

Optimoitu 3D-Tulostaminen

Infill-kuvion vaikutus kappaleiden kustannustehokkuuteen ja mekaanisiin ominaisuuksiin

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK), Konetekniikka (Materiaali- ja valmistustekniikka)

2023

Jaakko Salén

Tiivistelmä

Tekijä(t) Jaakko Salén	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 11/2023
	Sivumäärä 37	
Työn nimi Optimoitu 3D-tulostaminen Infill-kuvion vaikutus kappaleiden kustannustehokkuuteen ja mekaanisiin ominaisuuksiin		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), Konetekniikka (Materiaali- ja valmistustekniikka)		
Toimeksiantajaorganisaatio (jos opinnäytetyöllä on toimeksiantaja) Reijo Heikkinen, Yliopettaja, LAB Ammattikorkeakoulu		
Tiivistelmä <p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin, kuinka eri infill-kuviot vaikuttavat 3D-tulostettujen kappaleiden kustannustehokkuuteen ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Mekaanisten testien avulla selvitettiin, miten taivutus-, puristus- ja vetolujuus muuttuvat eri infill-prosenttien mukaisesti.</p> <p>Tutkimuksen perusteella havaittiin, että optimaalinen infill-prosentti vaihtelee rasiuksen tyypin mukaan. Esimerkiksi puristustestissä suurempi infill-prosentti tuotti parempia tuloksia, mutta materiaalin kustannukset olivat myös korkeammat. Kuitenkin huomioidessa sekä materiaalikustannukset, että mekaaniset ominaisuudet, voidaan päätellä, ettei aina ole taloudellisesti järkevää käyttää korkeinta infill-prosenttia. Tulokset antavat arvokasta tietoa siitä, kuinka 3D-tulostamista voidaan optimoida, sekä kustannustehokkuuden, että tuotteen laadun näkökulmasta.</p>		
Asiasanat 3D-tulostus, Infill-kuvio, kustannustehokkuus, mekaaniset ominaisuudet, optimoitu tulostus, taivutustesti, puristustesti, vetotesti		

Abstract

Author(s)	Type of Publication	Published
Jaakko Salen	Thesis, UAS	11/2023
	Number of Pages	
	37	
Title of Publication		
Optimized 3D printing The impact of infill patterns on the cost-effectiveness and mechanical properties.		
Degree, Field of Study		
Engineer (UAS), Mechanical Engineering (Material and processing)		
Organization of the client (if the thesis work is commissioned by another party)		
Reijo Heikkinen, Senior lecturer, LAB university of applied sciences.		
Abstract		
<p>In this bachelor's thesis, the impact of different infill patterns on the cost-effectiveness and mechanical properties of 3D printed parts was investigated. Through mechanical tests, it was determined how bending, compression, and tensile strength vary according to different infill percentages.</p> <p>Based on the research, it was found that the optimal infill percentage varies depending on the test. For instance, in the compression test, a higher infill percentage yielded better results, but the material costs were also higher. However, when considering both material costs and mechanical properties, it can be concluded that it is not always economically sensible to use the highest infill percentage. The results provide valuable insights into how 3D printing can be optimized from both a cost-effectiveness and product quality perspective.</p>		
Keywords		
3D printing, infill pattern, cost-effectiveness, mechanical properties, bending test, compression test, tension test, optimized printing		

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	1
2	3D-tulostaminen.....	2
2.1	Ainetta lisäävä valmistus.....	2
2.2	Ainetta lisäävän valmistuksen historia ja kehitys.....	2
3	Koekappaleiden valmistus	5
3.1	Materiaali: ecoPLA.....	5
3.2	Täyttökuvio	5
3.3	3D-tulostin: Prusa Original MK3S	7
3.4	Aineenkoetuslaite	7
4	3D-Tulosteiden ominaisuuksien testaus.....	10
4.1	Kappalekoot ja standardit	10
4.1.1	Taivutuskoekappaleet.....	11
4.1.2	Puristus koekappaleet	12
4.1.3	Veto koekappaleet.....	13
4.2	Testausmenetelmät ja standardit.....	14
4.2.1	Menetelmistä ja sovelluksista yleisesti.....	15
4.2.2	Taivutuskokeen menetelmä ja sovellutukset.....	16
4.2.3	Puristuskokeen menetelmät ja sovellutukset.....	17
4.2.4	Vetokokeen menetelmät ja sovellutukset.....	17
4.3	Valmistuskustannukset ja tuotantoaika	18
4.3.1	Taivutussarja tuotantokustannus	19
4.3.2	Puristussarja tuotantokustannus.....	21
4.3.3	Vetosarja tuotantokustannus	22
4.4	Testaustapojen toteaminen ja kehittäminen.....	23
4.4.1	Testauskertojen määrä	24
4.4.2	Tulosten kirjaus	24
5	Tulokset.....	25
5.1	Taivutustestin tulokset ja tulkinta	25
5.2	Puristustestin tulokset ja tulkinta.....	28
5.3	Vetotestin tulokset ja tulkinta	31
6	Yhteenvedo ja pohdinta	34
	Lähteet	36

1 Johdanto

3D-tulostus on noussut viime vuosina merkittäväksi tekniikaksi monilla aloilla, mukaan lukien teollisuus, lääketiede ja rakentaminen. Kuten minkä tahansa valmistusprosessin yhteydessä, myös 3D-tulostuksessa on tärkeää löytää tasapaino tuotantokustannusten ja lopputuotteen laadun välillä. Tässä opinnäytetyössä keskitytään erityisesti siihen, miten 3D-tulostettujen kappaleiden infill-kuvio vaikuttaa niiden kustannustehokkuuteen ja mekaanisiin ominaisuuksiin.

Infill-kuvio on yksi keskeinen tekijä, joka määrittää 3D-tulostetun kappaleen sisäisen rakenteen ja sen myötä myös kappaleen mekaaniset ominaisuudet. Erilaiset infill-kuviot voivat vaikuttaa kappaleen lujuuteen, jäykkyyteen ja muihin mekaanisiin ominaisuuksiin merkittävästi. Lisäksi infill-kuvion valinta vaikuttaa suoraan materiaalin käyttömäärään ja siten 3D-tulostuksen kustannuksiin.

Tämän työn tavoitteena on tutkia eri täyttöasteiden vaikutuksia 3D-tulostettujen kappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten taivutus-, puristus- ja vetolujuuteen. Samalla pyritään ymmärtämään, miten eri infill-prosentit vaikuttavat tulostuksen kustannustehokkuuteen, kun huomioidaan materiaalikustannukset ja tuotteen laatu. Työ pyrkii tarjoamaan arvokasta tietoa siitä, kuinka 3D-tulostamista voidaan optimoida, sekä taloudellisesta, että teknisestä näkökulmasta.

2 3D-tulostaminen

2.1 Ainetta lisäävä valmistus

Ainetta lisäävä valmistus, yleisemmin 3D-tulostus on menetelmä, jossa materiaalia lisätään kerros kerrokselta muodostaen kolmiulotteinen kohde digitaalisen mallin perusteella. Yksi yleisimmistä 3D-tulostustekniikoista on FDM (Fused Deposition Modeling) tai FFF (Fused Filament Fabrication). (Statista 2023) Tässä tutkimuksessa keskitytään juuri FDM tulosteiden ominaisuuksiin.

FDM-teknologiassa tulostuspää sulattaa termoplastista filamenttia, joka pursotetaan tarkasti ohjattuun kohtaan tulostusalustalle. Kun sulanut materiaali pursotetaan, joka muodostaa kappaleen, se jäähtyy ja kovettuu. Tuloste muodostuu kerros kerrokselta perinteisesti alhaalta ylöspäin, mutta myös vaihtoehtoisia sovelluksia löytyy kuten tulostinpään asettaminen 45° kulmaan tai käyttämällä useampaa liikeakselia perinteisen 3 sijaan. (XYZDims 2021) Materiaaleja voidaan myös tulostaa useita eri tyyppisiä ja värejä saman prosessin aikana erityisesti silloin, kun laite on varustettu automaattisella materiaalin vaihtajalla. (Prusa3D-2 2023)

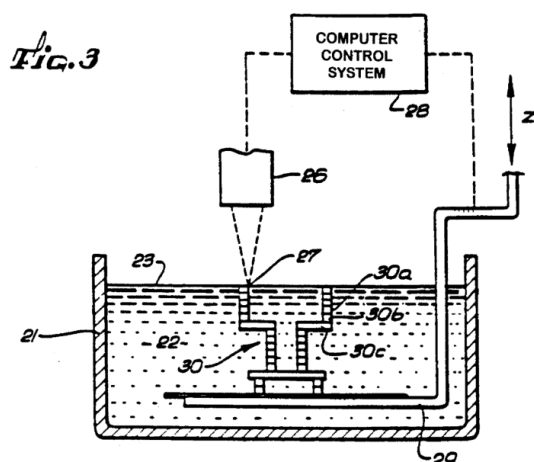
Valittu infill-kuvio ja tiheys määrittävät osan sisäisen rakenteen, mikä vaikuttaa sen mekaanisiin ominaisuuksiin ja painoon (Science Direct 2023) Täyttökuvion tyyppin ja tiheyden asetukset voidaan mukauttaa optimaalisen lujuuden, jäykkyyden, nopeuden ja materiaalin käytön mukaan.

Yksi FDM/FFF-tulostuksen keskeisistä eduista on sen joustavuus: sillä erilaisia materiaaleja, kuten PLA, ABS ja PETG voidaan käyttää sovelluksen vaatimusten mukaan. (Simplify3D 2023) Lisäksi tulostettavien kappaleiden geometriat voivat olla monimutkaisia ja niissä voi olla sisäisiä onteloita sekä kanavia, jotka olisivat vaikeita tai mahdottomia valmistaa perinteisillä valmistusmenetelmillä. Nykyään FDM/FFF-tulostus on laajalti käytössä niin teollisuudessa, harrastajayhteisöissä kuin tutkimuksessakin ja se tarjoaa tehokkaan tavan prototyyppien valmistukseen, räätälöityihin ratkaisuihin ja jopa lopputuotteiden valmistukseen.

2.2 Ainetta lisäävän valmistuksen historia ja kehitys

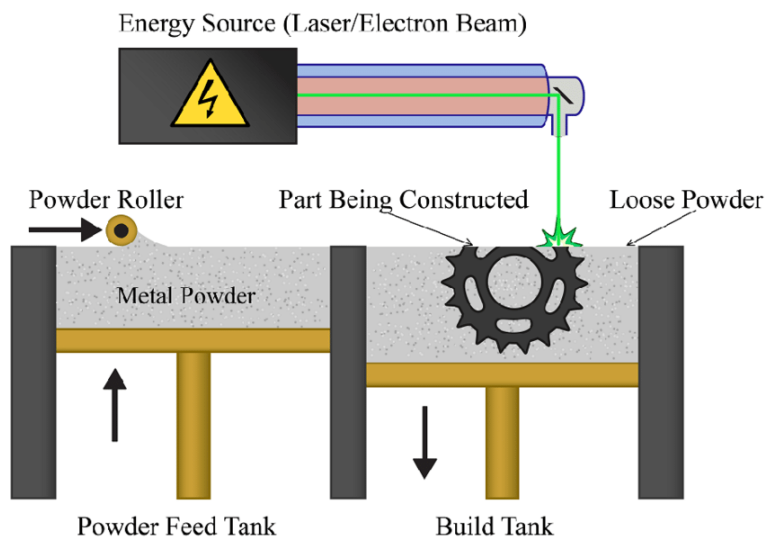
3D teknologiaa hyödyntävät ainetta lisäävän valmistuksen juuret voidaan jäljittää 1980-luvulle, kun ensimmäiset patentit ja prototyypit 3D-tulostustekniikoista esiteltiin (kuva 1). Chuck Hull kehitti stereolitografian (SLA) vuonna 1984, missä käytettiin UV-laseria

kovettamaan nestemäistä hartsia kerros kerrokselta (Google patents 2023-1). Tämä oli ensimmäinen askel kohti nykypäivän monimuotoisia 3D-tulostusmenetelmiä.



Kuva 1. SLA tulostuksen toimintaperiaate (US patent 1984)

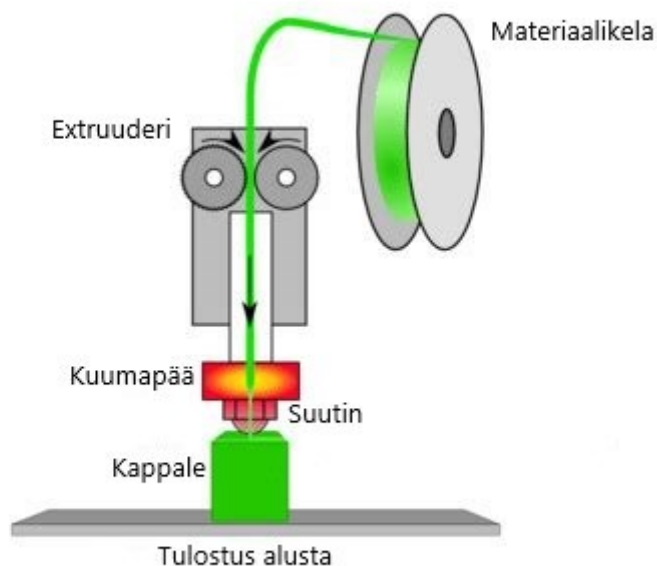
1990-luvulla Fused Deposition Modeling (FDM) -teknologia otettiin käyttöön. Samana vuosikymmenenä Selective Laser Sintering (SLS) -tekniikka esiteltiin, jossa jauhemainen materiaali sulatetaan laserin avulla (Google patents 2023). SLS-tekniikassa altistetaan jauhemainen raaka-aine altistetaan kohdistetulle laser säteelle jonka energian avulla kappale sintrataan yhtenäiseksi kerros kerrokselta, kappale rakentuu jauheen sekaan joka mahdollistaa erittäin monimutkaisten kappaleiden tuottamisen (kuva 2).



Kuva 2. SLS teknologian toimintaperiaate (Researchgate 2023)

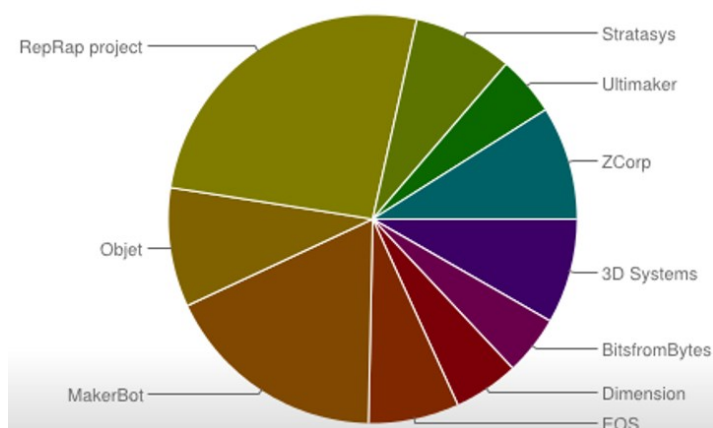
Tämän tutkimuksen kappaleiden tuottamiseen käytetyssä FDM tulostuksessa materiaalia eli filamenttia johdetaan materiaalikelalta extruuderiin, joka annostelee halutun määrän materiaalia. Materiaali kulkee kuumäpään kautta, jossa se kuumennetaan haluttuun

lämpötilaan. Tämän jälkeen suutin annostelee materiaalin kerros kerrokselta haluttuun muotoon muodostaen kappaleen tulostusalustalle.



Kuva 3. FDM/FFF tulostuksen toimintaperiaate (Jaakko Salen, reprap.org)

2000-luvulla 3D-tulostukseen liittyvien patenttien vanhetessa alkoi tulostusteknologia laajentua teollisuudesta kuluttajamarkkinoille (Techcrunch 2016), ja tulostimet muuttuivat edullisemmiksi, sekä helpommin saataviksi. Open source -projektit, kuten RepRap (kuva 4), mahdollistivat harrastajille ja pienille yrityksille pääsyn tähän moderniin teknologiaan (reprap 2023) Samalla materiaalit monipuolistuivat ja tulostustekniikat paranivat.



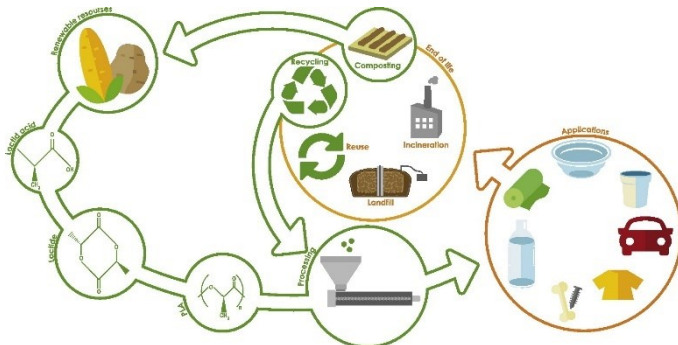
Kuva 4. Kuvio valmistajien markkina jakautumasta (Statistical Studies of Peer Production 2013)

3 Koekappaleiden valmistus

3.1 Materiaali: ecoPLA

Käytetty testausmateriaali valikoitui pohjautuen lähinnä omien projektieni yleisimmästä materiaalista. Valinta kohdistui PLA-muoviin, tunnetaan myös nimellä Polylaktidi mikä valmistetaan pääosin maitohaposta käymis- prosessin kautta. Materiaalin toimittajana toimi itävaltalainen yritys 3Djake ja tuotteeksi valikoitui ecoPLA Silver (3Djake 2023) filamentti. Oli tärkeää valita värinaineita sisältävä materiaali, sillä ne voivat vaikuttaa materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin sen sisäisten polymeeri sidosten muutosten kautta.

PLA on erinomainen valinta testausmateriaaliksi, koska sen fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet tekevät siitä edustavan monille muoveille. Lisäksi se on myös tunnettu jäykkyydestään ja hyvästä iskunkestävyydestään, mikä tekee siitä ihanteellisen kandidaatin mekaanisen rasituksen testeille. PLA on myös biopohjainen muovi, eli se on muita synteettisiä muoveja ympäristöystävällisempi vaihtoehto raakamateriaalin uusiutumisen näkökulmasta, tutkimukset molempien materiaalien kierrätysprosessien todellisesta ympäristöystävällisyydestä ovat kuitenkin tällä hetkellä puutteellisia eikä kaikkia teollisuuden vaikutuksia ja vaatimuksia olla tutkittu. (Science Direct 2020)



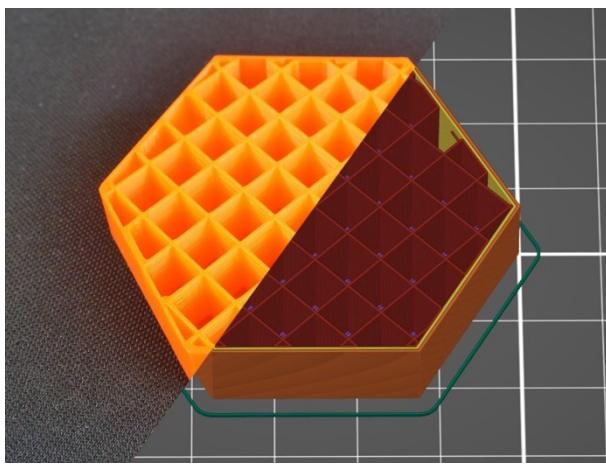
Kuva 6. Virtauskuvio PLA materiaalin kiertotalous periaatteesta (Science Direct)

3.2 Täyttökuvio

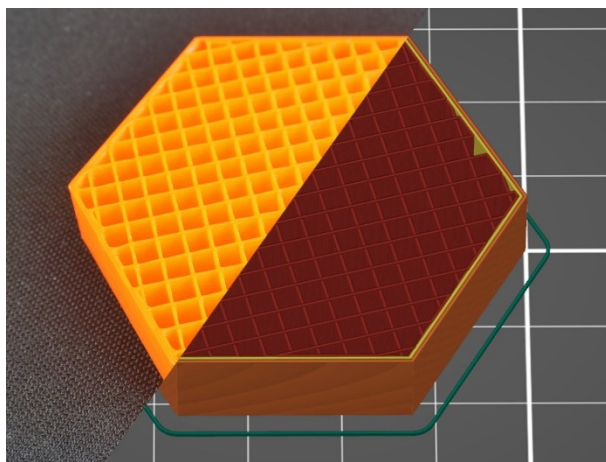
GRID, joka tunnetaan myös suoraviivaisena verkkotäyttökuviona, perustuu pääasiassa kappaleen orientaatioon ja viipalointiohjelman asetuksiin. Tyypillisesti se sijoittuu 45° kulmaan tulostimen X- tai Y-akseliin nähden. Tätä kulmaa voidaan muuttaa kappaleen käyttötarkoituksen tai erityisen geometrian vaatimusten mukaisesti. Kerrosten välisen suunnan on kuitenkin pysyttävä kohtisuorassa edelliseen kerrokseen nähden. (Prusa3D 2023-1)

Suoraviivainen kuvio luo kerroksittaisen ristikkäisrakenteen (kuva 7 ja 8), jossa parillisilla ja parittomilla kerroksilla on eri suuntaiset linjat (Prusa3D 2023-1). Nämä kerrokset liittyvät yhteen muodostaen rakenteen, joka on sekä kevyt, että kustannustehokas. Tämä on erityisen tärkeää tilanteissa, joissa halutaan korkea suhteellinen täyttöprosentti ilman suurta materiaalikustannusta.

GRID-täyttökuvio on erityisen suositeltava sellaisten teknisten kappaleiden tulostamiseen, joissa vaaditaan keskivertoa mekaanista kestävyttä eikä pinnan laatu ole määrittävä tekijä. GRID täyttökuvio on hyvin samankaltainen kuin Rectlinear täyttökuvio.



Kuva 7. GRID - kuvio (Prusa3D)



Kuva 8. Rectlinear - kuvio (Prusa3D)

Merkittävät erot kuvioiden välillä on, että rectlinear tarjoaa kaksinkertaisen määrän tukea päälle tulevalle kokonaiselle kerrokselle, mutta täyttää vain joka toisen kerroksen aina 90° kulmassa edelliseen nähden ja grid vuorostaan täyttää jokaisen kerroksen kuvioilla aina kääntäen 90° edelliseen kerrokseen nähden. Vaikka rakenteesta tulee jäykempi paremman kerroksien välisen yhteyden kautta, voi se johtaa tulosteen epäonnistumiseen, sillä

materiaalivirrat kohtaavat ristikkorakenteen risteyksissä muodostaen epätasaisuuksia. Tämä saattaa johtaa häiriöihin pinnanlaadussa, materiaalin virtauksessa tai jopa suutin kärjen törmäykseen.

3.3 3D-tulostin: Prusa Original MK3S

Projektissa käytettiin Prusa Original MK3S 3D-tulostinta (Kuva 9), joka on varustettu E3D V6 kuumapäällä. Tämä tulostin kasattiin ja kalibroitiin nimenomaan tämän projektin tarpeisiin ja se oli täysin käyttämätön ennen projektin aloittamista. Laitteen keskeinen toimintaperiaate on FDM-menetelmä (Prusa3D 2023-3). Tulostin on varustettu lämmitettävällä tulostusalustalla, mikä parantaa kappaleiden tarttuvuutta ja vähentää vinoutumista.

Tulostin sijoitettiin erilliseen, ympäristöltä suojattuun koteloon koko projektiin liittyvän valmistusprosessin ajaksi, mikä suojasi sitä ulkoisilta tekijöiltä ja pölyltä. Tämän ansiosta laitteen huolto ja ylläpito olivat minimaaliset. Kalibroinnissa hyödynnettiin erityisiä kalibroitikkappaleita, jotka ovat saatavilla valmistajan verkkosivuilta. Lisäksi kaikki työstöradat ja tulostusasetukset määriteltiin käyttäen Prusa Sliceria, joka on valmistajan oma viipalointiohjelma.



Kuva 9: Prusa Original MK3S 3D-Printteri (Prusa3D)

3.4 Aineenkoetuslaite

Aineenkoetuslaitteena käytettiin Shimadzun valmistamaa autograafista universaalista testilaitetta (Kuva 10). Laboratorion käytössä oli AG-IS 100 kN-malli, joka soveltuu erinomaisesti tarvittaviin testeihin. Laitteen toimintoihin sisältyy automaattinen nolla voiman

kalibrointi, jossa kappaleen asettamisessa tehty virhe voidaan automaattisesti korjata ennen testin aloitusta. Tämä osoittautui erinomaiseksi ominaisuudeksi varsinkin vetotestien suorituksessa, jossa kappale kiinnitettiin kahden pihtimäisen työkalupään väliin (Kuva 11). Kiristäessä työkalupäitä kappaleeseen saattoi jäädä veto- tai puristusvoimaa, joka olisi aiheuttanut tuloksien kirjauksessa alkupisteen vaihtelua.

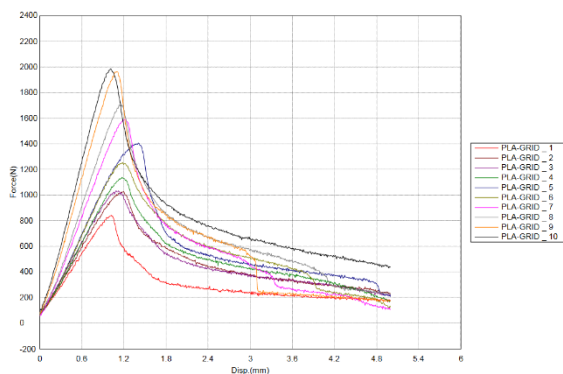


Kuva 10: Aineen koetuslaite AG-IS (Shimadzu)



Kuva 11. Vetotyökalu (Shimadzu)

Laitteen hallinta ohjelmana toimi TrapeziumX-V ohjelmisto, joka helpotti testauksen aikaista laaduntarkkailua automaattisesti skaalautuvan graafisen tarkastelun avulla (Kuva 12). Ohjelmiston ominaisuuksiin kuului myös testisarjan ja määrien määrittely -ominaisuus sekä nimeäminen, joten kappaleiden tulokset eivät vaatineet manuaalista korjaamista enää testin jälkeen. Ohjelmisto tuotti graafisesti ilmaistun käyrän lisäksi myös numeerista dataa taulukko muodossa, jota voitiin hyödyntää myöhemmin taulukkolaskenta ohjelmassa.



Kuva 12. Testaus sarjan voimat Trapezoid ohjelmiston kuviossa (Salen 2023).

Testilaitteen suuren kapasiteetin vuoksi voitiin todeta, ettei testeissä tarvinnut ottaa huomioon laitteen voimista johtuvia testilaitteiston fyysisiä muutoksia, kuten testauspenkin taipumaa, vetopihtien akselien venymää tai muita laitteiston toimintoihin liittyviä toleransseja, jotka täytyy ottaa huomioon suoritettaessa testejä, jotka vaativat laitteiston maksimikapasiteettia läheneviä voimia (Kuva 13).



Kuva 13. Voima-anturin tyyppikilpi (Reijo Heikkinen 2023).

4 3D-Tulosteiden ominaisuuksien testaus

4.1 Kappalekoot ja standardit

3D-tulostettuja kappaleita testatessa erilaisten rasiustyyppien mukaan, niiden koko ja muoto valitaan kyseessä olevan rasiuksen mukaan. Tätä varten hyödynnetään erityisesti muoveille suunnattuja SFS testaus standardeja. Nämä standardit antavat selkeät ohjeet kappaleiden mitoille, muodoille ja menetelmille.

Yksi olennainen seikka 3D-tulostettujen kappaleiden testauksessa on ymmärtää, miten täyttökuvio eli 'infill' vaikuttaa kappaleen mekaaniseen käyttäytymiseen rasiuksen aikana. Jotta voimme keskittyä erityisesti infillin vaikutukseen, on tärkeää vakioida kappaleiden ulkokuori, jota kutsutaan myös 'perimeteriksi'. Tässä tutkimuksessa kaikkien testattavien kappaleiden perimeter-asetukset pidetään vakiona 0,4 mm jokaisella pinnalla. Tämä asetus on yhtenäinen kaikilla kappaleen pinnoilla. Tämä varmistaa, että testitulokset heijastavat ensisijaisesti infillin vaikutusta kappaleen kestävyYTEEN.

Vaikka on mahdollista valmistaa kappaleita täysin ilman kuorta, koostuen pelkästään infill-kuviosta, tämä menetelmä ei kuitenkaan riittävästi edusta todellisten käyttökappaleiden yleisiä ominaisuuksia. Siksi tällaisia kappaleita ei pidetä sopivina testinäytteinä tässä yhteydessä.

Vaikka 3D-tulostus on noussut suosioon, sen testausstandardeja ei ole vielä vakiinnutettu laajasti. Siksi tällä hetkellä käytämme referenssinä ruiskuvalettujen tuotteiden testausstandardeja (ISO 178:2019). Tämä antaa meille mahdollisuuden vertailla 3D-tulostettujen kappaleiden kestävyYTEttä perinteisesti valmistettujen kappaleiden kanssa. Lopulliset vertailut tehdään materiaalivalmistajien antamien arvojen ja kontrollikappaleiden testaustulosten perusteella. (3Djake 2023)

Materiaalin ominaisuuksien johdonmukaisuuden varmistamiseksi kaikki testattavat kappaleet on tulostettu samasta valmistuserästä olevasta muovista. Tämä takaa, että kaikissa kappaleissa on yhdenmukaiset materiaaliominaisuudet.

Testikappaleiden fyysisen tilan, kuten kosteuden ja lämpötilan aiheuttamien vaihteluiden minimoimiseksi kappaleita on säilytetty seitsemän vuorokautta erityisessä ympäristössä, joka suojaa niitä lämpötilan ja kosteuden vaihteluilta. Paikaksi valittiin testauslaboration säilytyskaappi, jonka suhteellinen ilman lämpötila ja ilman kosteus olivat 23/50 olosuhde standardin mukaiset, lisäksi kaappi suojasi kappaleita UV säteilyltä, joka vaikuttaa PLA materiaalin ominaisuuksiin. Tämän ajanjakson aikana mahdolliset eroavaisuudet kappaleiden välillä ovat tasoittuneet, jolloin voidaan välttää valmistukseen ja säilytykseen

liittyviä tekijöitä, kuten liiallista kosteutta tai UV säteilyä, jotka voivat vaikuttaa testituloksiin. (ISO-291-2008)

Noudatettavat vakiointimenetelmät perustuvat SFS-ISO-291-2008-dokumenttiin. Tässä standardissa määritellään koekappaleiden ehdollistamisen vakiointi sekä testausolosuhteiden ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden raja-arvot.

4.1.1 Taivutuskoekappaleet

Määrittäessä muovien taivutusominaisuuksia, viitataan seuraavaan standardiin: Muovit. Taivutusominaisuuksien määrittäminen SFS-EN ISO 178:2019 (ladattu 04.01.2021).

Koekappaleen ulkomitat: Pituus (l): 80 mm, toleranssi ± 0.2 mm, leveys (b): 10 mm, toleranssi ± 0.2 mm, paksuus: 4 mm, toleranssi ± 0.2 mm (SFS-EN ISO 178:2019)

Koekappale on suorakaiteen profiili tanko, joka on valmistettu eri täyttöasteilla käyttäen grid-täyttökuviota (Kuva 7). Täyttöasteen intervallina on 10 %, minkä vuoksi koekappaleita on valmistettu kymmenen kappaletta, täyttöasteilla 10 % - 100 %. Jokaisesta täyttöasteesta on valmistettu viisi koekappaleita.

Taivutusominaisuuksien käsitteistä:

Taivutusjännite - Tämä ilmaisee materiaalin sisäistä jännitettä, kun siihen kohdistetaan taivutusvoimaa. Se on keskeinen arvo materiaalin taivutuskestävyyden määrittämiseksi. Taivutusjännitys lasketaan käyttäen standardin kaavaa 5 (SFS-EN ISO 178:2019)

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$$

jossa

σ_f on kyseessä oleva taivutusjännitysparametri, megapascalina

F on mitattu voima, Newtonina

L on tukien väli, millimetreinä

b on koekappaleen leveys, millimetreinä

h on koekappaleen paksuus, millimetreinä.

Taivutusmurtojännitys - Tämä on se jännite, jolla materiaali murtuu taivutuksen aikana. Se antaa käsityksen siitä, kuinka paljon jännitystä materiaali voi kestää ennen murtumista. Testauksen tuloksissa on kirjattu tulokset lähtötilanteesta aina murtojännitykseen saakka.

Testauksen yksityiskohdista:

Koekappaleen tukiväli: Tämä on etäisyys koekappaleen tukipisteiden välillä testauksen aikana. Tukivälin pituus vaikuttaa suoraan kappaleeseen kohdistuvan jännityksen määrään. Käytetty tukiväli on 55 mm

Koekappaleiden tarkastus: Ennen testausta koekappaleet tarkistetaan huolellisesti. Silmämääräinen tarkastus varmistaa, että kappaleissa ei ole ulkoisia vaurioita tai epätäydellisyyksiä. Vaakaa käytetään varmistamaan, että koekappaleiden massa on standardien mukainen, kun taas mikrometriä käytetään mittaamaan koekappaleiden tarkat mitat. (SFS-EN ISO 178:2019)

Testausmäärä: Jokaista koekappaletta ja täyttöastetta kohti suoritetaan viisi (5) erillistä testiä varmistamaan tulosten luotettavuus.

Testausstandardien mukaiset erityisohjeet: Kohdassa 6.5.3 mainitaan, että jos koekappale murtuu testauksen aikana muualta kuin sen keskikolmannekselta, kyseinen kappale tulee testata uudelleen. Tämä takaa, että saadut tulokset heijastavat materiaalin todellista taivutuskestävyyttä eikä mahdollisia valmistusvirheitä tai muita tekijöitä. (SFS-EN ISO 178:2019)

4.1.2 Puristus koekappaleet

Määrittäessä muovien puristusominaisuuksia, viitataan seuraavaan standardiin: Puristusominaisuuksien määrittäminen SFS-EN ISO 604:2002 (ladattu 04.01.2021).

Koekappaleen ulkomitat: Pituus (l): 50 mm, toleranssi ± 0.2 mm, leveys (b): 10 mm, toleranssi ± 0.2 mm, paksuus (h): 4 mm, toleranssi ± 0.2 mm (SFS-EN ISO 604:2002)

Koekappale on suorakaiteen profiili tanko, joka on valmistettu eri täyttöasteilla käyttäen grid-täyttökuviota. Täyttöasteen intervallina on 10 %, minkä vuoksi koekappaleita on valmistettu kymmenen kappaletta, täyttöasteilla 10 % - 100 %. Jokaisesta täyttöasteesta on valmistettu viisi koekappaletta. Koekappale edustaa standardin mukaista tyyppiä A. (SFS-EN ISO 604:2002)

Puristusominaisuuksien tarkastelussa ja testauksessa käytetään erilaisia keskeisiä käsitteitä kuten:

Puristusjännitys kuvaa materiaalin sisäistä jännitettä, kun materiaaliin kohdistetaan puristusvoimaa ja se on avainarvo arvioitaessa materiaalin kykyä kestää puristusta.

Myötöraja viittaa jännitykseen, jossa materiaali alkaa menettää muotoaan pysyvästi puristuksen vaikutuksesta. Kun tämä raja ylitetään, materiaali ei enää palaudu alkuperäiseen muotoonsa puristuksen poistuessa. Murtuma taas on hetki, jolloin materiaali ei enää kestä puristusta ja rikkoutuu. (SFS-EN ISO 604:2002)

Ennen itse puristustestin suorittamista, kaikki koekappaleet käydään läpi silmämääräisesti. Tämä takaa, että ne vastaavat vaadittuja standardeja ja ovat hyvässä kunnossa. Testauksessa käytetty nopeus on 20 mm/min. Testissä käytetty instrumentti on erityinen puristinpää (Kuva 13).



Kuva 13: Aineenkoetuslaitteen puristinpää (Shimadzu)

Standardissa mainittu kohta 6.5.3 korostaa, että mikäli koekappale murtuu puristuksen aikana muualla kuin sen keskikolmanneksella, testi tulee suorittaa uudelleen. Tämä takaa, että testitulokset antavat tarkan kuvan materiaalin puristusominaisuuksista. Jotta testitulokset olisivat vertailukelpoisia ja luotettavia, on erittäin tärkeää, että kaikki koekappaleet on valmistettu, säilytetty ja ehdollistettu ennalta määritellyissä olosuhteissa. (SFS-EN ISO 604:2002)

4.1.3 Veto koekappaleet

Määrittäessä muovien veto ominaisuuksia viitataan seuraaviin standardeihin:

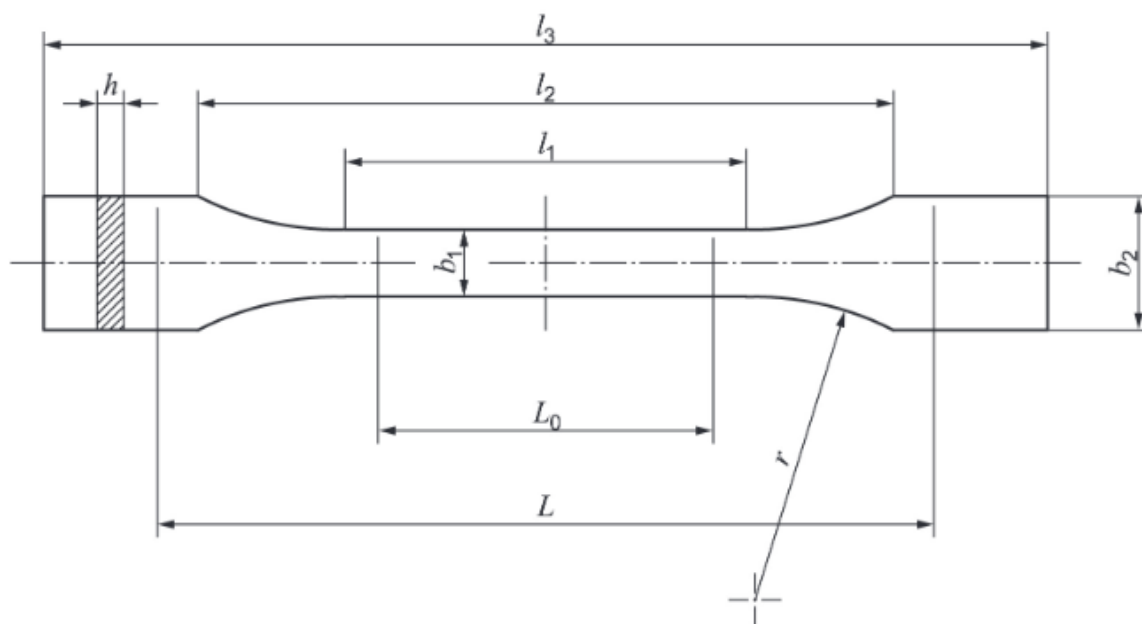
SFS-EN-ISO-527-1-2019-osa-1 (ladattu 04.01.2021)

SFS-EN-ISO-527-2-2012-osa-2 (ladattu 04.01.2021)

SFS-EN-ISO-527-3-2018-2-osa-3 (ladattu 04.01.2021)

Koekappaleen ulkomitat: Pituus (l): 150 mm, toleranssi ± 0.2 mm, leveys (b): 10/20 mm, toleranssi ± 0.2 mm, paksuus (h): 4 mm, toleranssi ± 0.2 mm. Koekappale on suorakaiteen profiili tanko, jonka päissä kappale on leveämpi aineenkoetuslaitteen tartuntaa varten. Koekappale on valmistettu eri täyttöasteilla käyttäen grid-täyttökuviota. Täyttöasteen intervallina on 10 %, minkä vuoksi koekappaleita on valmistettu kymmenen kappaletta,

täyttöasteilla 10 % - 100 %. Jokaisesta täyttöasteesta on valmistettu viisi koekappaletta. Koekappale edustaa standardin mukaista tyyppiä 1B. (SFS-EN-ISO-527-2-2012)



Kuva 1 Tyypin 1A ja 1B koekappaleet

Kuva 14 – Vetokokeen koekappaleen muoto (ISO-527-2-2012)

Veto-ominaisuuksien testauksessa käytetään erilaisia keskeisiä käsitteitä kuten:

Vetojännitys kuvaa materiaalin sisäistä jännitettä, kun materiaaliin kohdistetaan vetävää voimaa ja se on avainarvo arvioidessa materiaalin kykyä kestää vetoa. (SFS-EN-ISO-527-2-2012)

Myötöjännitys viittaa jännitykseen, jossa materiaali alkaa menettää muotoaan pysyvästi vedon vaikutuksesta. Kun tämä raja ylitetään, materiaali ei enää palaudu alkuperäiseen muotoonsa vedon poistuessa. (SFS-EN-ISO-527-2-2012). Veto-ominaisuuksia testatessa koekappaleet asetetaan kahden pihdimäisen puristimen väliin jonka koekappaleeseen kohdistetaan vetävää voimaa vetämällä ylempää työkalua.

4.2 Testausmenetelmät ja standardit

Tässä osiossa tarkastellaan kunkin rasituksen testausmenetelmiä ja yksityiskohtia sekä yleisiä asioita 3D tulostettujen koekappaleiden testauksesta. 3D tulostaminen ei suoraan vaatinut standardien tulkinnassa muutoksia, vaan voitiin hyödyntää puolijäykkien muovien standardimalleja ja menetelmiä. (SFS-EN ISO 178:2019)

4.2.1 Menetelmistä ja sovelluksista yleisesti

3D-tulostetun koekappaleen voidaan katsoa olevan standardin mukainen, sillä standardi kattaa useita materiaaleja, kuten muovattavat, ekstrudoitavat ja valettavat kestopuovut, mukaan lukien täytetyt, lujitetut ja täyttämättömät laadut. Tiettyjä materiaaleja, kuten solumuoveja ja eräitä tekstiililujitettuja muoveja, ei oteta huomioon näissä standardeissa. Tämän tutkimuksen materiaalit ja valmistusmenetelmät vastaavat kuitenkin standardin vaatimuksia.

Kun otetaan huomioon ecoPLA-materiaalin rajoitukset, on tärkeää huomata, että se ei kestä yli 60°C lämpötiloissa ilman pysyvää muodonmuutosta. Tämä lämpötila ylittää ecoPLA:n "Vicat" pehmenemislämpötilan sekä 57°C lasittumispisteen.

Testausnopeuden valinta on keskeinen tekijä materiaalin testaamisessa, ja SFS-standardin mukaan se voi vaihdella riippuen testattavan materiaalin ominaisuuksista tai rasituksen laadusta. Testausnopeudella viitataan koekappaleen tukien ja kuormituspään väliseen suhteelliseen liikenopeuteen.

Koekappaleiden vertailtavuuden takaamiseksi ne valmistetaan samasta muovierästä, samalla laitteella ja hallituissa kosteus- ja lämpötilaolosuhteissa. Tämä varmistaa, että testitulokset ovat vertailukelpoisia. Lisäksi olosuhdestandardin mukaan koekappaleiden kosteutta tasataan säilyttämällä niitä hallituissa olosuhteissa vähintään 10 päivän ajan ennen testausta.

Koekappaleiden mittaukseen liittyvät huomiot, koekappaleiden valmistamis prosessin luonteen takia ei kaikkia standardin vaatimuksia ole mahdollista täyttää, FDM 3D tulostusprossina luo kappaleet 0.2 mm kerroksista, jolloin kappaleisiin jää aina epätasaisuuksia ja lovia. Kappaleen orientointi valmistaessa suoritettiin siten että kappale on samassa asennossa kuin testauksessa. Ensimmäinen kerros on testavasta pinnasta nähden alapuolella. Täten minimoidaan kerrosmenetelmällä valmistamisesta johtuvat lovi vaikutukset kappaleessa, sillä kerroksen lovi tulee, pitkittäis- suunnassa kohti suoraan kohdistettavaan voimaan.

Kappaleiden mittojen tarkistamiseen käytettiin mikrometriä ja mittaukset suoritettiin jokaiseen kappaleeseen rasitettavan pinnan keskeltä ja kappaleen ääriimitat tarkistaen. Kappaleissa huomattiin vain minimaalista muutosta äärimitoissa ja paksuudessa eikä se johtanut yhtenkään koekappaleen hylkäämiseen.

Kappaleita hylättiin muiden valmistukseen liittyvien virheiden vuoksi muutamia kappaleita. Nämä kappaleet sisälsivät esimerkiksi palaneen muovin palasen, vajaaksi jääneen

ekstruusion kerroksessa. Yksi kokonainen 10kpl valmistuserä hylättiin laitteen materiaalin syöttöhäiriön vuoksi.

4.2.2 Taivutuskokeen menetelmä ja sovellutukset

Taivutustestissä tavoitteena on tutkia koekappaleen taivutusominaisuuksia. Testissä käytetään suorakaiteen muotoista koekappaletta, joka lepää kahdella tuella. Kappaletta kuormitetaan tukivälin keskikohdasta, kunnes sen ulkopinta murtuu. Kokeessa mitataan koekappaleen keskelle kohdistettava voima sekä sen aiheuttama taipuma kappaleessa, kappaleen venymää ei mitata.

Testin päämääränä on analysoida koekappaleen taivutuskäyttäytyminen, määrittää sen taivutuslujuus ja rasittaa kappale sen murtumispisteeseen asti. Tutkimuksen tuloksista voidaan laskea kappaleen taivutuskimmokerroin, taivutusjännitys ja taivutuslujuus.

Testausnopeuden suhteen noudatetaan SFS-EN ISO 178-2019 standardin suosituksia. Tässä yhteydessä on valittu testausnopeudeksi 20 mm/min, joka on standardin testausnopeustaulukon mediaani. Lisäksi on huomioitu, että koekappaleiden rasitus kasvaa jatkuvasti ja tasaisesti testausmenetelmän A mukaisesti.

Kokeessa keskitytään erityisesti koekappaleen taivutusominaisuuksiin. Testaus päättyy, kun koekappale saavuttaa maksimaalisen taivutusjännityksensä eli taivutusmurtojännityksen. Tämä tarkoittaa sitä, että koekappaleen ulkopinta saavuttaa suurimman nimellisen jännityksensä tukien keskipisteessä, mikä johtaa kappaleen murtumiseen. Tätä kautta saadaan selville kappaleen taivutuslujuus, joka on suurin jännitys, minkä koekappale pystyy kestämään taivutuksen aikana. Taivutusjännitys ilmaistaan yksikössä megapascal (MPa).

Lisäksi analysoidaan koekappaleen taipumista, joka kuvaa koekappaleen yläpinnan poikkeamista sen alkuperäisestä asennosta taivutuksen aikana. Tämä poikkeama ilmaistaan millimetreinä (mm). On tärkeää huomata, että taivutuksen aikana syntyvää venymää ei oteta tässä kokeessa huomioon.

Vaikka kokeessa ei käytetä esijännitystä, koekappale esiasetetaan ennen testausta. Deflektometria ei myöskään käytetä kokeessa, sillä koekappaleen venyminen määritetään erillisellä laskentakaavalla ja tätä venymistietoa käytetään vertailupohjana määritettäessä kappaleen murtopistettä.

4.2.3 Puristuskokeen menetelmät ja sovellutukset

Kokeen tavoitteena on arvioida kappaleen puristusominaisuuksia ja määrittää koekappaleen puristuslujuus sekä analysoida materiaalin käyttäytyminen puristuskuormituksessa. Tutkimuksen tuloksena voidaan määrittää kappaleen puristuskimmokerroin, puristusjännitys ja puristuslujuus.

Tämän tutkimuksen standardi määrittää käytettävät materiaalit, ja 3D-tulostettu testikappale voidaan todentaa standardin mukaisesti tuotetuksi kappaleeksi. On tärkeää huomauttaa, että tietyt materiaalit tai valmistusmenetelmät eivät ole standardin mukaisia ja näitä ei voida käyttää tässä testissä.

Testitulosten yhdenmukaisuuden varmistamiseksi kaikki testikappaleet valmistetaan samasta materiaalierästä, samalla laitteella ja hallituissa olosuhteissa. Ennen testausta koekappaleiden kosteustasapainoa säädellään, pitämällä kappaleita hallituissa olosuhteissa useiden päivien ajan.

Testaustulosten vertailukelpoisuuden takaamiseksi testattavien kappaleiden määrä on asetettu viiteen. Mikäli suorassa testauksessa ilmenee viallisia kappaleita, testi aloitetaan alusta. Kappaleiden valmistusprosessissa voi ilmetä epätasaisuuksia ja virheitä, kuten 3D-tulostuksessa tyypillistä. Tämän takia tarkka seuranta ja laadunvalvonta on välttämätöntä.

Koekappaleiden mittauksessa on tärkeää ottaa huomioon mahdolliset epätasaisuudet ja valmistusvirheet. Kappaleet tarkistetaan ennen testausta, ja vialliset kappaleet hylätään. Kappaleiden laadun tarkistukseen ja mittaukseen käytetään tarkkoja mittalaitteita, kuten mikrometriä.

4.2.4 Vetokokeen menetelmät ja sovellutukset

Vetokokeen periaate: Vetostandardin SFS-EN-ISO-527-2-2012 mukaisesti valmistetut 1A-tyyppiset testikappaleet altistetaan vedolle. Tämä testikappale on erityisesti suunniteltu arvioimaan materiaalin vetolujuutta ja elastisia ominaisuuksia, jotta voidaan ymmärtää, kuinka materiaali reagoi venytykseen ja kuinka paljon se voi venyä ennen murtumista.

Kokeen tavoitteena on määrittää kappaleen vetolujuus, venymä ja muita siihen liittyviä mekaanisia ominaisuuksia. Tutkimuksen tuloksena voidaan määrittää kappaleen vetokimmokerroin, vetojännitys ja vetolujuus, joka antaa käsityksen materiaalin kestävydestä ja soveltuvuudesta erilaisiin käyttökohteisiin.

Kuten aikaisemmissa kokeissa, myös tässä kokeessa on tärkeää noudattaa tarkasti standardin määrittämiä ohjeita ja suosituksia. Testattavien kappaleiden tulee olla

valmistettu samasta materiaali-erästä, samalla laitteella ja hallituissa olosuhteissa varmistaen testitulosten vertailukelpoisuuden.

Testausnopeudella on merkittävä rooli vetokokeen tuloksissa. Tässä tutkimuksessa käytetään SFS-EN ISO 178-2019 standardin määrittämän testausnopeuden taulukon määrittämää mediaania eli 20 mm/min. Tämä nopeus on valittu, koska se simuloi materiaalin todellisia käyttöolosuhteita ja antaa luotettavan kuvan sen mekaanisista ominaisuuksista.

Vetokokeessa kappaleen mittojen ja laadun tarkistus on välttämätöntä ennen itse testiä. Mahdolliset epätasaisuudet, valmistusvirheet tai muut poikkeavuudet voivat vaikuttaa testituloksiin. Kappaleet tarkistetaan huolellisesti ennen testausta, ja vialliset kappaleet hylätään.

Lopuksi on tärkeää huomauttaa, että vetokokeen tulokset ovat erittäin hyödyllisiä materiaalin ominaisuuksien ymmärtämiseen ja niiden soveltuvuuden arvioimiseen erilaisiin sovelluksiin. Tämä tieto on arvokasta tuotekehityksessä ja materiaalivalinnoissa.

4.3 Valmistuskustannukset ja tuotantoaika

Koekappaleiden valmistuskustannuksia arvioitaessa otettiin pääasiassa huomioon kaksi tekijää: kappaleiden tulostusaika sekä käytetyn materiaalin hinta. Tuotantokustannuksissa ei kuitenkaan otettu huomioon työntekijän työaikaa, sähkökustannuksia eikä muita mahdollisia epäsuoria kustannuksia, jotka voivat liittyä valmistusprosessiin.

On tärkeää mainita, että tällainen suppea kustannusanalyysi voi aliarvioida todellisia valmistuskustannuksia. Kokonaisvaltaisempi laskelma ottaisi huomioon kaikki tuotantoon liittyvät kustannukset, mukaan lukien laitteiden ylläpito, tilavuokra, työvoimakustannukset ja muut toimintakustannukset.

Koekappaleiden tuotantokustannuksien laskennassa käytettiin simuloituja lähtöarvoja slicer-ohjelmasta, ja kunkin koekappaleen todelliset massat määritettiin mittaamalla niiden paino mikrovaakaa käyttäen. Mittaustulokset olivat linjassa simuloitujen arvojen kanssa, poiketen vain +/- 0.01 g tarkkuudella.

Taulukoiden perusteella on havaittavissa, että koekappaleiden tuotantokustannukset kasvavat suhteessa niiden painoon (Taulukko 1, 2, 3). Tämä korreloittuu siihen tosiasiaan, että suuremmalla infill-prosentilla käytetään enemmän materiaalia, mikä lisää sekä koekappaleen painoa että sen materiaalikustannuksia. Tässä yhteydessä palkit ilmaisevat kunkin infill-prosentin simuloituja arvoja välillä 10–100 %.

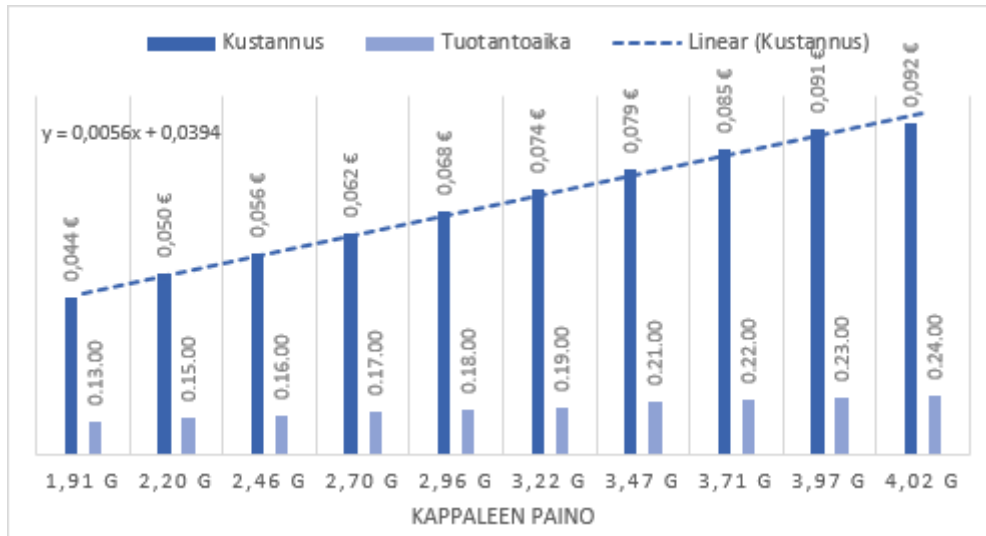
Taulukoista havaitaan kustannusten lineaarinen trendi koekappaleiden painon suhteen. Toisaalta, vaikka kustannukset nousevat kappaleen painon myötä, tuotantoaika pysyy suhteellisen vakiona eikä lisäänty suhteessa enempää muihin kustannuksiin. Tämä voi johtua siitä, että infill-prosentin lisääntyminen ei lisää printtauksen kokonaisaika yhtä paljon kuin muut tekijät, kuten pintakerroksen rakentaminen. Pitää myös huomioida kappaleen kokonaistilavuuden lisääminen tai geometria monimutkaisuus voi luoda tilanteen, jossa tuotantoaika alkaa merkittävästi lisääntyä suhteessa täyttöprosentin valintaan. (käydään erikseen läpi simuloituna tilanne, jossa kappale on esimerkiksi 10 tai 100 suurempi tilavuudeltaan tai monimutkaisempi geometrialtaan?)

On tärkeää ymmärtää, että suurempi infill-prosentti lisää kustannuksia mutta voi myös parantaa osan mekaanisia ominaisuuksia. Kuitenkin tuotantoaika ei näytä muuttuvan merkittävästi infill-prosentin perusteella. Tämä kuitenkin kertoo vain kyseisen kappaleen tuotantoajan lisääntymisestä suhteessa infill prosenttiin. Kappaleen tuotantoaikaan vaikuttavat enemmän kappaleen koko ja geometria sekä erityisesti käytettävän laitteen asetukset ja suutinkoko.

Simulaatioista laadituissa laskelmissa todettiin selkeä korrelaatio: kun osan monimutkaisuus lisääntyy (pieni lisäys), kerroksen korkeuden pienentyessä (suuri lisäys) kokonaistuotantoaika lisääntyy. Lisäksi, kun osan tilavuus kasvaa, tuotantoaika kasvaa enemmän suhteessa materiaalikustannuksiin. Tämä tarkoittaa, että tulostetun osan infill-prosentilla on suurempi vaikutus osan tuotantoaikaan sekä materiaalikustannuksiin mitä suurempi ja monimutkaisempi kappale on.

4.3.1 Taivutussarja tuotantokustannus

Kuvion 1 ja taulukon 1 sisällöstä huomataan lineaarista kehitystä jokaista 10% täyttöasteen inkrementtiä kohden keskiarvona 0,23 grammaa ja 1 minuutti. Huomion arvoista on, että ajan lisäys on suurimmaksi osaksi johdonmukaista, yksi minuutti jokaista 10 %:n täyttöasteen lisäystä kohden, paitsi ensimmäisellä ja viidennellä inkrementillä (10 %-20 % ja 60 %-70 %), jolloin ajan lisäys on kaksi minuuttia. Tämä voisi viitata siihen, että alhaisemmissa ja korkeammissa täyttöasteissa on kynnysarvoja, jolloin tulostukseen kuluva aika kasvaa merkittävästi suhteessa materiaalin kulutukseen.



Kuvio 1. Taivutus sarjan simuloitut tuotantokustannukset graafinen (Salen 2021)

Infill %	Pituus (m)	Tilavuus (mm ³)	Paino (g)	Hinta (€)	Hinta tark	Aika
10 %	0,64 m	1543,59 mm ³	1,91 g	0,04 €	0,044 €	0:13:00
20 %	0,74 m	1774,04 mm ³	2,20 g	0,05 €	0,050 €	0:15:00
30 %	0,83 m	1984,49 mm ³	2,46 g	0,06 €	0,056 €	0:16:00
40 %	0,90 m	2175,32 mm ³	2,70 g	0,06 €	0,062 €	0:17:00
50 %	0,99 m	2386,01 mm ³	2,96 g	0,07 €	0,068 €	0:18:00
60 %	1,08 m	2693,29 mm ³	3,22 g	0,07 €	0,074 €	0:19:00
70 %	1,16 m	2798,62 mm ³	3,47 g	0,08 €	0,079 €	0:21:00
80 %	1,25 m	2995,61 mm ³	3,71 g	0,09 €	0,085 €	0:22:00
90 %	1,33 m	3202,10 mm ³	3,97 g	0,09 €	0,091 €	0:23:00
100 %	1,35 m	3243,22 mm ³	4,02 g	0,09 €	0,092 €	0:24:00

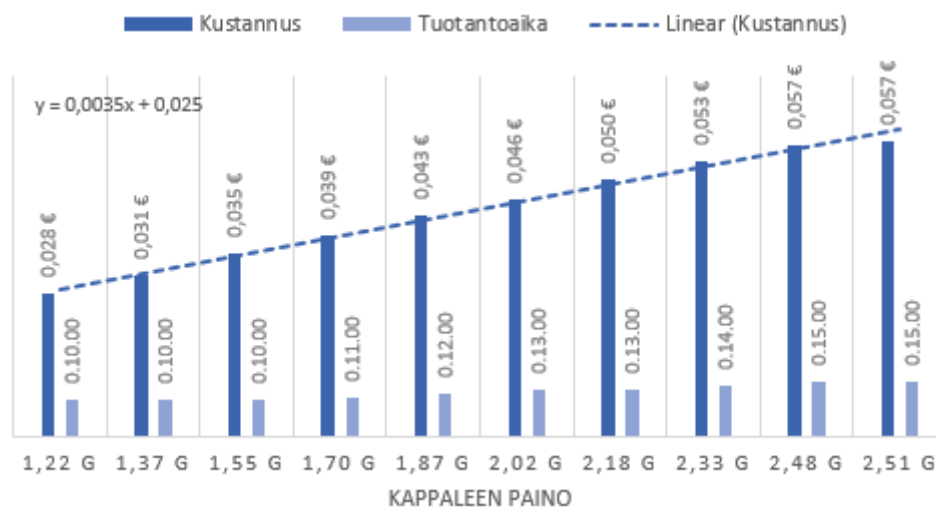
Taulukko 1. Taivutus sarjan simuloitut tuotantokustannukset numeraalinen (Salen 2021)

90 %:sta 100 %:n täyttöasteeseen painon lisäys pienenee merkittävästi vain 0,05 grammaan. Tämä voisi johtua tulostimen saavuttamasta maksimitiheydestä tai se voi viitata kynnysarvoon, jossa lisätäyttö ei merkittävästi lisää painoa.

Kokonaisuudessaan paino näyttää suhteellisen lineaarisen suhteessa täyttöasteeseen, kun taas tulostukseen käytetty aika kasvaa enimmäkseen johdonmukaisesti 10 % täyttöasteen lisäystä kohden, muutamalla poikkeuksella, jossa lisäysnopeus kaksinkertaistuu. Tämä viittaa siihen, että aikatehokkuus vähenee hieman suuremmilla täyttöasteilla.

4.3.2 Puristussarja tuotantokustannus

Kuvion 2 ja taulukon 2 sisällöstä huomataan lineaarista kehitystä jokaista 10% täyttöasteen inkrementtiä kohden on noin 0,14 grammaa ja 1 minuutti. Huomionarvoista on, että aika pysyy vakiona 60 %:n ja 70 %:n täyttöasteen välillä, ja jälleen 90 %:n ja 100 %:n täyttöasteen kohdalla, mikä viittaa siihen, että näillä alueilla tulostusaika ei muutu täyttöasteen mukaan.



Kuvio 2. Puristussarjan simuloitut tuotantokustannukset graafinen (Salen 2021)

Infill %	Pituus (m)	Tilavuus (mm ³)	Paino (g)	Hinta (€)	Hinta tark	Aika
10 %	0,41 m	984,99 mm ³	1,22 g	0,03 €	0,028 €	0:10:00
20 %	0,46 m	1104,74 mm ³	1,37 g	0,03 €	0,031 €	0:10:00
30 %	0,52 m	1253,77 mm ³	1,55 g	0,04 €	0,035 €	0:10:00
40 %	0,57 m	1374,49 mm ³	1,70 g	0,04 €	0,039 €	0:11:00
50 %	0,63 m	1506,86 mm ³	1,87 g	0,04 €	0,043 €	0:12:00
60 %	0,68 m	1628,26 mm ³	2,02 g	0,05 €	0,046 €	0:13:00
70 %	0,73 m	1758,96 mm ³	2,18 g	0,05 €	0,050 €	0:13:00
80 %	0,78 m	1881,97 mm ³	2,33 g	0,05 €	0,053 €	0:14:00
90 %	0,83 m	2002,76 mm ³	2,48 g	0,06 €	0,057 €	0:15:00
100 %	0,84 m	2028,01 mm ³	2,51 g	0,06 €	0,057 €	0:15:00

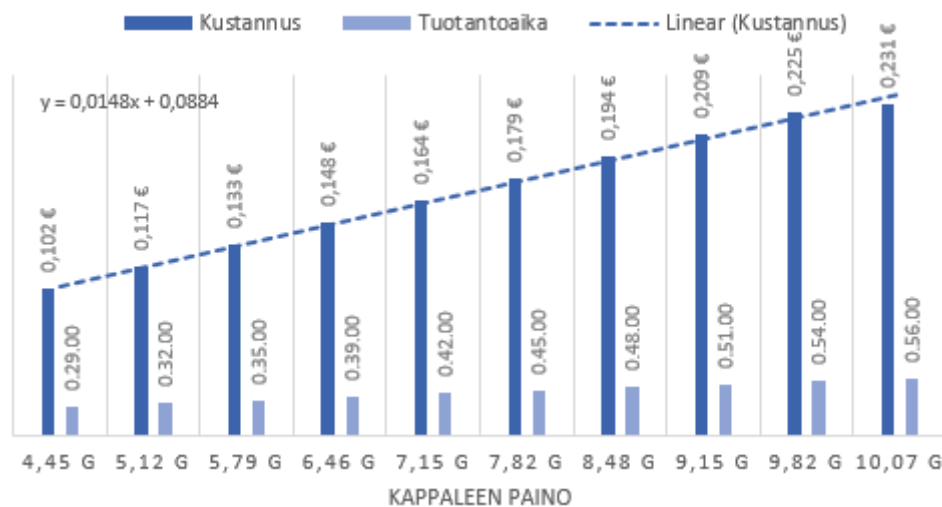
Taulukko 2. Puristussarjan simuloitut tuotantokustannukset numeraalinen

Yhteenvetona, että massalla on lineaarinen suhde täyttöasteeseen, pienellä mutta johdonmukaisella kasvulla täyttöasteen noustessa. Tulostusaika pysyy aluksi vakiona ja kasvaa sitten inkrementaalisesti tiettyjen täyttöasteen kynnyksarvojen kohdalla, ja tietyissä pisteissä on havaittavissa tasanteita, jotka osoittavat mahdollisia koneen tehokkuuden rajoja tai asetuksia, jotka ovat erityisiä tälle tulostustehtävälle.

4.3.3 Vetosarja tuotantokustannus

Kuvion 3 ja taulukon 3 sisällössä huomataan lineaarista kehitystä jokaista 10% täyttöasteen inkrementtiä kohden on keskiarvolta 0,67 grammaa ja 3 minuuttia. Tämä massan lisäyksen kuviointi on johdonmukainen, lukuun ottamatta viimeistä väliä (90 % - 100 %), jossa massan lisäys on huomattavasti vähemmän, vain 0,25 grammaa.

Ajan lisäyksessä on havaittavissa johdonmukainen kuvio. Poikkeuksena on väliltä 30 % - 40 % täyttöaste, jossa ajan kasvu on neljä minuuttia, ja viimeinen väli 90 % - 100 % täyttöaste, jossa ajan lisäys on hieman pienempi, kaksi minuuttia.



Kuvio 3, Vetosarjan simuloitut tuotantokustannukset graafinen (Salen, 2021)

Kun tarkastellaan 3D-tulostettujen koekappaleiden tuotantokustannuksia, on huomioitava, että suuremman tilavuuden koekappaleet vaikuttavat merkittävästi sekä tulostusaikaan että materiaalin kulutukseen. Vaikka täyttöasteen prosentuaalinen lisäys on sama kaikille koekappaleille, suuremman tilavuuden koekappaleeseen kuluu absoluuttisesti enemmän materiaalia ja tulostusaika pitenee. Tämä johtuu siitä, että korkeampi täyttöaste tarkoittaa suuremmissa tilavuudessa huomattavasti suurempaa materiaalmäärää.

Infill %	Pituus (m)	Tilavuus (mm ³)	Paino (g)	Hinta (€)	Hinta tark	Aika
Grid-10 %	1,49 m	3586,22 mm ³	4,45 g	0,10 €	0,102 €	0:29:00
Grid-20 %	1,72 m	4129,32 mm ³	5,12 g	0,12 €	0,117 €	0:32:00
Grid-30 %	1,94 m	4672,50 mm ³	5,79 g	0,13 €	0,133 €	0:35:00
Grid-40 %	2,17 m	5210,97 mm ³	6,46 g	0,15 €	0,148 €	0:39:00
Grid-50 %	2,40 m	5764,42 mm ³	7,15 g	0,16 €	0,164 €	0:42:00
Grid-60 %	2,62 m	6303,61 mm ³	7,82 g	0,18 €	0,179 €	0:45:00
Grid-70 %	2,84 m	6841,89 mm ³	8,48 g	0,19 €	0,194 €	0:48:00
Grid-80 %	3,07 m	7382,45 mm ³	9,15 g	0,21 €	0,209 €	0:51:00
Grid-90 %	3,29 m	7922,17 mm ³	9,82 g	0,22 €	0,225 €	0:54:00
Rect-100 %	3,38 m	8118,72 mm ³	10,07 g	0,23 €	0,231 €	0:56:00

Taulukko 3: Vetosarjan simuloidut tuotantokustannukset numeraalinen (Salen, 2021)

Lisäksi tulostusaika kasvaa suuremman pinta-alan vuoksi, jota tulostuspään on käsiteltävä jokaisella kerroksella. Tämä on selkeästi havaittavissa tämän laskelman kohdalla, jossa sekä paino että tulostusaika kasvavat jyrkemmin infill-prosentin nousun myötä. Näin ollen, kun suurempaa tilavuutta olevien kappaleiden tuotantokustannuksia vertaillaan pienempään tilavuuteen oleviin kappaleisiin, on tärkeää huomioida, että tilavuuden kasvu aiheuttaa suhteellisesti suurempia muutoksia sekä materiaalinkulutuksessa että tulostusajassa, mikä puolestaan vaikuttaa merkittävästi kappaleen valmistuksen kannattavuuden laskentaan.

4.4 Testaustapojen toteaminen ja kehittäminen

Tässä osiossa tarkastellaan testaustapojen yksityiskohtia ja sekä tulosten kirjaukseen liittyviä erityiskohtia. Alkuperäiset testaustulokset ovat saatavilla tämän tutkimuksen liitteenä niin graafisena kuin numeraalisena.

Tutkimuksen manuaalisen työvaiheen kehittämiseen liittyvät huomiot rajoittuvat testaustuloksien kirjaamiseen liittyvän ohjelmiston modernisointiin. Käytetty tietokone käyttöjärjestelmä oli vanhentunut ja Trapezoid ohjelmiston datan formaatti tarjonta rajallinen, eikä ole enää riittävällä tasolla toimiakseen saumattomasti nyky aikaisten ohjelmistojen kanssa.

4.4.1 Testauskertojen määrä

Testauskertojen määränä käytettiin yllä mainittujen standardien mukaista minimiä eli 5 kpl. Kaikki testitulokset, jotka eivät osuneet keskikolmannekselle testaustuloksien vertailussa uusittiin tai jätettiin pois vertailusta. Tiettyjen kappaleiden kohdalla tulosten poistaminen oli pakollista, sillä kappaleiden valmistaminen samoissa olosuhteissa ei ollut enää mahdollista.

Kappaleet kärsivät joko 3D tulostusprosessin yhteydessä tapahtuneesta valmistusvirheestä tai testauksen yhteydessä tapahtuneesta asetevirheestä. Poistettujen kappaleiden sarjassa saatiin kuitenkin vähintään 3 kpl samankaltaista tulosta, joista voitiin muodostaa tarvittavan tarkka keskiarvo tuloksien tarkastelua varten.

4.4.2 Tulosten kirjaus

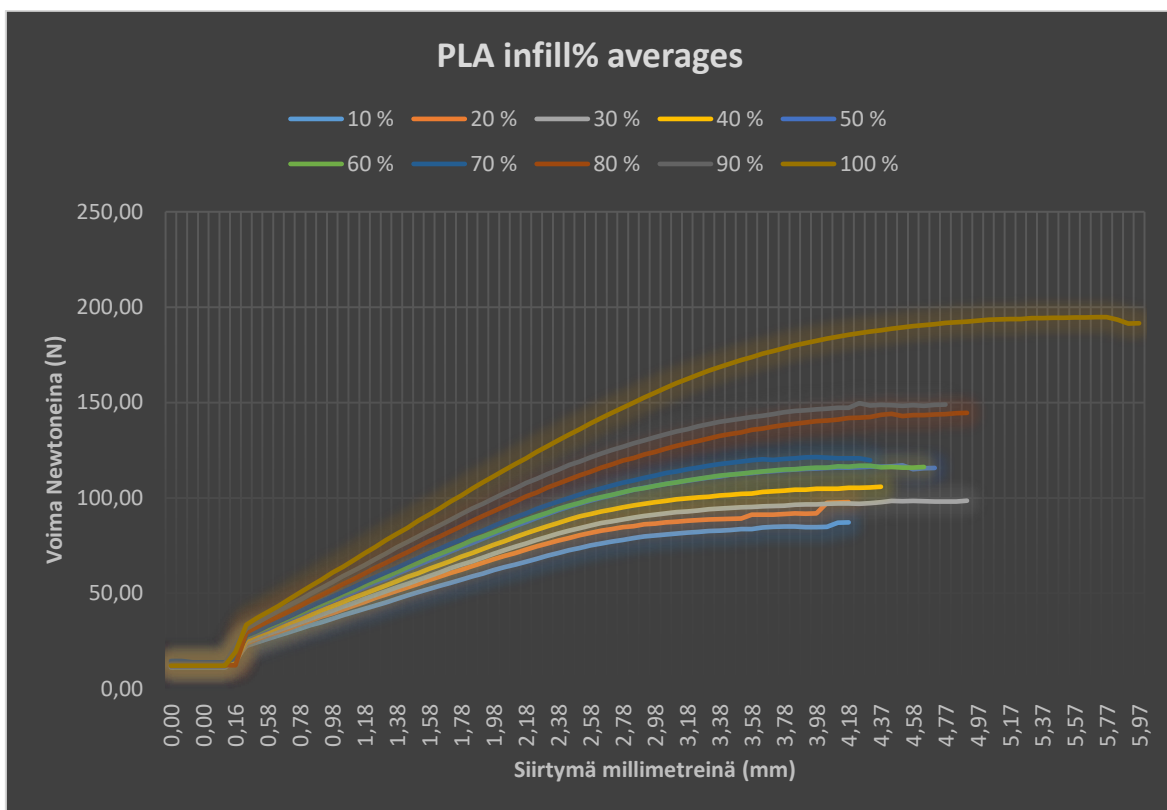
Tulokset kirjattiin aineenkoetuslaitteen valmistajan ohjelmistolla Trapezoid. Ohjelmisto tallensi kappaleiden testauksen graafisesti pdf muodossa ja numeraalisesti .asc muodossa. Ohjelmiston laatimat tiedot siirrettiin Microsoft Excel ohjelmistoon, jossa numeerinen data siistittiin tulkittavaan muotoon siirtämällä arvot erillisiin taulukoihin. Tämän datan avulla laadittiin graafinen tulkinta jokaisesta täyttöasteesta ja testaussarjasta.

Tuloksien siistimisellä tarkoitetaan kappaleen testauksen muodostaman kuvion numeraalisen arvon tulkintaa ja maksimi arvojen merkintää keskiarvojen laadintaan. Esimerkiksi vetokappaleiden siirtymän arvo oli aina 10mm vaikka kappale murtui jo pienemällä arvolla. Näin eri kappaleiden taulukoiden pituudet vastasivat toisiaan mikä helpotti tulosten tulkintaa taulukkolaskenta ohjelmassa.

5 Tulokset

5.1 Taivutustestin tulokset ja tulkinta

Kuvio esittää koekappaleiden keskiarvoiset tulokset erillisinä käyriä 10-100% täyttöasteille, käytetty inkrementti on 10%. Kaaviossa voima on kuvattu suhteessa siirtymään. Tulokset on esitetty suoraan voimana, jotta niiden tulkinta olisi helpompaa ilman erityistä lujuusopin tai sen sovellusten koulutusta. Lisäksi yllä mainitussa standardin mukaisessa taulukossa (taulukko 4) on esitetty voimien suhde jännitykseen, joka on ilmaistu megapascaleina (MPa). Tämä kaavio (kuvio 4) on hyödyllinen erityisesti niin harrastelijoille. taulukon tulokset (taulukko 5) on hyödyllinen tarkempaan suunnitteluun ja se noudattaa ISO-178 standardia.



Taivutuskokeen testaus seloste				
Standardi	SFS-EN ISO 178:2019	Testaus pvm.	18.05.2021	
Materiaali	ecoPLA	Testaaja	Jaakko Salen	
Tyyppi	Biopolymeeri	Testikappale	Tanko	
Tuotekoodi	3DJAKE ecoPLA	pituus L	80	
Valmistaja	3DJAKE	leveys b	10	
Muoto	Filamentti 1. 75 mm	paksuus h	4	
Valmistusmen.	3D-tulostus	Valmistus pvm.	03.05 - 05.05.2021	
Vakiointi olosuh.	SFS-ISO-291-2008	Testaus olosuh.	SFS-ISO-291-2008	
Tukiväli	55 mm	Testaus määrä	10 x 5 kpl	
Testaus nopeus	20 mm/min	Menetelmä	A	
Tarkkuus luokka	Tyyppi I	Kalibrointi	Ei vaadittu	
Kuormitus	3 piste taivutus	Kuormitus pinta	Poikkipinta-ala ylä	
Täyttöaste GRID	Murtojännitys (MPa)	Taipuma (mm)	Voima (N) / Dev%	
10 %	43.58	5.71	84.52	3 %
20 %	46.30	5.64	89.79	4 %
30 %	50.05	8.23	97.06	1 %
40 %	53.52	8.19	103.80	2 %
50 %	60.15	5.91	116.66	1 %
60 %	60.45	5.77	117.24	1 %
70 %	62.91	4.71	122.01	1 %
80 %	74.21	5.70	143.92	2 %
90 %	75.64	4.87	146.69	3 %
100 %	100.50	9.97	194.91	1 %

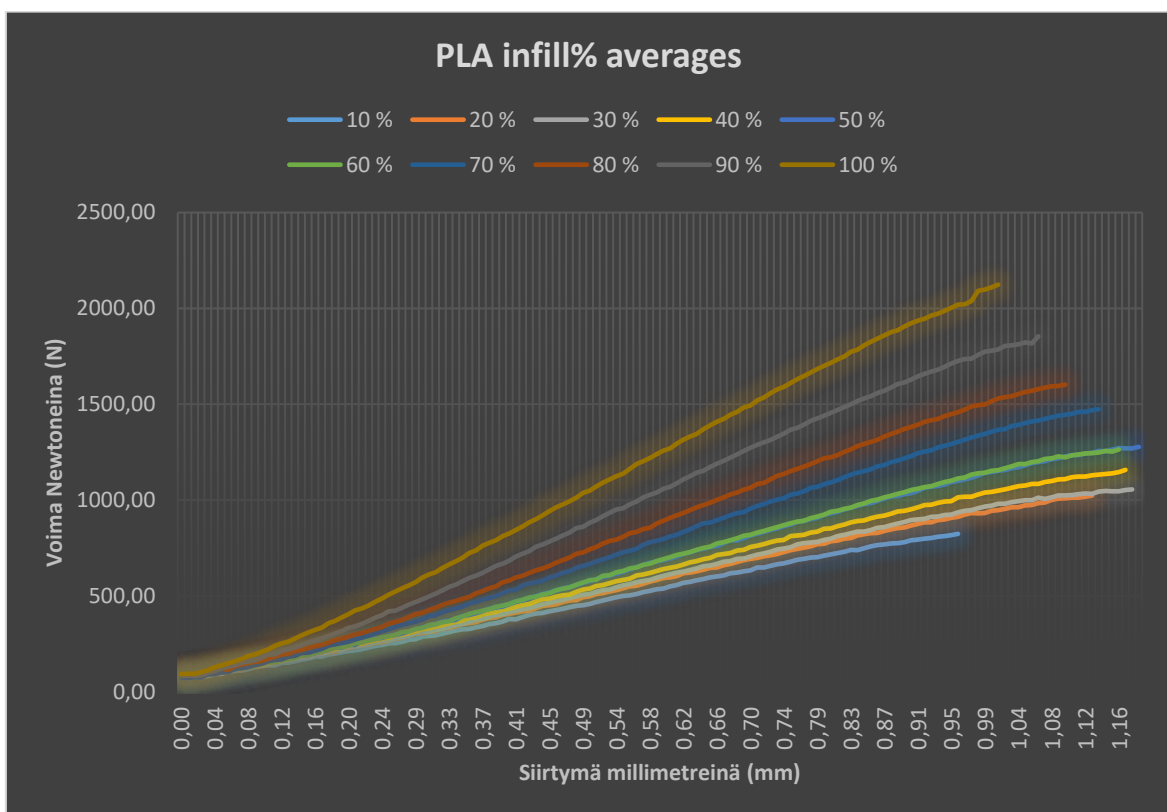
Taulukko 4. Standardin ISO-178 mukainen testaus seloste

Kuvion perusteella "optimaalisen" täyteprosentin määrittely riippuu 3D-tulostetun osan käyttötarkoituksesta. Alhaisempien täyteprosenttien, kuten 10 % - 40 %, avulla saavutetaan merkittävästi lisääntynyt lujuus ilman paljon lisämateriaalia. Kun täyteprosentti ylittää 40 %, lujuuden kasvu vähenee suhteessa käytettyyn materiaaliin. Täyteprosenttien 80 % ja 100 % välillä lujuuden ero ei ole niin merkittävä, joten monet sovellukset eivät ehkä tarvitse 100 % täytettä kuin äärimmäisissä mekaanisen rasituksen tapauksissa, tällöinkin ratkaisu kappaleen kestävyydelle löytyisi todennäköisesti kappaleen orientaatiosta tai geometriasta ja sen soveltuvuudesta kuin infill prosentin lisäämisestä.

Kevyille sovelluksille, joissa lujuus ei ole ensisijainen tarkoitus, pienempi täyteprosentti saattaa riittää monissakin tapauksissa. Rakenteellisille tai kuormitusta kestäville osille, joissa tarvitaan maksimaalista lujuutta, kannattaa harkita suuria täyteprosentteja, kuten 70 % - 80 %. On myös tärkeää ottaa huomioon tulostusaika, materiaalin kustannukset ja osan paino.

5.2 Puristustestin tulokset ja tulkinta

Kuvio esittää koekappaleiden keskiarvoiset tulokset erillisinä käyriä 10-100% täyttöasteille, käytetty inkrementti on 10%. Kuviossa voima on kuvattu suhteessa siirtymään. Tulokset on esitetty suoraan voimana, jotta niiden tulkinta olisi helpompaa ilman erityistä lujuusopin tai sen sovellusten koulutusta. (Kuvio 5) Lisäksi yllä mainitussa standardin mukaisessa taulukossa (taulukko 5) on esitetty voimien suhde jännitykseen, joka on ilmaistu megapascalina (MPa). Tämä kuvio on hyödyllinen erityisesti niin harrastelijoille, taulukon tulokset (taulukko 5) on hyödyllinen tarkempaan suunnitteluun ja se noudattaa ISO-604 standardia.



Kuvio 5. Puristuskokeen tulokset keskiarvoina

Kuviossa näkyy PLA-materiaalin puristustestien tulokset (kuvio 5), joissa on eri täyttöasteiden keskiarvot. Optimaalisen täyttöasteen valinta riippuu siitä, mitä tarkoituksia varten osaa käytetään. Yleisesti ottaen, mitä korkeampi täyttöprosentti, sitä vahvempi ja kestävämpi tulostettu kappale on, mutta se myös lisää tulostuksen materiaalikustannuksia ja -aikaa.

Puristuskokeen testaus seloste				
Standardi	ISO-604/A/1	Testaus pvm.	27.05.2021	
Materiaali	ecoPLA	Testaaja	Jaakko Salen	
Tyyppi	Biopolymeeri	Testikappale	Tanko	
Tuotekoodi	3DJAKE ecoPLA	pituus L	50	
Valmistaja	3DJAKE	leveys b	10	
Muoto	Filamentti 1. 75 mm	paksuus h	4	
Valmistusmen.	3D-tulostus	Valmistus pvm.	17.05 - 19.05.2021	
Vakiointi olosuh.	SFS-ISO-291-2008	Testaus olosuh.	SFS-ISO-291-2008	
Luistotuki	Kyllä	Testaus määrä	10 x 5 kpl	
Testaus nopeus	20 mm/min	Menetelmä	A	
Tarkkuus luokka	Tyyppi I	Kalibrointi	Ei vaadittu	
Kuormitus	Puristus	Kuormitus pinta	Poikkipinta-ala L	
Täyttöaste GRID	Myötöjännitys (MPa)	Puristus (mm)	Voima (N) / Dev%	
10 %	29.46	0.96	785.63	9
20 %	35.74	5.64	953.13	10
30 %	37.80	8.23	1008.13	8
40 %	41.72	8.19	1112.50	8
50 %	47.18	5.91	1258.13	7
60 %	46.66	5.77	1244.38	3
70 %	54.00	4.71	1440.00	5
80 %	59.46	5.70	1585.63	3
90 %	66.21	4.87	1765.63	7
100 %	77.44	9.97	2065.00	8

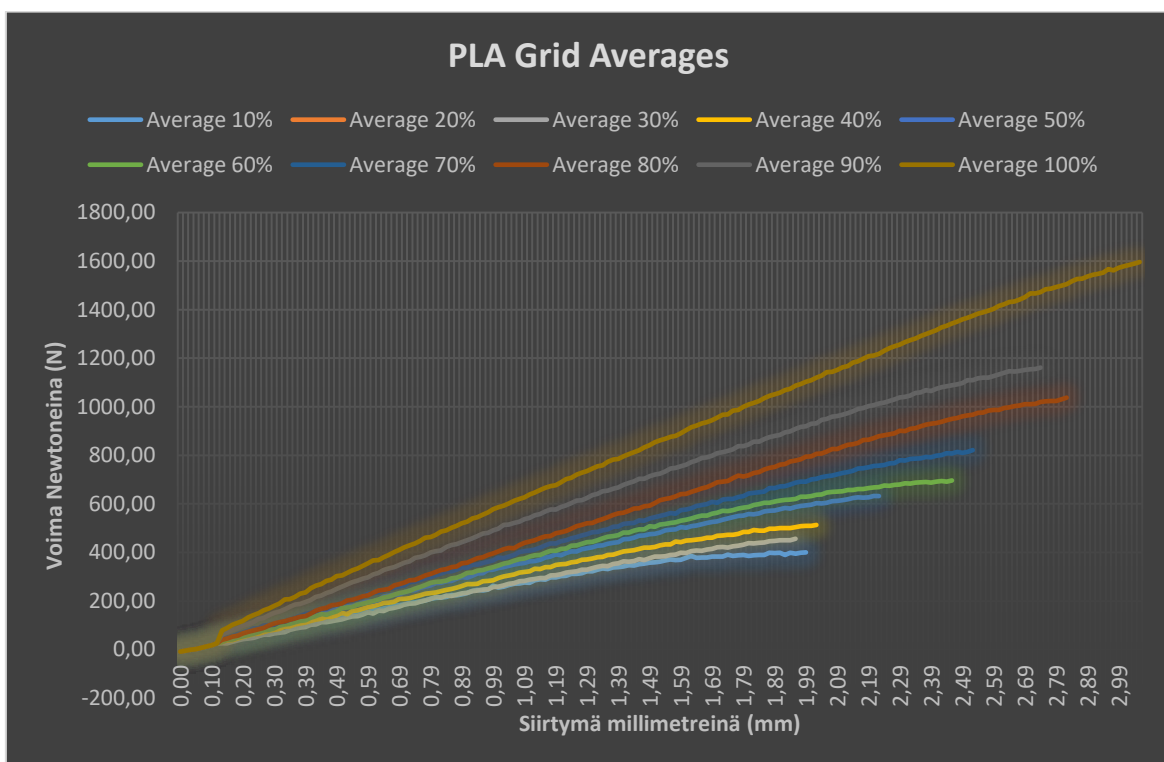
Taulukko 5 – Standardin ISO-604 mukainen testausseleoste

Kuvion perusteella näyttää siltä, että puristuskestävyys kasvaa lineaarisesti täyttöasteen kasvaessa. Ei kuitenkaan näytä olevan suurta eroa esimerkiksi 70 % ja 100 % välillä verrattuna alemmilla prosenteilla. Tämä tarkoittaa, että jossakin vaiheessa lisätyn materiaalin määrä ei enää tuo merkittävää lisäystä kestävyteen suhteessa lisäkustannuksiin. Kompromissina voisi olla, että valitaan täyttöaste, joka antaa riittävän kestävyden kohtuullisella materiaalikulutuksella.

Jos tarkoituksena on saada osa, joka on kevyempi ja valmistuu nopeammin, mutta jolla on silti hyväksyttävä mekaaninen lujuus, täyttöprosentti voisi olla 40–60%. Jos taas osan on oltava mahdollisimman kestävä ja paino ei ole ongelma, 70–80% voisi olla hyvä valinta. Täysin täytetyt (100%) osat ovat vahvimpia, mutta niiden tulostaminen vie eniten aikaa ja materiaalia, mikä ei välttämättä ole tarpeen.

5.3 Vetotestin tulokset ja tulkinta

Kuvio esittää koekappaleiden keskiarvoiset tulokset erillisinä käyriä 10-100% täyttöasteille, käytetty inkrementti on 10%. Kuviossa voima on kuvattu suhteessa siirtymään. Tulokset on esitetty suoraan voimana, jotta niiden tulkinta olisi helpompaa ilman erityistä lujuusopin tai sen sovellusten koulutusta (Kuvio 6). Lisäksi yllä mainitussa standardin mukaisessa taulukossa (taulukko 6) on esitetty voimien suhde jännitykseen, joka on ilmaistu megapascalina (MPa). Tämä kuvio (kuvio 6) on hyödyllinen erityisesti niin harrastelijoille, taulukon tulokset (taulukko 6) on hyödyllinen tarkempaan suunnitteluun ja se noudattaa SFS-527-2 standardia.



Kuvio 6 – Vetokokeen tulokset keskiarvoina

Tässä kuviossa esitetään PLA-materiaalin vetojännitystestin tulokset, joissa näytetään eri täyttöprosenttien keskiarvot vetolujuuden suhteen. Vetolujuuskäyrät noudattavat samankaltaista trendiä kuin puristuskestävyyden testitulokset: vetolujuus kasvaa täyttöprosentin kasvaessa (Kuvio 6).

Kuvion perusteella voidaan havaita, että matalilla täyttöprosentteilla (10-30%) vetolujuus kasvaa merkittävästi täyttöasteen noustessa. Kuitenkin, kun täyttöprosentti ylittää 70%, lujuuden kasvu tasoittuu. Tämä tarkoittaa, että yli 70% täyttöaste ei välttämättä tarjoa merkittävää hyötyä lujuuden suhteen verrattuna materiaalikustannuksiin ja tulostusaikaan.

Vetokokeen testaus seloste				
Standardi	SFS 527-2/1A/20	Testaus pvm.	18.05.2021	
Materiaali	ecoPLA	Testaaja	Jaakko Salen	
Tyyppi	Biopolymeeri	Testikappale	Tanko	
Tuotekoodi	3DJAKE ecoPLA	pituus L	150 mm	
Valmistaja	3DJAKE	leveys b	10/20 mm	
Muoto	Filamentti 1. 75 mm	paksuus h	4 mm	
Valmistusmen.	3D-tulostus	Valmistus pvm.	10.05 - 12.05.2021	
Vakiointi olosuh.	SFS-ISO-291-2008	Testaus olosuh.	SFS-ISO-291-2008	
Kiinnitysetäisyys	108 mm	Testaus määrä	10 x 5 kpl	
Testaus nopeus	20 mm/min	Menetelmä	A	
Tarkkuus luokka	Tyyppi I	Kalibrointi	Ei vaadittu	
Kuormitus	Veto	Kuormitus pinta	Poikkipinta pituus	
Täyttöaste GRID	Murtojännitys (MPa)	Venymä (mm)	Voima (N) / Dev%	
10 %	10.06	3.37	402.50	3
20 %	13.89	3.66	555.63	5
30 %	13.59	4.95	543.75	5
40 %	14.03	3.65	561.25	4
50 %	17.09	3.44	683.75	8
60 %	18.44	4.92	737.50	5
70 %	22.28	3.72	891.25	4
80 %	27.28	4.00	1083.75	2
90 %	30.39	3.53	1215.63	3
100 %	42.92	6.53	1716.88	4

Taulukko 6 – Standardin SFS-527-2 mukainen testaus seloste

Optimaalisen täyttöprosentin valinta riippuu taas sovelluksesta ja painotetaan eri tekijöitä kuten tulostuksen nopeutta, materiaalikustannusta ja osan lopullista käyttötarkoitusta. Jos osan on oltava kestävä, mutta kevyt ja taloudellinen materiaali kulutukseltaan, 50–70% voisi olla hyvä kompromissi lujuuden ja materiaalikulutuksen välillä.

Jos taas tarvitaan erittäin kestäviä osia ja materiaalikustannukset sekä tulostusaika eivät ole este, täyttöaste voi olla lähempänä 100%. On kuitenkin tärkeää huomata, että täyttöasteen nostaminen yli 80% tuottaa vain marginaalisen lisäyksen vetolujuudessa, mikä ei välttämättä ole kustannustehokasta.

6 Yhteenveto ja pohdinta

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli toimia pohjatutkimuksena FDM teknologiaa hyödyntävien 3D-printterien avulla tehtävien kappaleiden suunnittelun apuna. Tutkimus tuo tietoa PLA muovilla valmistettavien kappaleiden mekaanisesta kestävyydestä eri rasisitusmuodoilla ja luomaan käsitystä kappaleiden optimaalisesta valmistuksesta. Työssä esille tulleet tulokset toimivat hyödyllisenä pohjana niin harrastelijoille kuin ammattilaisille, jotka suunnittelevat tiettyihin käyttötarkoituksiin tarkoitettuja kappaleita.

Tulostettujen kappaleiden valmistaminen onnistui hyvin ja työn jälki oli erinomaisella tasolla, sillä suurilta valmistusvirheiltä ja laadun vaihtelulta vältyttiin suoritettujen esivalmisteluiden ansiosta. Koekappaleiden testaukset sujuivat myös käytännössä ilman ongelmia eikä luotettavuusrajan saavuttaminen koitunut ongelmaksi testauksessa. Aineenkoetuslaitteen käyttö oli helppoa ja tuloksien kirjauksen tapa selkeä. Aineenkoetuslaitteen automaattiset kalibrointi ja esiasete toiminnot osoittautuvat korvaamattomaksi avuksi laitteen käytön helpottamiseksi. Kaikkien rasisitusmuotojen koetulokset vastasivat hyvin muiden testausien tuloksia samankaltaisten kappaleiden osalta. Luonnollisesti infill täyttötyyppin ja kappaleen valmistusparametrien keskittäminen infillin vaikutukseen ei antanut täyttä vertailukohdetta jokaiselle testille.

Tuloksien kirjaaminen ja taulukkolaskentaohjelman käyttöön muuttaminen vei oletettua enemmän aikaa ja vaati manuaalista siistimistä sekä ohjelmiston toiminnan syvempää perehtymistä. Eri rasisitusmuotojen ja niihin liittyvien standardien vaatimuksien täyttäminen helpottui huomattavasti kun data jaottelu ja siistiminen oltiin suoritettu huolellisesti. Standardeissa määritellään paljon erityyppisiä jännityksiä, rajoja ja määreitä, joita ei kaikkia luonnollisesti tarvinnut tässä tutkimuksessa käsitellä. Datan pohjalta suurin osa laskelmista voitaisiin kuitenkin tehdä jälkikäteen. Venymän ja siirtymän suhteelliset arvot jätettiin mittaamatta aineenkoetuslaitteen varustelun puutteen vuoksi, tämä ei kuitenkaan ollut oleellinen osa mekaanisten ominaisuuksien määrittämistä ja esimerkiksi suhteellinen venymä voidaan suorittaa teoreettisella laskennalla käyttäen standardin kaavoja myös jälkikäteen.

Tämä työ antaa paljon uusia mahdollisuuksia tutkimuksen jatkamiseksi niin erilaisiin materiaaleihin kuin eri infill kuvioiden vaikutukseen. Tutkimuksen alussa tahtotilana oli suorittaa neljän erityyppisen infill kuvion vaikutus neljään eri tyyppiseen rasisitukseen. Kattavan tutkimuksen luomiseksi olisi koekappaleiden määrät noussut tuhansiin, joten tutkimus päätettiin jättää suppeammaksi. PLA materiaalina antaa hyvän pohjan päätelmien

tekemiseen eri materiaaleille ja infill kuvioille, vaikka ei suoraan tarjoa vastauksia esimerkiksi ASA materiaalin käyttäytymiseen samanlaisessa tutkimuksessa.

Tutkimusta voisi jatkaa esimerkiksi hunajakkeno, gyroidi, kolmio ja mahdollisten muiden geometrioiden vaikutuksen eroihin verrattuna grid kuvioon. Edellä mainituista kuvioista hunajakkeno ja gyroid kuviot tarjoavat luonnossa ilmeneviä geometrioita jotka ovat tunnetusti mekaanisesti erittäin kestäviä, siksi niiden vaikutus kestävyyyteen olisi hyvä tutkimuksen kohde. Tutkimusta voisi myös laajentaa muihin materiaaleihin kuten PET, Nylon ja ASA, joiden käyttö on yleistynyt 3D tulostin tekniikan kehittyessä mahdollistamaan näiden materiaalien luotettavan käytön jo kuluttajatasoisissa laitteissa. Jo tehtyjä tutkimuksia sekä laajempia tutkimuksia tulisi vertailla FEM-laskennan simulaatioilla. Täten mahdollisesti tarkentaa FEM-laskentaa siten että se vastaisi paremmin todellisia mekaanisia ominaisuuksia 3D tulosteissa.

Mekaanisen rasituksen raja-arvot määrittyvät tutkimuksen mukaan seuraavasti: Taivutus Draft 10-20% / Medium $\leq 40\%$ / High $\leq 80\%$, Puristus Draft 10-20% / Medium 40-60% / High $\leq 70\%$, Veto Draft 10-30% / Medium $\leq 30-60$ / High $\leq 70\%$

Lopullisena päätelmänä kappaleiden optimaalinen täyttöaste voidaan määrittää tutkimuksen perusteella kolmeen osaan. Ensimmäisenä niin sanotut vedos kappaleet eli draft kappaleet jossa infill on 10 - 20% riippuen kappaleen geometrian yksityiskohtaisuudesta, siten että suurempi yksityiskohta vaatii isomman täyttöasteen ja yksikertaisen suorat kappaleet pienemmällä täyttöasteella. Toiseksi kappaleet joilla on selkeä käyttötarkoitus mutta eivät vaadi suurta mekaanista kestävyttä, kappaleiden monimutkaisuus ei vaikuta tällä tasolla infillin määrään ja raja-arvona toimii 20-40% jonka ylittäminen ei enää ole tarkoituksen mukaista kustannustehokkuuden kannalta. Kolmantena ja viimeisenä ryhmänä käsitellään korkeaa mekaanista kestävien kappaleiden infill joka rajoittuu 70-80% täyttöasteeseen. 80% prosentin täyttöasteen ylittäminen ei tarjoa varsinaista hyötyä näissä kappaleissa mutta auttaa merkittäviin materiaalikustannusten vähentämiseen. 100% täyttöaste on suositeltavaa ainoastaa tilanteissa joissa kappaleen suunnittelussa ei voida enää tehdä parannuksia kestävyden suhteen tila tai muiden rajoitusten suhteen, tärkeä osa suunnittelua on myös että kappaleen tulostamisessa on otettu huomioon orientaatio sillä kerrosten välinen vetoominaisuus on oletusarvoltaan erittäin heikko kun taas kerroksen suuntainen kestävyys on moninkertaisesti parempi johtuen 3D tulostettujen kappaleiden anisotrooppisesta luonteesta. Mikäli edellä mainituilla menetelmillä ei saada tarvittavaa kestävyttä aikaan on syytä harkita 100% täyttöastetta muissa tapauksissa tätä tulisi välttää. Näin ollen tämän tutkimuksen alussa asetetut tavoitteet saavutettiin ja kysymyksiin saatiin vastaukset.

Lähteet

ResearchGate. 2023. 3D Complex Structures Through Fused Deposition Modeling as a Rapid Prototyping Technology Designed for Replacing Anatomic Parts of Human Body. Viitattu 10.11.2023. Saatavissa https://www.researchgate.net/figure/Schematic-FDM-principle_fig3_330125417

ResearchGate. 2023. Additive Manufacturing Techniques for Fabrication of Bone Scaffolds for Tissue Engineering Applications. Viitattu 11.11.2023. Saatavissa https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-SLS-method-Image-courtesy-of-3DEO-Co-164_fig2_344434235

Shimadzu. 2023-1. AGX-V2 Series – Options. Viitattu 11.11.2023. Saatavissa <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm/autograph-precision-universal-tester/option.html#346-10>

Shimadzu. 2023-2. Autograph Universal Testing Machines. Viitattu 11.11.2023. Saatavissa <https://www.shimadzu.com/an/products/material-non-destructive/test/retrofits/retrofits2.html>

Prusa3D-1. 2023. Infill patterns. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130

Statista. 2023. Which 3D printing technologies do you use?. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>

TechCrunch. 2016. How expiring patents are ushering in the next generation of 3D printing. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa <https://techcrunch.com/2016/05/15/how-expiring-patents-are-usher-in-the-next-generation-of-3d-printing/?guccounter=1>

RepRap. 2023. Welcome to RepRap.org. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa <https://reprap.org/wiki/RepRap>

3D Printing Spot. 2023. 9 Industrial That Use 3D Printing. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa <https://www.3dprintingspot.com/post/industries-that-use-3d-printing>

Google Patents. 2023-1. US4863538 - Method and apparatus for producing parts by selective sintering. Viitattu 13.10.2023. Saatavissa <https://patents.google.com/patent/US4863538>

Google Patents. 2023-2. US4575330 - SLA Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Viitattu 13.10.2023. Saatavissa <https://patents.google.com/patent/US4575330A/en>

XYZDims. 2021. 3D Printing: Rotating Tilted Nozzle 4th Axis Option – Draft. Viitattu 12.10.2023. Saatavissa <https://xyzdims.com/2021/01/27/3d-printing-rotating-tilted-nozzle-option/>

Prusa3D-2. 2018. Multi Material Upgrade 2.0 is here!. Viitattu 15.10.2023. Saatavissa https://blog.prusa3d.com/multi-material-upgrade-2-0-is-here_8700/

Science Direct. 2020. Effects of infill characteristics and strain rate on the deformation and failure properties of additively manufactured polyamide-based composite structures. Viitattu 10.9.2023. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379720318131#b0065>

Simplify3D. 2023. Ultimate 3D Printing Materials Guide. Viitattu 10.10.2023. Saatavissa <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/>

Science Direct. 2016. Poly (lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. Viitattu 13.11.2023. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169409X16300965>

Omnexus. 2018. Overcoming Plastics Coloring Challenges. Viitattu 11.10.2023. Saatavissa <https://omnexus.specialchem.com/tech-library/article/overcoming-plastics-coloring-challenges>

Science Direct. 2016. PLA composites: From production to properties. Viitattu 10.09.2023. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169409X16301028>

Prusa3D-3. 2023. Original Prusa i3 MK3S+ 3D Printer kit. Viitattu 19.11.2023. Saatavissa <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-3d-printer-kit/>

3Djake. 2023. ecoPLA Hopea. Viitattu 19.11.2023. Saatavissa <https://www.3djake.fi/3djake/ecopla-hopea>

Prusa3D-4. 2023. Original Prusa i3 MK3S. Viitattu 19.11.2023. Saatavissa <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s/>

Shimadzu. 2023-3. Fixed Compression Plates. Viitattu 11.11.2023. Saatavissa <https://www.shimadzu.com/an/products/uni-ttm-consumables/accessory/fixed-compression-plates/index.html>

SFS-ISO-291-2008. 2006. Plastics. Standard atmospheres for conditioning and testing. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS-EN-ISO-604-2002. 1997. Plastics. Determination of compressive properties. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS-EN-ISO-178-2019. 2011. Muovit. Taivutusominaisuuksien määrittäminen. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

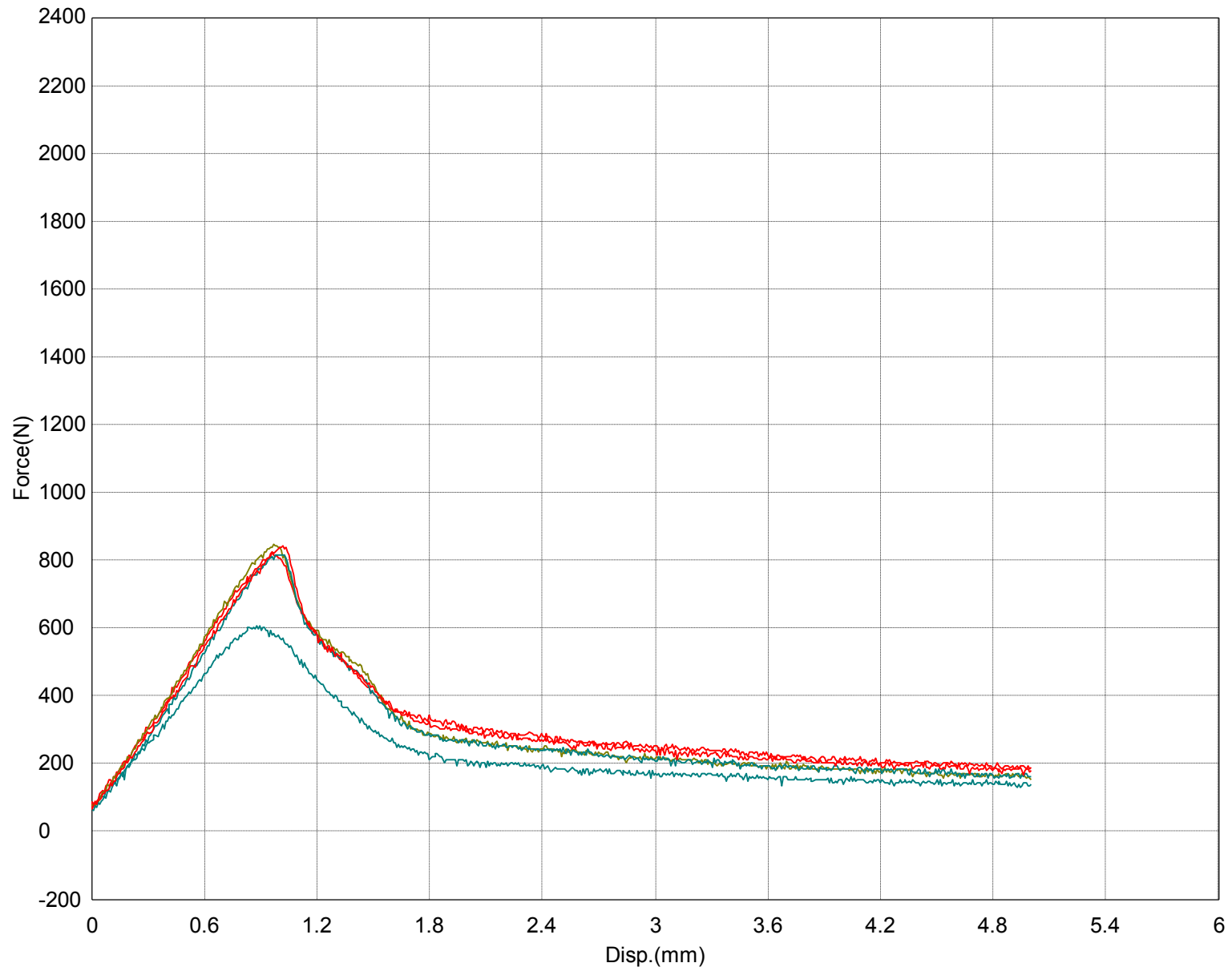
SFS-EN-ISO-527-1-2019-osa-1. 2012. Muovit. Veto-ominaisuuksien määrittäminen. Osa 1: Yleiset periaatteet. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

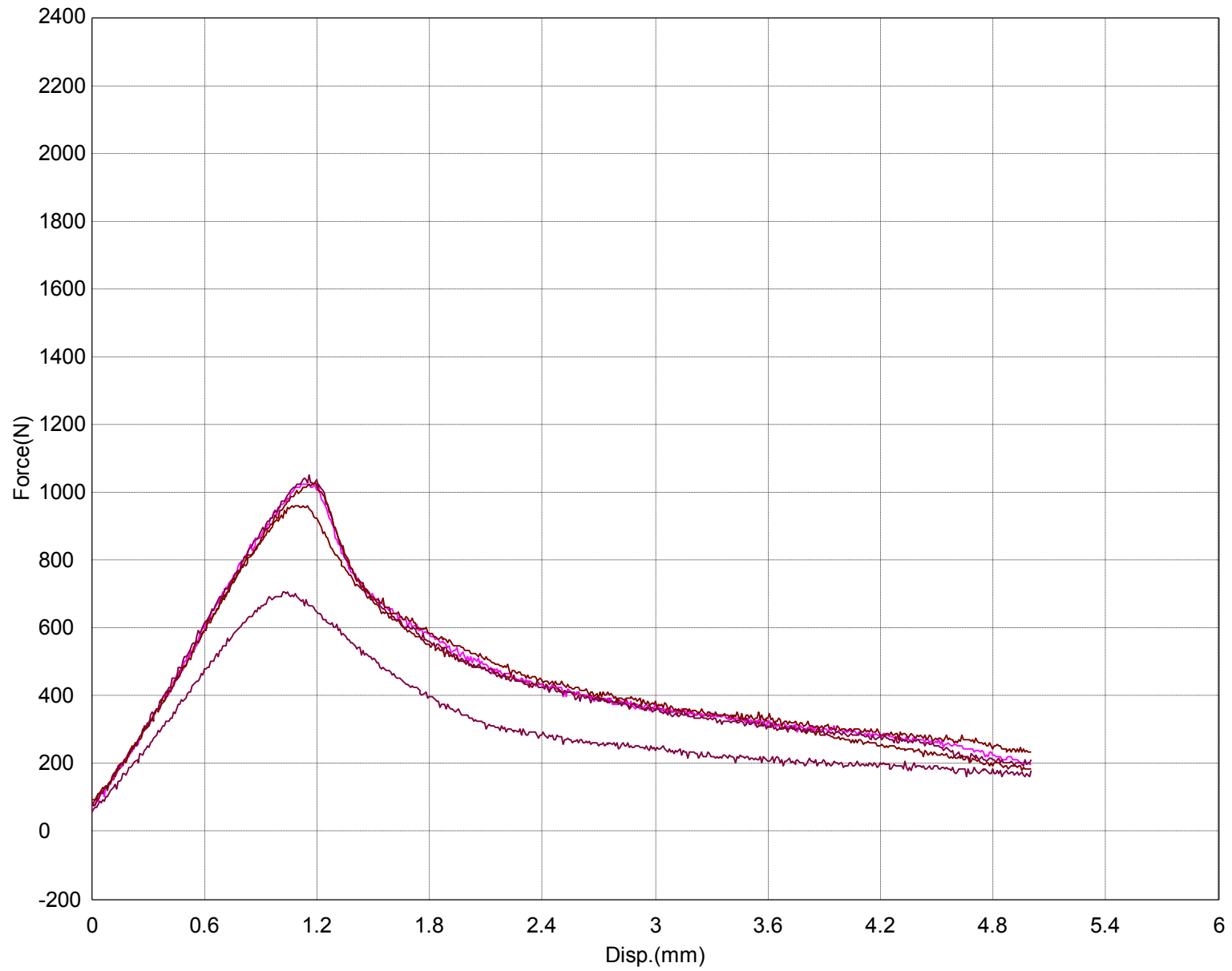
SFS-EN-ISO-527-2-2012-osa-2. 1996. Muovit. Veto-ominaisuuksien määrittäminen.

Osa 2: Testausolosuhteet valettaville ja ekstrudoitaville muoveille. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

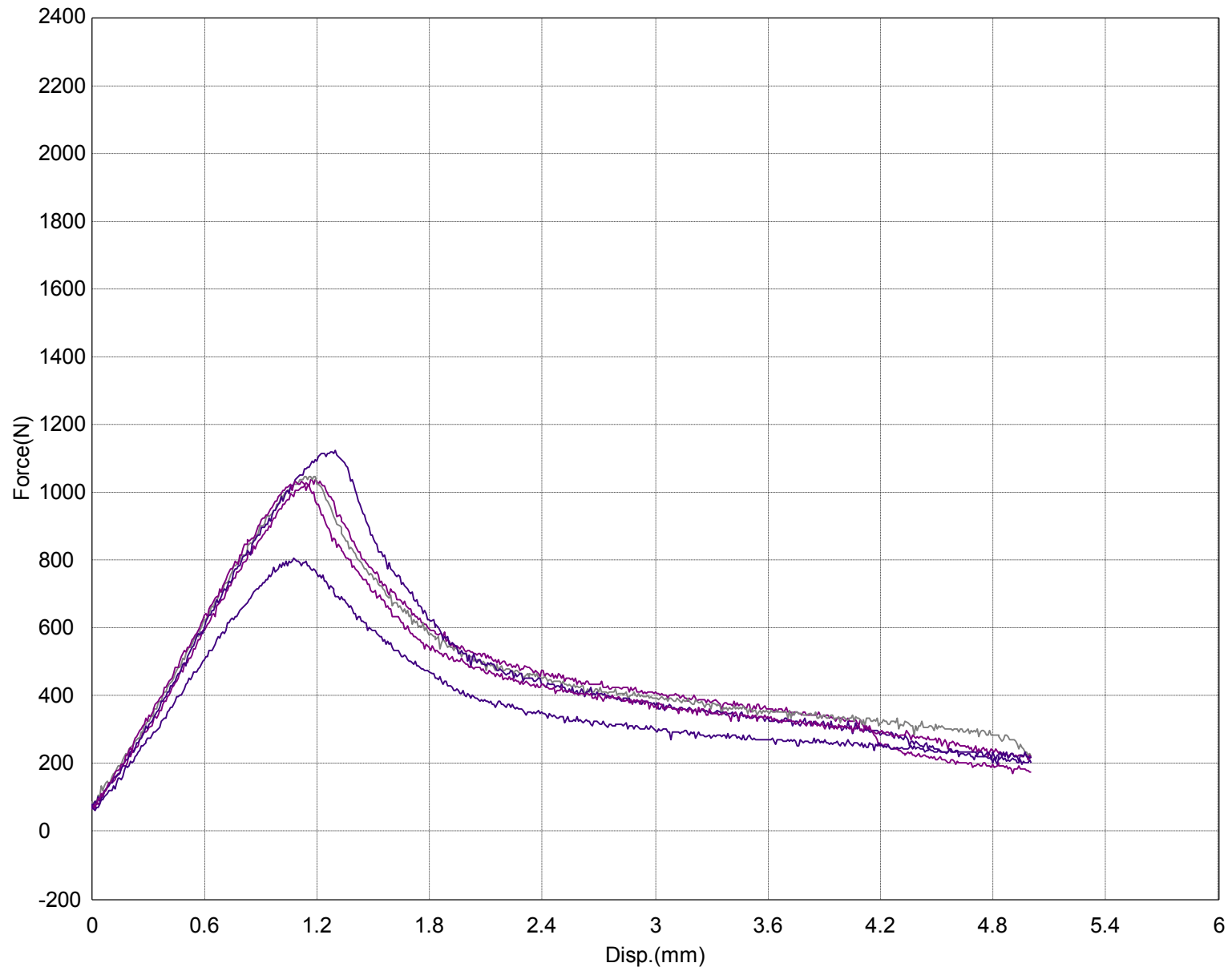
SFS-EN-ISO-527-3-2018-osa-3. 1995. Muovit. Veto-ominaisuuksien määrittäminen. Osa 3: Testausolosuhteet kalvoille ja levyille. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS-EN-ISO-3167. 2003. PLASTICS - MULTIPURPOSE TEST SPECIMEN. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

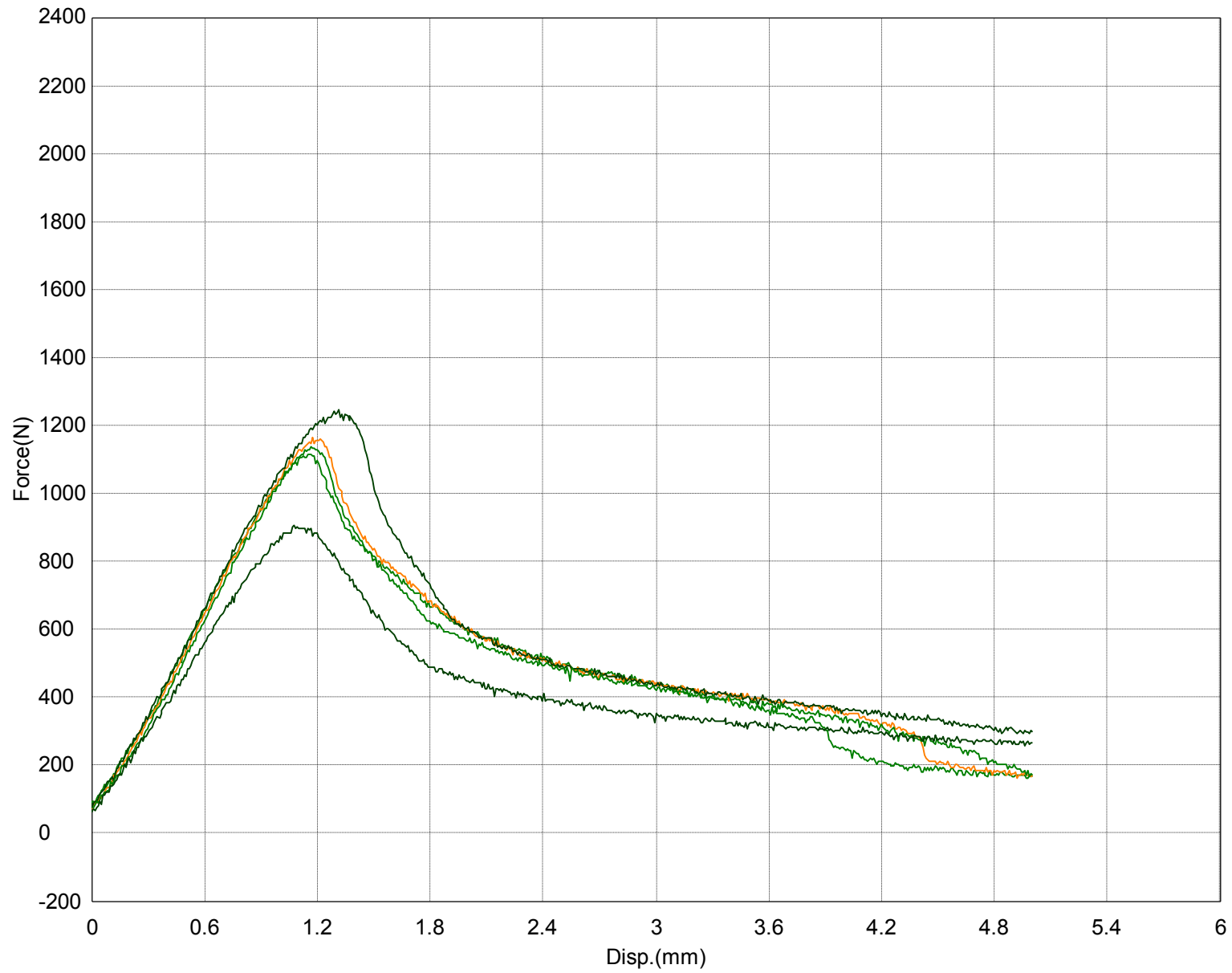




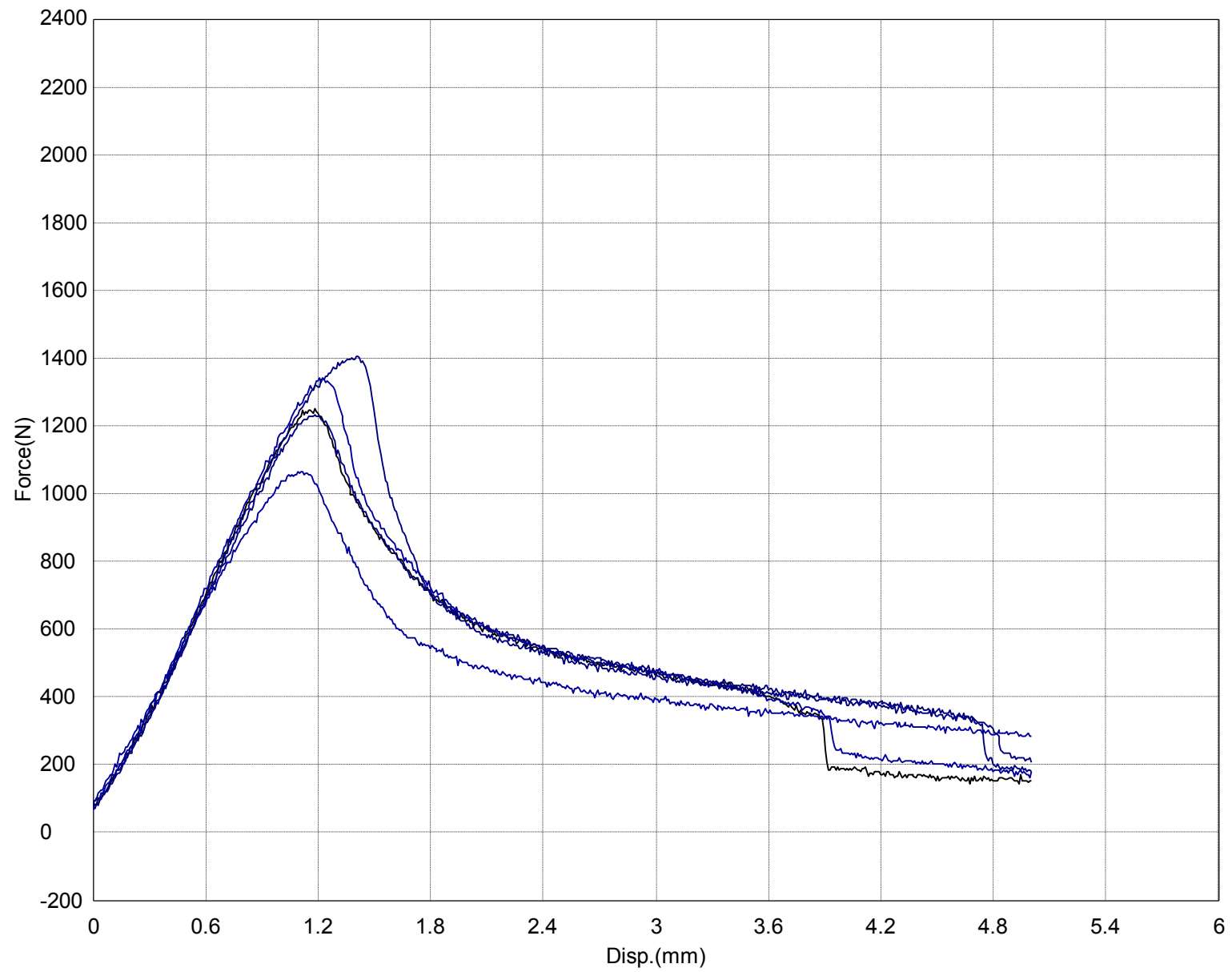
- PLA-GRID_2
- PLA-GRID_2
- PLA-GRID_2
- PLA-GRID_2
- PLA-GRID_2



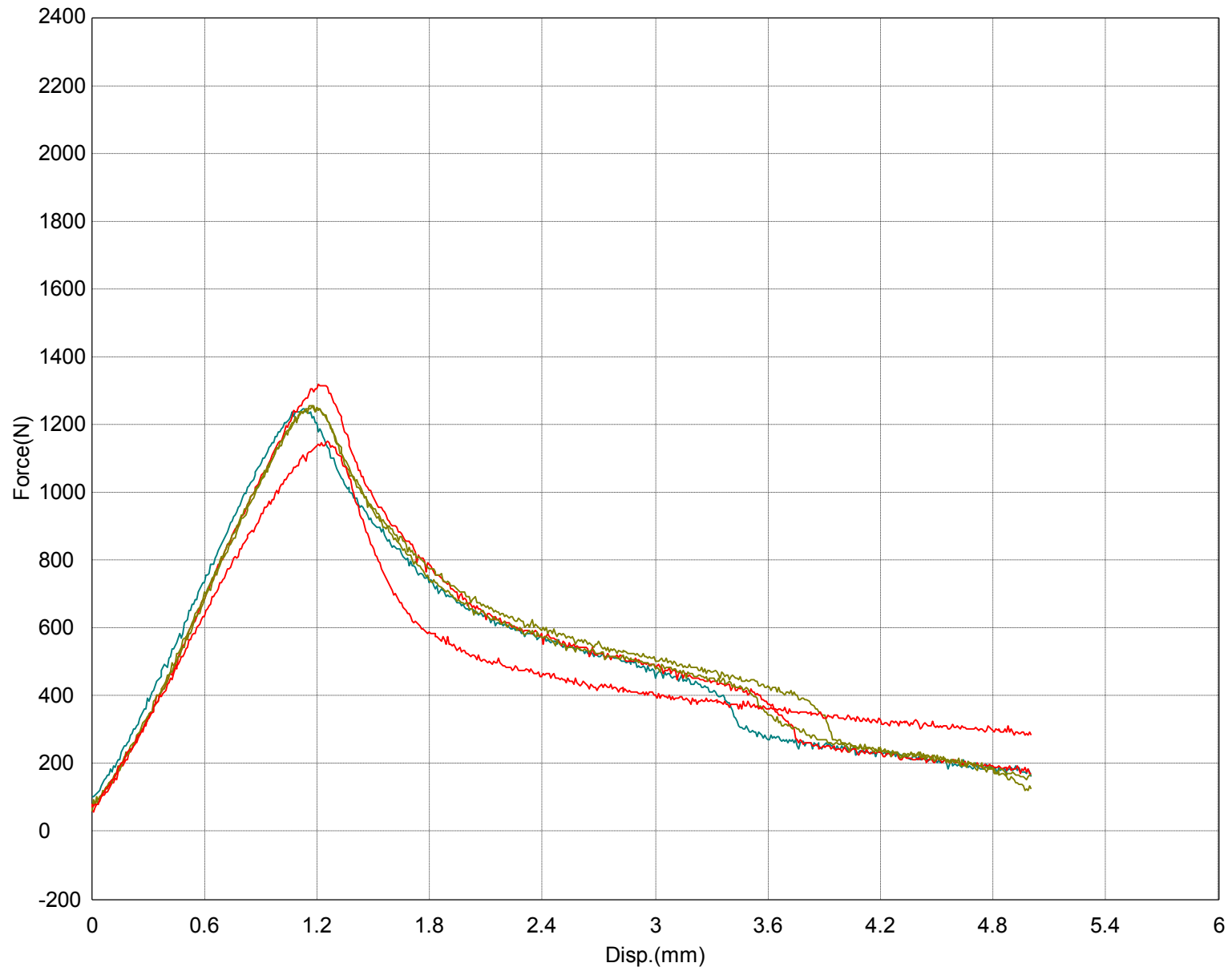
- PLA-GRID_3
- PLA-GRID_3
- PLA-GRID_3
- PLA-GRID_3
- PLA-GRID_3

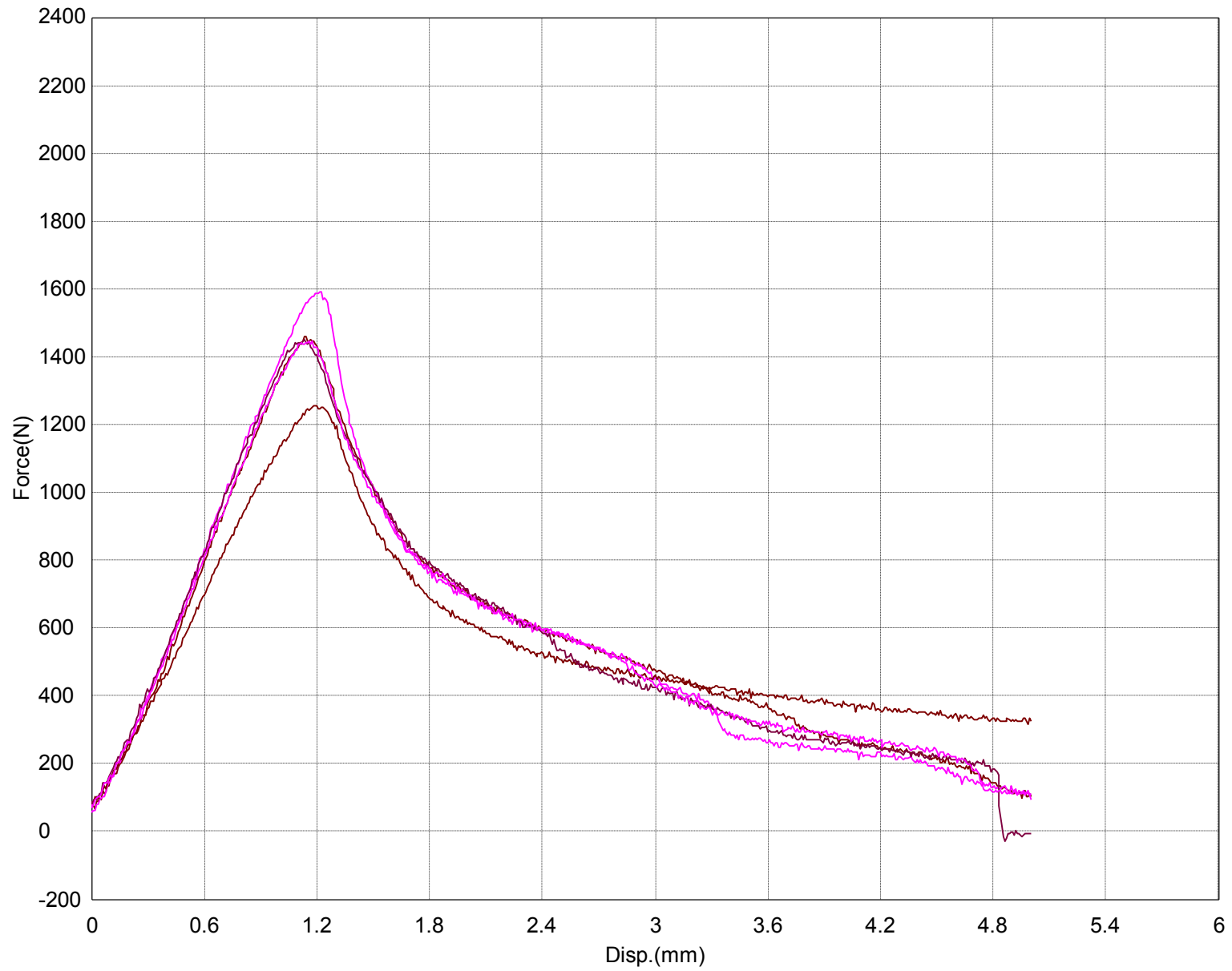


- PLA-GRID_4
- PLA-GRID_4
- PLA-GRID_4
- PLA-GRID_4
- PLA-GRID_4

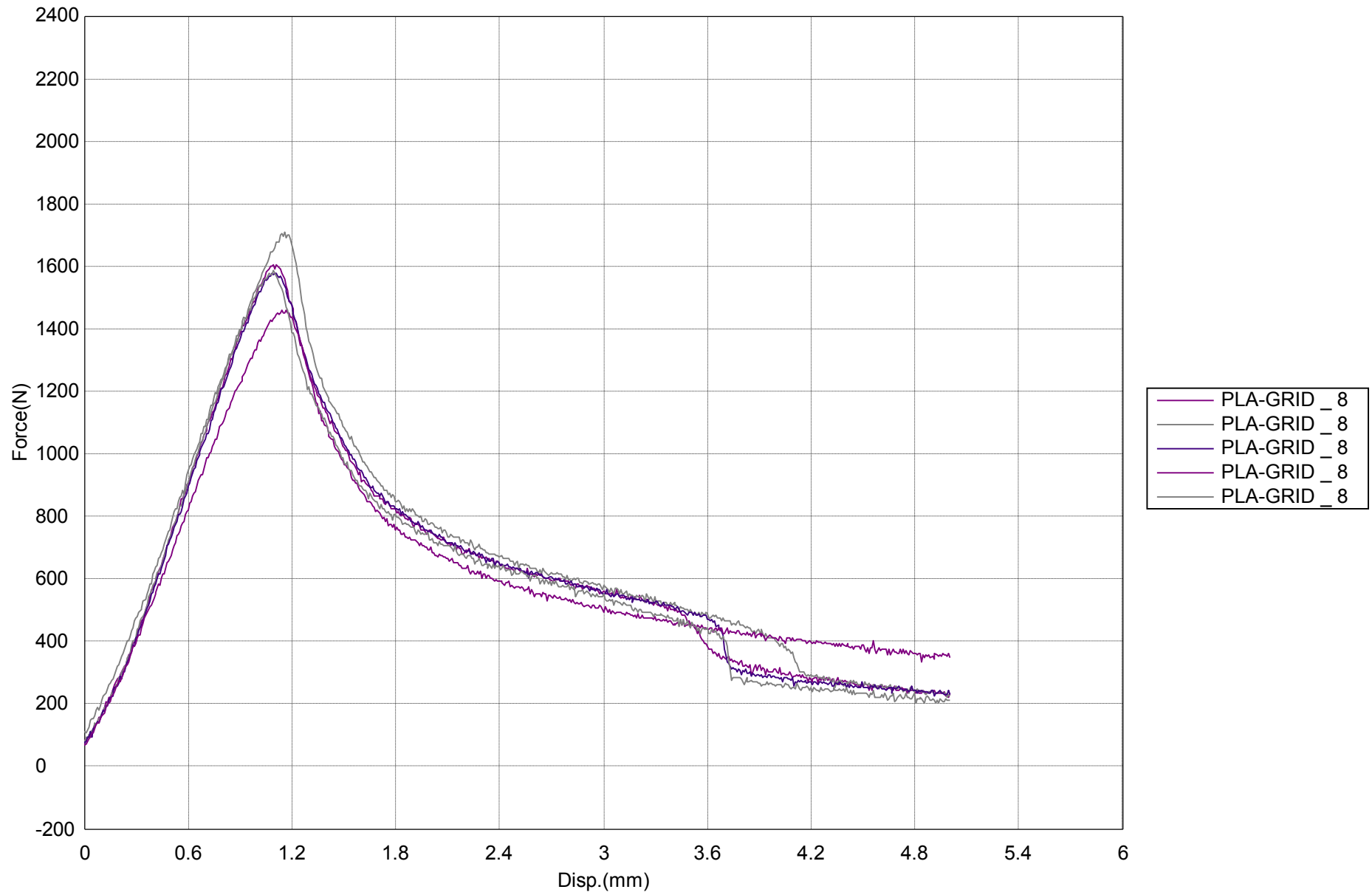


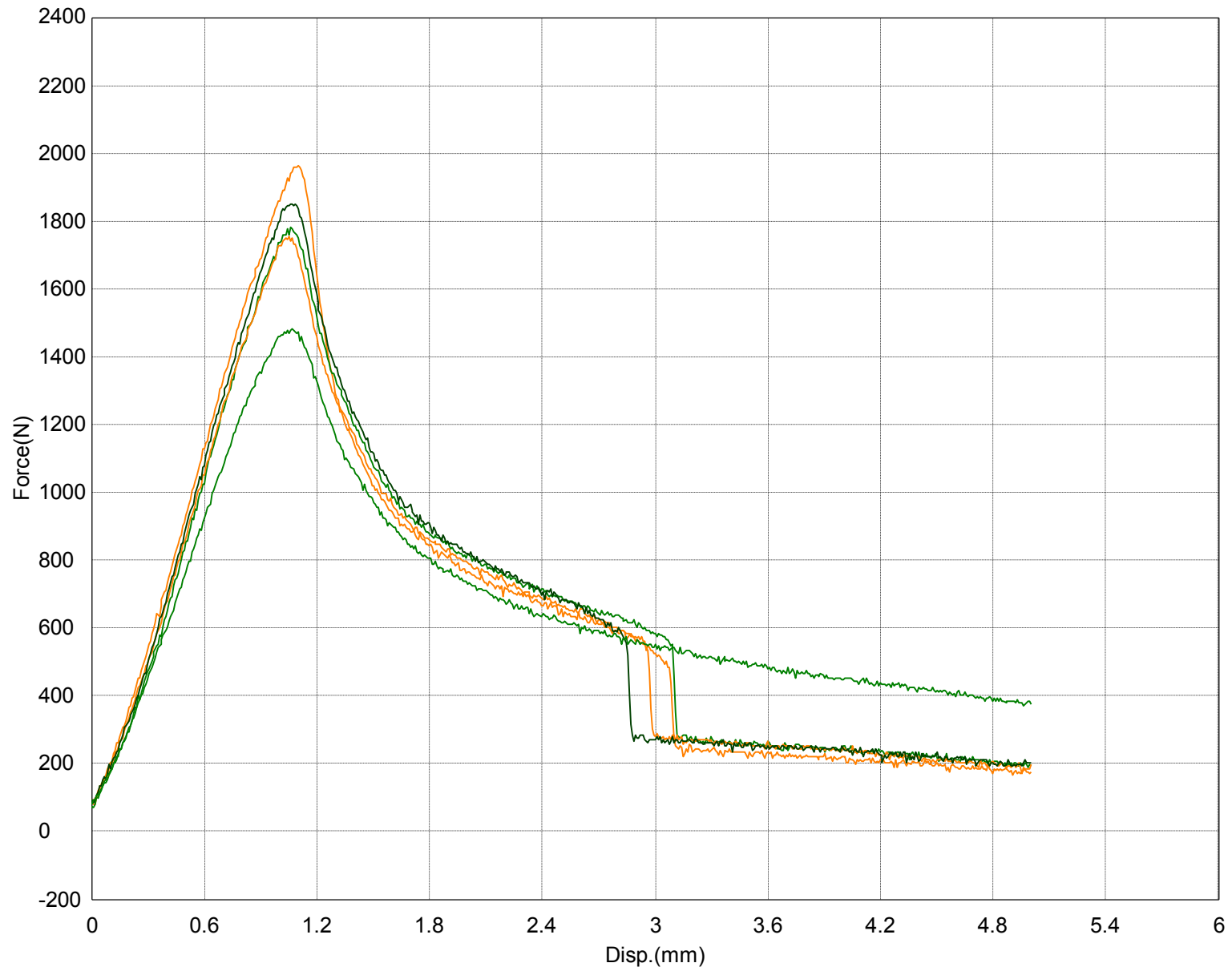
- PLA-GRID_5
- PLA-GRID_5
- PLA-GRID_5
- PLA-GRID_5
- PLA-GRID_5



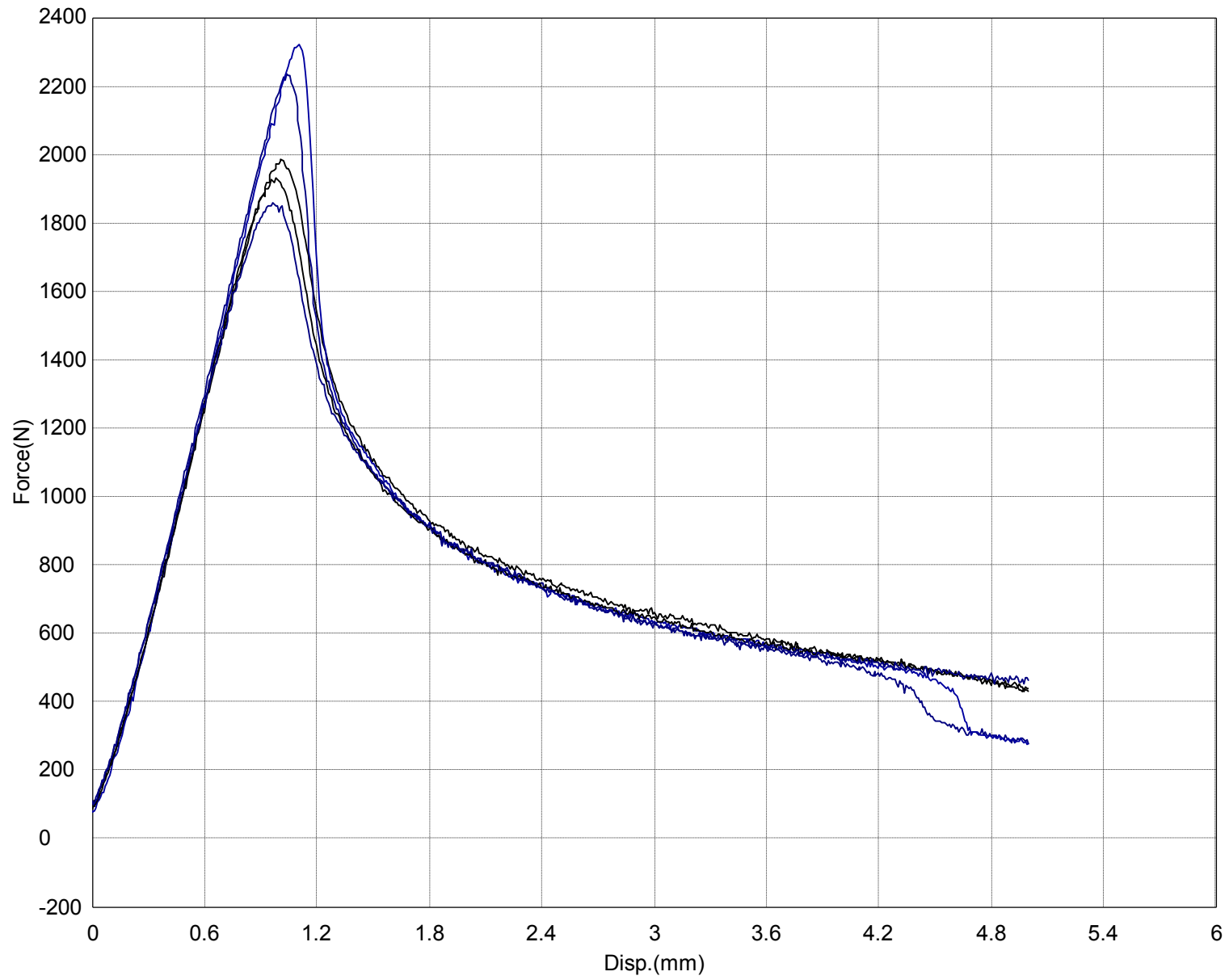


- PLA-GRID_7
- PLA-GRID_7
- PLA-GRID_7
- PLA-GRID_7
- PLA-GRID_7

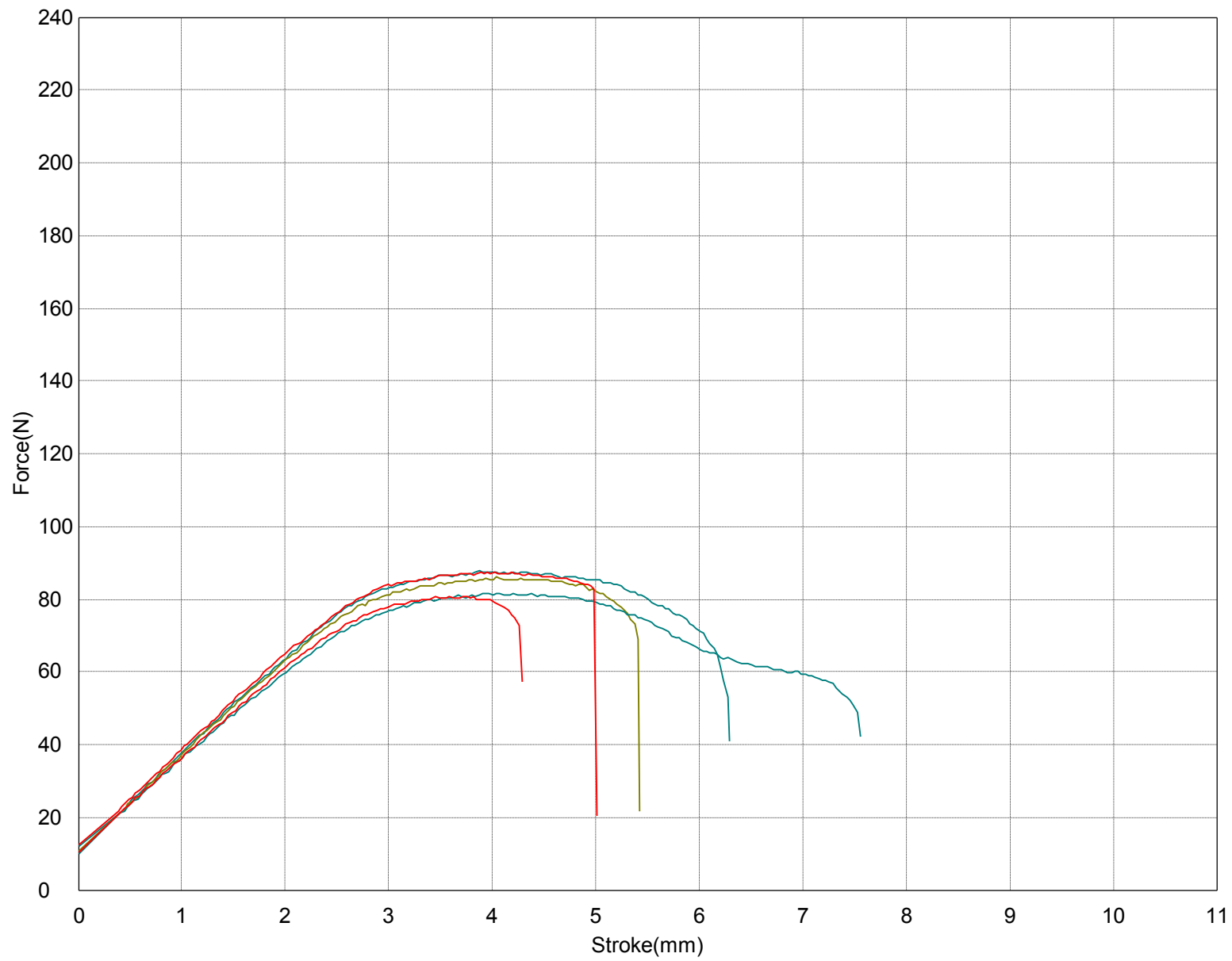




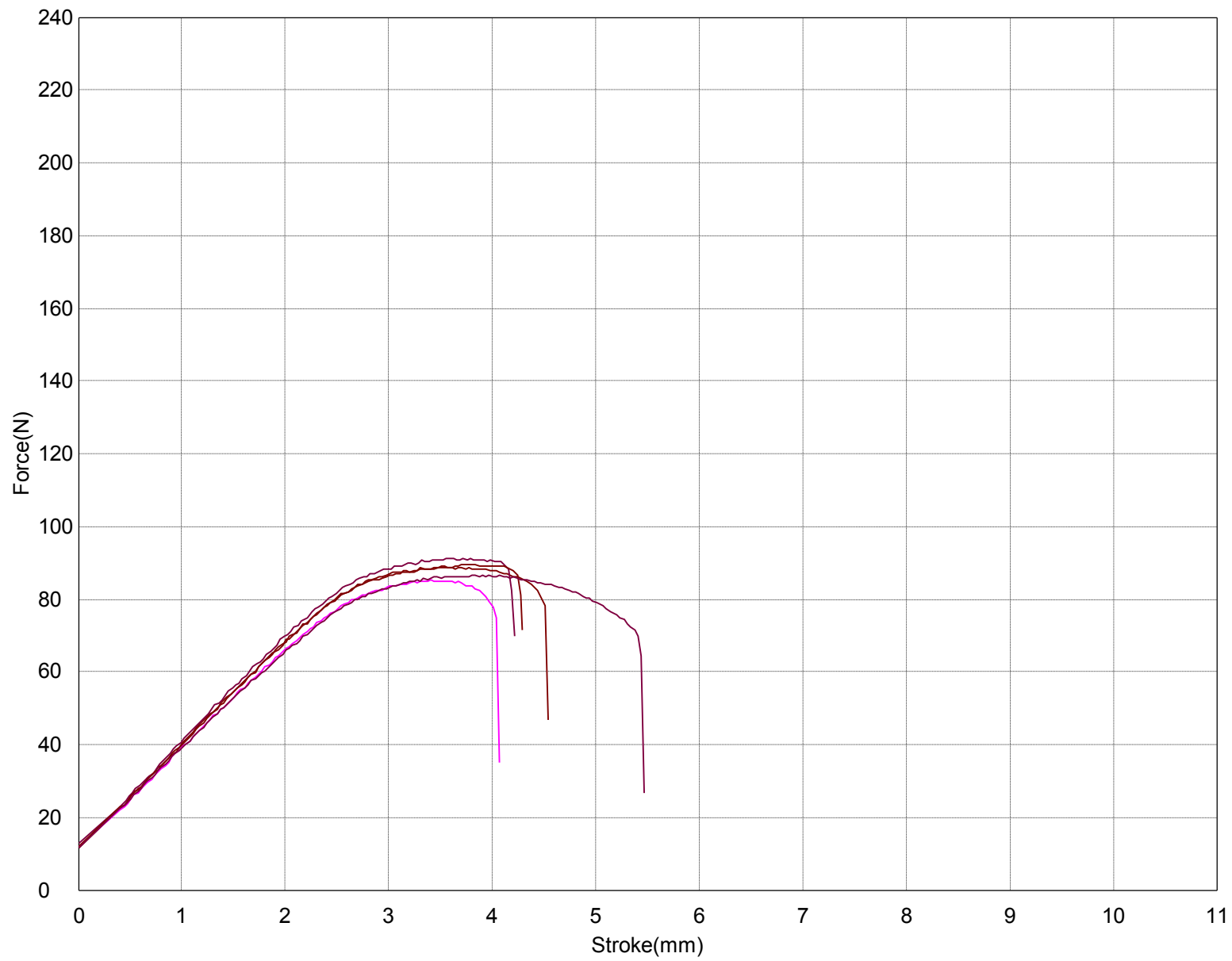
- PLA-GRID_9
- PLA-GRID_9
- PLA-GRID_9
- PLA-GRID_9
- PLA-GRID_9



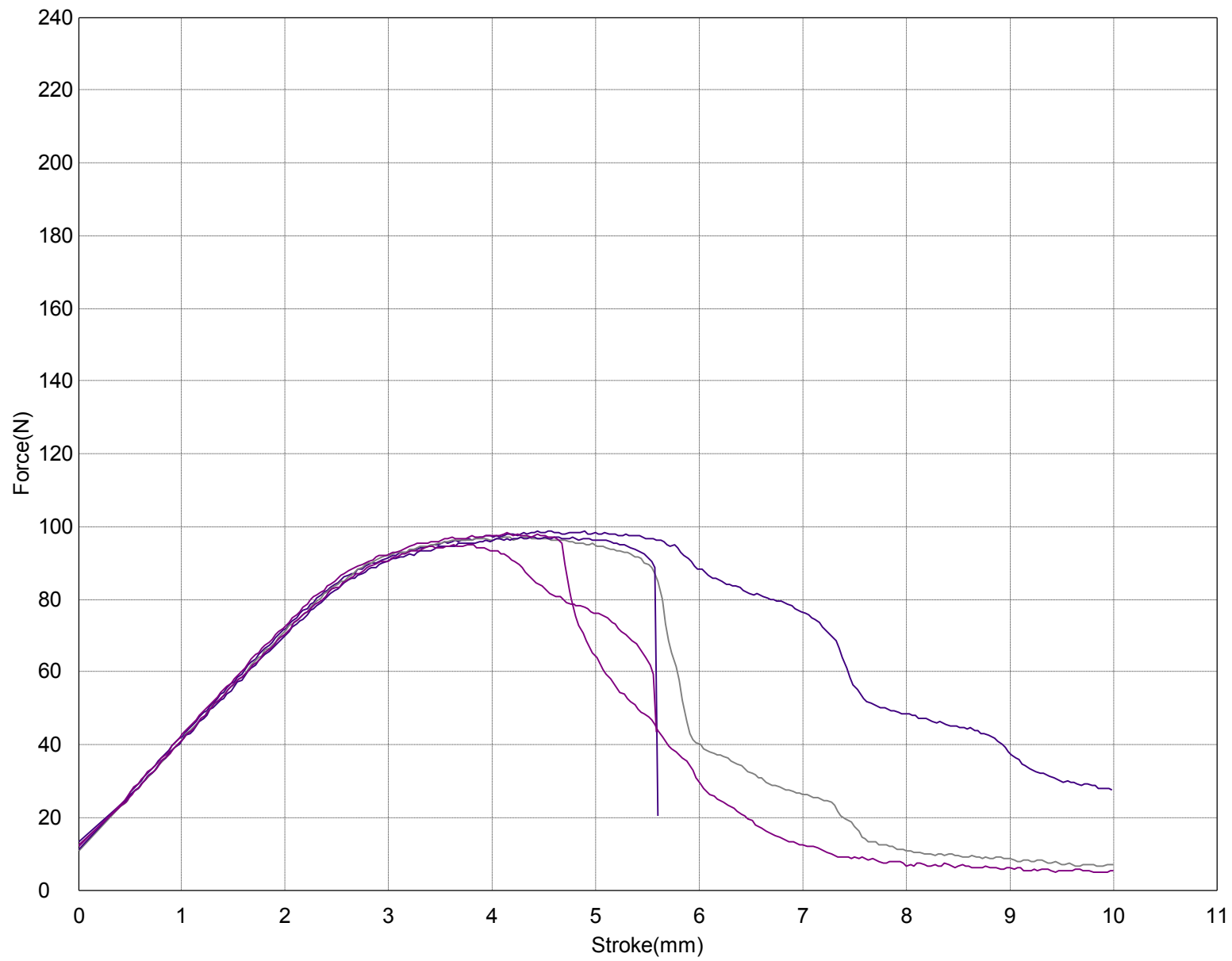
- PLA-GRID_10
- PLA-GRID_10
- PLA-GRID_10
- PLA-GRID_10
- PLA-GRID_10



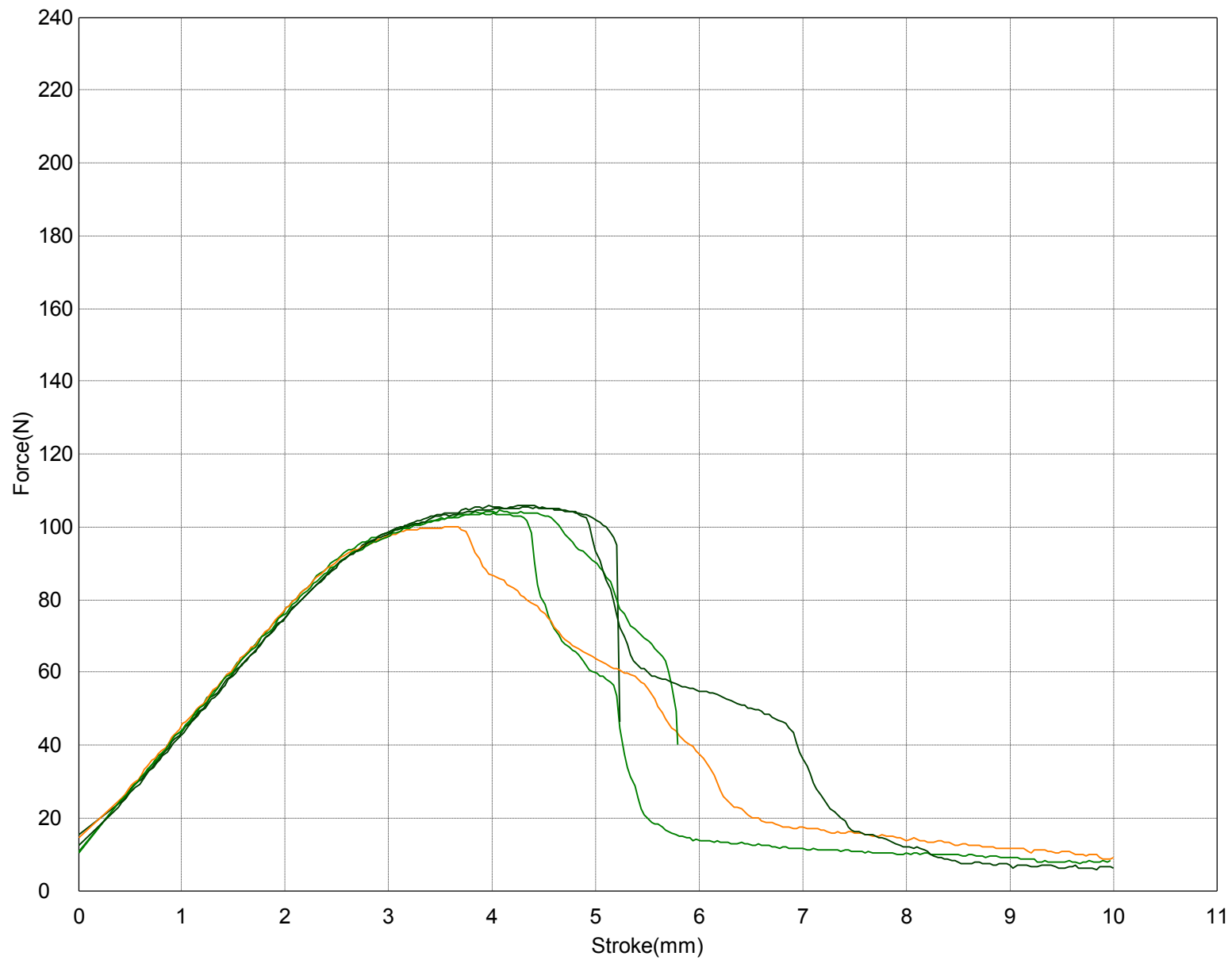
- PLA_Grid_1
- PLA_Grid_1
- PLA_Grid_1
- PLA_Grid_1
- PLA_Grid_1

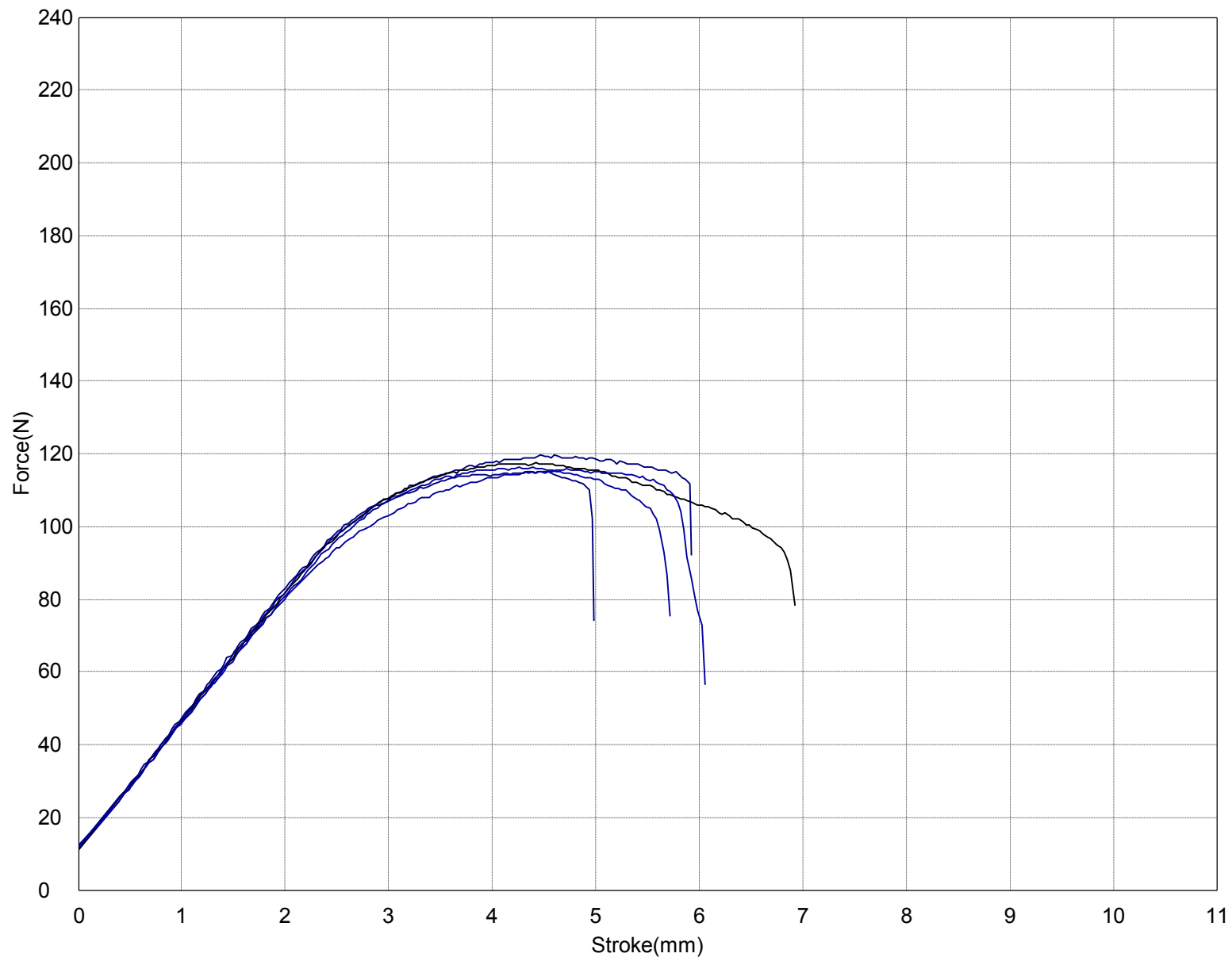


- PLA_Grid_2
- PLA_Grid_2
- PLA_Grid_2
- PLA_Grid_2
- PLA_Grid_2

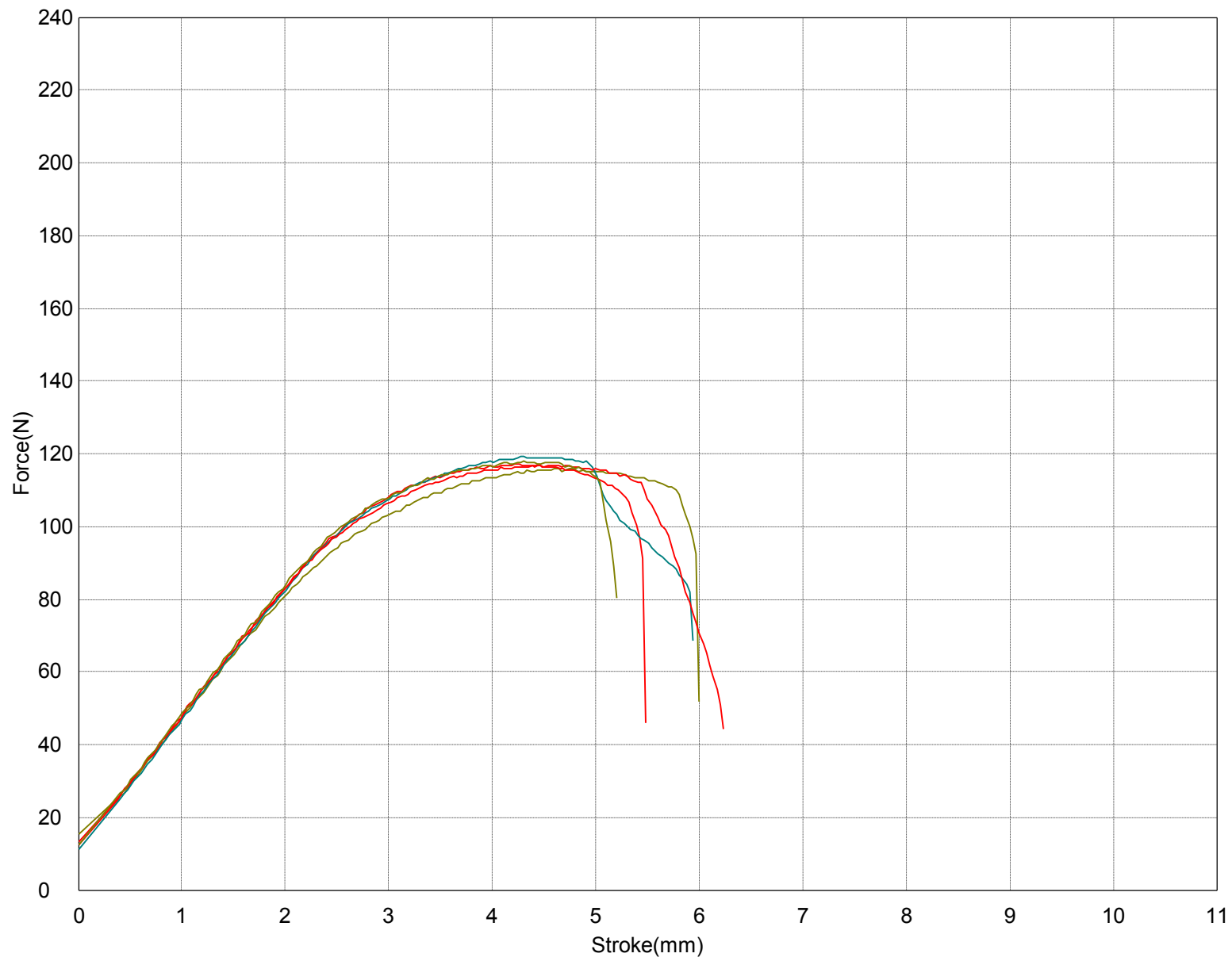


- PLA_Grid_3
- PLA_Grid_3
- PLA_Grid_3
- PLA_Grid_3
- PLA_Grid_3

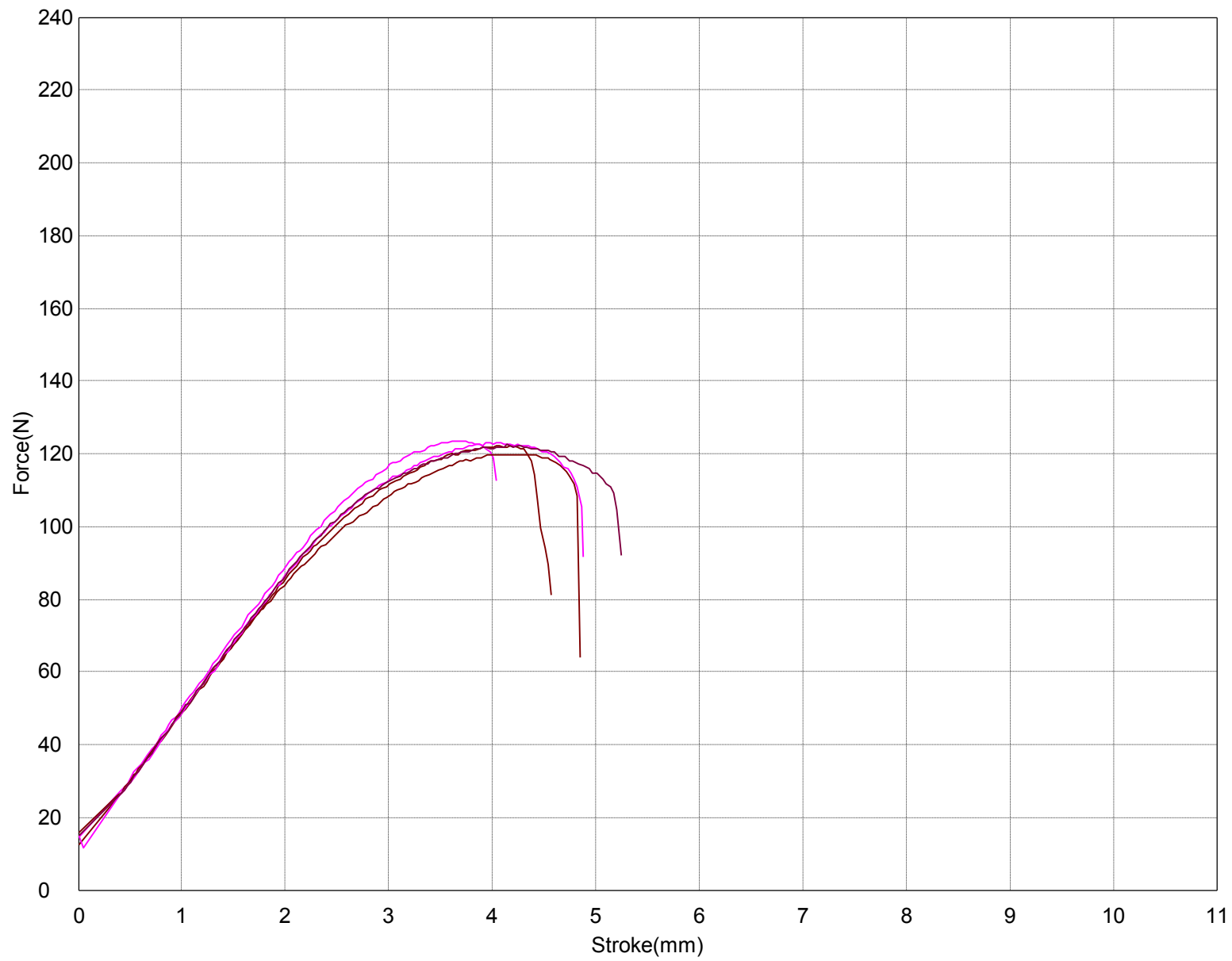




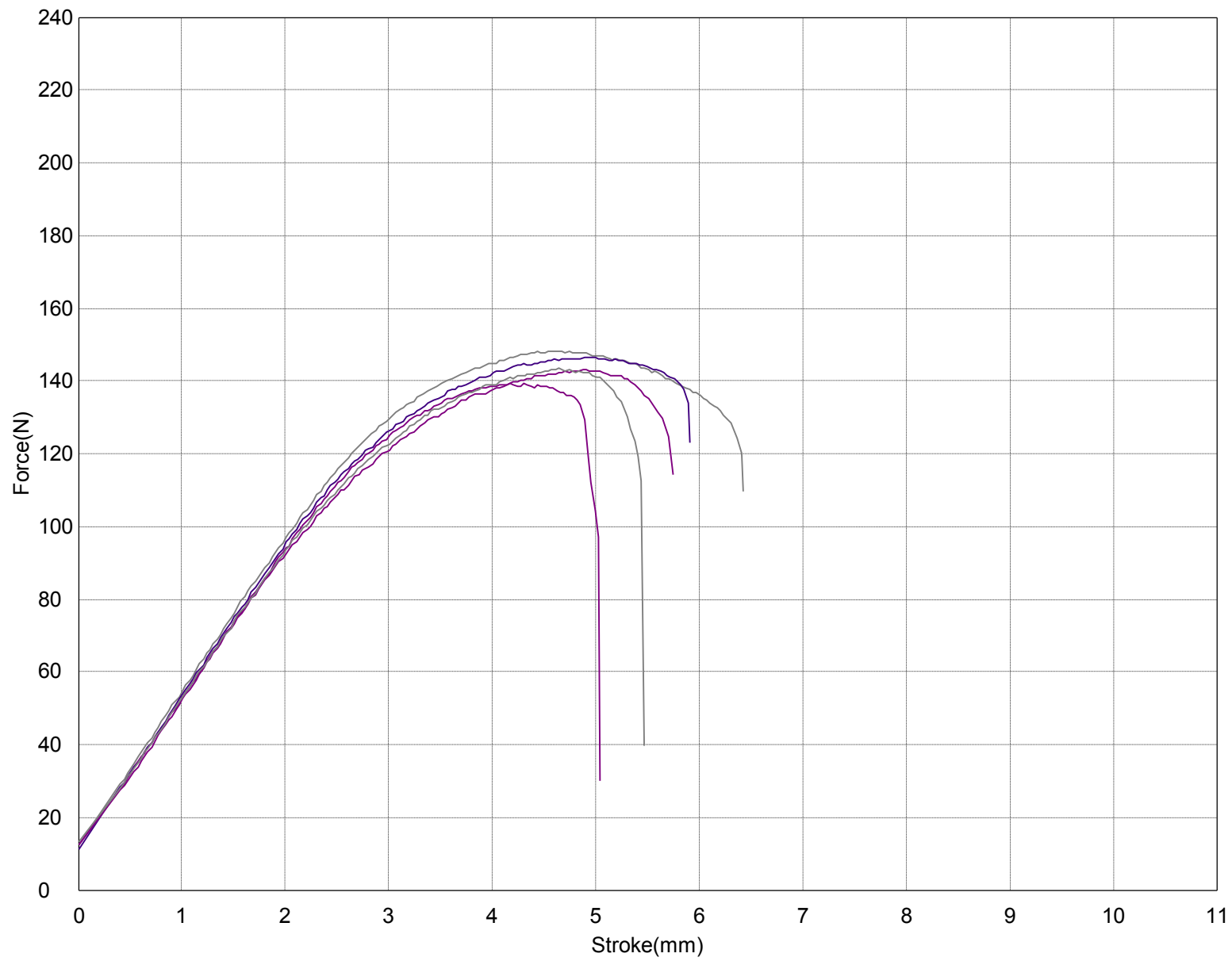
- PLA_Grid_5
- PLA_Grid_5
- PLA_Grid_5
- PLA_Grid_5
- PLA_Grid_5



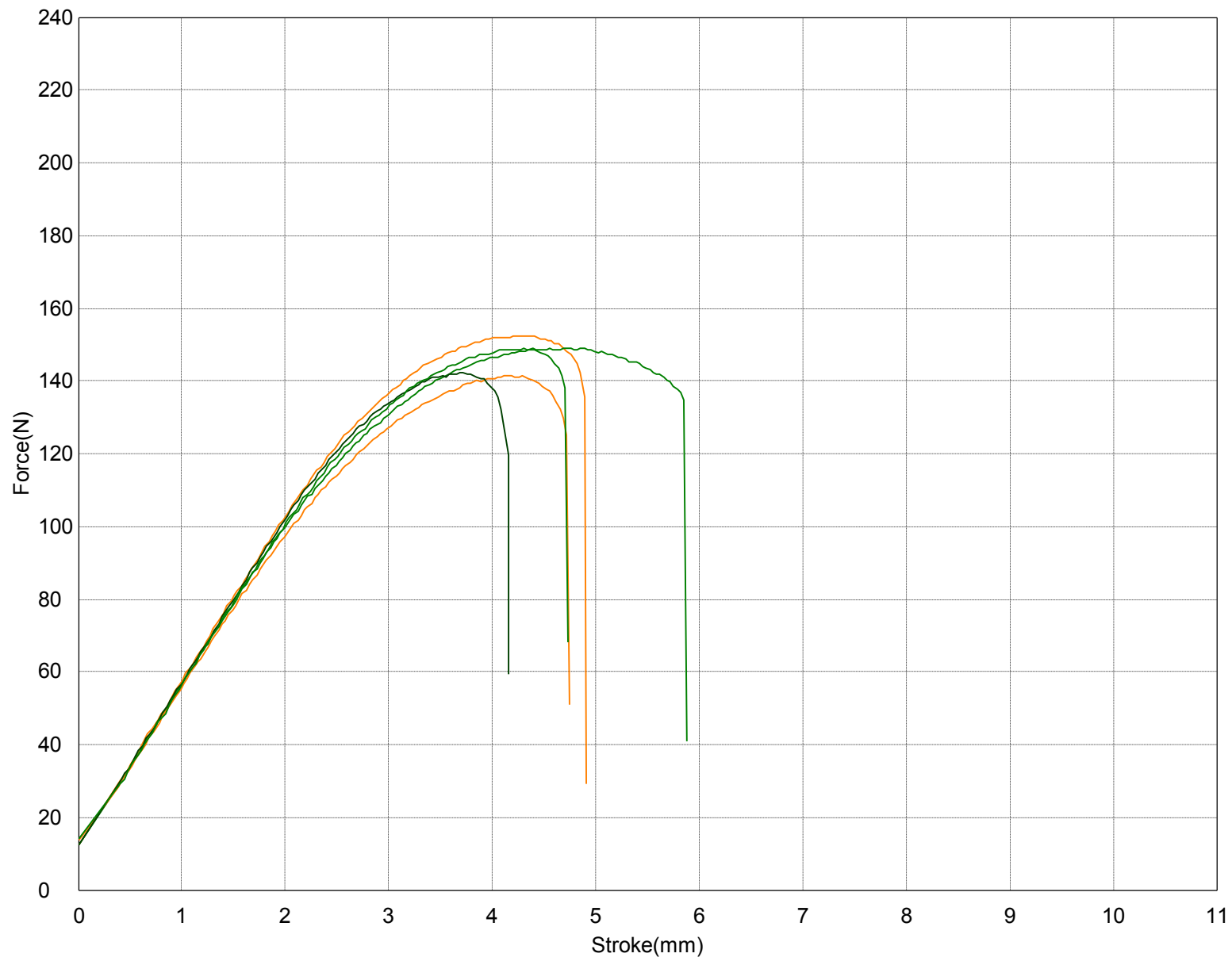
- PLA_Grid_6
- PLA_Grid_6
- PLA_Grid_6
- PLA_Grid_6
- PLA_Grid_6



- PLA_Grid_7
- PLA_Grid_7
- PLA_Grid_7
- PLA_Grid_7
- PLA_Grid_7



- PLA_Grid_8
- PLA_Grid_8
- PLA_Grid_8
- PLA_Grid_8
- PLA_Grid_8



- PLA_Grid_9
- PLA_Grid_9
- PLA_Grid_9
- PLA_Grid_9
- PLA_Grid_9

