Kiertotalous on yksi keskeisistä osista huoltovarmuutta. Tuotannon jatkuvuuden kannalta on tärkeää ylläpitää raaka-aineiden varmuusvarastoja (Huoltovarmuuskeskus, 2026). Jotta varastot voidaan pitää riittävinä ilman ulkoista apua, materiaalien on voitava kiertää talouden sisällä jatkuvasti.

Erityisesti materiaalit, joiden hankinnan saatavuus voi muuttua, kuten harvinaiset maametallit, ovat huoltovarmuuden kannalta kriittisiä. Harvinaisten maametallien käyttö on välttämätöntä teknologisissa sovelluksissa, mutta vain 1 % maametallia käytettävistä tuotteista saadaan kierrätettyä, ja loput päätyvät jätteeksi. Näitä maametalleja käytetään öljynjalostamoissa, kameralinsseissä, autojen akuissa, ydinreaktoreissa, kiintolevyasemissa, magneeteissa, röntgenlaitteissa ja monessa muussa kriittisessä käyttökohteessa. Jos harvinaisten maametallien saatavuus heikkenisi merkittävästi, tuotanto näille käyttökohteille vaarantuisi tai jopa pysähtyisi kokonaan. Harvinaisten maametallien kierrättäminen on halvempaa kuin niiden louhiminen. Japanissa toimii kierrätyslaitoksia, joissa elektroniikasta erotetaan ja hyödynnetään harvinaisia maametalleja (Great Magtech electric, 2022).

Syntypaikkalajittelu tarkoittaa jätteiden lajittelua jo niiden syntypaikalla. Se on erityisen tärkeää yrityksille, jotka tuottavat suuria määriä jätettä, sillä lajittelu voi

merkittävästi alentaa kustannuksia. Rakennusmailla jätteen lajittelu saattaa tuottaa jopa 30–40 %:n kustannussäästöjä verrattuna tilanteeseen, jossa jäte kerätään lajittelemattomana. Kun materiaalit lajitellaan oikein, niiden kierrätys on helpompaa, ja ne voidaan ohjata takaisin kiertoon uusien tuotteiden raaka-aineiksi (L&T, ei pvm).

Teollisuudessa syntyvä muovijäte voidaan syntypaikkalajittelun avulla ohjata joko takaisin tuotannon omaan kiertoon tai muualle uusien tuotteiden raaka-aineeksi. Eri muovilaatujen erillinen lajittelu on olennainen osa syntypaikkalajittelussa, sillä se varmistaa materiaalin puhtauden ja laadukkaan jatkokäsittelyn. Hylkymuovista voidaan muodostaa itseään ruokkiva kierto, jossa materiaali palautuu takaisin tuotantoon. Tällainen toimintamalli parantaa materiaalin saatavuuden ja yrityksen sisäistä huoltovarmuutta. Syntypaikkalajittelun avulla voidaan lisätä uusiutumattomien materiaalien hyödyntämistä valmistustuotannossa (Vainio, 2019).

3 Polyeteeni huoltovarmuuden raaka-aineena

PE eli polyeteeni on eniten käytetty muovilaji maailmanlaajuisesti. Polyeteeni jaetaan tiheyden ja molekyyliarakenteen mukaan. HDPE on suuritiheyksistä polyeteeniä, jota usein kuvaillaan kovaksi, kestäväksi ja joustavaksi. (Muoviteollisuus RY, 2026). HDPE:tä käytetään yleisesti elintarvikepakkauksissa, koska sillä on hyvät kosteuden- ja höyrynvastustusominaisuudet ja se on kemiallisesti reagoimaton. Lisäksi HDPE sopii putkien ja lelujen materiaaliksi hyvän UV-, isku- ja säänkestävyytensä ansiosta (The plastic bottles company, ei pvm.).

HDPE:n kemiallinen kaava on yksinkertainen $(C_2H_4)_n$. HDPE:n valmistus tapahtuu matalassa lämpötilassa. Etyleeni (CH_2) polymerisoidaan katalyytin, kuten kromioksidin avulla, jolloin etyleenin kaksoissidos katkeaa ja vapautuva sidos sitoutuu viereiseen hiiliatomiin muodostaen pitkän polymeeriketjun. HDPE:n ketjussa ei ole haarautumisia, minkä ansiosta ketjut pystyvät pakkautumaan tiiviisti muodostaen korkean tiheyden (Britannica, 2026). HDPE:n tiheys on noin $0.94\text{--}0.97\text{ g/cm}^3$ ja sen kiteisyys on korkea. HDPE:tä yleensä jalostetaan ekstruusiolla, puhallusmuovauksella, rotaatiovalulla ja ruiskuvalulla. Ruiskuvalun ansiosta HDPE:tä voidaan valmistaa suurissa määrin erä- ja jatkuvatuotannossa. Hyvien ominaisuuksien vuoksi HDPE on laajasti käytetty materiaali valmistavassa teollisuudessa (Special Chem, 2026).

Laajan käytön vuoksi HDPE:n saatavuus on korkea ja sen käyttömahdollisuudet ovat monipuoliset. Tämän vuoksi HDPE:n kierrätys on keskeisessä roolissa huoltovarmuuden näkökulmasta. Kun HDPE:n saatavuus voidaan turvata myös kotimaisen kierrätyksen ja materiaalikierron avulla, tuotannon jatkuvuus on vähemmän riippuvainen ulkoisista toimitusketjuista ja häiriötilanteiden vaikutukset vähenevät.

3.1 Ominaisuudet ja käyttökohteet

Polymeeriketjujen tiivis pakkautuminen on yksi syy siihen, miksi HDPE:llä on hyvät mekaaniset ominaisuudet ja korkea kemiallinen kestävyys. HDPE kestää hyvin erilaisia vahvoja happoja ja emäksiä, alkoholeja ja glykoleja, suolaliuoksia ja siivousaineita. Sen sijaan aromaattiset hiilivedyt, klooratut liuokset, vahvat hapettavat hapot, ketonit ja esterit (orgaaniset polaariset liuokset) ja UV-säteily voivat aiheuttaa materiaalin hajoamista, murtumista ja turpoamista. Mekaanisiin vahvuuksiin kuuluvat hyvä lujuus-painosuhte, kestävyys, ympäristörasituksen kestävyys, iskulujuus ja vetolujuus. HDPE:n ominaisuuksia ja käsittelyä voidaan parantaa lisäaineilla. Yleisiä lisäaineita ovat antioksidantit, UV-stabilointiaineet, käsittelyn apuaineet ja väriaineet (Laird Plastics, 2025).

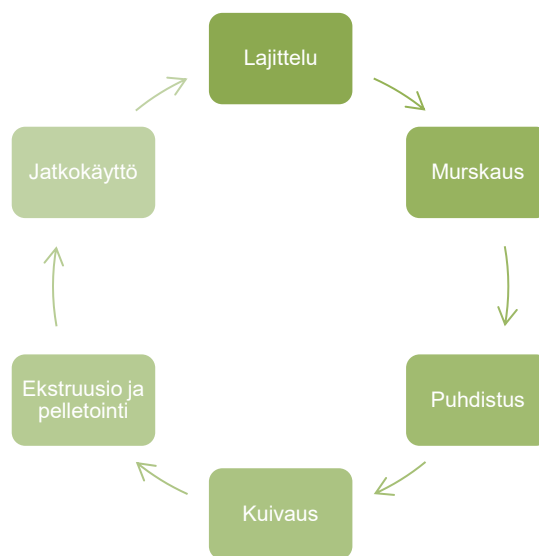
Aiemmin HDPE:n valmistuskustannukset olivat alhaiset, mutta viime aikoina geopoliittiset konfliktit ovat nostaneet HDPE:n hintaa raakaöljyn heikentyneen saatavuuden seurauksena (Business analytiq, 2026). HDPE tuotteiden valmistus on suhteellisen yksinkertaista, eikä materiaali vaadi laajaa käsittelyä. HDPE:stä voidaan valmistaa tuotteita monella eri tekniikalla, kuten ruiskuvalamalla, puhallusmuovauksella, rotaatiovalulla ja levyekstruusiolla. HDPE:tä käytetään monella eri teollisuusosalalla sen monipuolisuuden takia (Taulukko 1). (Laird Plastics, 2025.)

Taulukko 1 HDPE:n eri alojen käyttökohteet (Laird plastics, 2025).

	Pakkausala	Rakennusala	Teollisuusala	Kuluttaja-tuotteet
Käyttö-kohde	Ruokapakkaus, IBC-kuljetussäiliö, sulkimet	Putkistot (vesi, kaasu, kemikaali) Geokalvo, sähköjohdot putket	Materiaalin kuljetus, autojen osat, johtojen suojaus, kemikaalien prosessointi-tarvikkeet	Lelut, urheilutavarat, ulkokuonekalut, kotitarvikkeet

3.2 Kierrätys

Raakaöljyn saatavuuden heikentyessä HDPE:n kierrätyksen merkitys kasvaa entisestään. HDPE ei ole biohajoavaa, mutta se on kierrätettävää muovia. HDPE:n kierrätysprosessi (Kuvio 3) alkaa kotitalouksissa tapahtuvasta lajittelusta, minkä jälkeen muovi viedään kierrätyspisteille. HDPE erotellaan muusta muovijätteestä infrapunateknologian avulla. Muovi murskataan hiutaleiksi ja pestään epäpuhtauksista. Puhdistusvaiheessa hiutaleita lajitellaan vielä tiheyden perusteella kellutuspesualltaissa. Hiutaleet kuivataan keskipakovoimakuvureissa kuumalla ilmalla, sillä kosteus haittaa ekstruusioprosessia. Hiutaleet syötetään ekstruusioon, jossa materiaali sulatetaan ja pelletoidaan. Pellettien laatu tarkastetaan mittaamalla sulavirtaindeksi (MFI) ja testaamalla tiheys, kosteus ja epäpuhtaudet. Pelletit lähetetään tuotevalmistajille jatkokäyttöä varten (Energycycle, 2025). HDPE on helppo lajitella tiheyteen perustuvien menetelmien avulla ja se kykenee säilyttämään mekaaniset ominaisuudet useiden kierrätyskertojen jälkeen. Laajan käyttönsä takia HDPE:n kierrätykselle on tarvetta ja materiaali soveltuu hyvin olemassa oleviin kierrätysinfrastruktuureihin (Laird plastics, 2025).



Kuvio 3 Muovin kierrätysprosessi.

Kierrätettyä HDPE:tä ei usein käytetä elintarvikepakkauksissa kontaminaatoriskin vuoksi, mutta siitä valmistetaan mm. pulloja pesuaineille ja moottoriöljyille. Lisäksi kierrätetystä HDPE:stä valmistetaan putkia ja muovisia huonekaluja. Kierrätetyn HDPE:n ominaisuudet ovat hyvin samanlaiset kuin neitseellisellä HDPE:llä (Shmasuyeva ja Zander, 2025). Merkittävimpiä eroja ovat heikompi UV-stabiilisuus, jota voidaan parantaa lisäaineilla, sekä se, että kierrätetty HDPE on harvoin elintarvikelaatuista. Mekaaniset ominaisuudet heikkenevät tyypillisesti 5–15 % jokaisen kierrätyskerran myötä. (Laird plastics, 2025). Kierrätetyn HDPE:n valmistus on kuitenkin kustannustehokkaampaa kuin neitseellisen HDPE:n valmistus, koska kierrätetty HDPE kuluttaa vähemmän energiaa (The plastic bottles company, ei pvm.).

Kierrätettyyn HDPE:hen saatetaan lisätä lisäaineita materiaalin ominaisuuksien parantamiseksi. Kierrätysmateriaalin joukkoon voidaan sekoittaa neitseellistä HDPE:tä, jotta ominaisuudet olisivat yleisesti paremmat. Stabilointiaineita käytetään muovin lämpöhistorian mukaan ja käyttöiän pidentämiseksi. Iskumuuttajat parantavat matalan lämmön suorituskykyä. Usein kierrätetyn HDPE:n väri on epätasainen, minkä vuoksi väriaineilla voidaan saavuttaa tasainen ja haluttu väri. Käsittelyaineet parantavat muovin prosessoitavuutta esimerkiksi vähentämällä prosessiin tarvittavaa energiamäärää (Laird Plastics, 2025).

3.2.1 Filamentin valmistus

Filamentin valmistusta tapahtuu ekstruuderilla, jossa muovi sulatetaan ja pursotetaan ruuvien avulla ulos suuttimesta pitkäksi filamentiksi. Filamentti jäähdytetään, minkä jälkeen vetomekanismi vetää filamentin tietyllä nopeudella, joka määräytyy halutun lopullisen halkaisijan mukaan. Yleinen 3D-tulostuksessa käytettävän filamentin halkaisija on 1,75 mm. Jotta filamentista tulee tasalaatuista ja mittatarkkaa, on tärkeää, että lämpötila, paine ja ekstruusion nopeus ovat hallinnassa (Shiferaw ym, 2023, s. 1–2). Filamentin halkaisijan tarkkuuteen vaikuttavat myös laitteen tekniset ratkaisut. Tasainen filamentti saavutetaan usein laserantureilla, jotka ovat yhdistetty automaattiseen

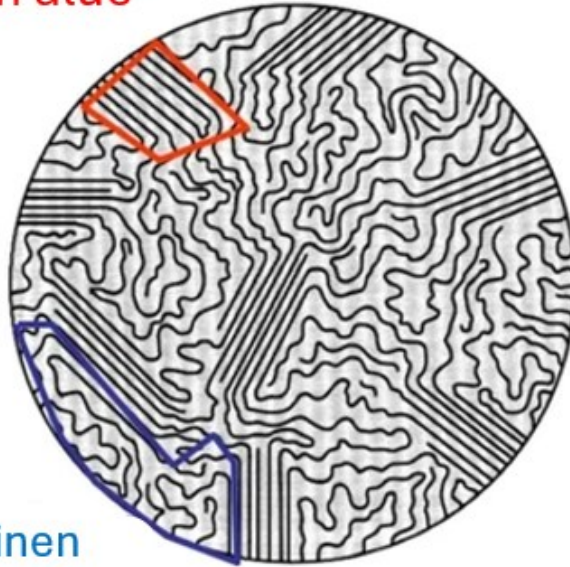
ohjausjärjestelmään. Filamentin valmistuksessa käytetään lisäaineita tulostettavuuden parantamiseksi, mutta niillä voi olla myös haittavaikutuksia. Esimerkiksi kuituvahvisteet voivat lisätä tulostimen suuttimen kulumista tai plastisointiaineet lisäävät epätarkkuutta lasittumislämpötilan muuttuessa (O'Neill, 2025.)

Shiferaw ym. (2023) rakensivat filamenttiekstruuderin, jolla valmistettiin filamenttia kierrätetystä HDPE:stä. Ekstruuderin kaikki komponentit olivat samassa linjassa, mikä vähensi filamentin tarpeetonta mutkailua ja paransi prosessin hallittavuutta. Tutkimuksessa filamentin valmistuksen parhaiksi parametreiksi määritettiin ekstruuderin lämpötilaksi 220 °C, ruuvin nopeudeksi 30 rpm ja vetomekanismin nopeudeksi 5 rpm. Tulosten perusteella neitseellisen ja kierrätetyn filamentin vetolujuusominaisuuksissa ei havaittu merkittävää eroa, jolla olisi vaikutusta 3D-tulostuksessa. FTIR-spektrissä kierrätetyn filamentin piikit vastasivat neitseellisen filamentin piikkejä, mutta kierrätetyn filamentin spektrissä havaittiin lisäksi pieniä ylimääräisiä piikkejä, jotka johtuivat epäpuhtauksista. Kierrätetyn filamentin TGA-tulokset olivat verrattavissa neitseellisen filamentin lämpöstabilisuuteen (s. 11–13).

HDPE-pelletit kuivataan noin 60 °C:ssa, jotta mahdollinen kosteus saadaan poistettua. Ekstruusioprosessin lämpötila on 180–220 °C (Shiferaw ym, 2023, s.1–2). Muut laiteparametrit, kuten ekstruuderin ruuvin, vetomekanismin ja kelausnopeus, ovat laitekohtaisia, ja optimaaliset asetukset voivat vaihdella käytetyn laitteiston mukaan.

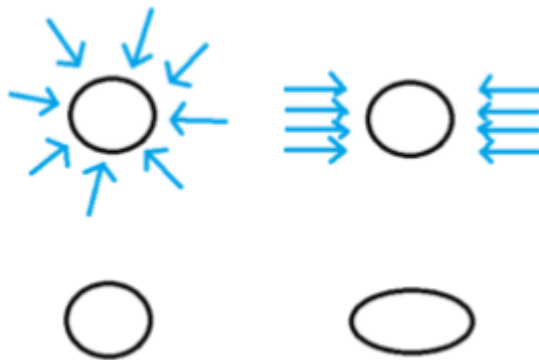
HDPE on erittäin kiteistä muovia, mikä aiheuttaa ongelmia filamentin valmistuksessa ja 3D-tulostuksessa (Kuva 2). Suuttimesta pursuava HDPE on täysin sulassa tilassa, mutta jäähtyessään HDPE kiteytyy nopeasti ja kutistuu enemmän kuin vähemmän kiteiset muovit. Filamentin jäähtyminen on kriittinen vaihe filamentin tasaisuuden ja laadun kannalta. Tuulettimia ei tule osoittaa suoraan HDPE-filamenttia kohti, sillä silloin filamentti ei jäähdy tasaisesti, mikä aiheuttaa filamentin eri osien erisuuruisen kutistumisen (Kuva 3). HDPE-filamentin onnistunut valmistus edellyttää riittävän hitaan jäähtymisen, ettei filamentin kelaus tai muut vaiheet venytä filamenttia (3Devo, 2026).

Kiteinen alue



Amorfinen
alue

Kuva 2 Muovin molekyyliketjujen rakenteen kiteinen alue ja amorfinen (epäjärjestäytynyt) alue (3Devo, 2024).



Kuva 3 Tuulettimien aiheuttama filamentin muodonmuutos (3Devo, 2026).

3.3 Lisävä valmistus HDPE-filamentilla

Lisävässä valmistuksessa HDPE:tä käytetään prototyyppien valmistukseen sen kestävyuden vuoksi. Lisäksi HDPE:stä voidaan 3D-tulostaa esimerkiksi astioita, putkien osia ja muita tuotteita, joita valmistetaan perinteisesti muilla

valmistusmenetelmillä (3Devo, 2024). Vaikka HDPE:llä on hyviä ominaisuuksia, sitä ei käytetä usein 3D-tulostuksessa. Muihin tulostusmateriaaleihin verrattuna HDPE:tä ei ole helppo tulostaa, eikä HDPE-filamentti ole laajasti kaupallisessa tuotannossa. Ominaisuuksiltaan PETG on hyvin samanlainen, mutta se on merkittävästi helpompi tulostaa, joten PETG on suositumpi materiaali 3D-tulostuksessa (O'Neill, 2022.)

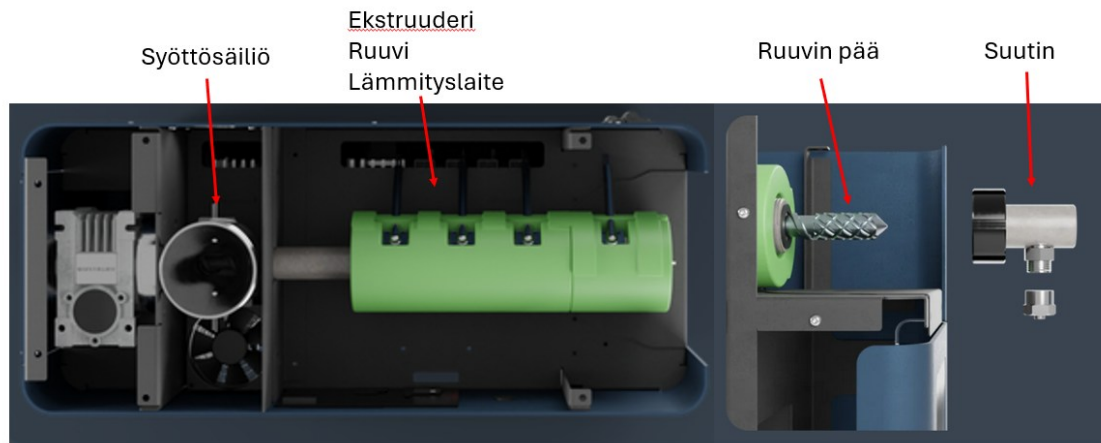
HDPE:n jäähtyessä esiintyvä käyristyminen ja kutistuminen voivat aiheuttaa ongelmia 3D-tulostuksessa, mikä heikentää tulostuksen mittatarkkuutta. HDPE:n tulostaminen edellyttää oikeiden lämpötilojen käyttöä, ja lämmitettävä tulostusalusta on erittäin tärkeä. Tulostimen kammiolämmitys hidastaa HDPE:n jäähtymistä, minkä pitäisi helpottaa HDPE:n käyristymistä ja kutistumista. Lisäksi HDPE:llä on heikko tarttuvuus tulostusalustaan, mikä voi johtaa kappaleen irtoamiseen tulostuksen aikana. Tulostusalustalle voidaan käyttää liimaa ja kappaleelle voidaan lisätä reunusrakenne (brim), mitkä parantavat kiinnittymistä alustaan. HDPE:tä tulostetaan tyypillisesti 230–260 °C suutinlämpötilalla ja tulostusalustan lämpötila on 100–130 °C (O'Neill, 2022.)

4 Filamentin valmistus

Filamenttia valmistettiin Filament Maker 2 -ekstruuderilla HDPE-pelleteistä. Filamentin laatua ja tasaisuutta seurattiin laitteen anturien mittaustuloksien avulla. Mittausdatan perusteella valittiin ekstruusiolle parhaat mahdolliset prosessiparametrit. Tulostukseen käytettävän filamentin ihanteellinen halkaisija on 1,75 mm, mutta 1,55–1,80 mm halkaisija filamentille on edelleen käyttökelpoista.

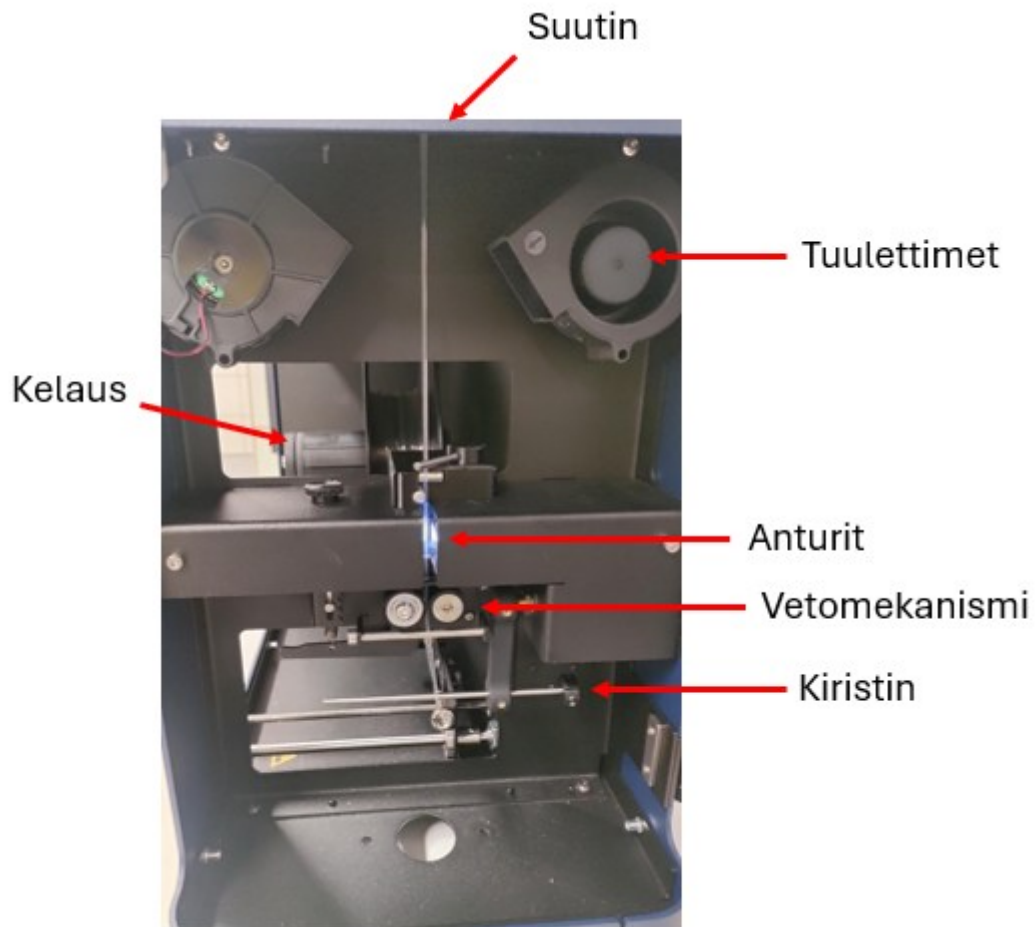
4.1 Filament Maker 2

Filament Maker 2 on ekstruuderit, joka valmistaa 3D-tulostukseen soveltuvaa filamenttia. Laitteen toimintaperiaatteena on, että materiaali syötetään syöttösäiliöön, josta se kulkeutuu ekstruuderiin sulamaan ja sekoittumaan pyörivän ruuvien avulla. Ruuvien synnyttämän paineen vaikutuksesta sulaa materiaali pursuaa ulos suuttimesta filamenttina (Kuva 4). Suuttimesta poistuva filamentti kulkee mittausanturien ohi, jotka mittaavat filamentin muotoa ja halkaisijaa. Vetomekanismit vetävät filamenttia eteenpäin, ja niiden nopeus säätyy antureilta saatavan mittausdatan perusteella, mikä mahdollistaa filamentin halkaisijan hallinnan reaaliaikaisesti. Mittausanturit toimivat lasereilla, jotka kohdistuvat filamenttia kohti (Kuva 5). Filamentti peittää osan laserin säteestä, ja laitteen ohjelmisto laskee tämän perusteella filamentin halkaisijan. Anturien mittaustarkkuus on 10 µm, ja ne suorittavat 25 mittausta sekunnissa kuvanopeudella 5 fps. Laitteessa on lisäksi infrapunakameralla toimiva lämpötila-anturi, joka mittaa filamentin pinnan lämpötilan ennen vetomekanismia. (3Devo, 2026) Filamentin jäykkyyttä kelassa voidaan säätää kiristimen asetuksilla. Filamentin kelautumista ohjaa liikkuva varsi, jonka avulla filamentti asetetaan tasaisesti kelalle. Laitteen anturit voidaan kalibroida kalibrointisauvoilla.



Kuva 4 Filament Maker 2 -laitteen kokoonpano (3Devo, 2026).

Filament Maker 2:n käyttöönotto suoritettiin valmistajan ohjeiden mukaisesti (Kuva 5). Käyttöönotossa materiaalina käytettiin PLA:ta. Ekstruuderin lämmitysvyöhykkeet kuumennettiin lämpötiloihin 160, 165, 170 ja 165 °C. Ekstruuderin ruuvin nopeudeksi asetettiin 5,0 rpm ja vetomekanismin nopeudeksi 20,0 rpm. Laite säätelee vetomekanismin nopeutta automaattisesti muiden prosessiparametrien perusteella. Syöttösäiliön tuulettimen teho oli 100 %, ja filamentituulettimen teho oli 70 %. Valmistajan ohjeistama kiristimen jäykkyyasetus oli 3, mutta tällä asetuksella kela muodostui liian löysäksi, joten jäykkyyasetusta 4 pidettiin parempana. Laite tuottaa PLA-filamenttia noin 100 g 20 minuutissa, mikä vastaa noin 300 g/h tuotantonopeutta.



Kuva 5 Filament Maker 2 käyttöönotto PLA:lla.

4.2 Materiaalin hankinta ja käsittely

Työn lähtökohtana oli käyttää varsinaissuomalaisessa yrityksessä syntyvää HDPE:tä filamentin raaka-aineena huoltovarmuuden tueksi. Yritysten sisäinen syntypaikkalajittelu takaa materiaalin puhtauden, minkä vuoksi niiden kierrätys on helppoa. Tätä demonstroimiselle käytettiin 3Devon valmistamia HDPE Flush-pellettejä. Pellettejä ei kuivattu, koska niitä säilytetään ilmatiiviissä säkeissä, joissa on ilmanpoistomekaniikka. HDPE ei absorboi kosteutta, jos muovia on säilytetty kuivassa tilassa.

4.3 Filamentin tuotanto

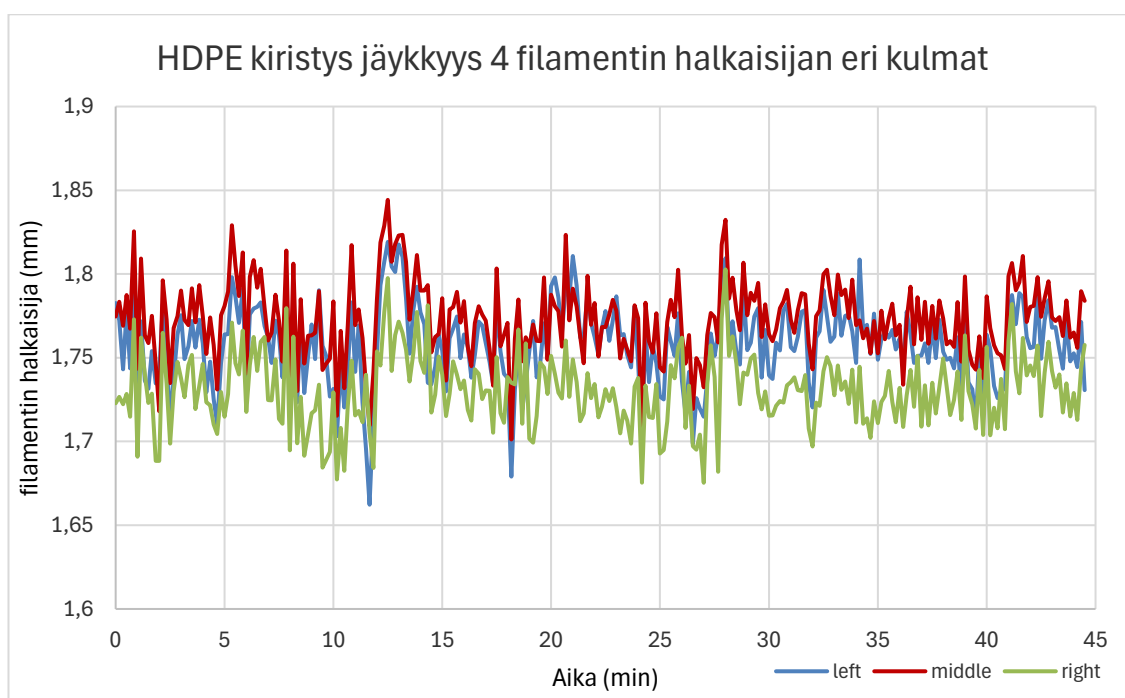
HDPE:n korkea kiteisyys tekee filamentin pyöreiden ja tasaisuuden saavuttamisesta haastavaa. Liian korkeat ekstruuderin lämpötilat (200–230 °C) lisäävät filamentin soikeutta. Koska suuttimen ulkopuolella vallitseva lämpötilaero on suuri, HDPE:n rakenteella ei ole aikaa asettua kunnolla. Nopean kutistumisen seurauksena filamentti epämuodostuu. Myös tuulettimien kohdistuminen suoraan filamenttiin aiheutti lisääntyneitä soikeutta.

Kun lämpötilaparametrit laskettiin välille 175–190 °C, filamentti ei ollut suuttimesta poistuessaan yhtä kuumaa. Tuuletinten suuntaus muutettiin siten, että ne ohjattiin sivuille muodostamaan filamentin ympärille pyörivä ilmavirta, jolloin jäähtyminen tapahtuisi tasaisemmin joka suunnasta. Näillä parametreilla tehtiin kolme filamentin ekstruusiota. Ekstruusioiden välinen ero oli kiristimen jäykkyysohjeissa, jotka olivat 1, 3 ja 4. Säätoasteikko oli 1–5, jossa asetus 1 on tarkoitettu joustaville materiaaleille ja asetus 5 jäykille materiaaleille. Lisäksi yhdessä ekstruusiossa tuulettimien teho oli asetettu 60 %:iin, kun taas kahdessa muussa ekstruusiossa tuulettimien teho oli 30 %.

Taulukko 2 HDPE:n ekstruusioajon prosessiparametrit.

	Parametrit		
1. Lämpötila	190 °C		
2. Lämpötila	185 °C		
3. Lämpötila	180 °C		
4. Lämpötila	175 °C		
Ekstruuderin ruuvin pyörimisnopeus	5 rpm		
Vetomekanismi	Oletus halkaisija 1,75 mm, jolloin nopeus 15–25 rpm		
Filamenttituulettimet (%)	35	35	60
Kiristinjäykkyys	1	4	3

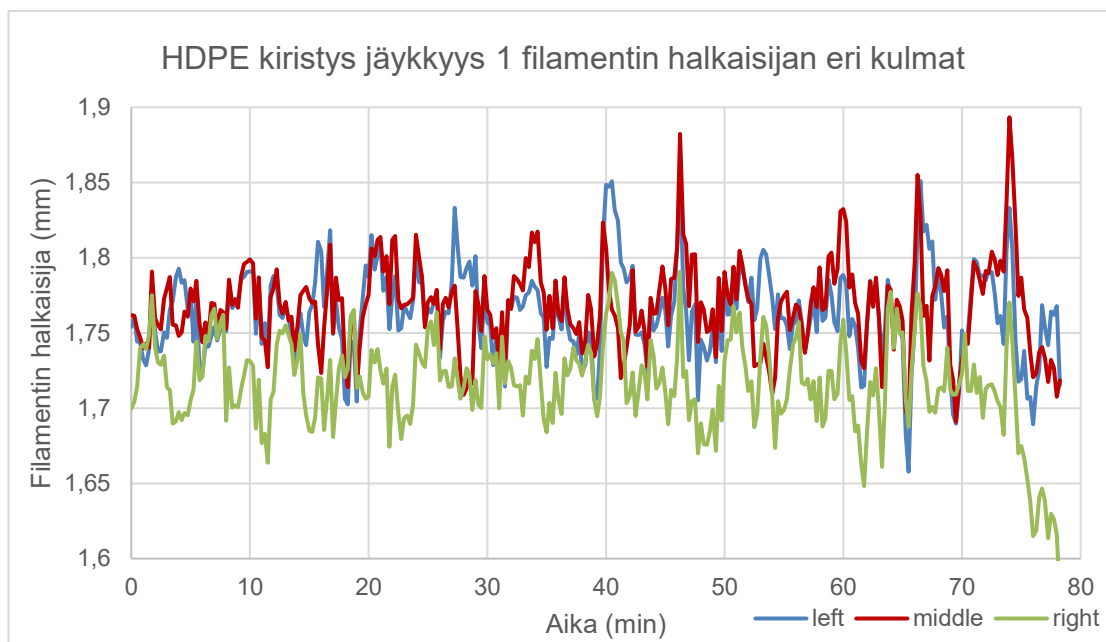
Ekstruusion (Kuvio 4) ensimmäisen 30 minuutin aikana filamentin halkaisijat vaihtelevat merkittävästi. Erityisesti 12 ja 27 minuutin kohdalla kaikkien mittauskulmien halkaisijakäyriin ilmestyy piikkejä. Oikeanpuolinen halkaisija oli koko mittausjakson ajan pienempi kuin muut mitatut halkaisijat, vaikka ero ei ollut anturidatan mukaan erittäin suuri. Vasen ja keskimäinen halkaisija olivat keskenään melko lähellä toisiaan. Oikeanpuolinen halkaisija seurasi ajallisesti samaa vaihtelua kuin muut halkaisijat, mutta pysyi jatkuvasti ohuempana. Ekstruusioajon filamentin halkaisijoiden tulokset on esitetty liitteessä 2.



Kuvio 4 HDPE-filamentin halkaisija, kun kiristinjäykkyyasetus on 4.

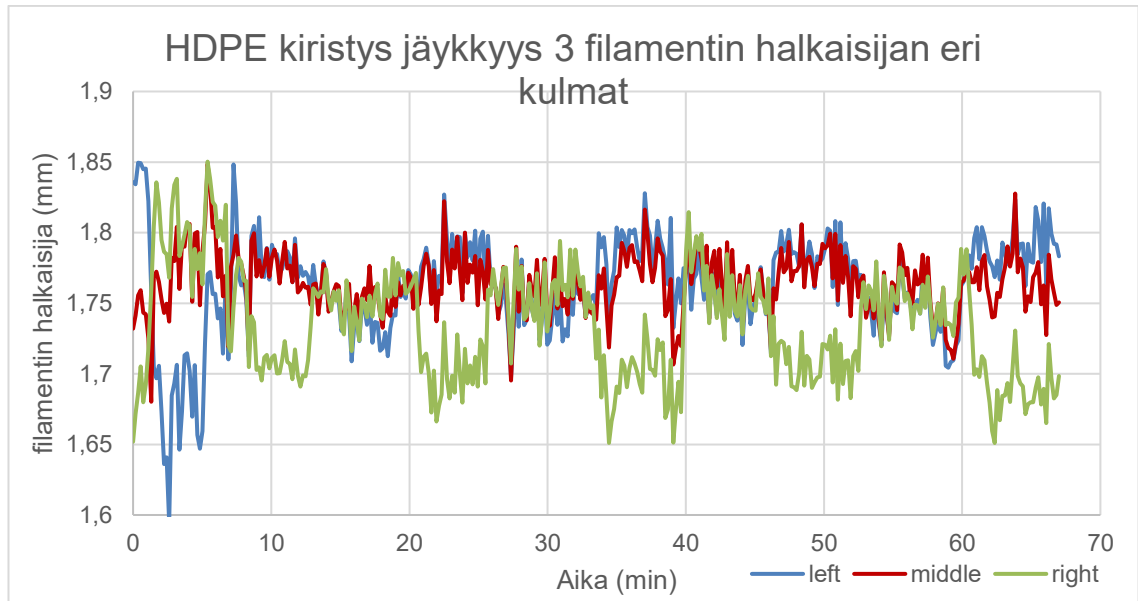
Kun jäykkyyasetus pidettiin arvossa 1, filamentin halkaisija vaihteli enemmän ekstruusion loppupäässä (Kuvio 5). Oikeanpuolinen halkaisija oli myös pienempi kuin muut halkaisijat. Vasen ja keskimäinen halkaisija olivat suurin piirtein samansuuruisia, mutta niissä esiintyi piikkimäistä vaihtelua tietyissä kohdissa. Noin 40 minuutin kohdalla piikit alkoivat kasvaa ja poiketa toisistaan selkeämmin. Ekstruusion loppuvaiheessa oikeanpuolinen halkaisija laski voimakkaasti, mikä johtui materiaalin loppumisesta ekstruuderista. Tällöin ruuvi ei enää pystynyt syöttämään materiaalia tasaisella nopeudella, mikä heikensi

halkaisijan tasaisuutta. Ekstruusioajon filamentin halkaisijoiden tulokset on esitetty liitteessä 3.



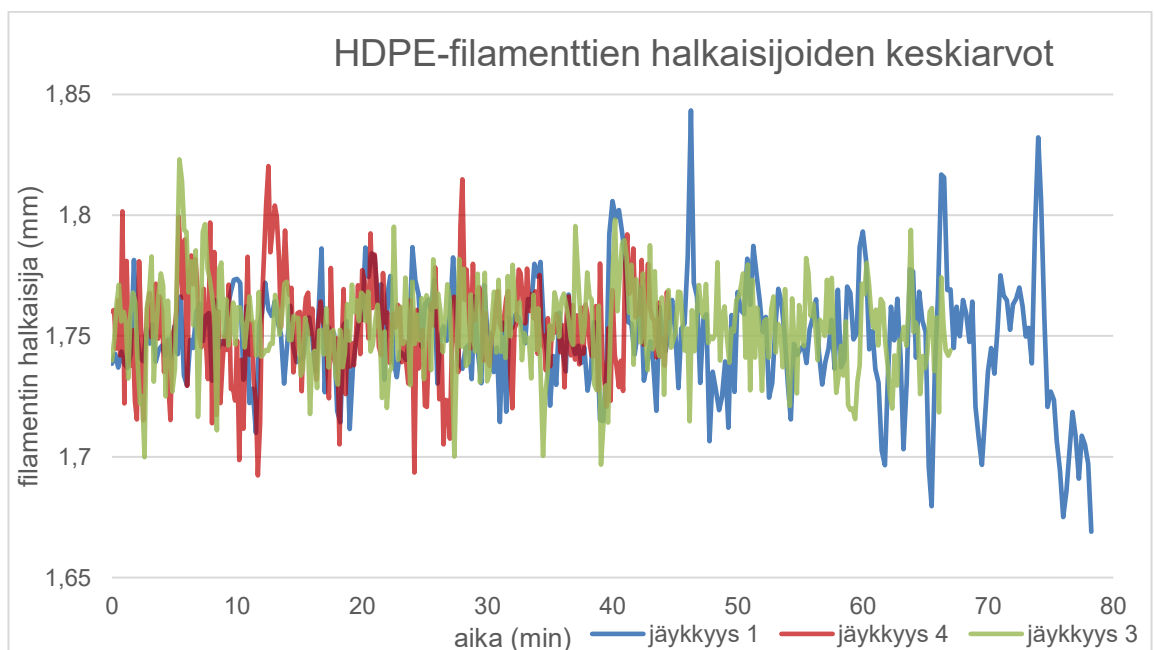
Kuvio 5 HDPE-filamentin halkaisija, kun kiristinjäykkyyasetus on 1.

Kun jäykkyysasetus pidettiin arvossa 3, halkaisijat vaihtelivat merkittävästi ekstruusion alussa, mutta vasen ja keskimäinen halkaisija tasaantuivat noin 10 minuutin kohdalla (Kuvio 6). Oikeanpuolinen halkaisija ei kuitenkaan tasaantunut missään vaiheessa ekstruusiota. Oikeanpuoleisen halkaisijan vaihtelu tapahtuu noin 5–8 minuutin sykleissä. Halkaisija on 5 minuutin ajan 0,05 mm pienempi kuin muut halkaisijat, minkä jälkeen se nousi 8 minuutiksi samalle tasolle vasemman ja keskimäisen halkaisijan kanssa. Vasen ja keskimäinen halkaisija pysyivät ekstruusion loppuosan suhteellisen tasaisina ilman merkittäviä piikkejä. Ekstruusioajon filamentin halkaisijoiden tulokset on esitetty liitteessä 4.



Kuvio 6 HDPE-filamentin halkaisija, kun kiristinjäykkyyset on 3.

Ekstruusioajoissa käytettiin eri määrä materiaalia, joten ajojen pituudet ovat eri pituisia (Kuvio 7). Jäykkyysetarvon 1 filamentin halkaisijan keskiarvo vaihtelee selvästi eniten ajoista. Filamentilla on suuria piikkejä varsinkin ajon puolen välin jälkeen. Jäykkyysetarvon 3 filamentin halkaisija ei vaihtele suuresti 10 minuutin kohdan jälkeen.



Kuvio 7 HDPE-filamenttien halkaisijoiden keskiarvot.

Matalammilla lämpötiloilla filamentin pyöreys parani, mutta filamentin halkaisija ei ole täysin tasaista millään ekstruusioajolla. Anturin mittaama halkaisija vaihteli lyhyillä aikaväleillä noin 1,6–1,8 mm:n välillä. Kaikkien valmistettujen filamenttien halkaisijat olivat manuaalisesti mitattuina pienempiä kuin anturien ilmoittamat arvot. Anturien tarkkuus varmistettiin kalibroinnilla, jonka perusteella anturien mittatarkkuus todettiin oikeaksi. Tämä voi viitata siihen, että filamentti on vetomekanismin jälkeen vielä liian kuumaa, jolloin kiristin ja jännitys kelauksessa voivat muokata filamentin muotoa. Lisäksi HDPE:n kutistumista saattaa tapahtua vielä vetomekanismin jälkeen, jos filamentti ei ole ehtinyt jäähtyä riittävästi.

5 Lisävä valmistus

Itse valmistetulla ja kaupallisella HDPE-filamentilla tulostettiin testisauvoja ja nielunäytepuikkoja. Kaupallisen filamentin HDPE Dark Blue, 1.75 mm / 500g valmistaja on Spectrum. Filamentti sisältää taipumista vähentäviä lisäaineita, jotka helpottavat tulostusprosessissa (3DJake, ei pvm.). Testisauvoilla tehtiin taivutuslujuustesti, jolla saatiin tulostettavan materiaalin mekaanisten ominaisuuksien tulokset. Taivutuslujuustesti suoritettiin standardin ISO 178:2019 perusteella. Nielunäytepuikkoja voidaan tulostaa terveydenhuollon käyttöön huoltovarmuuden parantamiseksi. Nielunäytepuikon taivutusominaisuuksien oli oltava riittävät, jotta ne kestäisivät näytteenoton aiheuttaman mekaanisen kuormituksen ilman katkeamista.

5.1 Funmat HT -tulostin

Funmat HT -tulostin toimii FDM-menetelmällä, jossa muovifilamentti sulatetaan ekstruuderissa ja pursotetaan ulos suuttimesta (Kuva 6). Suutin ja ekstruuderiliikkuvat yhdessä x- ja y-akselilla, kun taas tulostusalusta liikkuu z-akselilla. Tulostusalusta on lämmitettävä, jotta tuloste tarttuu pintaan eikä jäähdy liian nopeasti. Lisäksi tulostuskammio voidaan lämmittää, mikä vähentää tulosteen vääntymistä, halkeilua ja sisäisiä jännityksiä.

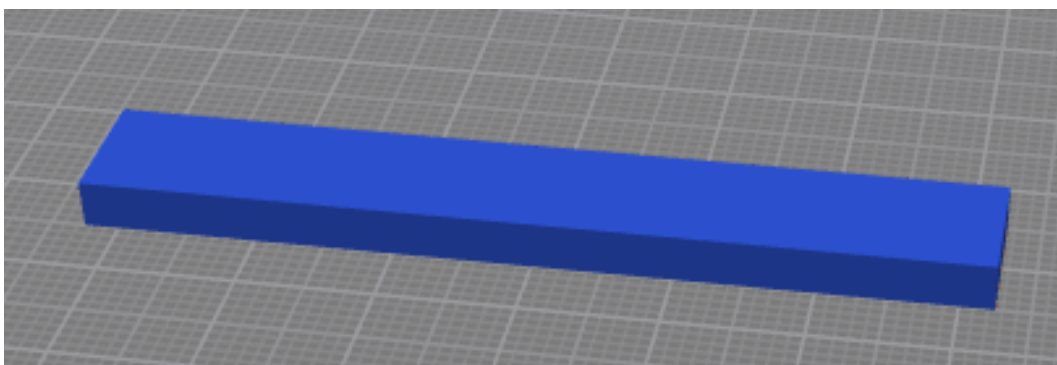
Tulostettavien kappaleiden mallit valmistellaan Intamsuite Neo -ohjelmistolla. Ohjelmistossa valitaan käytettävä tulostin ja tarkemmat tulostusparametrit, kuten täytön muoto ja määrä, tulostusnopeus ja muut prosessiin vaikuttavat asetukset. Osa parametreista voidaan määrittää suoraan tulostimella, kuten eri lämpötilat, valittu materiaali, tulostusnopeus, vetäytymispituus ja -nopeus ja materiaalin virtausprosentti.



Kuva 6 Intamsys Funmat HT 3D-tulostin (Intamsys, ei pvm.).

5.2 Kappaleen CAD-malli

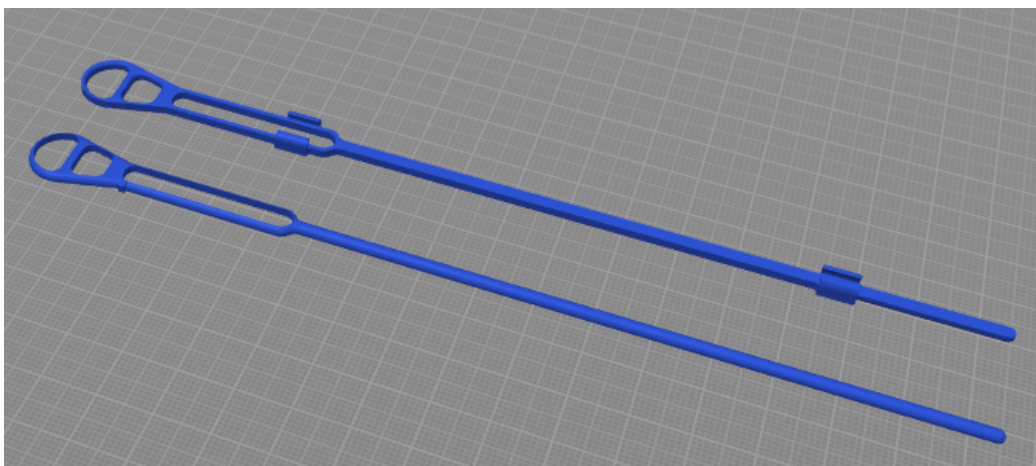
Testisauvat sopivat standardin (ISO 178:2019) mukaiseen taivutuslujuustestiin. Testisauvojen mitat ovat: pituus noin 65 mm, leveys 10 mm ja paksuus 3 mm (Kuva 7).



Kuva 7 Testisauvan CAD-malli Intamsuite Neo -ohjelmistossa.

Nielunnäytepuikon malli on ladattu NIH 3D -sivustolta, joka tarjoaa vapaaseen käyttöön biotieteellisiä ja lääketieteellisiä 3D-malleja (NIH, 2023).

Mallitiedostoon sisältyi työkalu näytepuikon kokoamista varten, mutta sitä ei tulostettu. Näytepuikko koostuu kahdesta osasta, jotka liitetään toisiinsa siten, että pienempi osa asetetaan suuremman osan sisään mallissa olevien lovien avulla, jolloin niiden väliin voidaan lisätä pumpulia näytteenottoa varten (Kuva 8).



Kuva 8 Nielunnäytepuikko CAD-malli Intamsuite Neo -ohjelmistossa.

5.3 Kappaleen tulostaminen

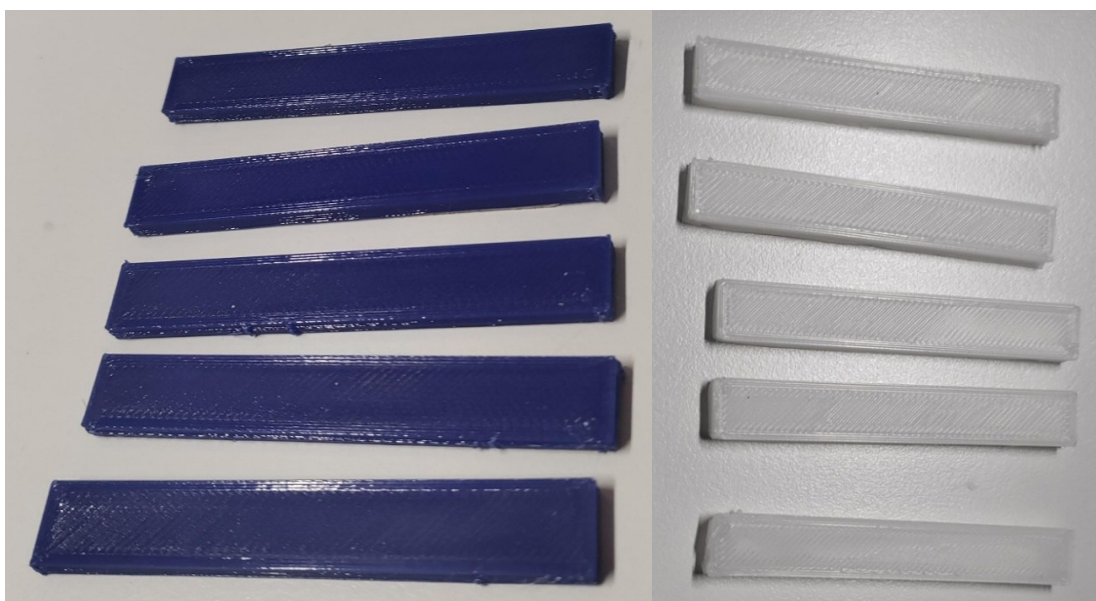
Intamsuite Neo -ohjelmalla ei ollut mahdollista valita HDPE:tä materiaaliksi, joten lämpötila-asetukset määrättiin manuaalisesti. Muut tulostusparametrit pidettiin oletusarvoissa lukuun ottamatta täytön tiheyttä, täytön kerroskorkeutta ja täytön muotoa (Taulukko 3). Jotta tulostuskappaleet pysyisivät tulostusalustassa, pintaan levitettiin ohut kerros puikkoliimaa. Filamentin tulostuslämpötilat valittiin filamentin valmistajan antamien suositusten perusteella.

Taulukko 3 Kaupallisen ja itse valmistetun filamentista valmistettujen testisauvojen tulostus parametrit.

Testisauvat	Kaupallinen	Itse valmistettu
Suutin	260 °C	245 °C
Tulostusalusta	90 °C	115 °C
Tulostuskammio	55 °C	55 °C
Vetäytymispituus	0.5 mm	0.5 mm
Vetäytymisnopeus	25 mm/s	25 mm/s
Tulostusnopeus	60 mm/s	45 mm/s
Täytön tiheys	80 %	80 %
Täytön viivojen etäisyys	0.5 mm	0.5 mm
Täytön kerroskorkeus	0.2 mm	0.2 mm
Täytön muoto	lineaarinen	lineaarinen

Testisauvojen muoto oli erittäin yksinkertainen, joten niiden tulostus oli helppoa. Kaupallisella filamentilla ainoa ongelma liittyi testisauvojen tarttumiseen tulostusalustaan, mikä ratkaistiin levittämällä liima alustaan. Myös itse valmistetulla filamentilla ilmeni tarttumisongelmia. Pelkkä liima ei riittänyt tarttumiseen, joten tulostusmalliin lisättiin reunusrakenne (brim) ja tulostusalustan lämpötilaa nostettiin.

Testisauvojen tulostuspinta oli erittäin sileä, eikä kappaleissa havaittu merkittäviä epämuodostumia (Kuva 9). Itse valmistetulla filamentilla tulostettujen testisauvojen leveys oli hieman pienempi kuin kaupallisella filamentilla tulostettujen. Testisauvojen mitat on esitetty liitteeseen 1.



Kuva 9 Kaupallisella (sininen) ja itse valmistetulla (valkoinen) filamentilla tulostetut testisauvat.

Kaupallisella filamentilla tulostetut nielunäytepuikot tarttuivat tulostusalustaan ilman reunusrakennetta. Tulostuspinnan laatu oli erittäin karheaa, ja kappaleiden rakenteiden väliin muodostui ohuita muovisia säikeitä (Kuva 10). Säikeitä pystyttiin vähentämään hidastamalla tulostusnopeutta, mutta niitä ei saatu kokonaan poistettua (Taulukko 4). Näytepuikkojen keskiosan suora rakenne oli erittäin sileä, mutta monimutkaisemmissa kohdissa esiintyi paikallisia epämuodostumia.

Taulukko 4 Kaupallisen ja itse valmistetun filamentin nielunäytepuikkojen tulostusparametrit.

NIELUNÄYTEPUIKOT	Kaupallinen	Itse valmistettu
Suutin T (°C)	245	245
Tulostusalusta T (°C)	95	115
Kammio T (°C)	55	-
Tulostusnopeus (mm/s)	22,5	40
vetäytymispituus (mm)	1,7	1,7
vetäytymisnopeus (mm/s)	35	35
Täytön tiheys %	25 %	25 %

täytön kerroskorkeus mm	0.2	0.2
täytön muoto	grid	grid

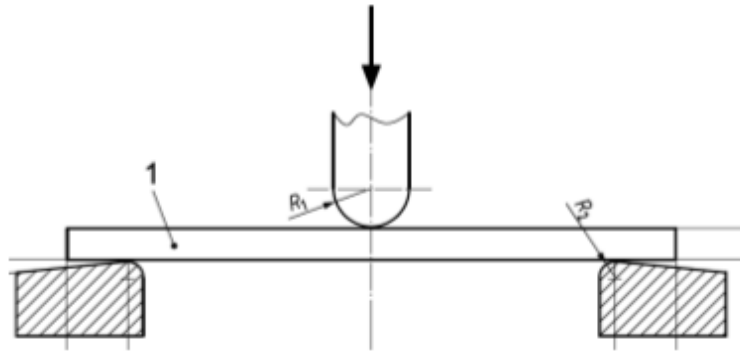
Itse valmistetulla filamentilla tulostetut nielunäytepuikot jouduttiin valmistamaan eri 3D-tulostimella, koska filamentin ohut halkaisija aiheutti sen juuttumisen Funmat HT -tulostimen syöttörattaaseen. Prenta CXY -tulostimessa ei ollut lämmitettävää tulostuskammiota, mikä heikensi näytepuikkojen tarttuvuutta ja vaikeutti tulostusprosessia. Näytepuikot jäähdyivät nopeasti, mikä johti tulostuksen epätasaisuuteen (Kuva 10). Filamentista pystyttiin tulostamaan näytepuikkoja reunusrakennuksen avulla, mutta valmiita kappaleita ei saatu irrotettua reunuksesta ehjinä, koska tulostuslaatu oli erittäin hajanaista. Näytepuikkojen pinta oli kauttaaltaan karhea ja epätasainen.



Kuva 10 Kaupallisesta filamentista tulostetut nielunäytepuikot (sininen) ja itse valmistetusta filamentista tulostetut nielunäytepuikot (valkoinen).

5.4 Taivutuslujuustesti

Taivutuslujuustesti suoritettiin standardin ISO 178:2019 mukaisesti. Sekä kaupallisesta että itse valmistetusta filamentista tulostettiin viisi testisauvaa. Kaikkien yksittäisten koekappaleiden mitat ja mittaustulokset on esitetty liitteessä 1. Taivutuslujuustestit toteutettiin Shimadzu AGS-X-laitteella.

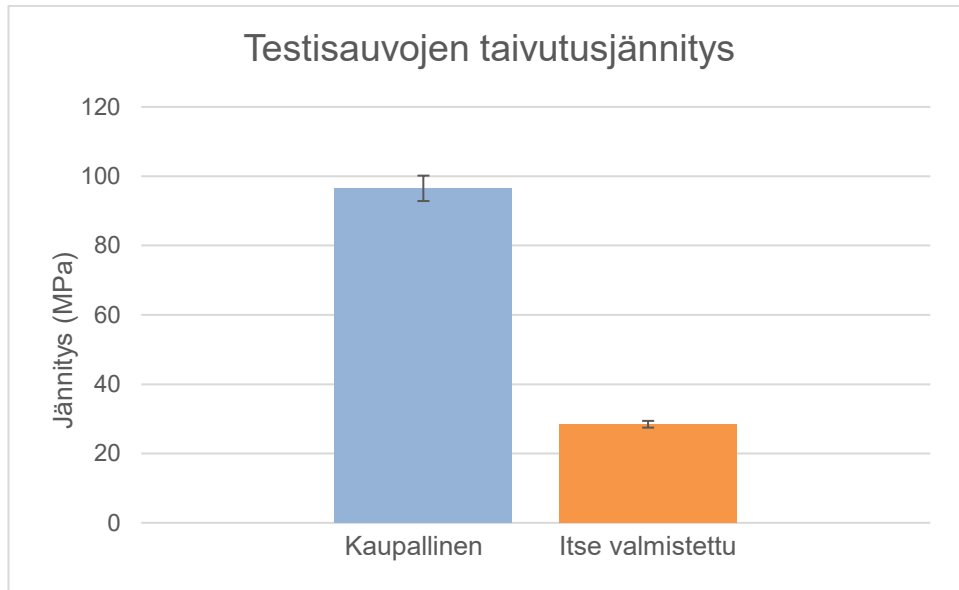


Kuva 11 Kolmipistetaivutus standardin ISO 178 mukaan (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2019).

Tukiväli asetettiin standardin mukaisesti kaavalla $L = (16 \pm 1)h$, jossa h on koekappaleen paksuus. Tämän perusteella tukivälin etäisyys oli 50 mm. Taivutustestin nopeudeksi asetettiin 30 mm/min.

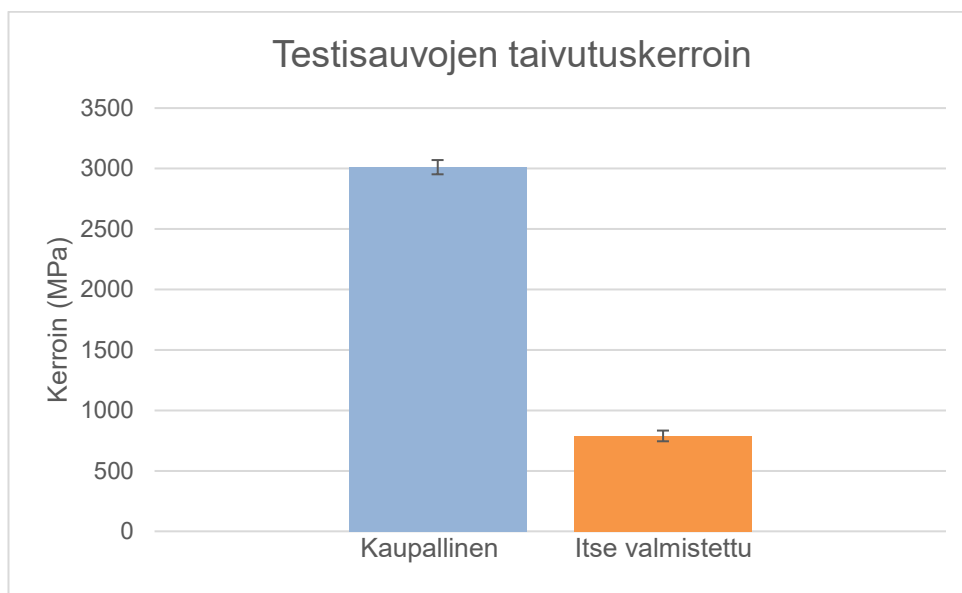
Yhden itse valmistetusta filamentista tulostetun testisauvan taivutuslujuustestin tulos poikkesi selvästi muiden vastaavien koekappaleiden tuloksista. Poikkeama oli niin suuri, että tulosta voidaan pitää mittausrvirheenä. Tämän vuoksi kyseisen testisauvan tuloksia ei sisällytetty lopulliseen analyysiin.

Tuloksissa havaittiin selvä ero kaupallisesta ja itse valmistetusta filamentista tulostettujen testisauvojen taivutusjännityksessä (Kuvio 8). Kaupallisella filamentilla valmistettujen testisauvojen taivutusjännitys oli lähes 100 MPa. Itse valmistetulla filamentilla valmistettujen testisauvojen taivutusjännitys oli noin 30 MPa, mikä on hieman pienempi kuin ruiskuvalulla valmistetuilla testisauvoilla kirjallisuudessa esitetty arvo 40 MPa (Tesfaw ym, 2022).



Kuvio 8 Kaupallisella ja itse valmistetulla filamentilla tulostettujen testisauvojen taivutusjännitys.

Myös taivutuskertoimen tuloksissa havaittiin yli kolminkertainen ero kaupallisella ja itse valmistetulla filamentilla tulostettujen testisauvojen välillä (Kuvio 9). Kaupallisella filamentilla valmistettujen testisauvojen taivutuskerroin oli noin 3000 MPa. Itse valmistetulla filamentilla valmistettujen testisauvojen taivutuskerroin oli noin 790 MPa, mikä vastaa hyvin ruiskuvalulla valmistettujen testisauvojen kirjallisuusarvoa 800–1400 MPa (Laird plastics, 2025).



Kuvio 9 Kaupallisella ja itse valmistetulla filamentilla tulostettujen testisauvojen taivutuskerroin.

6 Tulosten tarkastelua

Tässä luvussa esitetään tulosten analyysi filamenttien, 3D-tulostuksen ja taivutuslujuustestin osalta.

6.1 Filamentit

Tuloksista voidaan havaita, että anturien oikeanpuolisen kuvan halkaisija oli jatkuvasti pienempi kuin muiden puolien halkaisijat. Tämä viittaa siihen, että ilmiö syntyy suuttimen ja anturien välisellä alueella. Tällä välillä vaikuttavia tekijöitä ovat ainoastaan suutin, tuulettimet ja filamentin lämpötila. Suuttimessa saattaa olla osittainen tukos, joka muuttaa filamentin muotoa heti pursotuksen alussa. Lisäksi oikeanpuolinen tuuletin voi ohjata enemmän ilmavirtaa filamenttiin, mikä litistää sitä ja aiheuttaa halkaisijan pienenemisen.

Lämpötilojen on oltava riittävän korkeat, jotta HDPE on suuttimen kohdalla tarpeeksi sulassa tilassa, mutta eivät liian korkeat, jotta materiaali ei muutu ylisulaksi. Liian korkea lämpötila lisää jäähtymisen aikana epätasaista kiteytymistä ja epämuodostumista. Myös Filament Maker 2 -laitteen jäähdytysalue ei ole kovin pitkä, minkä vuoksi filamenttia ei pystytä jäähdyttämään tarpeeksi hitaasti, minkä hyvänlaatuinen HDPE-filamentti vaatisi. Filamentti on vetomekanismin ja kiristimen kohdalla edelleen liian kuumaa, mikä aiheuttaa filamentin venymistä ja litistymistä vielä mittausanturin jälkeen. Tämä näkyy anturidatan halkaisijan ja manuaalisesti mitatun halkaisijan välisenä erona.

Jatkossa erityisesti suuttimen lämpötilaa tulisi kokeilla säätää matalammaksi, jotta filamentin laatu voidaan tasoittaa ja vähentää epämuodostumia. Toinen mahdollinen jäähdytysratkaisu on liukuhihnapohjainen jäähdytysjärjestelmä. Liukuhihna sijoitettaisiin lisäosana suuttimen alapuolelle, ja sen päädyssä olisi anturi ja vetomekanismi, joka ohjaisi filamentin kelaan. Liukuhihna olisi riittävän pitkä, jotta filamentti ehtisi jäähtyä ennen kelausta. Tällöin filamentin lämpötila ei olisi niin liian korkea, mikä vähentäisi sen muodonmuutoksen riskiä. 3Devo:lla

on pilotointivaiheessa tämän tyyppinen jäähdytysratkaisu, mutta se ei ole vielä kuluttajakäytössä (3Devo, 2026).

Nykyinen jäähdytys ei ole riittävä HDPE-filamentin valmistukseen. Vaikka tuulettimet suuntaavat ilmavirran filamentin ympärillä, virtaus ei ole tasainen eikä kovin tehokasta. Ilmavirran muodostama piiri jättää sen keskelle alueen, jossa jäähdytys on selvästi heikompaa. Jäähdytyksen parantamiseksi tuulettimiin tulisi suunnitella lisäosa, joka jakaisi ilmavirran tasaisemmin ja tehokkaammin filamentille. Tällainen lisäosa olisi mahdollista mallintaa ja valmistaa 3D-tulostamalla.

Filamentin halkaisijan vaihtelulle on vaikea osoittaa yksiselitteistä syytä. Filamentin lämpötila, tuulettimien toiminta, vetomekanismi, kiristin, kelaus sekä materiaaliominaisuudet vaikuttavat anturien mittaustietoihin. Silti on epäloogista, että ekstruusion edetessä halkaisijan vaihtelu kasvaa, vaikka prosessiparametrit pysyvät muuttumattomina. Teoriassa halkaisijan tulisi tällöin vähitellen tasaantua. Vetomekanismin automaatioalgoritmia ei ole vielä tarkasteltu, ja se saattaa olla epäoptimaalinen juuri HDPE:lle. Automaattinen säätö voi reagoida liian herkästi, nopeasti tai hitaasti, mikä voi aiheuttaa halkaisijan vaihtelua, vaikka muut parametrit pysyvät vakiona. Lisäksi jäykkyysasetuksella 3 havaittu filamentin oikeanpuolisen halkaisijan syklinen vaihtelu viittaa siihen, että laitteessa jokin komponentti tai toiminto toimii syklissä, joka vaikuttaa halkaisijaan.

HDPE:n ominaisuudet tekevät sen ekstruusion tasalaatuiseksi filamentiksi haastavaksi. Tämän vuoksi HDPE ei olisi optimaalinen materiaali filamentin valmistukseen, erityisesti tilanteissa, joissa materiaalia haluttaisiin käyttää huoltovarmuuden kannalta. Vaikka materiaalin ominaisuudet tuotteelle olisivat hyvät, sen prosessointi tuo tuotantoon tarpeettomia haasteita. Saatavilla on muita materiaaleja, joilla on samankaltaisia ominaisuuksia, joita on huomattavasti helpompi valmistaa filamentiksi.

6.2 Tulostetut kappaleet

Testisauvojen tulostus oli niiden yksinkertaisen muodon vuoksi helppoa. HDPE ei jäähdy nopeasti, kun sitä pursotetaan samaan kohtaan paljon. Tämä vähentää kappaleen taipumista ja kutistumista tulostuksen aikana, mikä puolestaan pienentää filamentin halkaisijan epätasaisuuden vaikutusta lopputulokseen. Koska itse valmistettu filamentti oli paljon ohuempaa kuin 1,75 mm, siitä valmistettujen testisauvojen leveys jäi pienemmäksi kuin kaupallisella filamentilla valmistettujen. Tulostimen ohjelmisto ei tunnista, että filamentti on ohuempaa, minkä vuoksi se pursottaa kappaleeseen vähemmän materiaalia kuin sen on tarkoitus. Tätä voisi kompensoida lisäämällä materiaalivirtausprosenttia, jolloin suuttimesta pursoutuisi enemmän materiaalin.

HDPE tarttuu tulostusalustaan hyvin, kun tulostusalustan lämpötila on tarpeeksi korkea ja kappaleelle käytetään reunusrakennetta, joka lisää kiinnityspinta-alaa. Kaupallisen filamentin tarttumisominaisuudet olivat selvästi parempia, sillä reunusrakennetta ei tarvittu ja tulostusalustan lämpötilan ei tarvinnut olla niin korkea. Kaupallinen filamentti on muokattu lisäaineilla 3D-tulostusta varten eli filamentin lasittumislämpötilaa on muutettu siten, että HDPE ei kiteydy matalammissa lämpötiloissa.

Nielunäytepuikkojen tulostus osoittautui selvästi haastavammaksi. Kappaleen monimutkaisempi muoto aiheutti filamentin säikeiden syntymistä rakenteiden väliin. Tätä ongelmaa pystyttiin vähentämään hidastamalla tulostusnopeutta ja lisäämällä vetäytymispituutta ja -nopeutta, mutta pinnanlaatu oli silti erittäin karheaa ja epätasaista. FDM-menetelmä tuottaa yleisesti ottaen karkeampia pintoja kuin monet muut 3D-tulostusmenetelmät. Itse valmistetulla filamentilla tulostettujen nielunäytepuikkojen laatu oli erityisen heikkoa, koska tulostukseen ei pystytty käyttämään tulostuskammion lämmitystä. HDPE on materiaalina erittäin haastava tulostaa, koska sen nopea ja epätasainen kiteytyminen aiheuttaa muodonmuutoksia, heikkoa kerrosten välistä tarttuvuutta ja suurta kutistumista. Ilman tulostuskammion lämmitystä materiaalia ei saatu pidettyä

tarpeeksi kuumana, joten sen tulostuslaatu oli surkeaa. Filamentilla oli haasteita tarttua alustaan ja edellisiin kerroksiin, mikä korosti tulostusongelmia monimutkaisessa kappaleessa.

Molemmilla, kaupallisella ja itse valmistetulla, filamentilla valmistetut nielunäytepuikot voitiin taivuttaa täysin ympäri ilman, että ne murtuivat. On kuitenkin huomioitava, että itse valmistettujen näytepuikkojen reunusrakenne lisää jäykkyyttä ja tukea. Kuitenkaan kumpaakaan nielunäytepuikkoa ei voitaisi käyttää todellisissa näytteenotoissa, sillä näytepuikkojen karkea pinta voisi aiheuttaa haavoja nielussa.

HDPE:llä voi olla käyttökohteita 3D-tulostuksessa yksinkertaisissa kappaleissa, joissa pinnanlaadulla ei ole suurta merkitystä. Etenkin tilanteissa, joissa tarvitaan HDPE:n hyviä mekaanisia tai kemiallisia ominaisuuksia eikä mikään muu materiaali sovellu käyttötarkoitukseen. Tällöin tulostuksen haasteet voidaan hyväksyä osana prosessia. Sen sijaan pikkutarkkoihin tulostuksiin, joissa lopullinen pinnanlaatu on kriittinen, HDPE ei ole hyvä materiaali. Pinnan jälkikäsitteily olisi liian työlästä ja aikaa vievää.

6.3 Taivutuslujuustesti

Kaupallisesta filamentista valmistettujen testisauvojen taivutusjännitys ja -kerroin olivat selvästi suurempia kuin kirjallisuusarvot ja itse valmistetusta filamentista tulostettujen testisauvojen. Tulosten ero oli yli kolminkertainen. Tämän eron syynä oli itse valmistetun filamentin epätasaisuus ja ohuempi halkaisija sekä kaupallisen filamentin lisäaineet. Itse valmistetun filamentin ohuuden vuoksi testisauvoihin pursotettiin vähemmän materiaalia kuin oli suunniteltu, mikä johti heikompaan täyttöprosenttiin. Filamentin epätasainen halkaisija aiheutti sen, että tulostettavaan kappaleeseen muodostui alueita, joissa materiaalia oli enemmän tai vähemmän. Tämä aiheutti kappaleeseen heikompia ja vahvempia kohtia. Kuitenkin kumpikaan testisauvoista ei katkennut taivutuslujuustestissä, mikä korostaa HDPE:n joustavuutta.

Itse valmistettuun filamenttiin käytetty HDPE oli alun perin tarkoitettu ekstruuderin puhdistuskäyttöön, joten siinä ei todennäköisesti ole lisäaineita, jotka vahvistaisivat sen mekaanisia ominaisuuksia. On myös mahdollista, että materiaalin prosessointi heikensi sen mekaanisia ominaisuuksia. Kaupallisesta filamentista tulostetuissa kappaleissa havaittiin jo tulostusvaiheessa parempaa tarttuvuutta ja tasalaatuisuutta, mikä viittaa siihen, että materiaaliin on lisätty lisäaineita parantamaan prosessoitavuutta ja mekaanista suorituskykyä.

Itse valmistetun filamentin kolmannen testisauvan taivutusjännitys ja -kerroin olivat huomattavasti suurempia kuin muiden itse valmistettujen testisauvojen. Ainoa ero oli se, ettei kyseisen sauvan tulostuksessa ollut käytetty reunusrakennetta, mikä oli myös johtanut huonompaan pinnanlaatuun. Tämän ei kuitenkaan pitäisi vaikuttaa taivutusominaisuuksiin. On mahdollista, että jokin muu tulostusparametri, kuten vetäytymisnopeus ja -pituus tai virtausprosentti, olivat virheellisesti eri arvoissa, mikä olisi voinut muuttaa kappaleeseen pursotetun materiaalin määrää.

3D-tulostettujen kappaleiden taivutusominaisuudet voivat olla yhtä hyviä kuin ruiskuvalettujen kappaleiden, joten niitä voidaan käyttää samoissa käyttötarkoituksissa. Tämä edellyttää, että filamentin laatu on riittävän hyvä, jotta tulostettujen kappaleiden ominaisuudet pysyvät tasaisina ja luotettavina, mikä voi olla haastavaa HDPE:n kannalta.

7 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia prosessia, jossa HDPE:n soveltuvuutta filamentin valmistukseen ja 3D-tulostukseen tarkasteltiin huoltovarmuuden näkökulmasta. Tulosten perusteella HDPE:stä voidaan valmistaa filamenttia ja 3D-tulostaa kappaleita, joiden taivutusominaisuudet ovat verrattavissa kirjallisuudessa raportoituun tasoon. Prosessi osoittautui kuitenkin haastavaksi HDPE:n ominaisuuksien vuoksi. Huoltovarmuuden tukena HDPE:n hyödyntäminen 3D-tulostuksessa on rajoittunutta erityisesti filamentin laadulle asetettujen vaatimusten ja monimutkaisten tulostettavien kappaleiden vuoksi.

Kokonaisuutena prosessi toimii, mutta materiaalina HDPE ei ole hyvä vaihtoehto filamentin valmistukseen eikä 3D-tulostukseen. HDPE:stä on erittäin haastavaa valmistaa korkealaatuista filamenttia, mikä on välttämätöntä, jotta tulostus sujuisi ongelmitta. Vaikka filamentti olisi täysin virheetöntä, HDPE:n ominaisuudet tekevät tulostamisesta vaikeaa, erityisesti monimutkaisissa kappaleissa. Jotta HDPE-filamentin valmistus ja tulostus toimisivat luotettavasti, prosessia tulisi kehittää merkittävästi materiaalin käsittelyn ja tulostusparametrien hallinnan osalta. Tämä haasteellisuus on erittäin kriittinen huoltovarmuuden kannalta, sillä tuotannon nopeus on tärkeää varsinkin häiriötilanteissa.

3D-tulostettujen kappaleiden mekaaniset ominaisuudet voivat olla yhtä hyviä kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettujen kappaleiden. On kuitenkin tärkeää huomata, että eri materiaalit voivat käyttäytyä tulostuksessa eri tavalla, ja niiden ominaisuudet on varmistettava tulostuksen jälkeen. Tämä ei myöskään tarkoita sitä, että kaikkien tuotteiden tai osien valmistus voitaisiin korvata 3D-tulostuksella.

Prosessin rakentaminen on aikaa vievää ja monivaiheista, minkä vuoksi sen käyttöönotto teollisuudentuotannossa ja humanitaarisen avun tukena edellyttää huolellista ja ennakoivaa suunnittelua. Huoltovarmuuden kannalta on olennaista, että prosessi on kehitetty ja testattu ennakoivasti

normaaliolosuhteissa, sillä kriisi- ja häiriötilanteissa uusien toimintamallien käyttöönotto ei ole realistista.

Kierrätetyn muovin kerääminen, ja sen jalostaminen filamentiksi, vaativat tarkasti määriteltyjä prosessointiparametreja, jotka on optimoitava erikseen jokaiselle kierrätettävälle muovilaadulle. Muovin kierrätykselle on rakennettava toimiva ja riittävän tehokas järjestelmä, jotta materiaali pysyy kierrossa ja sen saatavuus voidaan varmistaa ilman ulkoista apua. Tämä kierrätysjärjestelmä on välttämätöntä, jotta materiaalia voidaan hyödyntää luotettavasti myös tilanteissa, joissa neitseellisten raaka-aineiden saatavuus on rajoittunutta. Syntypaikkalajittelun avulla voidaan luoda järjestelmään materiaalinkierto, joka parantaa raaka-aineen saatavuutta myös häiriötilanteissa.

Samoin jokainen tulostettava kappale ja materiaali tarvitsevat omat tulostusparametrit, jotta tulostus olisi käyttökelpoinen. Huoltovarmuuden näkökulmasta on tärkeää arvioida etukäteen, mitkä kappaleet tuottavat eniten hyötyä 3D-tulostuksen avulla ja mitkä niistä on ylipäättään mahdollista tulostaa riittävän toimintavarmoina. Tulostettavien kappaleiden CAD-mallien saatavuus on varmistettava, sillä häiriötilanteissa internetiyhteyksien toimivuus ei ole taattua. Tämän vuoksi CAD-malleja varten on ylläpidettävä fyysinen tiedostokirjasto tukilaitoksissa ja yrityksissä, mikä vähentää riippuvuutta ulkoisista tietoverkoista.

Kun prosessi saadaan aidosti osaksi tuotannon tukirakennetta, se vähentää materiaalihävikkiä, tuo joustavuutta ja lisää sietokykyä tuotantoketjuun, mikä mahdollistaa nopeamman reagoinnin äkillisiin ja ennakoimattomiin tarpeisiin. 3D tulostus ei ole täydellinen ratkaisu, mutta oikein suunniteltuna se voi paikata tuotantoketjun kriittisiä heikkouksia ja vahvistaa huoltovarmuutta erityisesti paikallisessa tuotannossa.

Jatkotutkimuksessa prosessia kannattaisi kehittää käyttämällä muita materiaaleja, joiden ominaisuudet soveltuvat paremmin 3D-tulostukseen. Lisäksi huoltovarmuuden kannalta merkityksellisten tulostettavien osien määrittelyyn tulisi kiinnittää enemmän huomiota, sillä periaatteessa mikä

tahansa osa voidaan nähdä mahdollisena tulostuskohteena. Siksi tulostettavia osia olisi järkevää etsiä esimerkiksi Turku AMK:n laboratoriotiloista tai yrityksen omasta tuotannosta, jotta prosessin toimivuutta voitaisiin testata konkreettisesti käytännön tarpeisiin perustuvilla kappaleilla. Samalla tulisi arvioida tarkemmin tuotteiden tulostettavuutta, mihin käyttötarkoituksiin tulostettujen kappaleiden laatu on riittävä ja missä tilanteissa 3D-tulostus tarjoaa todellista lisäarvoa.

8 Lähdeluettelo

3Devo. (2.7.2024). *The versatility of HDPE filament for 3D printing.*

<https://www.3Devo.com/blog/versatility-hdpe-filament-3d-printing>

3Devo (16.9.2024). HDPE: Combining with Additives and Polymers for better Results. <https://www.3devo.com/blog/hdpe-combining-with-additives-and-polymers>

3Devo. (2026). *Filament Maker Two.* <https://www.3Devo.com/filament-maker-two>

3Devo (2026) LinkedIn: 3Devo julkaisu Haettu 23.4.2026 osoitteesta

https://www.linkedin.com/posts/3devo_additivemanufacturing-materialvalidation-activity-7437803370624585728-Csgf

3Devo. (2026). *HDPE extrusion tips.* <https://support.3Devo.com/why-is-hdpe-difficult-to-extrude>

3DJake (ei pvm). Spectrum HDPE Dark Blue, 1.75 mm / 500g Haettu 23.4.2026 osoitteesta <https://www.3djake.com/spectrum/hdpe-dark-blue?sai=38926>

Agarwal, R. (2022). The personal protective equipment fabricated via 3D printing technology during COVID-19. *Annals of 3D Printed Medicine*, 5, 1-3. <https://doi:10.1016/j.stlm.2021.100042>

Ahert, M. (3.6.2019). *Protolabs Types of 3D printing technology.*

<https://www.protolabs.com/resources/blog/types-of-3d-printing/>

Authentise. (10.9.2025). *The Dark Side of Additive Manufacturing: Why IP Theft is the Additive Manufacturing Industry's Overlooked Challenge.*

<https://www.authentise.com/post/the-dark-side-of-additive-manufacturing-why-ip-theft-is-the-additive-manufacturing-industry-s-overl>

Business analytiq. (2026). HDPE price index Haettu 23.4.2026 osoitteesta

<https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/hdpe-price-index/>

Britannica. (2026, 2 20). *Science Polyethylene*.

<https://www.britannica.com/science/polyethylene>

Corsini, L., Aranda-Jan, C. B., & Moultrie, J. (2022). The impact of 3D printing on the humanitarian. *Production Planning & Control*, 33:6-7, 8-10.

<https://doi:10.1080/09537287.2020.1834130>

FAME. (2025). *FAME Sustainable Additive Manufacturing is Finland's competitive edge*. Haettu 30.3.2026 osoitteesta <https://fame3d.fi/>

Foshammer, J., Søberg, P. V., Helo, P., & Ituarte, F. I. (2022). Identification of aftermarket and legacy parts suitable for additive manufacturing: A knowledge management-based approach. *International Journal of Production Economics*, 253, 1-11. <https://doi:10.1016/j.ijpe.2022.108573>.

Great Magtech electric. (27.2.2022). *Harvinaisten maametallien kierrätys ja käyttö*. <https://fi.gme-magnet.com/news/recycling-and-utilization-of-rare-earth-element-60414492.html>

Holmes, J. (2024). *Yhdistyneet Kansakunnat John Holmes: Luonnonkatastrofit ja niihin varautuminen*. <https://unric.org/fi/john-holmes-luonnonkatastrofit-ja-niihin-varautuminen/>

HUBS. (2023). *3D Printing Trend Report 2023*.

<https://www.protolabs.com/media/ji5flecj/3dp-trend-report-2023.pdf>

Huoltovarmuuskeskus. (2026). *Toimialat* Haettu 3.4.2026 osoitteesta

<https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/toimialat>

Intamsys (ei pvm.). *Funmat HT* Haettu 23.4.2026 osoitteesta

<https://www.intamsys.com/funmat-ht-3d-printer>

ISO. (2023). *ISO/IEC 3532-1:2023(en)*.

<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:79624:en>

Ketola, P. (6.9.2025). *3D printing renaissance Kansalaishuoltovarmuus 3D-tulostuksen avulla: kriisien keskellä yhteisölähtöisiä innovaatioita*.
<https://3drenaissance.com/2025/09/06/kansalaishuoltovarmuus/>

Ketola, P. (10.6.2025). *AHK Saksalais-Suomalainen Kauppakamari. Teollinen 3D-tulostus huoltovarmuuden ja joustavan valmistuksen tukena*.
Retrieved from <https://www.ahkfinnland.de/fi/blog/teollinen-3d-tulostus-huoltovarmuuden-ja-joustavan-valmistuksen-tukena>

L&T. (ei pvm.). *Syntypaikkalajittelu säästää jopa 40 % rakennustyömaan kustannuksia*. <https://www.lt.fi/referenssit/rakennustyomaa-on-raaka-aineiden-aarreaitta-lajittelu-on-rahamarvoista-tyota>

Laird plastics. (2025). *HDPE Guide: Properties, Uses & Applications [2025 Update]*. Haettu 30.3.2026 osoitteesta
<https://lairdplastics.com/resources/hdpe-guide-properties-uses-applications-2025-update/>

Levä, K. (ei pvm.). *Tukes: Kiertotalouden turvallisuusriskit hallintaan*.
<https://tukes.fi/kiertotalouden-turvallisuusriskit>

Muoviteollisuus RY. (2026). *PE*. Haettu 30.3.2026 osoitteesta
<https://plastics.fi/termi/pe/>

Naghshineh, B.;& Carvalho, H. (2021). The implications of additive manufacturing technology adoption for supply chain resilience: A systematic search and review. *International Journal of Production Economics*, 247, 1-2. <http://doi:10.1016/j.ijpe.2021.108387>

NIH. (3.6.2023). *NJIT SWAB - Throat Testing Swab*. Haettu 28.2.2026 osoitteesta <https://3d.nih.gov/entries/3DPX-014187>

O'Neill, B. (28.11.2022). *Wevolver HDPE 3D printing: applications, advantages, alternatives*. <https://www.wevolver.com/article/hdpe-3d-printing>

O'Neill, B. (3.12.2025). *Wevolver What is 3D Printer Filament Made Of? Polymers, Additives, Composites, and Beyond*.

<https://www.wevolver.com/article/what-is-3d-printer-filament-made-of-polymers-additives-composites-and-beyond>

Peron, M., Saporiti, N., Coruzzolo, A. M., Lolli, F., & Holmström, J. (2025). The impact of Additive Manufacturing on supply chain resilience: a Delphi study. *Technological Forecasting & Social change*, 219, 9-18.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124231>

Salmi, M., Akmal, J. S., Pei, E., Wolff, J., Jaribion, A., & Khajavi, S. H. (2020). 3D Printing in COVID-19: Productivity Estimation of the Most Promising Open Source Solutions in Emergency Situations. *Applied Sciences*, 1-2.
<https://doi.org/10.3390/APP10114004>

Shiferaw, M. Z., Gebremedhen, H. S., & Mengistie, A. K. (2023). Developing Filament Extruder and Characterization of Recycled High-Density Polyethylene for 3D Printing Filament Material. *Engineering: Open Access*(1), 5-20. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4441233>

Shmasuyeva, M., & Zander, U. (2025). *Cirplus Recycled High-density Polyethylene (R-HDPE)*. <https://cirplus.com/materials/R-HDPE>

Special Chem. (10.2.2026). *Guide Polyethylene (PE): How to select the right grade?* Haettu 29.3.2026 osoitteesta
<https://www.specialchem.com/plastics/guide/polyethylene-plastic>

Stratasys Direct. (8.1.2018). *ASTM Additive Manufacturing Standards: What You Need to Know*.
<https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/resources/articles/astm-additive-manufacturing-standards-what-you-need-to-know/>

Suomen Standardisoimisliitto SFS. (2019). Muovit. Taivutusominaisuuksien määrittäminen. (SFS-EN ISO 178:2019).

Suomen Standardisoimisliitto SFS. (2021). *Lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Perusteet ja sanasto (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021)*.

Suomen Standardisoimisliitto SFS. (2024). *Additive manufacturing. General principles. Main characteristics and corresponding test methods (SFS-EN ISO/ASTM 52927:2024)* .

Tesfaw, S., Bogale, T. M., & Fatoba, O. (2022). Evaluation of tensile and flexural strength properties of virgin and recycled high-density polyethylene (HDPE) for pipe fitting application. *Materials today proceedings*, 62(6), 7-8. <https://doi:10.1016/j.matpr.2022.03.385>

The plastic bottles company. (ei pvm.). *What is HDPE plastic?*
<https://www.theplasticbottlescompany.com/plastic-types/hdpe-plastic/>

Vainio, V. (21.3.2019). L&T: Teollisuuden muovijätteet kiertävät uusiksi tuotteiksi <https://www.lt.fi/blogi/teollisuudessa-muovi-ei-ole-ongelma>

Ympäristöministeriö. (ei pvm.). *Vastualueet Kiertotalous*. Haettu 4.4.2026 osoitteesta <https://ym.fi/kiertotalous>

Taivutuslujuustestitulokset ja näytteiden mitat

Testisauva	Taivutusjännitys (MPa)	Taivutuskerroin (Mpa)	Leveys (mm)	Paksuus (mm)
1_1	99,6172	3024,24	10,22	3,11
1_2	91,1928	2917,75	10,03	3,27
1_3	94,3067	2995,46	9,91	3,29
1_4	97,9692	3061,36	10,09	3,13
1_5	99,4652	3058,08	10,15	3,14
Keskiarvo	96,5102	3011,38	10,08	3,188
Keskihajonta	3,66211	58,8734	0,118321596	0,084970583
Suhteellinen keskihajonta	3,795 %	1,955 %	1,174 %	2,665 %
2_1	28,6815	774,656	9,55	3,16
2_2	27,6674	778,3	9,55	3,19
2_3	39,2663	1267,5	9,51	3,25
2_4	27,7256	750,06	9,56	3,25
2_5	29,7372	852,726	9,54	3,2
Keskiarvo	28,452925	788,9355	9,55	3,2
Keskihajonta	0,974279219	44,33790843	0,008164966	0,037416574
Suhteellinen keskihajonta	3,424 %	5,620 %	0,085 %	1,169 %

Filament Maker 2 ekstruusion tulokset jäykkyyssetus

4

Jäykkyyssetus

4

aika	Keskiarv o	vasen	keski	Oikea
min	mm			
0,000	1,760	1,783	1,775	1,723
0,167	1,761	1,772	1,783	1,727
0,333	1,745	1,743	1,769	1,722
0,500	1,765	1,778	1,788	1,728
0,667	1,742	1,744	1,767	1,715
0,833	1,802	1,806	1,825	1,773
1,000	1,722	1,732	1,743	1,691
1,167	1,781	1,772	1,809	1,762
1,333	1,747	1,736	1,763	1,740
1,500	1,738	1,731	1,759	1,723
1,667	1,753	1,754	1,775	1,729
1,833	1,723	1,735	1,746	1,688
2,000	1,716	1,740	1,718	1,688
2,167	1,781	1,782	1,796	1,765
2,333	1,753	1,751	1,773	1,734
2,500	1,715	1,712	1,735	1,699
2,667	1,745	1,738	1,768	1,730
2,833	1,762	1,764	1,775	1,747
3,000	1,768	1,775	1,790	1,738
3,167	1,749	1,749	1,773	1,727
3,333	1,757	1,757	1,769	1,746
3,500	1,772	1,772	1,791	1,752
3,667	1,749	1,756	1,771	1,719
3,833	1,766	1,773	1,793	1,733
4,000	1,760	1,759	1,775	1,746
4,167	1,735	1,729	1,752	1,723
4,333	1,748	1,748	1,774	1,722
4,500	1,731	1,725	1,758	1,710
4,667	1,715	1,710	1,731	1,705
4,833	1,751	1,747	1,775	1,729
5,000	1,753	1,764	1,781	1,715
5,167	1,761	1,764	1,789	1,728
5,333	1,799	1,798	1,829	1,771

5,500	1,779	1,786	1,805	1,747
5,667	1,766	1,771	1,787	1,740
5,833	1,790	1,791	1,813	1,766
6,000	1,729	1,730	1,741	1,718
6,167	1,773	1,776	1,798	1,746
6,333	1,783	1,779	1,808	1,762
6,500	1,771	1,780	1,792	1,742
6,667	1,782	1,783	1,803	1,760
6,833	1,770	1,769	1,780	1,762
7,000	1,749	1,762	1,760	1,725
7,167	1,745	1,747	1,765	1,725
7,333	1,770	1,772	1,788	1,749
7,500	1,750	1,763	1,772	1,714
7,667	1,732	1,738	1,748	1,711
7,833	1,797	1,797	1,814	1,780
8,000	1,714	1,721	1,726	1,695
8,167	1,785	1,786	1,806	1,763
8,333	1,717	1,723	1,730	1,699
8,500	1,760	1,769	1,785	1,727
8,667	1,722	1,729	1,747	1,691
8,833	1,740	1,751	1,763	1,704
9,000	1,750	1,770	1,763	1,717
9,167	1,744	1,749	1,765	1,719
9,333	1,771	1,790	1,790	1,734
9,500	1,728	1,757	1,743	1,684
9,667	1,729	1,751	1,746	1,689
9,833	1,723	1,727	1,749	1,694
10,000	1,748	1,732	1,784	1,729
10,167	1,699	1,703	1,715	1,677
10,333	1,740	1,746	1,766	1,708
10,500	1,712	1,720	1,732	1,683
10,667	1,745	1,743	1,770	1,721
10,833	1,783	1,783	1,817	1,748
11,000	1,742	1,742	1,769	1,716
11,167	1,755	1,769	1,779	1,718
11,333	1,732	1,723	1,762	1,712
11,500	1,723	1,695	1,733	1,740
11,667	1,692	1,662	1,709	1,705
11,833	1,714	1,716	1,741	1,684
12,000	1,764	1,752	1,785	1,754
12,167	1,786	1,793	1,819	1,745
12,333	1,805	1,807	1,829	1,777

12,500	1,820	1,819	1,844	1,798
12,667	1,785	1,804	1,807	1,742
12,833	1,794	1,801	1,818	1,764
13,000	1,804	1,818	1,823	1,771
13,167	1,799	1,810	1,823	1,765
13,333	1,782	1,785	1,807	1,755
13,500	1,754	1,752	1,773	1,736
13,667	1,774	1,779	1,791	1,753
13,833	1,794	1,792	1,811	1,777
14,000	1,772	1,777	1,790	1,748
14,167	1,767	1,770	1,790	1,741
14,333	1,770	1,735	1,793	1,781
14,500	1,735	1,734	1,753	1,717
14,667	1,745	1,745	1,762	1,728
14,833	1,759	1,764	1,764	1,751
15,000	1,760	1,754	1,786	1,740
15,167	1,727	1,730	1,736	1,715
15,333	1,756	1,762	1,779	1,728
15,500	1,766	1,767	1,780	1,748
15,667	1,768	1,775	1,789	1,740
15,833	1,751	1,750	1,771	1,731
16,000	1,761	1,764	1,784	1,736
16,167	1,744	1,756	1,756	1,719
16,333	1,732	1,738	1,745	1,712
16,500	1,755	1,752	1,771	1,743
16,667	1,764	1,772	1,781	1,740
16,833	1,757	1,769	1,776	1,725
17,000	1,754	1,759	1,772	1,730
17,167	1,744	1,747	1,755	1,730
17,333	1,724	1,734	1,733	1,705
17,500	1,778	1,781	1,803	1,750
17,667	1,743	1,754	1,757	1,717
17,833	1,738	1,740	1,763	1,711
18,000	1,749	1,738	1,771	1,738
18,167	1,705	1,679	1,701	1,735
18,333	1,742	1,731	1,761	1,734
18,500	1,769	1,757	1,785	1,767
18,667	1,726	1,719	1,748	1,711
18,833	1,752	1,736	1,762	1,759
19,000	1,737	1,754	1,756	1,702
19,167	1,747	1,772	1,770	1,699
19,333	1,738	1,738	1,760	1,715

19,500	1,751	1,746	1,760	1,747
19,667	1,771	1,771	1,798	1,744
19,833	1,743	1,750	1,749	1,728
20,000	1,777	1,793	1,788	1,751
20,167	1,773	1,798	1,781	1,740
20,333	1,764	1,786	1,778	1,729
20,500	1,749	1,765	1,757	1,726
20,667	1,792	1,794	1,823	1,760
20,833	1,762	1,786	1,772	1,727
21,000	1,784	1,811	1,791	1,749
21,167	1,770	1,793	1,781	1,735
21,333	1,746	1,762	1,763	1,712
21,500	1,742	1,763	1,747	1,717
21,667	1,776	1,789	1,799	1,741
21,833	1,755	1,771	1,770	1,726
22,000	1,760	1,762	1,783	1,734
22,167	1,739	1,752	1,751	1,714
22,333	1,752	1,768	1,768	1,721
22,500	1,759	1,778	1,768	1,731
22,667	1,753	1,760	1,776	1,724
22,833	1,763	1,772	1,784	1,732
23,000	1,762	1,787	1,778	1,720
23,167	1,739	1,763	1,750	1,705
23,333	1,748	1,764	1,761	1,719
23,500	1,740	1,752	1,755	1,713
23,667	1,730	1,744	1,748	1,699
23,833	1,765	1,780	1,781	1,733
24,000	1,753	1,747	1,774	1,738
24,167	1,693	1,701	1,704	1,675
24,333	1,761	1,766	1,783	1,733
24,500	1,737	1,735	1,760	1,715
24,667	1,741	1,757	1,753	1,714
24,833	1,753	1,747	1,777	1,734
25,000	1,721	1,727	1,744	1,693
25,167	1,721	1,725	1,742	1,695
25,333	1,751	1,769	1,771	1,712
25,500	1,763	1,760	1,785	1,746
25,667	1,754	1,751	1,774	1,738
25,833	1,778	1,777	1,803	1,756
26,000	1,754	1,736	1,763	1,762
26,167	1,724	1,717	1,747	1,708
26,333	1,746	1,742	1,764	1,733

26,500	1,705	1,699	1,719	1,697
26,667	1,724	1,726	1,750	1,695
26,833	1,723	1,720	1,746	1,704
27,000	1,708	1,715	1,732	1,675
27,167	1,745	1,738	1,763	1,734
27,333	1,766	1,765	1,777	1,758
27,500	1,755	1,751	1,774	1,738
27,667	1,735	1,764	1,759	1,682
27,833	1,796	1,797	1,817	1,773
28,000	1,815	1,809	1,832	1,803
28,167	1,765	1,759	1,785	1,751
28,333	1,777	1,772	1,798	1,763
28,500	1,759	1,754	1,778	1,746
28,667	1,745	1,746	1,766	1,722
28,833	1,780	1,792	1,807	1,741
29,000	1,757	1,755	1,775	1,740
29,167	1,766	1,759	1,789	1,750
29,333	1,770	1,775	1,784	1,752
29,500	1,768	1,780	1,795	1,729
29,667	1,740	1,738	1,762	1,719
29,833	1,759	1,767	1,782	1,730
30,000	1,740	1,740	1,764	1,715
30,167	1,738	1,737	1,760	1,716
30,333	1,749	1,759	1,767	1,721
30,500	1,753	1,754	1,780	1,724
30,667	1,762	1,778	1,784	1,723
30,833	1,769	1,782	1,790	1,734
31,000	1,755	1,756	1,772	1,736
31,167	1,752	1,754	1,765	1,738
31,333	1,757	1,763	1,778	1,731
31,500	1,765	1,777	1,789	1,730
31,667	1,769	1,778	1,788	1,740
31,833	1,734	1,735	1,758	1,708
32,000	1,720	1,720	1,743	1,697
32,167	1,753	1,762	1,775	1,723
32,333	1,755	1,766	1,778	1,721
32,500	1,777	1,791	1,800	1,742
32,667	1,776	1,775	1,802	1,750
32,833	1,764	1,760	1,787	1,745
33,000	1,755	1,763	1,775	1,728
33,167	1,778	1,788	1,800	1,745
33,333	1,760	1,763	1,787	1,731

33,500	1,767	1,775	1,791	1,736
33,667	1,757	1,776	1,774	1,723
33,833	1,768	1,766	1,797	1,743
34,000	1,743	1,747	1,769	1,711
34,167	1,775	1,809	1,772	1,745
34,333	1,746	1,766	1,762	1,711
34,500	1,750	1,770	1,767	1,714
34,667	1,736	1,752	1,753	1,702
34,833	1,757	1,776	1,772	1,724
35,000	1,737	1,749	1,753	1,711
35,167	1,754	1,761	1,778	1,724
35,333	1,751	1,766	1,761	1,727
35,500	1,759	1,762	1,774	1,742
35,667	1,758	1,767	1,782	1,724
35,833	1,743	1,755	1,763	1,712
36,000	1,754	1,761	1,770	1,732
36,167	1,729	1,744	1,734	1,709
36,333	1,759	1,777	1,773	1,728
36,500	1,766	1,764	1,792	1,743
36,667	1,742	1,747	1,758	1,721
36,833	1,763	1,751	1,786	1,751
37,000	1,740	1,751	1,761	1,709
37,167	1,758	1,758	1,783	1,734
37,333	1,738	1,747	1,758	1,710
37,500	1,762	1,769	1,781	1,735
37,667	1,743	1,750	1,762	1,717
37,833	1,763	1,773	1,784	1,732
38,000	1,759	1,754	1,773	1,750
38,167	1,746	1,749	1,758	1,733
38,333	1,742	1,750	1,760	1,716
38,500	1,742	1,744	1,756	1,725
38,667	1,762	1,762	1,783	1,742
38,833	1,727	1,722	1,748	1,713
39,000	1,780	1,778	1,798	1,763
39,167	1,740	1,735	1,755	1,730
39,333	1,733	1,731	1,746	1,722
39,500	1,721	1,712	1,743	1,708
39,667	1,753	1,754	1,763	1,743
39,833	1,723	1,728	1,738	1,704
40,000	1,769	1,764	1,787	1,756
40,167	1,742	1,755	1,768	1,704
40,333	1,737	1,733	1,757	1,720

40,500	1,729	1,726	1,753	1,708
40,667	1,740	1,730	1,752	1,737
40,833	1,727	1,731	1,743	1,707
41,000	1,778	1,776	1,799	1,760
41,167	1,792	1,788	1,807	1,782
41,333	1,767	1,770	1,790	1,742
41,500	1,771	1,789	1,795	1,729
41,667	1,786	1,786	1,811	1,762
41,833	1,758	1,762	1,771	1,739
42,000	1,760	1,756	1,780	1,745
42,167	1,759	1,756	1,781	1,739
42,333	1,782	1,789	1,798	1,757
42,500	1,746	1,749	1,774	1,715
42,667	1,766	1,772	1,786	1,741
42,833	1,780	1,784	1,796	1,759
43,000	1,761	1,768	1,774	1,742
43,167	1,757	1,768	1,772	1,732
43,333	1,756	1,754	1,774	1,740
43,500	1,741	1,743	1,763	1,717
43,667	1,764	1,773	1,784	1,735
43,833	1,742	1,748	1,762	1,715
44,000	1,749	1,753	1,765	1,729
44,167	1,738	1,744	1,756	1,713
44,333	1,768	1,771	1,790	1,744
44,500	1,757	1,731	1,784	1,758

Filament Maker 2 ekstruusion tulokset jäykkyyssasetus

1

Jäykkyyssasetus

1

aika	keskiarvo	vasen	keski	oikea
min			mm	
0	1,739	1,754	1,762	1,700
0,25	1,743	1,761	1,761	1,704
0,5	1,737	1,744	1,752	1,714
0,75	1,744	1,744	1,747	1,740
1	1,738	1,732	1,740	1,742
1,25	1,737	1,728	1,743	1,739
1,5	1,743	1,739	1,740	1,749
1,75	1,781	1,778	1,791	1,775
2	1,750	1,751	1,760	1,740
2,25	1,741	1,738	1,755	1,730
2,5	1,740	1,738	1,752	1,729
2,75	1,753	1,750	1,773	1,735
3	1,747	1,747	1,780	1,714
3,25	1,755	1,766	1,787	1,712
3,5	1,739	1,771	1,755	1,690
3,75	1,744	1,787	1,755	1,691
4	1,746	1,793	1,748	1,697
4,25	1,742	1,783	1,750	1,692
4,5	1,749	1,785	1,764	1,697
4,75	1,741	1,766	1,761	1,695
5	1,754	1,777	1,779	1,705
5,25	1,743	1,744	1,771	1,712
5,5	1,766	1,770	1,785	1,744
5,75	1,734	1,727	1,756	1,719
6	1,730	1,724	1,744	1,721
6,25	1,748	1,741	1,757	1,748
6,5	1,745	1,741	1,749	1,745
6,75	1,760	1,748	1,770	1,762
7	1,763	1,754	1,769	1,766
7,25	1,748	1,745	1,752	1,746
7,5	1,758	1,753	1,765	1,757
7,75	1,759	1,752	1,764	1,762
8	1,732	1,751	1,753	1,692
8,25	1,765	1,782	1,785	1,727
8,5	1,745	1,766	1,769	1,700
8,75	1,748	1,769	1,772	1,702

9	1,746	1,772	1,767	1,701
9,25	1,762	1,786	1,788	1,713
9,5	1,769	1,787	1,796	1,722
9,75	1,773	1,791	1,797	1,732
10	1,774	1,791	1,799	1,731
10,25	1,772	1,791	1,796	1,728
10,5	1,732	1,750	1,759	1,686
10,75	1,762	1,781	1,787	1,719
11	1,722	1,743	1,747	1,677
11,25	1,728	1,756	1,745	1,683
11,5	1,710	1,739	1,727	1,664
11,75	1,754	1,781	1,774	1,706
12	1,760	1,788	1,780	1,711
12,25	1,772	1,782	1,792	1,742
12,5	1,761	1,762	1,769	1,751
12,75	1,758	1,760	1,763	1,750
13	1,764	1,768	1,771	1,755
13,25	1,756	1,760	1,758	1,749
13,5	1,751	1,750	1,761	1,743
13,75	1,730	1,730	1,739	1,722
14	1,747	1,751	1,755	1,732
14,25	1,763	1,763	1,775	1,749
14,5	1,745	1,748	1,778	1,710
14,75	1,739	1,742	1,780	1,695
15	1,741	1,764	1,773	1,685
15,25	1,741	1,769	1,770	1,684
15,5	1,749	1,783	1,771	1,694
15,75	1,758	1,811	1,742	1,720
16	1,749	1,804	1,723	1,720
16,25	1,736	1,767	1,754	1,686
16,5	1,758	1,790	1,777	1,706
16,75	1,786	1,818	1,809	1,732
17	1,727	1,749	1,750	1,681
17,25	1,754	1,771	1,787	1,704
17,5	1,752	1,754	1,772	1,726
17,75	1,751	1,746	1,773	1,735
18	1,719	1,706	1,730	1,721
18,25	1,714	1,703	1,714	1,726
18,5	1,755	1,745	1,758	1,761
18,75	1,756	1,742	1,761	1,765
19	1,711	1,704	1,714	1,713
19,25	1,737	1,750	1,740	1,721
19,5	1,748	1,774	1,761	1,710
19,75	1,757	1,795	1,769	1,706

20	1,757	1,787	1,775	1,708
20,25	1,787	1,815	1,806	1,739
20,5	1,774	1,792	1,801	1,730
20,75	1,784	1,802	1,812	1,739
21	1,783	1,810	1,814	1,725
21,25	1,762	1,778	1,791	1,716
21,5	1,771	1,787	1,801	1,726
21,75	1,732	1,752	1,769	1,674
22	1,767	1,774	1,812	1,714
22,25	1,775	1,788	1,814	1,722
22,5	1,740	1,752	1,772	1,697
22,75	1,733	1,753	1,766	1,680
23	1,744	1,768	1,769	1,694
23,25	1,743	1,763	1,769	1,695
23,5	1,740	1,760	1,771	1,690
23,75	1,749	1,772	1,773	1,703
24	1,787	1,803	1,815	1,742
24,25	1,773	1,784	1,800	1,736
24,5	1,767	1,784	1,787	1,730
24,75	1,746	1,756	1,754	1,727
25	1,763	1,766	1,770	1,753
25,25	1,765	1,764	1,774	1,758
25,5	1,761	1,771	1,769	1,742
25,75	1,773	1,777	1,779	1,764
26	1,730	1,733	1,739	1,719
26,25	1,751	1,758	1,769	1,725
26,5	1,754	1,764	1,773	1,725
26,75	1,748	1,763	1,767	1,714
27	1,759	1,784	1,777	1,714
27,25	1,783	1,833	1,781	1,733
27,5	1,761	1,808	1,753	1,719
27,75	1,738	1,787	1,722	1,706
28	1,736	1,787	1,709	1,714
28,25	1,745	1,793	1,713	1,726
28,5	1,746	1,797	1,720	1,722
28,75	1,732	1,781	1,716	1,699
29	1,767	1,801	1,778	1,719
29,25	1,743	1,757	1,769	1,702
29,5	1,730	1,740	1,751	1,700
29,75	1,771	1,778	1,788	1,748
30	1,752	1,757	1,765	1,733
30,25	1,751	1,755	1,762	1,736
30,5	1,735	1,729	1,747	1,730
30,75	1,745	1,746	1,753	1,737

31	1,714	1,717	1,726	1,700
31,25	1,755	1,755	1,764	1,748
31,5	1,719	1,715	1,725	1,717
31,75	1,758	1,769	1,772	1,731
32	1,753	1,767	1,766	1,727
32,25	1,759	1,774	1,788	1,715
32,5	1,758	1,773	1,786	1,714
32,75	1,754	1,765	1,782	1,715
33	1,747	1,768	1,778	1,695
33,25	1,765	1,775	1,800	1,721
33,5	1,762	1,777	1,794	1,716
33,75	1,780	1,785	1,817	1,738
34	1,775	1,781	1,810	1,733
34,25	1,781	1,778	1,817	1,746
34,5	1,755	1,763	1,784	1,717
34,75	1,743	1,760	1,777	1,693
35	1,721	1,727	1,752	1,684
35,25	1,742	1,747	1,775	1,704
35,5	1,730	1,746	1,753	1,690
35,75	1,760	1,771	1,785	1,724
36	1,744	1,761	1,763	1,705
36,25	1,735	1,752	1,758	1,696
36,5	1,767	1,781	1,787	1,733
36,75	1,748	1,756	1,766	1,722
37	1,743	1,746	1,756	1,726
37,25	1,746	1,744	1,753	1,740
37,5	1,739	1,735	1,749	1,732
37,75	1,745	1,749	1,757	1,730
38	1,727	1,724	1,736	1,722
38,25	1,735	1,729	1,745	1,731
38,5	1,756	1,750	1,775	1,742
38,75	1,750	1,748	1,766	1,737
39	1,715	1,706	1,734	1,706
39,25	1,715	1,707	1,743	1,695
39,5	1,736	1,740	1,761	1,708
39,75	1,792	1,813	1,823	1,741
40	1,806	1,848	1,806	1,763
40,25	1,799	1,847	1,778	1,771
40,5	1,802	1,851	1,765	1,790
40,75	1,793	1,832	1,762	1,785
41	1,782	1,825	1,753	1,769
41,25	1,756	1,797	1,720	1,750
41,5	1,755	1,793	1,728	1,744
41,75	1,742	1,783	1,740	1,703

42	1,751	1,787	1,755	1,708
42,25	1,770	1,795	1,792	1,724
42,5	1,731	1,749	1,751	1,695
42,75	1,738	1,749	1,754	1,712
43	1,748	1,750	1,765	1,728
43,25	1,739	1,742	1,751	1,724
43,5	1,719	1,723	1,728	1,706
43,75	1,762	1,767	1,773	1,745
44	1,750	1,752	1,763	1,736
44,25	1,744	1,755	1,763	1,713
44,5	1,752	1,763	1,778	1,716
44,75	1,765	1,773	1,794	1,727
45	1,752	1,765	1,780	1,711
45,25	1,728	1,741	1,755	1,689
45,5	1,753	1,761	1,786	1,712
45,75	1,755	1,771	1,787	1,708
46	1,783	1,808	1,807	1,734
46,25	1,843	1,857	1,882	1,791
46,5	1,772	1,780	1,816	1,721
46,75	1,766	1,765	1,809	1,725
47	1,731	1,732	1,768	1,692
47,25	1,757	1,764	1,802	1,705
47,5	1,759	1,769	1,802	1,706
47,75	1,706	1,705	1,744	1,670
48	1,735	1,746	1,770	1,690
48,25	1,728	1,741	1,766	1,676
48,5	1,719	1,732	1,751	1,676
48,75	1,725	1,738	1,752	1,684
49	1,739	1,754	1,766	1,699
49,25	1,712	1,730	1,734	1,672
49,5	1,759	1,774	1,787	1,715
49,75	1,727	1,738	1,751	1,692
50	1,768	1,782	1,791	1,731
50,25	1,761	1,762	1,775	1,745
50,5	1,759	1,763	1,769	1,745
50,75	1,782	1,784	1,794	1,768
51	1,763	1,766	1,772	1,750
51,25	1,787	1,794	1,805	1,764
51,5	1,776	1,792	1,795	1,740
51,75	1,764	1,784	1,782	1,728
52	1,752	1,771	1,773	1,712
52,25	1,758	1,787	1,769	1,718
52,5	1,725	1,758	1,728	1,687
52,75	1,731	1,766	1,729	1,696

53	1,755	1,800	1,730	1,734
53,25	1,770	1,805	1,743	1,761
53,5	1,764	1,802	1,734	1,755
53,75	1,750	1,789	1,725	1,736
54	1,730	1,773	1,709	1,707
54,25	1,715	1,752	1,720	1,674
54,5	1,747	1,776	1,760	1,705
54,75	1,742	1,760	1,771	1,696
55	1,744	1,760	1,775	1,699
55,25	1,746	1,755	1,777	1,706
55,5	1,739	1,739	1,752	1,725
55,75	1,753	1,756	1,760	1,742
56	1,758	1,757	1,769	1,747
56,25	1,765	1,772	1,767	1,757
56,5	1,743	1,758	1,755	1,717
56,75	1,730	1,737	1,737	1,716
57	1,739	1,748	1,750	1,720
57,25	1,745	1,760	1,769	1,706
57,5	1,757	1,772	1,780	1,718
57,75	1,736	1,751	1,767	1,691
58	1,769	1,791	1,794	1,720
58,25	1,737	1,758	1,765	1,688
58,5	1,740	1,760	1,767	1,693
58,75	1,770	1,786	1,801	1,725
59	1,768	1,775	1,803	1,725
59,25	1,749	1,757	1,783	1,706
59,5	1,751	1,751	1,793	1,709
59,75	1,787	1,787	1,831	1,743
60	1,793	1,789	1,832	1,759
60,25	1,781	1,783	1,824	1,738
60,5	1,745	1,748	1,780	1,706
60,75	1,752	1,759	1,789	1,708
61	1,736	1,755	1,770	1,685
61,25	1,731	1,741	1,763	1,689
61,5	1,703	1,714	1,731	1,663
61,75	1,697	1,715	1,727	1,648
62	1,732	1,756	1,756	1,684
62,25	1,762	1,785	1,784	1,717
62,5	1,748	1,769	1,767	1,708
62,75	1,765	1,783	1,787	1,727
63	1,741	1,761	1,761	1,700
63,25	1,703	1,734	1,714	1,661
63,5	1,731	1,753	1,736	1,703
63,75	1,778	1,785	1,781	1,766

64	1,777	1,774	1,779	1,777
64,25	1,741	1,744	1,739	1,740
64,5	1,768	1,767	1,772	1,766
64,75	1,756	1,752	1,768	1,749
65	1,752	1,746	1,759	1,750
65,25	1,696	1,683	1,699	1,706
65,5	1,680	1,658	1,693	1,688
65,75	1,736	1,721	1,762	1,725
66	1,767	1,753	1,797	1,753
66,25	1,817	1,819	1,855	1,776
66,5	1,816	1,851	1,828	1,768
66,75	1,769	1,817	1,761	1,728
67	1,769	1,822	1,768	1,718
67,25	1,745	1,806	1,732	1,697
67,5	1,762	1,811	1,774	1,701
67,75	1,750	1,772	1,781	1,697
68	1,765	1,789	1,793	1,713
68,25	1,759	1,776	1,788	1,714
68,5	1,747	1,754	1,778	1,711
68,75	1,764	1,761	1,792	1,740
69	1,721	1,721	1,729	1,712
69,25	1,708	1,696	1,719	1,709
69,5	1,697	1,690	1,691	1,709
69,75	1,715	1,711	1,717	1,716
70	1,736	1,752	1,732	1,723
70,25	1,745	1,742	1,743	1,750
70,5	1,734	1,749	1,743	1,711
70,75	1,753	1,777	1,771	1,711
71	1,775	1,799	1,797	1,729
71,25	1,767	1,797	1,793	1,710
71,5	1,765	1,788	1,785	1,721
71,75	1,753	1,788	1,776	1,694
72	1,763	1,785	1,791	1,713
72,25	1,765	1,791	1,790	1,715
72,5	1,770	1,790	1,804	1,716
72,75	1,762	1,776	1,799	1,711
73	1,750	1,756	1,788	1,705
73,25	1,753	1,761	1,798	1,701
73,5	1,739	1,743	1,791	1,682
73,75	1,795	1,806	1,837	1,741
74	1,832	1,833	1,893	1,770
74,25	1,806	1,806	1,866	1,745
74,5	1,758	1,745	1,822	1,706
74,75	1,721	1,718	1,775	1,670

75	1,727	1,719	1,787	1,675
75,25	1,724	1,738	1,766	1,667
75,5	1,706	1,706	1,760	1,653
75,75	1,694	1,707	1,737	1,638
76	1,675	1,689	1,721	1,615
76,25	1,686	1,715	1,723	1,619
76,5	1,701	1,725	1,737	1,641
76,75	1,718	1,768	1,741	1,647
77	1,708	1,754	1,733	1,638
77,25	1,691	1,742	1,717	1,614
77,5	1,709	1,764	1,732	1,630
77,75	1,705	1,762	1,727	1,626
78	1,697	1,768	1,708	1,616
78,25	1,669	1,715	1,718	1,573

Filament Maker 2 ekstruusion tulokset jäykkyyssasetus

3

Jäykkyyssasetus 3	keskiarvo	vasen	keski	oikea
min	mm			
0,000	1,740	1,836	1,732	1,652
0,186	1,749	1,834	1,741	1,672
0,372	1,764	1,850	1,756	1,686
0,558	1,771	1,849	1,759	1,705
0,744	1,756	1,845	1,743	1,680
0,931	1,760	1,845	1,742	1,692
1,117	1,755	1,822	1,725	1,718
1,303	1,732	1,758	1,680	1,759
1,489	1,759	1,705	1,768	1,805
1,675	1,768	1,697	1,772	1,836
1,861	1,764	1,706	1,765	1,821
2,047	1,740	1,673	1,753	1,795
2,233	1,722	1,636	1,743	1,786
2,420	1,725	1,641	1,750	1,785
2,606	1,700	1,594	1,737	1,768
2,792	1,761	1,685	1,782	1,817
2,978	1,769	1,693	1,780	1,834
3,164	1,783	1,706	1,804	1,838
3,350	1,731	1,646	1,760	1,783
3,536	1,752	1,673	1,792	1,790
3,722	1,767	1,713	1,790	1,799
3,908	1,776	1,715	1,806	1,808
4,095	1,771	1,702	1,806	1,805
4,281	1,725	1,670	1,751	1,755
4,467	1,765	1,706	1,799	1,788
4,653	1,744	1,657	1,800	1,774
4,839	1,727	1,647	1,749	1,786
5,025	1,737	1,660	1,787	1,763
5,211	1,781	1,722	1,806	1,815
5,397	1,823	1,771	1,849	1,850
5,584	1,814	1,772	1,833	1,838
5,770	1,794	1,757	1,803	1,822
5,956	1,793	1,757	1,804	1,819
6,142	1,768	1,739	1,768	1,797
6,328	1,781	1,746	1,788	1,808
6,514	1,755	1,714	1,755	1,794
6,700	1,785	1,767	1,770	1,820

6,886	1,717	1,710	1,719	1,720
7,072	1,751	1,761	1,776	1,716
7,259	1,793	1,848	1,784	1,747
7,445	1,796	1,821	1,798	1,770
7,631	1,778	1,770	1,781	1,782
7,817	1,773	1,763	1,778	1,779
8,003	1,767	1,765	1,769	1,766
8,189	1,759	1,752	1,758	1,766
8,375	1,711	1,712	1,716	1,705
8,561	1,778	1,798	1,794	1,741
8,747	1,780	1,805	1,800	1,737
8,934	1,750	1,776	1,769	1,703
9,120	1,765	1,811	1,781	1,705
9,306	1,746	1,774	1,769	1,695
9,492	1,752	1,769	1,777	1,712
9,678	1,764	1,789	1,789	1,713
9,864	1,746	1,767	1,769	1,704
10,050	1,762	1,791	1,783	1,711
10,236	1,762	1,784	1,788	1,713
10,423	1,755	1,785	1,780	1,700
10,609	1,745	1,771	1,764	1,701
10,795	1,755	1,774	1,780	1,710
10,981	1,766	1,783	1,793	1,723
11,167	1,757	1,787	1,775	1,708
11,353	1,755	1,783	1,777	1,707
11,539	1,742	1,765	1,765	1,696
11,725	1,768	1,796	1,792	1,717
11,911	1,741	1,768	1,758	1,699
12,098	1,742	1,776	1,760	1,691
12,284	1,744	1,769	1,764	1,699
12,470	1,744	1,772	1,761	1,698
12,656	1,747	1,769	1,762	1,710
12,842	1,747	1,758	1,749	1,733
13,028	1,767	1,777	1,763	1,761
13,214	1,762	1,763	1,764	1,758
13,400	1,751	1,756	1,742	1,754
13,587	1,758	1,757	1,758	1,758
13,773	1,772	1,780	1,778	1,758
13,959	1,772	1,771	1,772	1,774
14,145	1,748	1,748	1,744	1,753
14,331	1,748	1,749	1,751	1,745
14,517	1,758	1,758	1,758	1,758
14,703	1,757	1,757	1,763	1,752
14,889	1,758	1,751	1,762	1,759

15,075	1,734	1,730	1,738	1,733
15,262	1,736	1,736	1,743	1,728
15,448	1,757	1,760	1,746	1,766
15,634	1,752	1,742	1,764	1,749
15,820	1,718	1,709	1,728	1,716
16,006	1,742	1,734	1,744	1,748
16,192	1,744	1,738	1,756	1,737
16,378	1,728	1,723	1,738	1,724
16,564	1,752	1,749	1,754	1,753
16,751	1,752	1,746	1,761	1,750
16,937	1,742	1,735	1,752	1,740
17,123	1,761	1,753	1,776	1,755
17,309	1,737	1,722	1,748	1,741
17,495	1,751	1,737	1,761	1,756
17,681	1,753	1,736	1,757	1,764
17,867	1,733	1,716	1,742	1,741
18,053	1,730	1,718	1,733	1,739
18,239	1,753	1,729	1,755	1,774
18,426	1,737	1,712	1,744	1,755
18,612	1,743	1,732	1,741	1,755
18,798	1,763	1,742	1,765	1,782
18,984	1,748	1,741	1,748	1,756
19,170	1,771	1,771	1,765	1,779
19,356	1,760	1,755	1,755	1,770
19,542	1,765	1,759	1,762	1,773
19,728	1,756	1,753	1,758	1,757
19,914	1,768	1,774	1,772	1,759
20,101	1,767	1,770	1,768	1,762
20,287	1,756	1,756	1,746	1,767
20,473	1,768	1,767	1,767	1,771
20,659	1,744	1,752	1,749	1,730
20,845	1,746	1,776	1,761	1,701
21,031	1,757	1,781	1,776	1,712
21,217	1,763	1,789	1,785	1,714
21,403	1,751	1,778	1,776	1,700
21,590	1,724	1,751	1,749	1,673
21,776	1,752	1,780	1,774	1,702
21,962	1,720	1,757	1,737	1,666
22,148	1,735	1,769	1,759	1,677
22,334	1,737	1,768	1,757	1,685
22,520	1,795	1,827	1,822	1,737
22,706	1,757	1,795	1,779	1,696
22,892	1,740	1,774	1,764	1,683
23,078	1,762	1,799	1,788	1,699

23,265	1,747	1,779	1,775	1,687
23,451	1,774	1,797	1,797	1,728
23,637	1,757	1,797	1,774	1,701
23,823	1,730	1,757	1,752	1,680
24,009	1,772	1,800	1,800	1,718
24,195	1,747	1,782	1,764	1,693
24,381	1,759	1,793	1,777	1,706
24,567	1,748	1,780	1,772	1,693
24,754	1,766	1,801	1,784	1,712
24,940	1,732	1,757	1,749	1,691
25,126	1,767	1,796	1,781	1,724
25,312	1,764	1,801	1,772	1,719
25,498	1,736	1,762	1,753	1,693
25,684	1,782	1,798	1,788	1,760
25,870	1,762	1,767	1,763	1,756
26,056	1,768	1,763	1,765	1,774
26,242	1,761	1,761	1,761	1,760
26,429	1,743	1,742	1,739	1,749
26,615	1,756	1,748	1,758	1,761
26,801	1,771	1,763	1,776	1,775
26,987	1,765	1,752	1,769	1,775
27,173	1,735	1,728	1,737	1,741
27,359	1,700	1,698	1,695	1,707
27,545	1,740	1,729	1,741	1,751
27,731	1,782	1,767	1,790	1,789
27,918	1,746	1,733	1,744	1,760
28,104	1,778	1,781	1,776	1,776
28,290	1,738	1,734	1,740	1,739
28,476	1,739	1,738	1,738	1,741
28,662	1,767	1,767	1,770	1,764
28,848	1,750	1,746	1,759	1,746
29,034	1,744	1,738	1,755	1,737
29,220	1,776	1,775	1,781	1,771
29,406	1,731	1,724	1,749	1,720
29,593	1,745	1,740	1,757	1,740
29,779	1,776	1,768	1,781	1,779
29,965	1,731	1,721	1,743	1,730
30,151	1,734	1,724	1,734	1,744
30,337	1,755	1,741	1,760	1,764
30,523	1,768	1,756	1,783	1,766
30,709	1,743	1,735	1,746	1,749
30,895	1,773	1,758	1,768	1,794
31,081	1,743	1,723	1,748	1,759
31,268	1,749	1,732	1,753	1,763

31,454	1,741	1,726	1,742	1,754
31,640	1,775	1,763	1,773	1,788
31,826	1,750	1,742	1,753	1,755
32,012	1,779	1,771	1,779	1,788
32,198	1,764	1,757	1,764	1,772
32,384	1,756	1,755	1,752	1,762
32,570	1,764	1,760	1,763	1,769
32,757	1,740	1,740	1,739	1,740
32,943	1,751	1,746	1,750	1,758
33,129	1,748	1,753	1,744	1,747
33,315	1,749	1,756	1,742	1,749
33,501	1,732	1,748	1,738	1,711
33,687	1,767	1,800	1,770	1,731
33,873	1,744	1,790	1,760	1,683
34,059	1,762	1,797	1,775	1,713
34,245	1,736	1,777	1,747	1,684
34,432	1,700	1,731	1,719	1,651
34,618	1,726	1,764	1,748	1,666
34,804	1,735	1,773	1,756	1,675
34,990	1,754	1,804	1,769	1,691
35,176	1,749	1,790	1,769	1,686
35,362	1,768	1,802	1,793	1,710
35,548	1,763	1,798	1,787	1,706
35,734	1,750	1,783	1,776	1,690
35,921	1,765	1,802	1,789	1,704
36,107	1,768	1,800	1,791	1,712
36,293	1,763	1,802	1,779	1,707
36,479	1,757	1,790	1,780	1,701
36,665	1,749	1,780	1,773	1,693
36,851	1,746	1,787	1,765	1,687
37,037	1,795	1,828	1,816	1,742
37,223	1,776	1,804	1,800	1,725
37,409	1,760	1,798	1,778	1,703
37,596	1,747	1,775	1,765	1,703
37,782	1,754	1,789	1,775	1,699
37,968	1,776	1,808	1,796	1,725
38,154	1,766	1,796	1,787	1,717
38,340	1,765	1,789	1,784	1,722
38,526	1,730	1,780	1,741	1,669
38,712	1,728	1,763	1,745	1,675
38,898	1,763	1,811	1,767	1,710
39,085	1,697	1,733	1,707	1,651
39,271	1,714	1,751	1,718	1,675
39,457	1,730	1,767	1,727	1,694

39,643	1,714	1,750	1,720	1,673
39,829	1,755	1,775	1,750	1,739
40,015	1,778	1,772	1,775	1,788
40,201	1,798	1,781	1,799	1,815
40,387	1,760	1,745	1,764	1,772
40,573	1,776	1,767	1,775	1,785
40,760	1,788	1,771	1,796	1,797
40,946	1,790	1,789	1,792	1,788
41,132	1,783	1,768	1,781	1,799
41,318	1,760	1,753	1,768	1,759
41,504	1,779	1,771	1,791	1,776
41,690	1,738	1,740	1,739	1,736
41,876	1,773	1,772	1,779	1,770
42,062	1,768	1,759	1,787	1,759
42,248	1,747	1,741	1,761	1,740
42,435	1,776	1,779	1,789	1,760
42,621	1,749	1,742	1,763	1,742
42,807	1,736	1,739	1,744	1,724
42,993	1,788	1,785	1,793	1,785
43,179	1,744	1,745	1,748	1,740
43,365	1,777	1,773	1,788	1,770
43,551	1,747	1,743	1,753	1,745
43,737	1,742	1,738	1,747	1,741
43,924	1,766	1,765	1,770	1,763
44,110	1,726	1,720	1,729	1,728
44,296	1,760	1,756	1,766	1,759
44,482	1,769	1,761	1,777	1,769
44,668	1,745	1,735	1,753	1,747
44,854	1,748	1,747	1,752	1,745
45,040	1,751	1,752	1,757	1,745
45,226	1,768	1,766	1,768	1,771
45,412	1,768	1,776	1,774	1,755
45,599	1,755	1,756	1,757	1,752
45,785	1,744	1,742	1,747	1,743
45,971	1,753	1,745	1,746	1,768
46,157	1,715	1,714	1,717	1,713
46,343	1,761	1,781	1,761	1,741
46,529	1,744	1,786	1,753	1,692
46,715	1,760	1,786	1,772	1,721
46,901	1,771	1,801	1,789	1,723
47,088	1,760	1,787	1,772	1,722
47,274	1,758	1,792	1,775	1,707
47,460	1,772	1,802	1,793	1,719
47,646	1,747	1,785	1,765	1,691

47,832	1,750	1,786	1,773	1,690
48,018	1,749	1,785	1,773	1,688
48,204	1,751	1,776	1,776	1,700
48,390	1,781	1,806	1,806	1,730
48,576	1,740	1,766	1,761	1,692
48,763	1,758	1,781	1,781	1,713
48,949	1,762	1,794	1,783	1,710
49,135	1,750	1,785	1,776	1,690
49,321	1,739	1,761	1,762	1,694
49,507	1,753	1,783	1,778	1,698
49,693	1,752	1,780	1,778	1,698
49,879	1,765	1,782	1,792	1,721
50,065	1,766	1,789	1,789	1,721
50,252	1,770	1,803	1,791	1,717
50,438	1,776	1,801	1,799	1,727
50,624	1,741	1,762	1,768	1,694
50,810	1,780	1,808	1,799	1,732
50,996	1,727	1,749	1,752	1,682
51,182	1,773	1,807	1,791	1,721
51,368	1,741	1,766	1,764	1,693
51,554	1,762	1,792	1,784	1,709
51,740	1,753	1,781	1,769	1,710
51,927	1,727	1,758	1,741	1,683
52,113	1,756	1,780	1,776	1,712
52,299	1,757	1,780	1,774	1,716
52,485	1,741	1,767	1,754	1,702
52,671	1,761	1,770	1,766	1,747
52,857	1,766	1,765	1,770	1,765
53,043	1,743	1,744	1,740	1,746
53,229	1,755	1,754	1,748	1,763
53,415	1,752	1,744	1,752	1,759
53,602	1,737	1,727	1,739	1,745
53,788	1,769	1,763	1,766	1,780
53,974	1,739	1,736	1,737	1,744
54,160	1,721	1,720	1,724	1,719
54,346	1,766	1,756	1,772	1,769
54,532	1,748	1,742	1,745	1,757
54,718	1,726	1,728	1,726	1,724
54,904	1,763	1,762	1,765	1,762
55,091	1,753	1,744	1,763	1,752
55,277	1,746	1,743	1,745	1,750
55,463	1,782	1,780	1,792	1,775
55,649	1,776	1,769	1,786	1,774
55,835	1,758	1,753	1,770	1,752

56,021	1,763	1,758	1,775	1,757
56,207	1,753	1,752	1,757	1,751
56,393	1,740	1,739	1,750	1,732
56,579	1,757	1,748	1,773	1,749
56,766	1,755	1,752	1,763	1,748
56,952	1,750	1,743	1,765	1,743
57,138	1,773	1,772	1,784	1,763
57,324	1,751	1,753	1,754	1,747
57,510	1,774	1,771	1,782	1,769
57,696	1,746	1,740	1,751	1,749
57,882	1,726	1,720	1,733	1,726
58,068	1,734	1,729	1,737	1,737
58,255	1,746	1,738	1,750	1,750
58,441	1,734	1,730	1,737	1,734
58,627	1,756	1,746	1,761	1,761
58,813	1,721	1,706	1,724	1,735
58,999	1,720	1,704	1,718	1,736
59,185	1,720	1,708	1,717	1,734
59,371	1,716	1,710	1,711	1,727
59,557	1,731	1,720	1,722	1,751
59,743	1,738	1,724	1,735	1,754
59,930	1,772	1,762	1,764	1,788
60,116	1,767	1,765	1,766	1,770
60,302	1,780	1,779	1,773	1,788
60,488	1,772	1,784	1,772	1,760
60,674	1,758	1,774	1,765	1,735
60,860	1,753	1,796	1,765	1,699
61,046	1,761	1,804	1,776	1,703
61,232	1,746	1,781	1,759	1,698
61,419	1,765	1,804	1,780	1,713
61,605	1,764	1,798	1,784	1,710
61,791	1,747	1,787	1,762	1,693
61,977	1,737	1,780	1,752	1,680
62,163	1,725	1,776	1,740	1,659
62,349	1,720	1,768	1,741	1,651
62,535	1,742	1,780	1,757	1,688
62,721	1,730	1,767	1,755	1,667
62,907	1,748	1,793	1,767	1,684
63,094	1,748	1,785	1,775	1,685
63,280	1,754	1,777	1,790	1,693
63,466	1,746	1,782	1,776	1,680
63,652	1,762	1,796	1,785	1,705
63,838	1,794	1,824	1,828	1,731
64,024	1,752	1,785	1,772	1,698

64,210	1,756	1,792	1,782	1,693
64,396	1,753	1,792	1,776	1,691
64,582	1,726	1,762	1,744	1,671
64,769	1,742	1,792	1,755	1,678
64,955	1,737	1,780	1,751	1,680
65,141	1,742	1,779	1,768	1,680
65,327	1,760	1,818	1,772	1,690
65,513	1,762	1,808	1,779	1,698
65,699	1,736	1,779	1,749	1,678
65,885	1,758	1,821	1,763	1,689
66,071	1,718	1,762	1,727	1,665
66,258	1,774	1,817	1,784	1,721
66,444	1,754	1,799	1,767	1,697
66,630	1,744	1,792	1,758	1,683
66,816	1,742	1,792	1,749	1,685
67,002	1,744	1,783	1,751	1,698