



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Juha Lehtinen

3D-tulostettujen muovipylväiden muotoilun vaikutus nurjahduskestävyyteen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinööriyö

14.02.2020

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Juha Lehtinen 3D-tulostettujen muovipylväiden muotoilun vaikutus nurjahduskestävyyteen 60 sivua + 3 liitettä 14.02.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Ammatillinen pääaine	Tuotesuunnittelu
Ohjaajat	Lehtori Pekka Salonen Tutkija Kirsi Kukko
<p>Tässä insinööriyössä oli tavoitteena selvittää 3D-pursotusmenetelmällä tulostettujen kappaleiden nurjahduskestävyys puristuskokeen avulla. Nurjahduskestävyyden ja lujuusominaisuuksien ennakkoinnilla voidaan saavuttaa merkittäviä taloudellisia säästöjä 3D-tulostettujen kappaleiden käyttöönotossa. Tulostettavien kappaleiden muotoilulla vaikutetaan kappaleen lujuusominaisuuksiin ja valmistustekniikka voidaan optimoida, jos taipuminen, murtuminen ja nurjahdus voidaan määrittellä tai arvioida jo 3D-tulostettavien kappaleiden suunnitteluvaiheessa. Lujuusominaisuuksien määrittämistä ja sopivia testausmenetelmiä, materiaalien valinnassa, valmistustekniikassa ja kappaleiden muotoilussa on pyritävä kehittämään mahdollisimman luotettaviksi. Tätä edellyttävät erityisesti 3D-tulostettujen kappaleiden lisääntyneet käyttövaatimukset kohteissa, joissa kappalekoko on pieni ja monimutkainen. Näitä vaativia käyttökohteita on erityisesti lääketieteellisissä soveluksissa ja lentokoneteollisuudessa.</p> <p>Testikappaleita valmistettiin Aalto-yliopiston ADDLab:n tulostuslaitteilla kahdesta eri muovimateriaalista. Kaikki testikappaleet olivat muodoltaan pylväsmäisiä. Muovipylväiden muotoilun vaikutusta tarkasteltiin erilaisilla poikkipinnoilla kappaleiden korkeuden vaihdeltaessa. Nurjahdusta eli kappaleen taipumista puristuksen voimasta ennen murtumista selvitettiin puristuskokeiden avulla. Voiman kasvaessa riittävän suureksi muovipylväs alkaa taipua sivusuunnassa ja pylvääseen vaikuttaa nurjahdusvoima. Muovipylväitä kuvattiin puristuskokeiden aikana. Pylvääseen kohdistuvan puristusvoiman synnyttämää muodonmuutosta tallennettiin videokuvauksen avulla. Tavoitteena oli varmistaa, että puristusvoima kohdentuu mahdollisimman tasaisesti pylvään poikkipinta-alaan. Kappaleen muotoilulla puolestaan oli tavoitteena saavuttaa mahdollisimman luja kappale puristuskokeita varten.</p> <p>Testauslaitteiden luotettavuuden parantaminen ja testauskappaleiden tulostustekniikan toiminnan häiriöttömyys edellyttävät vielä jatkotutkimuksia. Testausmenetelmien standardoinnilla voidaan edistää testitulosten käytettävyyttä ja luotettavuutta.</p>	
Avainsanat	3D-tulostus, pursotus, nurjahdus, kimmokerroin

Author Title Number of Pages Date	Juha Lehtinen Effect of different shapes to 3D-printed plastic pillars buckling strength 60 pages + 3 appendices 14th February 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Professional Major	Product Design
Instructors	Pekka Salonen, Senior Lecturer Kirsi Kukko, Researcher
<p>The purpose of this thesis was to figure out the buckling strength of 3D-printed objects by using a pressing machine. With information of the buckling strength and firmness property we are able to cut costs by using 3D-printed products. With different shaping of 3D-printed products we are able to affect their strength attributes. The processing technique can be optimized by using information of the products' bending, breaking and buckling, or it could even be able to affect the products' attributes during the design phase. While specifying the strength attribute, material selection, processing style and product design are important to develop as reliable a product as possible. This objective supports ever increasing usage demands on small and complex products. These kinds of usage demanding products are used in medical technology and aero technology.</p> <p>3D-printed test objects were created in Aalto University ADDLab 3D-printers by using two different filaments. All test objects were bacilliform by shape and short compared to the cross-section surface area. Bacilliform objects shapes were affected by changing their cross-sectional surface area and lengths of bacilliforms. By using pressing machines we were able to examine bacilliforms bending before breaking, thus, buckling. When pressing power increases too greatly, the test object will start to bend sideways and it will influence buckling power. Test objects were documented during the pressing test. In documented videos it can be seen how buckling strength affects the shaping of bacilliform objects. The goal was to get as constant as possible pressing power towards the test object to get maximum strength.</p> <p>For extension examinations machines need to be more reliable and test object processing failures should be eliminated. By creating standards for testing systems we can advance test result usage and reliability.</p>	
Keywords	3D-printing, extrusion, buckling, Young's modulus

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	3D-tulostaminen tuotannossa	2
2.1	Tuotteiden valmistus 3D-tulostustekniikalla	2
2.2	3D-tulostuskoulutus ja teknologian kehittyminen	9
2.3	3D-tulostuksessa käytettävien materiaalien vertailua	11
2.4	Kappaleiden suunnittelu ja muotoilu	14
3	Rakenteen vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin	16
3.1	Lujuusominaisuuksien vertailu	17
3.2	Lujuusominaisuuksia ja esimerkkejä niiden testimenetelmistä	20
3.3	Puristuskoe nurjahduksen testaamiseen	25
3.4	Standardien käyttö testeissä	27
4	3D-pursotustekniikalla tulostettujen pylväiden testit	28
4.1	3D-tulostuslaitteet testikappaleiden valmistuksessa	28
4.2	Testilaitteet ja -menetelmät	33
4.2.1	Kappaleiden punnitus	34
4.2.2	Puristuskokeet	35
4.2.3	Koetulosten tallennus videointi- ja kuvaustekniikalla	36
5	Tulokset	36
5.1	3D-tulostettujen pylväiden mitat	37
5.2	Pylväiden punnitus	41
5.3	Mekaaniset testit	44
5.4	Nurjahdustulokset	51
6	Tulosten arviointi	54
6.1	Testimenetelmien kehittäminen	54
6.2	Tulosten käytettävyys suunnittelussa	55
7	Yhteenveto	56

Liitteet

Liite 1. Ultimaker2 Simple Manual

Liite 2. Videoita ja kuvia puristustesteistä

Liite 3. 3D-tulostettujen pylväiden mittaustuloksia

Lyhenteet ja käsitteet

3D	Three Dimensional, kolmiulotteinen
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene, akryliniiriilibutadieenistyreeni
AM	Additive Manufacturing, materiaalia lisäävä valmistus
AMF	Additive manufacturing file format, tiedostoformaatti, joka välittää tuotemallitietoa (geometria, 3D-tulostustietoa ja materiaalitiedot)
CAD	Computer aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
DIC	Digital image correlation, digitaalinen kuvakorrelaatio
HBC	Heat Build Chamber, lämpökammio
MBD	Model Based Definition, malliperusteinen tuotemäärittely
PLA	Polylactic acid, polylaktidi, biohajoava muovi
3D-tulostus	Kappaleen valmistus kovettamalla materiaalia käyttäen kirjoituspäätä, suutinta tai muuta tulostusteknologiaa
Pursotus	Materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä, jossa materiaalia annostellaan (sulatetaan) suuttimen läpi
Stereolitografia	Valmistusmenetelmä, jossa valon avulla kovetetaan valolle herkältä nesteestä valmistettava kappale
Valmistuskammio	Materiaalia lisäävässä valmistuksessa oleva tila, jossa kappaleet valmistetaan

1 Johdanto

Materiaalia lisäävä valmistustekniikka (AM eli Additive Manufacture) ja 3D-tulostettujen kappaleiden käyttö ovat lisääntyneet merkittävästi 2010-luvulla sekä uusissa että erityyppisissä vaativissa käyttökohteissa [1]. Erityisesti räätälöityjen yksittäisten kappaleiden valmistuksessa on saavutettu uusia käyttökohteita mm. lääketieteen erilaisissa vaativissa sovelluksissa ja lentokone-teollisuudessa, jossa tulostettuja kappaleita käytetään keveyttä, kestävyyttä ja erityisesti turvallisuutta vaativissa kohteissa. 3D-tulostuksella voidaan valmistaa geometrisesti monimutkaisia kappaleita, joita ei voida tehdä perinteisellä valmistusmenetelmällä. [1; 2.] Valmistusmateriaalin valinta, valmistustekniikka ja suunnittelussa huomioitavat geometriset ratkaisut määrittelevät tulostetun kappaleen soveltuvuuden erilaisiin käyttökohteisiin [3].

Valmistetun tuotteen lujuusvaatimusten ja -ominaisuuksien tunteminen varmistaa käyttökohteen oikean valinnan. Tulostettujen kappaleiden lujuusominaisuudet asettavat vaatimuksia käytettävyydelle mekaanisesti rasittavissa olosuhteissa. 3D-tulostettujen kappaleiden turvallisuus- ja ympäristövaatimukset tulevat asettamaan uusia ja tiukempia vaatimuksia myös käytössä oleville standardeille. Taloudellista hyötyä saavutetaan optimaalisen valmistustekniikan ja käytettävän materiaalin valinnalla. Sopivien testausmenetelmien ja testikappaleiden sekä niiden antamien lujuustulosten avulla voidaan edistää sopivan materiaalin valintaa todellisiin käyttökohteisiin.

Tässä työssä testikappaleiden lujuutta tutkittiin puristuskokeessa nurjahduskestävyyden määrittämisen avulla. Määrittämistä varten tulostettiin 3D-puristustekniikalla kolmenlaisia pylväitä, joiden korkeudet olivat 32, 45 ja 90 mm. Pylväiden poikkileikkauksen muoto oli joko neliö (15x15 mm tai 16x16 mm) tai pyöreä (14, 15 tai 16 mm halkaisijaltaan). Kaikki testikappaleet tulostettiin Aalto-yliopiston ADDLab-laboratorion laitteilla. [2.]

Tulostettujen muovipylväiden poikkileikkauksen vaikutusta nurjahduskestävyyteen testattiin puristuskokeissa. Muovipylväitä tulostettiin muuttamalla niiden pituutta ja poikkipinta-alaa sekä tulostettavaa 3D-muovimateriaalia. Tulostuksen valmistusteknisiä ominaisuuksia ja eroavuuksia selvitettiin kahden eri tulostuslaitteen avulla ja tulostamalla kappaleita eri asennoissa.

Muovipylväiden lujuusominaisuuksista keskityttiin puristuskokeisiin. Puristukseen käytettiin sekä Metropolia Ammattikorkeakoulun, että Aalto-yliopiston koneosaston puristuslaitteita. Puristuskokeiden aikana pylväsmäisten 3D-tulostettujen muovipylväiden muodonmuutokset tallennettiin videolle. Puristuskokeista saatiin määritettyä kimmomoduuli, myötölujuus, murtolujuus sekä venymä maksimivoimalla eri poikkipinta-aloilla.

Tässä työssä saatujen koetulosten avulla saatiin uutta tietoa puristuskokeen käytettävyydestä nurjahduskestävyyden määrittämiseksi. Tuloksia voidaan hyödyntää suunniteltaessa 3D-tulostettavia kappaleita mekaanisesti vaativiin käyttöolosuhteisiin.

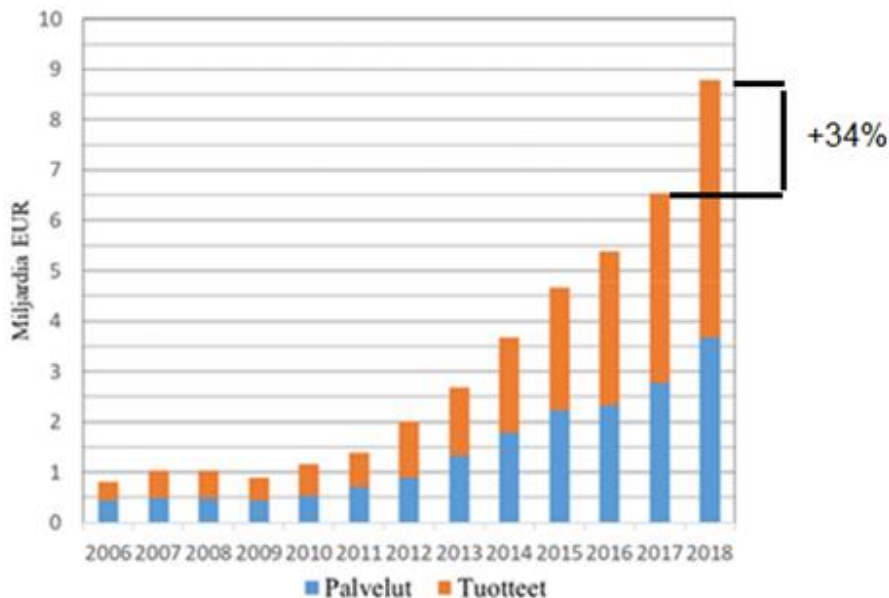
2 3D-tulostaminen tuotannossa

Yleisin 3D-tulostustekniikka on pursotus, jossa tulostusmateriaalina käytetään kelalla olevaa muovilankaa. Kelalta tulostukseen pursotettava muovilanka sulatetaan ja kove-tetaan uudelleen haluttuun muotoon. Tämä valmistustekniikka ja 3D-tulostuslaitteisto mahdollistavat sekä prototyyppien valmistuksen että teollisen tulostusmenetelmän. Tuotantomenetelmien valinnassa korostuu muotoilun ja tuotesuunnittelun merkitys. Tuotekehitysprosessi voidaan jaotella neljään vaiheeseen eli esitutkimus (tuoteideat), luonnostelu, kehittäminen ja viimeistely (tuote) [4]. 3D-tulostustekniikka on otettu tuotannolliseen käyttöön myös maailmalla hitaammin kuin on arvioitu eikä laitteiden kehitys ole ollut ennusteiden mukaista [2].

2.1 Tuotteiden valmistus 3D-tulostustekniikalla

Tuotteen valmistuksen muuttaminen perinteisestä tekniikasta uuteen 3D-tulostukseen vaatii täysin uutta suunnittelua. Tuotannossa käytössä olevista ja usein perinteisistä valmistusmenetelmistä on luovuttava ja investoitava uusiin koneisiin ja laitteisiin. Tulostus 3D-tekniikalla perustuu menetelmään, jossa tuote valmistetaan materiaalia lisäämällä. Perinteisessä valmistusmenetelmässä tuote syntyy materiaalia poistamalla tai valmistamalla tuote valamalla muottiin. Jokaisella laitevalmistajalla on laitteeseen ominainen valmistustekniikka, ja siksi laitevalmistajien kasvava määrä lisää erilaisia tekniikoita. Uusien laitteiden ja käytettävien ohjelmistojen sekä materiaalien lisääntyessä asiakkaat asettavat yhä uusia vaatimuksia teollisuuden käyttösovelluksille. Tämä on ehkä syynä siihen, että suomalainen teollisuus panostaa 3D-tulostukseen odotettua

hitaammin. [5.] Investoinnit uusimpaan teknologiaan ja uusiin sovelluksiin varmistaisivat kuitenkin pysymisen kansainvälisessä kilpailussa mukana. 3D-tuotteiden ja palveluiden liikevaihto kasvoi maailmalla vuonna 2018 n. 34 % verrattuna vuoteen 2017 kuvassa 1 esitetyn mukaisesti [6].

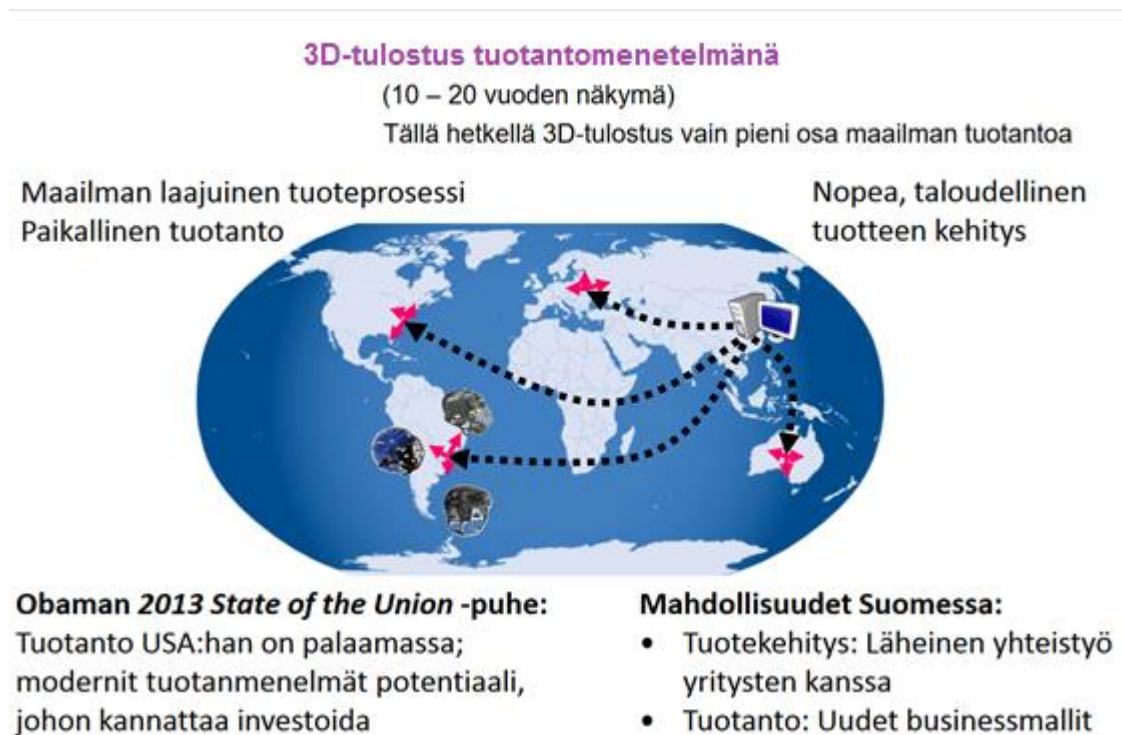


Kuva 1. Lisäävän valmistuksen tuotteiden (punainen) ja palveluiden (sininen) liikevaihto [5].

Jos 3D-tulostus otetaan käyttöön, tarjoaa se täysin uusia mahdollisuuksia ja nopeasti saavutettavia hyötyjä. Valmistuksen monipuolisuudesta huolimatta eri tulostustekniikat rajoittavat kuitenkin sen käyttöä. Laitevalmistajien ilmoittamat tuotteilla saavutettavat tulokset voivat koskea vain erittäin räätälöityjä tuotteita ja pieniä valmistusmääriä. Valmistusprosessin eri vaiheet ovat laitevalmistajien mukaan nimettyjä ja siksi vertailu eri laitevalmistajien kesken asettaa haasteita eri menetelmien nimeämisessä. [5.] Menetelmien ja käsitteistön yhdenmukaistamiseen tulisi luoda nykyisten standardien täydentämiseksi kansainvälisiä standardeja, jotta luotettavuus ja toistettavuus kappaleiden valmistamisessa voidaan varmistaa [7].

Tekniikoiden kehittyessä standardoinnin merkitys korostuu. Uusia tulostusmenetelmiä syntyy uusien materiaalien ja käyttökohteiden kautta. Tavoitteena laitevalmistajilla on saavuttaa tulosteisiin entistä parempaa pinnanlaatua ja lisätä sekä tulostusnopeutta että kappaleiden kokoa. Tulostuksessa käytettävät ohjelmistot vaikuttavat tulostusnopeuteen ja valmistettavien tuotteiden optimaaliseen tulostukseen. Tulostustekniikka hyödyntää yhä enemmän automaatiota ja robotiikkaa, koska laitteiden käyttöastetta

voidaan niiden avulla maksimoida ja hyödyntää esimerkiksi yöaikaan ilman työntekijöiden valvontaa. Kansainvälisesti tarkasteltuna automaatioasteen nostaminen ja sarjatuotannon lisääminen ovat tavoitteena yritysten kilpailukyvyyn parantamisessa (kuva 2). [8.]



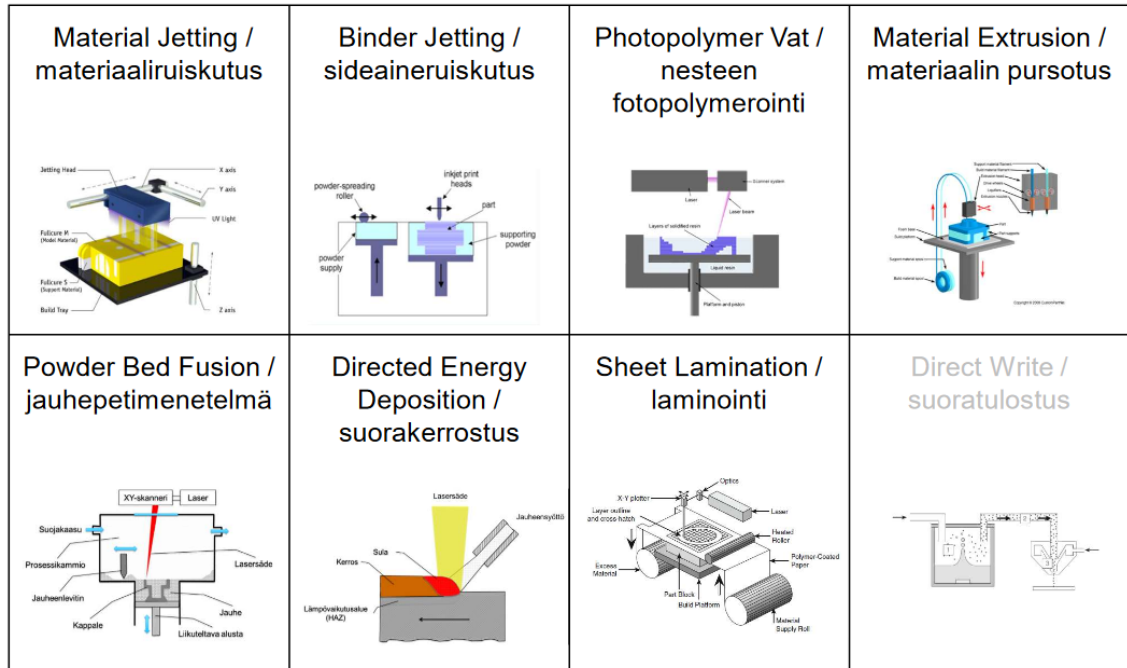
Kuva 2. 3D-tulostuksen käytön kehittyminen ja laajeneminen maailmalla [8].

Seuraavia haasteita sisältyy vielä 3D-tulostuksen laajempaan käyttöön ottoon [9]:

- isojen kappaleiden 3D-tulostuksen kysyntä kasvaa
- materiaalien ominaisuudet eivät ole riittäviä vastaamaan asiakkaiden toiveisiin
- digitaalisuuden lisääntyessä eri prosesseissa syntyy tarvetta uudelle osaamiselle ja toimintamalleille
- prototyyppien valmistuksesta siirtyminen tuotantoon on liian haasteellista
- valmistusmenetelmien integrointi tuotantoon edellyttää vanhasta tekniikasta luopumista.

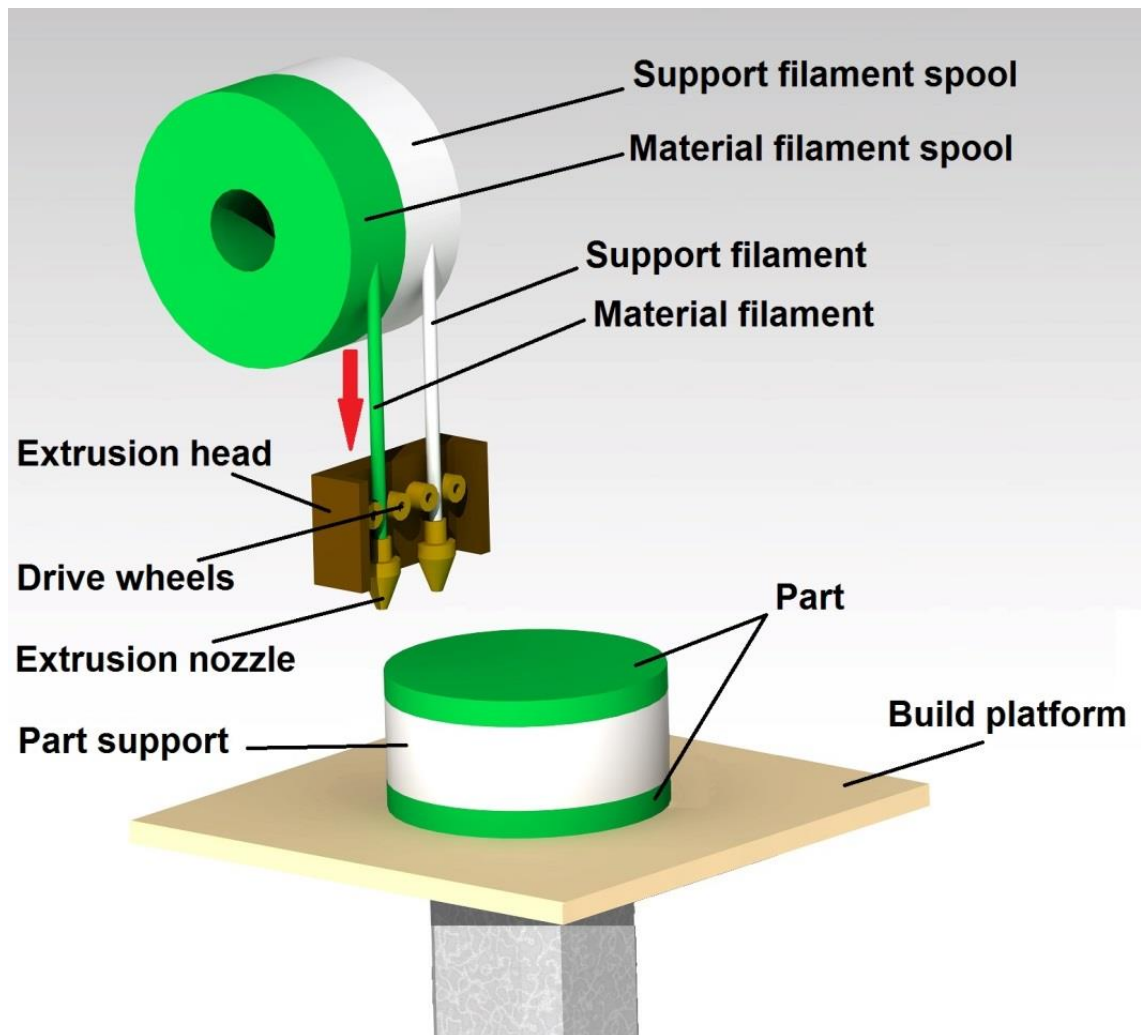
Valmistusteknologioita voidaan luokitella kahdeksan erilaista (kuva 3), joista tässä työssä on käytetty pursotusta (Material Extrusion) Tämä on yleisimmin käytetty valmistusmenetelmä jos materiaalina on muovi. Kuvan 3 tulostusmenetelmistä on 7 standar-

disoituja ja suoratulostus eli Direct Write on vielä kehittymässä. 3D-tulostus on kannattava vaihtoehto kappaleiden valmistamisessa, jos kappaleet ovat geometrialtaan monimutkaisia ja niiden valmistettava määrä on pieni (alle 1000 kpl).



Kuva 3. Valmistusteknologioiden periaatekuvia. Pursotusmenetelmä on esitetty ylärivillä neljäs vasemmalta ja sitä on käytetty tässä työssä [9].

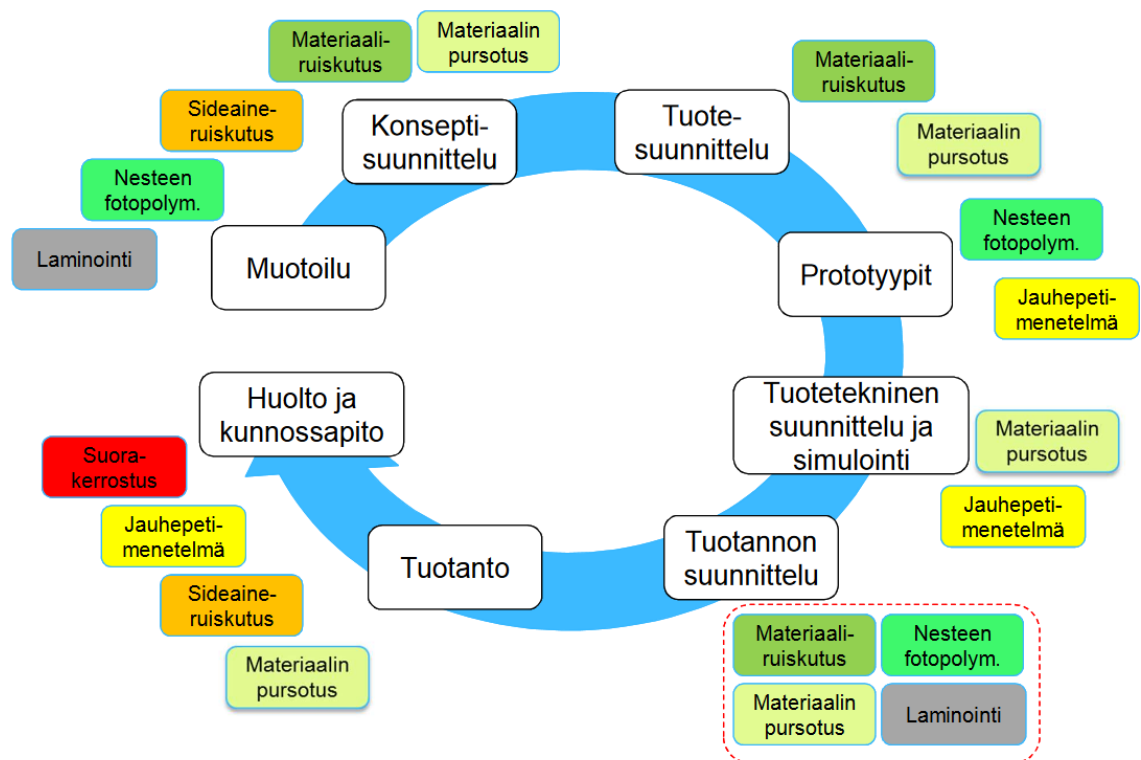
Toisaalta 3D-tulostustekniikka voi olla ainoa valmistusmenetelmä, jolla tuote voidaan valmistaa. Kuvassa 4 on esitetty pursotustekniikan periaate.



Kuva 4. Pursotustekniikan periaate. Kelalta syötetään (punainen nuoli alaspäin) sekä muovi- (Material filament) että tukimateriaalia (Support filament) tulostussuuttimien (Extrusion nozzle) läpi tulostusalustalle/-pöydälle (Build platform). Tulostusalusta siirtyy pystysuoraan alaspäin jokaisen valmiin tulostuskerroksen jälkeen (punainen nuoli alaspäin). Valmiista tuotteesta poistetaan tukimateriaali (Part support). Tuloksena syntyy valmis tuote (Part).

Kappaleiden tulostukseen käytettäviä tulostusvaihtoehtoja ja niihin liittyviä haasteita on huomioitava menetelmää valittaessa. Käytössä olevien tietokoneohjelmistojen avulla tulostus voidaan suorittaa tarpeen mukaan juuri siihen kohteeseen, missä sitä käytetään. Esimerkiksi jos kappaleita valmistetaan vain yksittäisinä ja räätälöityinä, voidaan käyttää valmistusmenetelmänä stereolitografiaa. Stereolitografia on huomattavasti hitaampi valmistustapa kuin pursotusmenetelmä, mutta sillä voidaan valmistaa erittäin tarkkoja ja pienikokoisia kappaleita (kerrospaksuus 10 µm). Stereolitografiassa käytet-

tävän valon avulla kovetetaan haluttu kappaleen muoto valolle herkältä nesteestä. Menetelmää hyödynnetään erittäin pienten ja tarkkuutta vaativien kappaleiden valmistuksessa lääketieteessä (esimerkiksi osia silmiin ja korviin). [10.] Michiganin yliopiston tutkijat ovat kehittäneet stereolitografiatulostustekniikkaa nykyistä nopeammaksi. Menetelmässä käytetään valon kahta eri aallonpituutta ja niihin eri tavalla reagoivaa tulostusnestettä. Tekniikalla on onnistuttu tulostamaan esineitä 100 kertaa nopeammalla tulostusnopeudella kuin käytössä olevilla tulostimilla. Tutkija Mark Burns pitää tätä tulostustekniikkaa tulevaisuuden 3D-tulostustekniikkana ja kaupallistamisen mahdollisuuksia on aloitettu selvittämään [3]. Tulostustekniikan valmistusketjun eteneminen tulee muuttumaan digitaalisen valmistuksen lisääntyessä. Tämä lisää tarvetta 3D-tulostuksen koulutukseen erityisesti materiaaliosaamisessa, digitalisaatiossa, automaatioissa ja laitetekniikan tuntemisessa. 3D-tulostustekniikoiden suunnittelussa tarvitaan myös tiivistä yhteistyötä tulostuslaitteiden valmistajien ja tuotteita käyttävien asiakkaiden kanssa. Menetelmien sovellusalueita on esitetty koko tuotantoketjussa kuvassa 5 lähtien liikkeelle muotoilusta.



Kuva 5. Menetelmien sovellusalueiden käyttö muotoilusta tuotantoon ja kunnossapitoon [9].

Teollisuudessa käytetyt CAD-mallit siirtyvät toimitusketjuissa, ja niiden siirtämiseen liittyy aina tuotevastuukysymyksiä. Vastuullisuus tiedonsiirrossa korostuu kansainvälisessä toiminnassa. Tulostusparametrit ja tulostukseen liittyvät geometriset määrytykset liittyvät myös olennaisesti laadunvarmistukseen ja lopputuotteeseen.

Suunnitteluprosesseissa ollaan siirtymässä MBD (Model Based Definition) käyttöön eli malliperusteiseen tuotemäärittelyyn. Tavoitteena on saada tietojen käsittely yhdenmukaiseksi [11]. Tuotevastuu ja tuotteen parametrien omistajuus ovat tulevaisuuden kehittämistyön kohteena. Toisaalta jatkokehitys vaikuttaa siihen, miten ohjelmistot tarkentuvat erikokoisten kappaleiden valmistuksessa. Tavoitteena on, että laadukkailla laitteistoilla voidaan valmistaa tulosteita tarkasti ja siten, että pinnanlaatu on hyvä suoraan digitaalisista CAD-tiedoista. Digitaalisilla ratkaisuilla tulostusaika nopeutuu muutama tuntiin aikaisemmista useista tunneista. [12.]

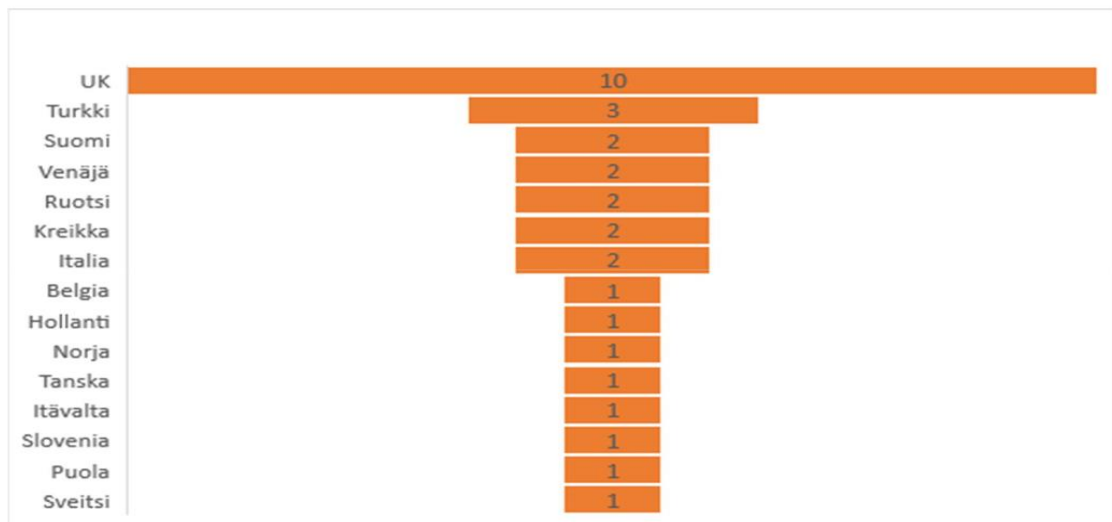
Nopeasti tulostettavia muovisia 3D-tulostettuja kappaleita saadaan EOS:n (Electro Optical Systems) teollisuustason tulostimilla. Menetelmänä käytetään lasersintrausta, joka perustuu erittäin hienojakoisen jauheen sulattamiseen lasersäteellä. Tulostimilla voidaan tulostaa monimutkaisetkin kappaleet yksityiskohtaisesti. Tulosteiden maksimikoko on tällä hetkellä 340x340x600 mm ja kerroksien korkeus 0,06 mm (maksimi tulostusnopeus 800 kerrosta/h). Tulostuksen etuna on, että tukiainetta ei tarvitse erikseen lisätä. EOS:n uusin teknologia muovituotteiden massavalmistukseen on LaserProFusion-menetelmä, joka on kymmenen kertaa nopeampi kuin nykyiset 3D-tulostimet ja laite tulee markkinoille vuonna 2021. [13.]

Tulostuslaitteiden suunnittelussa ja käytössä on otettava huomioon riittävä työturvallisuus. Pursotusmenetelmän käytössä (esimerkiksi ABS- ja PLA- muovit) voi vapautua hengitysilmaan huomattavia määriä nanohiukkasia riippuen tulostusmateriaalista ja -lämpötilasta. Varsinkin käytettäessä useita laitteita samassa tilassa nousee haitallisten nanopartikkeleiden määrä, jolloin niille altistuminen voi aiheuttaa terveydelle haittaa. [14; 15.] Ultimaker -laittevalmistaja on ottanut uusissa laitteissaan huomioon nanohiukkasten syntymisen ja kehittänyt Ultimaker S5 3D-tulostimeen lisäosan S5 Air Manager. Tämän lisäosan avulla voidaan suodattaa jopa 95 % syntyvistä nanohiukkasista. [16.]

2.2 3D-tulostuskoulutus ja teknologian kehittyminen

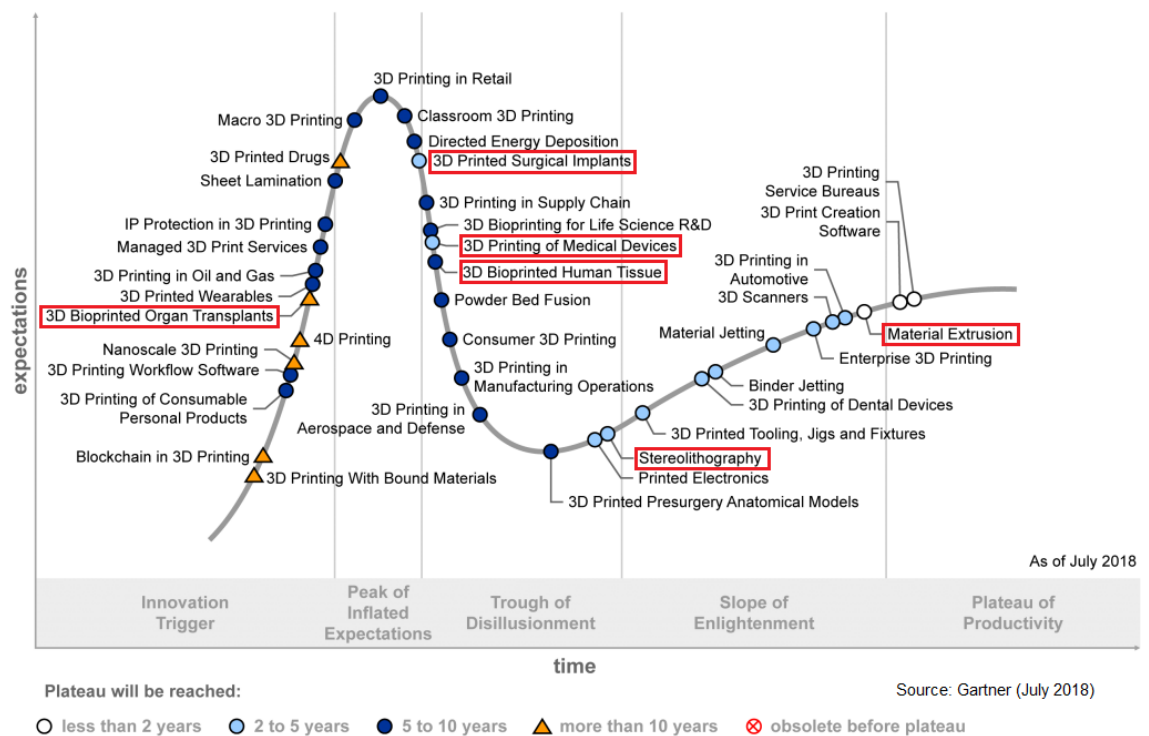
Kappaleiden käytettävyydelle asetetaan erilaisia vaatimuksia. Valitun muovimateriaalin ominaisuudet vaikuttavat siihen, mihin lopputuotteeseen sitä voidaan turvallisesti käyttää. Vaativiin olosuhteisiin kehitetään uusia materiaaleja, jotka pohjautuvat luonnosta saataviin raaka-aineisiin ja erilaisten yhdistelmien kuten hybridien käyttösovelluksiin. Tulostettavien kappaleiden käytettävyyttä ja valmistettavuutta voidaan edistää, jos ratkaisuja etsitään yrityksen ja 3D-tulostuskoulutusta järjestävän tutkimuslaitoksen kanssa. Tällöin voidaan yhdistää muotoilu, valmistustekniikka ja datan käyttö kappaleen valmistuksen suunnittelussa.

Yhdysvaltalaiset tutkimukset osoittavat, että insinöörikoulutuksessa saadaan hyviä tuloksia aikaan erilaisilla yhteisillä projektitoilla [5]. Euroopassa oli vuonna 2016 yli 30 3D-tulostuksen kannalta merkittävää instituutiota, joista kaksi oli Suomessa (LUT ja Aalto). Instituutioiden lukumäärät on esitelty maittain kuvassa 6.



Kuva 6. 3D-tulostuksessa aktiiviset instituutiot Euroopassa vuonna 2017 [5].

3D-tulostus ja sen ennustettu käyttö on kuvattu seuraavan hypekäyrän muodossa. Konsulttiyhtiö Gartner Group on kehittänyt Hype Cycle -mallin (kuva 7), jolla voidaan kuvata uuden teknologiaan elinkaarta. Kaavion vasemmassa alalaidassa syntyy uusi teknologia, huippuvaihe käyrän huipulla ja selviytyminen näkyy käyrän aallonpohjalla. Teknologiat siirtyvät kehitysvaiheeseen ja massatuotantovaiheessa käyrä tasaantuu.



Kuva 7. Hypekäyrällä 3D-tekniologioiden kehittyminen ja käyttöennuste. Käyrään on merkitty (punaisilla laatikoilla) tässä työssä esitetyt menetelmiä [17].

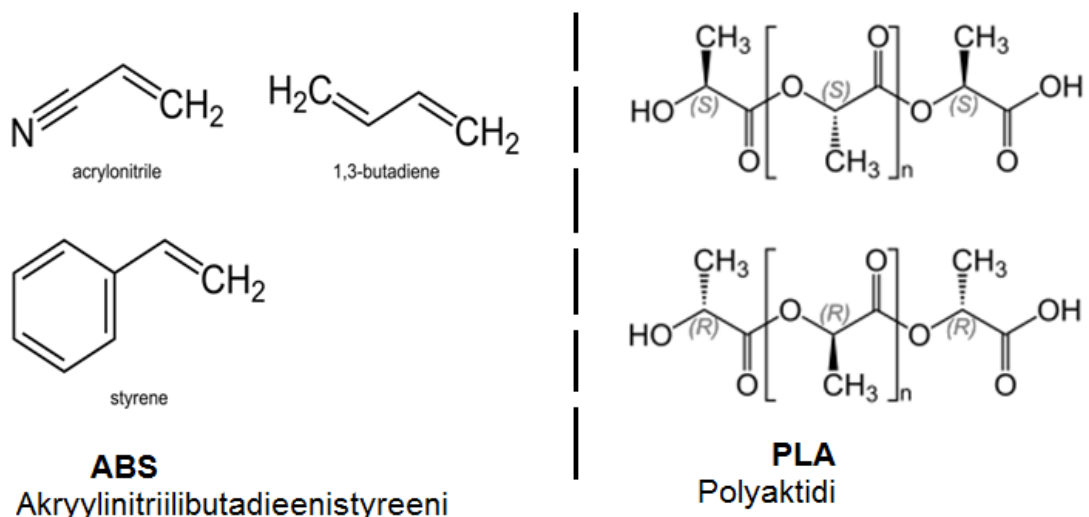
Tutkimusyhtiö Gartnerin uusimman hypekäyrän mukaan tekoäly ja muut uudet digiteknikat ovat tulossa lähivuosina yhä enemmän käyttöön. Käyrä kuvaakin uusien teknologioiden leviämistä, joita tulee ennakoida. [17; 3.]

2.3 3D-tulostuksessa käytettävien materiaalien vertailua

3D-tulostettujen kappaleiden pursotustekniikkaa kehittämällä voidaan valmistaa nykyistä tasalaatuisempia kappaleita. Pursotuslaitteiden käyttövarmuutta ja tuottavuutta voidaan lisätä automaation ja robotiikan avulla. Näiden teknologioiden avulla voidaan pienentää hajontaa pursotettujen kappaleiden lujuusominaisuuksissa. Tämä perustuu häiriöttömään ja tasaiseen tuotantonopeuteen.

Polymeerien tulostamiseksi on käytettävissä useita menetelmiä. Polymeerit ovat muovien tärkein ainesosa, ja ne ovat orgaanisia suurmolekyylejä. Ne ovat muodostuneet pienempien molekyylien ja monomeerien liittyessä yhteen kemiallisten reaktioiden (polymeroitireaktioiden) kautta ketjumaisiksi rakenteiksi. Useimmat kuluttajille suunnatut laitteet perustuvat sulan polymeerin pursotukseen. Päämenetelmistä on useita laitevalmistajista riippuvia variaatioita.

Tässä työssä on käytetty pursotuksessa kahta eri muovimateriaalia joista toinen on ABS eli akrylonitriilibutadienistyreeni ((C₈H₈• C₄H₆•C₃H₃N)_x) ja toinen PLA eli polyaktidi. Molempien rakennekuvat on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. ABS-muovin monomeerien (ABS muovin monomeerit ovat akrylonitriili, butadieni ja styreeni) ja PLA-muovin rakennekaavat [18; 19].

ABS on yleisesti käytetty muovilaatu, koska sen ominaisuuksia ovat kestävyys, keveys ja jäykkyys. ABS-muovi kestää hyvin heikkoja happoja ja emäksiä. ABS-muovia käytetään myös erilaisten sekoitusten yhdisteenä. Jokaista ABS kg:ia kohden tarvitaan 2 kg raakaöljyä. [18.]

PLA on biohajoava termoplastinen alifaattinen polyesteri, joka on uusiutuvista raaka-aineista. Sitä käytetään laajasti lääketieteen sovelluksissa (biohajoavat ruuvit ja implantit) [19].

Tässä työssä käytettiin PLA-muovia Ultimaker2- ja Ultimaker3-tulostimissa ja ABSplus P430 -muovia uPrint -tulostimessa. Muovimateriaalit ovat lankamaisessa muodossa keloissa ja langan halkaisija noin 1-2 mm. Muovikelojen paino oli noin 1 kg ja kelojen muotoilu on tulostinkohtainen. ABSplus P430 on hinnaltaan kalliimpi kuin PLA, ja sen lankakela on erillisessä suojakuoressa [20].

Muovimateriaalit muodostavat merkittävän osan 3D-tulostuksesta, koska niiden materiaaliominaisuudet vaikuttavat lopputuotteen käytettävyyteen. Muovien ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa halutulla tavalla sekoittamalla niihin lisäaineita. Tekniset ominaisuudet saadaan muuttumaan ja tämä merkitsee soveltuvuusalueiden ja eri käyttökohteiden määrän lisääntymistä. Eri valmistajien käyttämät kaupalliset nimet, joilla muovituotteita myydään, vaikeuttavat käyttäjän valintaa.

Tulostettavien kappaleiden ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa myös tekemällä niistä jäykempiä sekoittamalla lujitekuitua, joista esimerkiksi hiilikuitu on mahdollinen materiaaliin sekoitettava lujite. Kuitu voi olla kestumuovilankaan seostettuna lyhyen katkokuidun muodossa. Tulostettavaa rakennetta voidaan myös lujittaa muotoilulla. [21.]

Seuraavaksi tarkastellaan muutamien esimerkkien avulla eri muovien ominaisuuksia. Mekaanista rasitusta ja kemikaaleja kestävään kohteeseen voidaan valita useimmiten polyamidi tuotemerkiltään PA 2200. Tälle materiaalille löytyy monta käyttökohdetta ja siksi sille on olemassa EU-direktiivi elintarvikekäyttöön. PA 2200 mahdollistaa tarkkojen yksityiskohtien valmistuksen. Tarkkuus lopputulosteessa mahdollistaa sen, että muovilaatua PA 2200 voidaan käyttää lääketieteessä mm. proteesien valmistukseen.

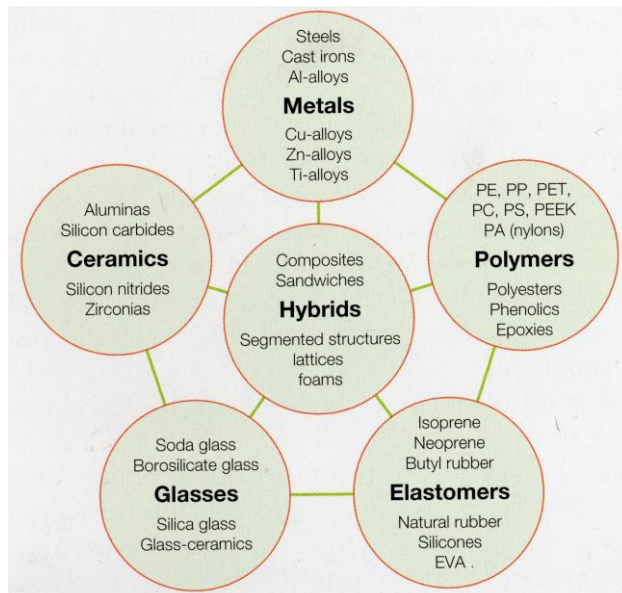
Toisena yleisenä muovimateriaalina käytetään tuotemerkkiä PA 2210 FR, joka on paloluokiteltu muovimateriaali, ja sen käyttö soveltuu palonkestävien mekaanisten osien

valmistukseen. Muovien palosuojaaluokitukselle on luotu järjestelmä, jossa määritellään palosuojaukselle eriaisteiset luokat. [22.]

Digital ABS on kahden eri materiaalin seos, joiden seossuhteita voidaan muuttaa valmistajan antamissa rajoissa. Digital ABS on suunniteltu jäljittelemään teknisissä käyttökohteissa käytettäviä standardilaatuisia ABS-muovimateriaaleja. Ne kestävät suhteellisen korkeita käyttölämpötiloja, ja niiden iskuthekyys on hyvä. Digital ABS on akryyliyhdistepohjainen, mutta tarkempi kemiallinen koostumus on liikesalaisuus ja sitä ei ole julkaistu [15].

Digitaalisia muovimateriaaleja edustavat VeroYellow ja VeroCyan -materiaalit, ja niitä voidaan yhdistellä toisiinsa eri suhteissa. Ne ovat läpinäkymättömiä, jäykkiä ja värillisiä materiaaleja. Kumimaisia materiaaleja edustavat esimerkiksi musta TangoBlack ja läpinäkyvä TangoPlus, joita voidaan myös yhdistää muihin materiaaleihin erilaisten ominaisuuksien tuottamiseksi. [23.]

Materiaalien tarkastelua ja jaottelua voidaan esittää viitenä eri ryhmänä: metallit, polymeerit, elastomeerit, lasit ja keraamit, ja näitä viittä yhdistelemällä saadaan hybridejä (kuva 9) [24]. Erityisesti hybridien käyttö luo uusia mahdollisuuksia 3D-tulostuksessa mm. lamellimaisissa rakenteissa.



Kuva 9. Eri materiaaleja yhdistämällä saadaan hybridejä (kuvan keskellä) [24].

2.4 Kappaleiden suunnittelu ja muotoilu

Uusien tuotteiden valmistuksessa teollinen muotoilu on noussut merkittäväksi tekijäksi. Teolliset muotoilijat ovat yhä enemmän mukana tuotesuunnittelussa ja valmistuksen eri vaiheissa [25]. Ideaalilanteessa lisäävän valmistuksen asiantuntija on mukana jo suunnittelun alkuvaiheessa, jolloin tulostettava kappale pystytään suunnittelemaan lisäävän valmistuksen ja menetelmän mahdollisuudet huomioiden. Muotoilun laajempi hyödyntäminen nostaisi selvästi lisäävän valmistuksen käyttöä ja parantaisi kustannustehokkuutta [26].

Ennen valmistuksen aloittamista suunnittelun lopputuloksena saatu 3D-malli testataan erilaisilla simulaatio-ohjelmilla. Simulointien avulla varmistetaan, että valmistettavan kappaleen ominaisuudet (esim. materiaalmäärä, virtausominaisuudet ja jäykkyys) on optimoitu ja lämpöelementit pysyvät hallinnassa valmistuksen ajan. Pelkästään lämpösimuloinnin tekemiseen on vaihtoehtoisia ohjelmistoja, joilla voidaan nähdä miten kappale ns. elää tuotannon aikana ja miten lämmöstä johtuvaa taipumista voidaan huomioida.

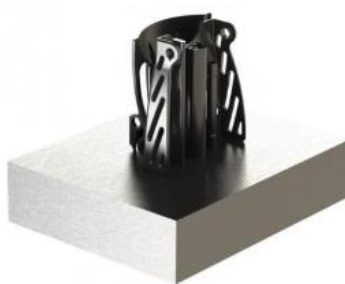
Tulostettavien kappaleiden muotoilu vaikuttaa tulostustekniikan valintaan ja tulostusnopeuteen. Uusilta tuotteilta odotetaan keveyttä, kestävyyttä, lujuutta ja älykkyyttä. Suunnitteluohjelmien kehittyessä voidaan valmistaa monimutkaisia ja mikroskooppisen (muutamana sadan mikrometrin kokoisia) pieniä tuotteita.

3D-valmistetuilla tuotteilla on saavutettu merkittäviä säästöjä esim. ilmailuteollisuudessa suihkumoottoreiden osien valmistuksessa. Tästä esimerkkeinä ovat yritykset GE (General Electric) ja Snecma (Safran Aircraft Engines), jotka hyödyntävät 3D-tulostustekniikkaa suihkumoottoreissa. Esimerkiksi GE:n suihkumoottorin Leap - polttoainesuuttimen valmistukseen tarvittiin aikaisemmin 20 osaa. Nyt voidaan valmistaa monimutkainen suutin yhtenä kappaleena saavuttaen painonsäästöä jopa 25 %. Toinen esimerkki kevennetyistä rakenteista on turvavyön solki kuvassa 10.

Kevennetyt rakenteet: Turvavyön solki



- Airbus A380, 853 istuinta: painonvähennys yhteensä 72,5 kg.
- Lentokoneen eliniän aikana tämä tarkoittaa 3.3 miljoonan litran polttoaineen säästöä.



Kuva 10. Lentokoneteollisuudessa on hyödynnetty 3D-tulostustekniikkaa ja saavutettu huomattavia painonsäästöjä mm. turvavyön solkien painoissa [6].

Tulostettujen kappaleiden suunnittelussa on huomioitava koko valmistusketjun osaminen kuten kuvassa 11 on esitetty.



Kuva 11. 3D-tulostettujen kappaleiden suunnittelu on suunnitteluketjun osaamisten summa [26].

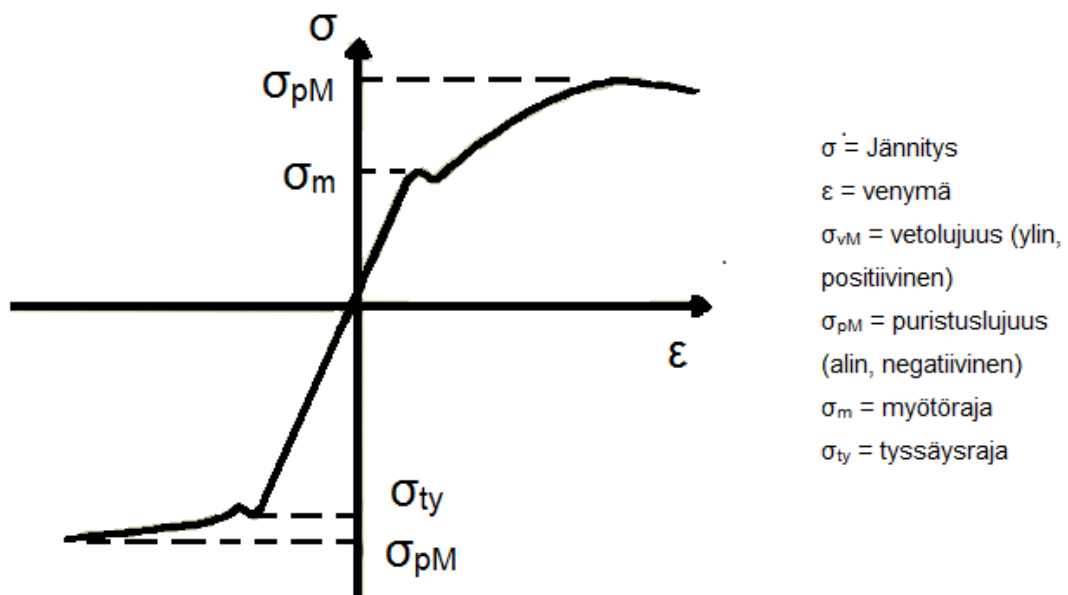
Monimutkaisten tulostettavien kappaleiden käyttö lisääntyy lääketieteessä silmä- ja sisäelinten ja erilaisten proteesien valmistuksessa. Uusimpana lääketieteen haasteena on suunnitella valmistaa munuaisia tulostamalla [27]. Oulun yliopiston FabLabin johtaja Jani Ylioja uskoo, että lääketieteessä 3D-tulostustekniikan käyttö lisääntyy yhdistämällä tulevaisuudessa biomateriaaleja.

3 Rakenteen vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin

Rakenteita mitoitettaessa sovelletaan useimmiten kahta periaatetta. Toisaalta rakenteen jännitykset eivät saa kasvaa liian suuriksi ja toisaalta rakenteen muodonmuutosten tulee pysyä sallituissa rajoissa [28]. Rakenteen tasapainotila eli stabiilitetti pyritään saavuttamaan siten, että ennakoitu tai määrätty kuorma tai voima ei aiheuta rakenteeseen tasapainon menetystä. Suunnittelussa on huomioitava myös valmistustekniikan ja materiaalin valinnan vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin.

3.1 Lujuusominaisuuksien vertailu

Jännitys- ja muodonmuutostilan välistä yhteyttä tutkitaan tavallisesti vetokokeen avulla. Metallien ja erityisesti terästen vetokokeissa saatuja lujuusominaisuuksia voidaan näiden tulosten pohjalta vertailla ja määrittää vetokoekäyristä suhteellisuusraja eli kohta, johon asti jännitys on suoraan verrannollinen venymään. Myötörajan määrittäminen on mahdollista vain osalle metallisia aineita. Jos myötörajaa ei voida määrittää lujuusominaisuuksista niin määritetään 0,2-raja. Tämä tarkoittaa sitä jännitystä, joka saa aikaan pysyvän 0,2 %:n venymän. Verrattaessa puristuman ja puristusjännityksen välistä riippuvuutta saadaan veto-puristus - jännitys-venymäpiirros kuten kuvassa 12 on esitetty. [29.]



Kuva 12. Veto-puristus- jännitys-venymäpiirros [29].

Metallien lujuusominaisuuksien testausmenetelmät ja niistä määriteltävät lujuusominaisuudet antavat perustietoa ja vertailumateriaalia muovimateriaalien lujuusominaisuuksiin. Erityisiä haasteita lujuusominaisuuksien määrittämiseen tulee 3D-tulostettujen kappaleiden kohdalla. 3D-tulostettujen kappaleiden ominaisuudet voidaan määrittellä erilaisilla testausmenetelmillä, mutta tulosten vertailukelpoisuus ja luotettavuus on lukuisten muuttujien takia hankalaa.

Tavallisimmat lujuusominaisuudet, jotka voidaan määritellä puristuskokeessa, ovat kimmokerroin, myötölujuus, murtolujuus ja murtolujuutta vastaava venymä. Puristuskokeessa puristusvoiman kasvaessa voidaan määrittää kappaleeseen kohdentuva nurjahdusvoima. Testiolosuhteissa saadut tulokset perustuvat useimmiten oletukseen, että aine käyttäytyy homogeenisesti ja konstruktio on virheetön. Testitulosten hajonnan aiheuttaa testikappaleiden epähomogeenisuus ja valmistuksen tasalaatuisuuden puute.

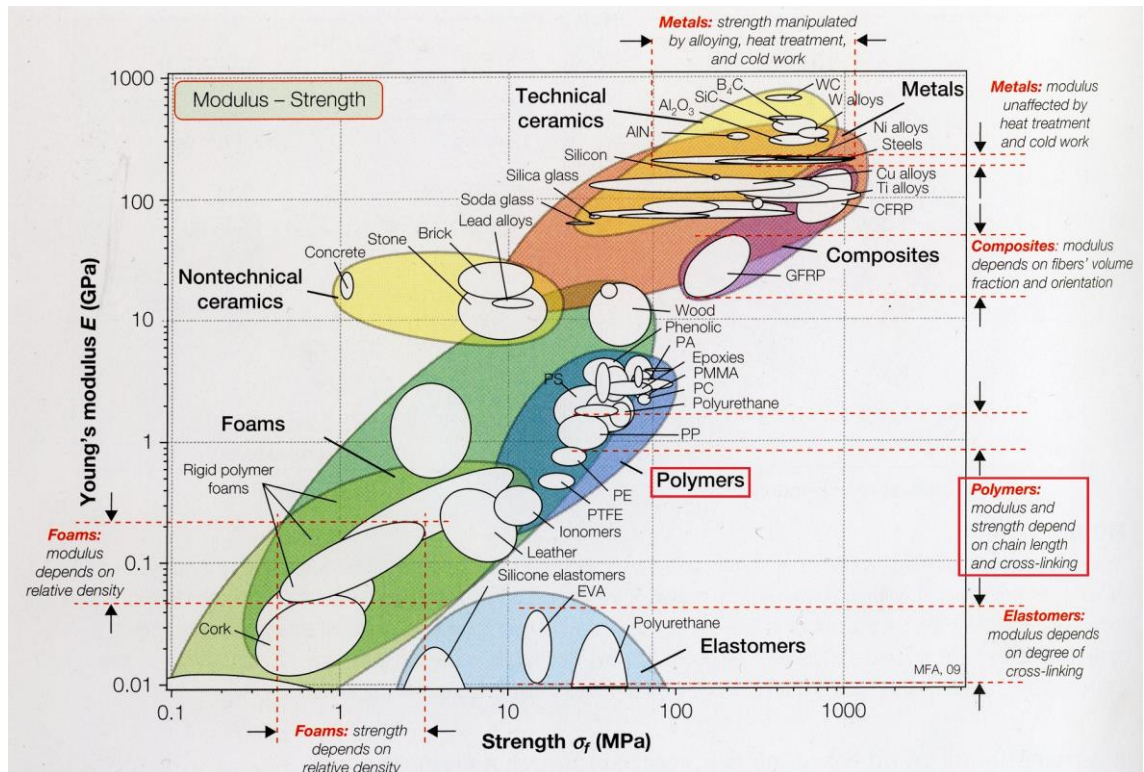
Tulostettujen 3D-muovipylväiden lujuutta ja nurjahdusvoimaa tutkittiin tässä työssä puristamalla pylväitä tasaisella nopeudella tasomaisten teräspintojen välissä. Eripituisien ja muodoltaan erilaisten testikappaleiden lujuusominaisuuksien määrittämisessä keskityttiin puristuskokeeseen ja sen avulla nurjahduskestävyyden määrittämiseen. Vetokokeiden käyttö olisi edellyttänyt tulostettujen testikappaleiden toisenlaista muotoilua kiinnityksen mahdollistamiseksi vetokokeen aikana.

Koska 3D-tulostus perustuu kerrostuksellisuuteen eli valmistus tapahtuu kerroksittain, on suunnitteluprosessissa erityisesti huomioitava kappaleen geometrian vaikutus tulostussuuntaan eli kappaleen tulostusasentoon. Nämä valmistusparametrit vaikuttavat kappaleiden lujuusominaisuuksiin. Tässä työssä käytettyjen muovimateriaalien mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Testimateriaalien ABS ja PLA mekaaniset ominaisuudet [30].

		ABS	PLA
		Acrylonitrile butadiene styrene	Polylactic acid or polylactide
Molecular Formula		(C ₈ H ₈ ·C ₄ H ₆ ·C ₃ H ₃ N) _n	(C ₃ H ₄ O ₂) _n
Environmentally Friendly		NO	YES
Degradable		NO	YES
Melting Point		205°C	175°C
Rockwell Hardness		R105 to R110	R70 to R90
Surface Quality		Fine	Good
Cool Time		Medium	Long
Moisture Absorption		Approx. 3% - 5%	Minor
Density		1,04 g/cm ³	1,23 - 1,25 g/cm ³
Elongation at Break		20 %	3,80 %
Glass Transition		221°F (105°C)	140 - 149°F (60-65°C)
Tensile Strength		6,5 psi (44,81 MPa)	8 383,18 psi (57,8 MPa)
Flexural Strength		11 psi (75,84 MPa)	8 020,58 psi (55,3 MPa)
Tensile Modulus		320 psi (2210 MPa)	478 624,53 psi (3300 MPa)
Flexural Modulus		330 psi (2280 MPa)	333 586,79 psi (2300 MPa)

Materiaalin käytettävyyttä voidaan parantaa muuttamalla ja käsittelemällä materiaalin sisäistä mikrorakennetta. Lämpökäsittelyn ja kylmämuokkauksen avulla voidaan vaikuttaa metallien ominaisuuksiin. Metalleja voidaan myös seostaa lujittavilla aineilla. Erilaisien käsittelyjen avulla lujuusominaisuudet saadaan vastaamaan käyttökohteen asettamia vaatimuksia (kuva 13, oikea yläkulma (Metals)). Metallien kimmokertoimet ja lujuusarvot ovat huomattavasti korkeammat kuin esimerkiksi polymeerien. Polymeerien ominaisuuksia voidaan muokata käsittelemällä polymeeriketjuja eli kemiallista sidoksia (kuvassa 13 (Polymers)).



Kuva 13. Käsittelyn vaikutus materiaaleihin kimmomoduulin- ja lujuuden funktiona (polymeereillä riippuvuus ketjujen pituudesta ja linkittymisestä, punaiset neliöt) [24, s.388]

3.2 Lujuusominaisuuksia ja esimerkkejä niiden testimenetelmistä

Kappaleeseen kohdistettu kuormitus aiheuttaa muodonmuutoksen, jonka vaikutus kappaleeseen riippuu sen geometrisesta muotoilusta. Muodonmuutoksen kasvaessa riittävän suureksi sisäiset voimat eivät pysty pitämään kappaletta tasapainossa ja alkupe-
räisessä olotilassa. Voidaan määrittellä kappaleelle lujuusarvo, joka ilmaisee sen jänni-
tyksen suuruuden, jolla kappale murtuu. Näin määriteltynä voidaan eri kappaleita ver-
tailla lujuuden suhteen. [29.]

Muovien mekaaniset ominaisuudet ovat riippuvaisia useista eri tekijöistä. Muovien si-
säiseen rakenteeseen vaikuttavat kemiallinen koostumus, kiteisyys, orientaatio ja lisä-
aineet. Polymeerit ovat tärkein ainesosa ja niiden lisäksi muoveissa on lisäaineita kuten
esimerkiksi stabilisaattoreita, täyteaineita ja pehmittimiä. Polymeerejä sekoittamalla
voidaan valmistaa eri käyttötarkoituksiin sopivia muoveja. Ulkoiset tekijät vaihtelevat
usein suuresti, ja käytettävä lämpötila, paine, kuormitus (leikkaus-, veto-, puristus- tai
2-akσιαalinen kuormitus) ja sen laajuus (frekvenssi ja nopeus) ratkaisevat muovista
valmistetun kappaleen käyttöiän. 3D-tulostuksessa on huomioitava syntyviä tiheyseroja

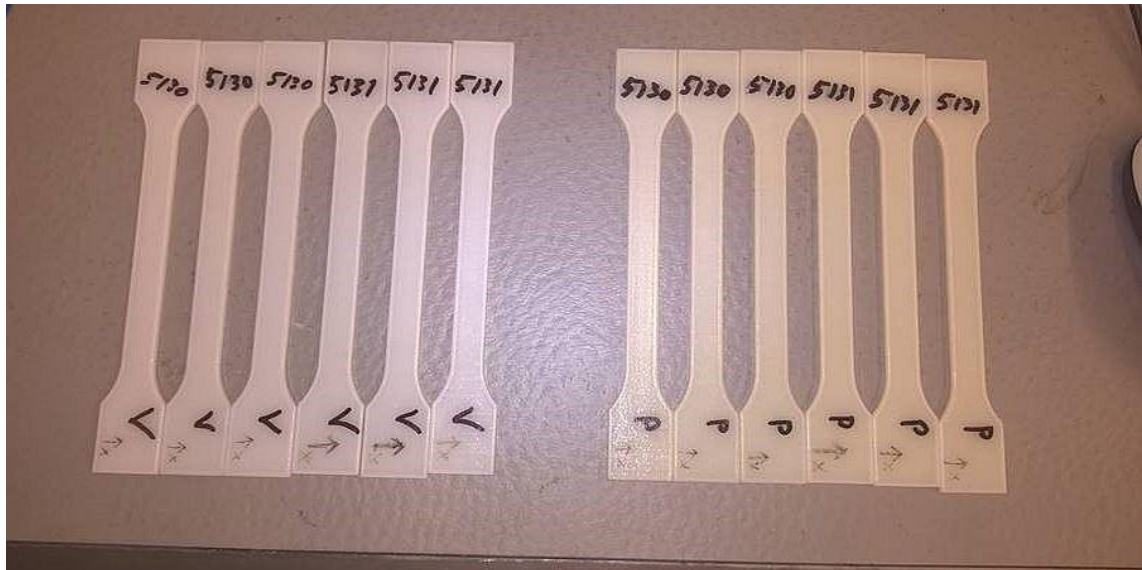
kappaleessa, koska ulkopinta on tiheämpää kuin sisäinen rakenne eli infill (havainnekuva infill- rakenteesta kappaleessa 5.2. kuva 31) [30, s. 2].

Koekappaleiden testimenetelmien avulla voidaan suunnitella muovien soveltuvuutta tiettyyn käyttökohteeseen. Mekaaniset testit ovat vain suuntaa antavia ja ne tehdään yleensä vakio testisauvoille. Testitulosten luotettavuus perustuu kokeiden vertailtavuuteen ja siihen, että onko ne suoritettu saman standardin mukaisesti.

Jännitys-venymättestaus on yleisimmin käytetty testausmenetelmä. Kokeessa venytetään standardoitua koesauvaa vakionopeudella ja mitataan jännitystä vastustavaa voimaa [30, s. 3; 31].

Testimenetelmissä on saavutettu mielenkiintoisia tuloksia polymeerien vetokokeissa, ja niiden vertailu puristuskokeista saatuihin lujuustietoihin tuo lisätietoa muovien käyttäytymisestä. Polymeerimateriaalien testaamista on selvitetty Tampereen ammattikorkeakoulussa (TAMK) sijaitsevalla Stratasysin Objet 350 Connex 3 -laitteella. Näillä materiaalikokeilla haluttiin verifioida ja tarkentaa materiaalivalmistajan antamia arvoja. Kokeissa on ollut tarkoitus myös selvittää eri tekijöiden vaikutusta tulostettujen kappaleiden ominaisuuksiin.

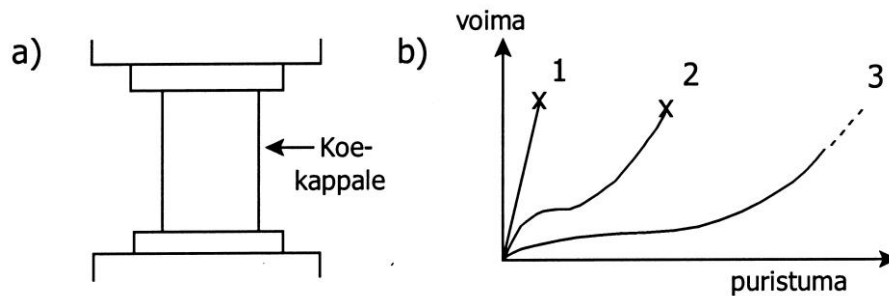
Alustavat taivutuskokeet tässä testissä osoittivat, että taivutuslujuus kasvaa ja materiaali jäykistyy tulostetun testisauvan ikääntyessä. Taipuma vastaavasti pienenee. Näissä testeissä ikääntyneet testisauvat olivat noin 5 kk vanhoja. Jatkossa tulisi tehdä suurempi koesarja, jonka avulla voisi seurata tarkemmin tulostettujen sauvojen taivutus- ja vetolujuuksia ajan funktiona. Kumimaisille seoksille (TangoPlus ja Digital ABS) tehtiin myös vetokokeita käyttäen kahta eri vetonopeutta: 5 mm/min ja 15 mm/min (kuva 14).



Kuva 14. Digital ABS -materiaalista tulostettuja testisauvoja [32].

Vetonopeuden kasvaessa saavutettiin järjestelmällisesti suurempia vetolujuuden arvoja venymän pysyessä kuitenkin samassa suuruusluokassa tai ollen jopa hieman suurempi kuin pienemmällä vetonopeudella vedettäessä. Nämä TAMKin laitteilla saadut veto-koetulokset täydentävät puristuskokeissa saatuja lujuustuloksia. [32.]

Puristuskokeen kaaviokuva ja voima-puristuma-käyriä on kuvassa 15. Puristuksessa koekappaletta puristetaan kahden tasomaisen teräslevyn välissä kappaleen maksimi-voimaan saakka ja rekisteröidään tarvittava voima. Voima-puristuma-käyrän muoto riippuu käytetyn muovin laadusta. Kestomuovit voivat puristua litteiksi levyiksi mikä tarkoittaa sitä että molekyylit liukuvat toistensa ohi. Kertamuovien muodonmuutos on pieni ennen murtumista. [33.]



Kuva 15. a) Puristuskoe. b) Voima-puristuma -käyriä: 1) kertamuovi, 2) polymetyylimetakrylaatti ja 3) kova PVC, polykarbonaatti, polyeteeni [33].

Jännitysarvot (MPa tai N/mm²) saadaan jakamalla voiman arvo tietyn puristuman kohdalla koekappaleen alkuperäisellä poikkileikkauspinta-alalla. Puristusjännityksen suurin arvo nimetään puristuslujuudeksi. Jännitys–puristuma- tai voima–puristuma-käyrissä havaitaan muoveilla jännitys–venymä-käyrien myötörajaa vastaava käyrän suunnan käännekohta. Muovit, jotka puristuvat selkeästi kokoon voidaan kuvata joko puristuslujuusarvolla tai jännitys–myötörajalla. [33.] Muovien testauksessa voidaan käyttää ASTM-, DIN- ja ISO -standardeja, jotta luotettavuus testimenetelmiin paranee. Jännitys–venymä-käyrän lineaariselta alkuosalta voidaan määrittää kimmomoduuli (ASTM D1708) eli Youngin moduuli:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (1)$$

σ on jännitys eli voima koesauvan poikkileikkaus alaa kohden

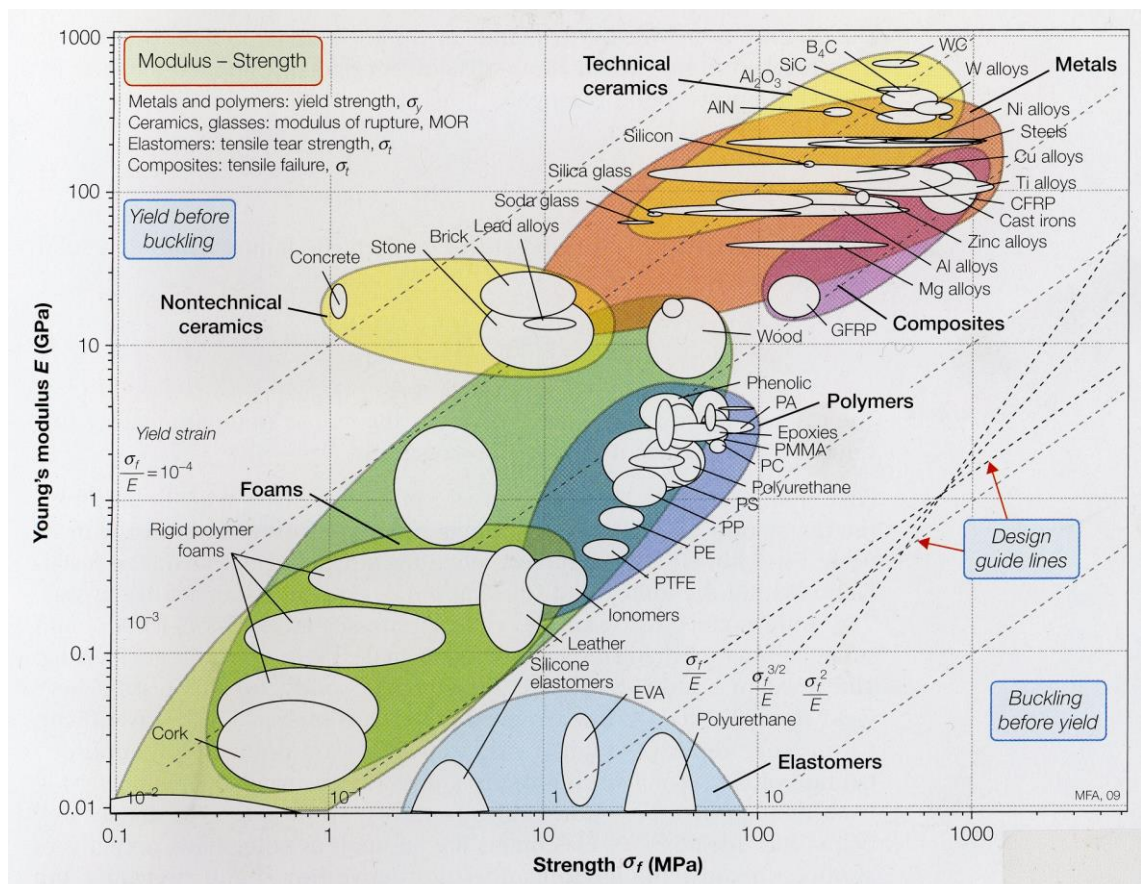
ε on venymä

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

L_0 on kappaleen alkuperäinen ja L venytyksen jälkeinen pituus [34]

Jännitys–venymä-kokeesta saadaan määriteltyä myös elastisuusvakio eli Poissonin suhde. Se on kappaleen leveyden pieneneminen yksikköleveyttä kohden. Lineaarisilla polymeereillä jännityksen aiheuttamat muutokset voidaan jakaa kolmeen ryhmään. Nämä kolme ryhmää muodostuvat ketjun atomien välisten valenssikulmien oikenemisestä (suhteellisuusalue), ketjumolekyylin oikenemisestä (kimmoalue) ja molekyylin liukumisesta toisiinsa nähden (myötöalue).

Mekaanisen koestuksen avulla voidaan muovikappaleeseen kohdistaa leikkaus-, taivutus-, puristus-, tai vääntöjännitys. Vertailtaessa lujuusominaisuuksia teräksiin ovat muovien vetolujuudet noin 10–20 % teräksen lujuusarvoista ja tiheys noin 15 % teräksen tiheydestä. Muovien kimmolujuus on erittäin pieni verrattuna muihin materiaaleihin. [24.] Materiaalin valinnassa voidaan käyttää apuna Youngin moduulin ja lujuuden kaaviokuvaa 16. Kuvassa ovat merkittynä alueet, joissa nurjahtaminen tapahtuu ennen myötöä (Buckling before yield) ja myötö ennen nurjahtamista (Yield before buckling). Kuvan 16 kimmomodulin riippuvuutta lujuudesta tarkastellaan tässä työssä saatuihin tuloksiin. (Nurjahdustulokset 5.4.)



Kuva 16. Suunnitteluviivat (katkoviivat) auttavat valitsemaan materiaalit sopiviin käyttökohteisiin. Youngin moduuli lujuuden funktiona [24, s. 69].

Muovien mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat kaupallisissa laaduissa. Mekaaniset ominaisuudet kuten esimerkiksi murtolujuus ilmoitetaan vaihteluvälinä, tästä esimerkkinä taulukko 2 ABS-muoville.

Taulukko 2. ABS-muovin mekaaniset ominaisuudet [34, s. 219].

Aineen tunnus	Aineen nimitys	Aineen numero	MEKAANISET OMINAISUUDET							
			Murtolujuus		Kimmomoduuli (veto)		Murtovenymä		Taivutuslujuus	
			N/mm ²	K	kN/mm ²	K	%	K	N/mm ²	K
ABS	Akrylinitrilibutadieenistryreeni									
	ABS iskunkestävä	24	24...43	1...2	1,4...2,5	1...2	5...60	2...3	41...69	2
	ABS +20-40% lasia	25	59...131	2...4	4,0...7,1	2...3	2,5...3	2	111...186	3...4

3.3 Puristuskoee nurjahduksen testaamiseen

Puristuskokeessa määritetään nurjahdussauvan taipuma puristavan voiman funktiona. Tiettyä voimaa vastaa aina tunnettu taipuma, ja taipuman kasvattamiseksi tarvitaan yhä suurempi voima. Tässä työssä testituloksia arvioidaan Eulerin neljän nurjahdustapausten pohjalta, jotka on esitetty kuvassa 17.

Eulerin neljä nurjahdustapausta [29].

$$F_n = \mu \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3)$$

F_n on nurjahdusvoima

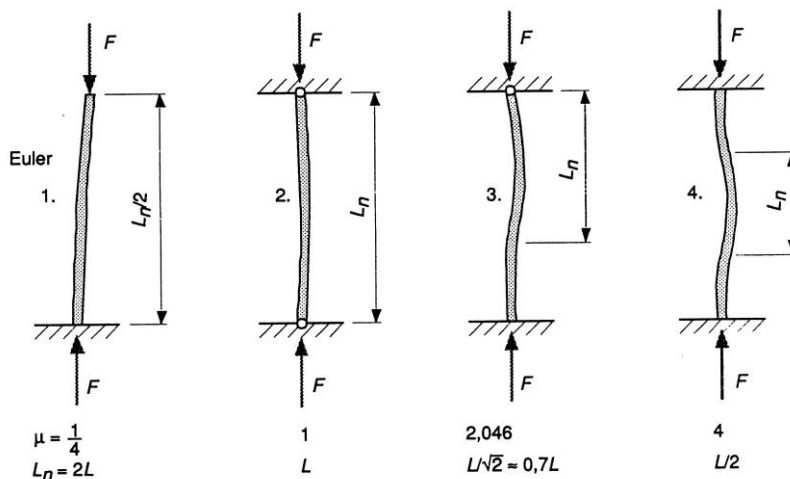
μ on Eulerin kerroin

E on kimmokerroin

I on jäyhyysmomentti

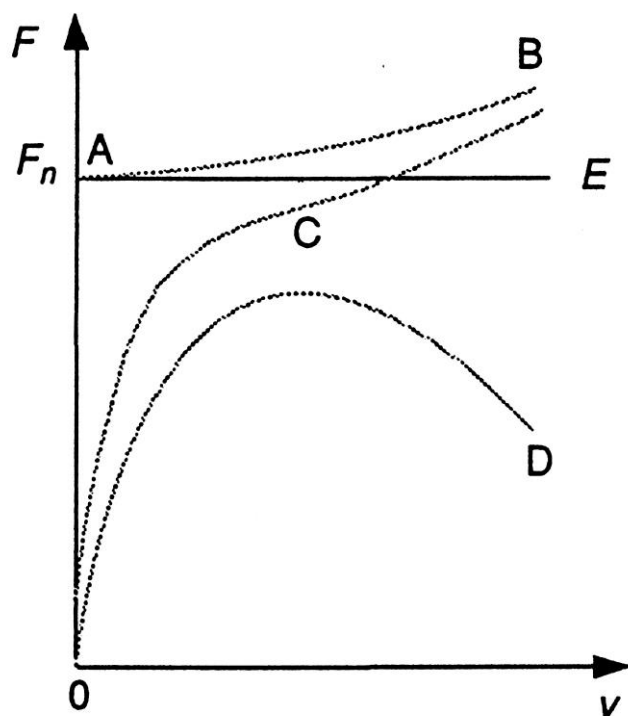
L_n/i on hoikkuusluku (kuva 17)

L on sauvan pituus



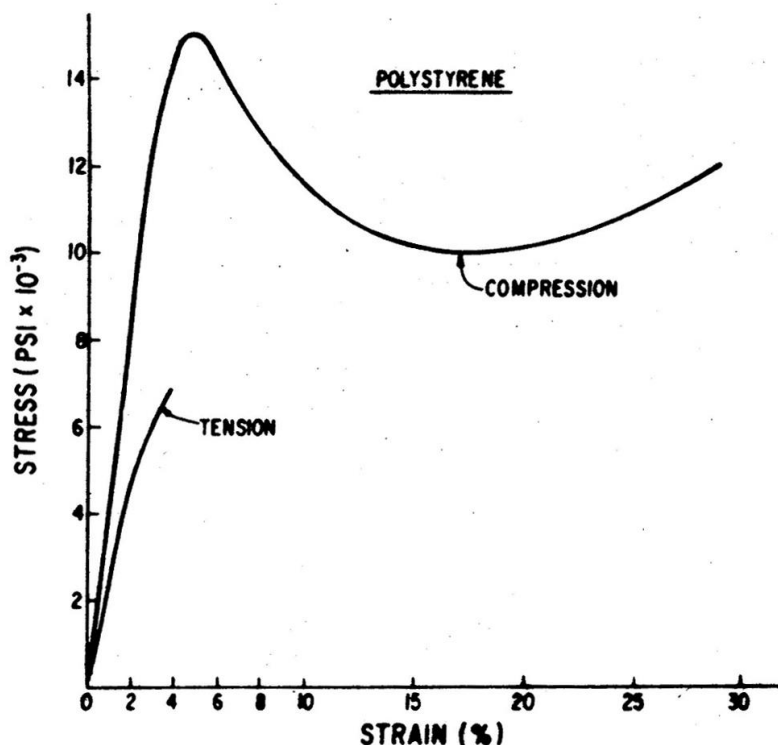
Kuva 17. Eulerin nurjahdustapauksia on neljä erilaista [28].

Sauvaan kohdistuva muodonmuutos riippuu sauvan konstruktiosta ja paksuudesta. Kuvassa 18 ideaalisen kimmoisen sauvan muodonmuutos kulkee käyrän B mukaisesti, eli tiettyä kuormaa (F) vastaa tietty taipuma (v), ja kun kuorma kasvaa, niin taipuma kasvaa. Kuvassa 18 käyrä C edustaa sauvaa, joka ei ole konstruktioltaan täydellinen vaan sillä voi olla esimerkiksi alkukaarevuus. Mitä suurempia ovat konstruktion virheet sitä enemmän käyrä se C kaartuu alaspäin. Äärimmäisen hoikat sauvat pysyvät kimmoisina pisteeseen F_n saakka ja paksummat sauvat noudattavat käyrän D kulkua.



Kuva 18. Nurjahdussauvan voima puristuman funktiona [28].

Puristuskokeella saadut kimmomoduulin arvot ovat muoveilla hieman suuremmat kuin vetokokeella saadut. Tämä johtuu siitä, että puristuskokeessa sisäisten rakennevirheiden vaikutus on pienimmillään. Siksi vedossa hauraasti murtuva polymeeri saattaa puristuksessa murtua sitkeä-murtuma- mekanismilla [35]. Polymeerin muodonmuutoskäyttäytyminen on todennettavissa kimmomoduulin arvoina kuvassa 19 esitetyllä tavalla, ja nämä arvot ovat hieman suuremmat kuin vetokokeessa.



Kuva 19. Hauraan polymeerin muodonmuutoskäyttäytyminen vedossa (tension) ja puristuksessa (compression) [34].

3.4 Standardien käyttö testeissä

Yleisiä periaatteita ja terminologiaa on esitetty standardissa SFS-EN ISO/ ASTM 52900: 2017 (Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia) [7]. Tässä standardissa määritellään materiaaleja lisäävien valmistusmenetelmien (Additive Manufacturing, AM) yhteydessä käytettävät termit ja nimikkeistö. Standardi mahdollistaa kansainvälisen käsitteistön eri valmistusmenetelmiin. Nykyisin käytössä olevien standardien lisäksi tarvitaan tulostustekniikoiden lisääntyessä tarkennettuja tai uusia standardeja. Standardien avulla voidaan edistää tulostuksen jäljitettävyyttä ja kappaleiden mittaustekniikoiden toistettavuutta. Muovien vetokokeeseen käytetään standardia, jossa kuormitus määritellään kalibroidun kappaleen perusteella. Muovien taivutusominaisuuksia voidaan tutkia koejärjestelyillä standardin mukaan, jossa suorakaiteen muotoinen koesauva sijoitetaan kahden tuen väliin ja voima kohdennetaan tukien keskiväliin. Näitä yleisesti käytettyjä muovien testeihin liittyviä standardeja on luetteloitu yhteen koosteeseen. [36.]

4 3D-pursotustekniikalla tulostettujen pylväiden testit

Tässä työssä puristuskokeessa testatut kappaleet on 3D-tulostettu Aalto-yliopiston konetekniikan ADDLab-laboratoriossa, jossa on useita kymmeniä tulostuslaitteita opetus- ja opiskelijakäyttöön. Tulostuslaitteiden käyttövarmuus eri käyttäjien ja ryhmien kohdalla asettaa vaatimukset ohjeistukseen ja ohjeiden noudattamiseen. Tulostimen käyttöohjeistusta tarkennettiin ADDLab tulostimelle Ultimaker 2 laaditulla käyttöohjeella (liite 1).

Testit perustuvat 3D-pursotustekniikalla tulostettujen pylväiden puristuskokeisiin ja lujuuslaskentamenetelmiin. Kappaleiden lujuutta ja nurjahdusvoimaa määritettiin puristamalla tulostettuja muovipylväitä tasaisella nopeudella tasomaisten teräspintojen välissä. Aalto-yliopiston ADDLab-laboratoriossa tulostettiin kaikkiaan 111 pylvästä testauksia varten. Pylväitä pursotettiin kolmella erimallisella tulostimella, ja valmiiden pylväiden geometrisissa mitoissa oli hajontaa. Kaikkia pylväitä (111 kpl) ei valittu testattaviksi, sillä niiden ominaisuuksien välillä oli eroja ja ne olisivat lisänneet hajontaa lopputuloksissa. Tässä työssä käytettiin 78:aa muovipylvästä.

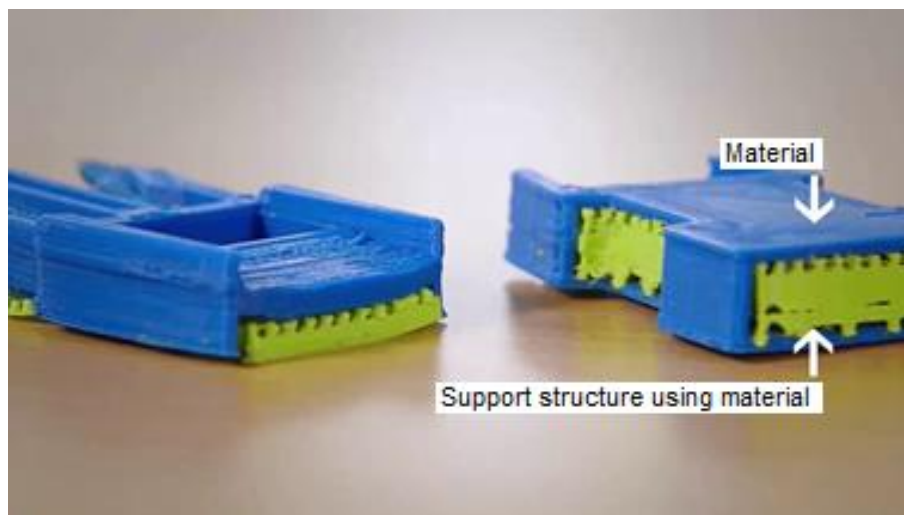
4.1 3D-tulostuslaitteet testikappaleiden valmistuksessa

Pylväsmäiset muovikappaleet tulostettiin puristuskokeita varten nurjahduskestävyyden määrittämiseksi. Pursotukseen käytettiin kolmea eri tulostinta, jotka ovat

- Stratasys uPrint SE plus (+WaveWash)
- Ultimaker 2
- Ultimaker 3.

Muovipylväitä tulostettiin ensin uPrint-tulostimella, jossa on HBC (Heated Build Chamber) eli oma sisäinen lämmityskammio. HBC -kammio pitää tulostuksen tasaisessa lämpötilassa, jolloin tulostuksen ulkoinen ilma ja sen vaihtelu eivät pääse vaikuttamaan tulostuksen laatuun. uPrint -tulostimen tulostuksen onnistumisen todennäköisyys on korkeampi kuin avonaisilla tulostimilla, joilla ei ole omaa lämmityskammiota. Tukimateriaali on osana uPrint-tulostusta ja tulostin lisää sen aina jokaiseen tulostettuun kappaleeseen (kuva 20). Tulostin aloittaa työn aina pursottamalla ensin noin 2 mm:n paksuisen tukimateriaalikerroksen tulostuspöydälle. Tulostaminen alkaa tukimateriaalin pääl-

le. uPrint:n tukimateriaali on vaalempaa, heikompaa ja kevyempää kuin varsinainen kappaleen muovimateriaali. Tukimateriaali poistetaan tulostetusta kappaleesta joko irrottamalla manuaalisesti käsin, leikkaamalla sopivaa työkalua käyttäen tai vahvalla liuotuspesulla. [37.]



Kuva 20. Tulostettu kappale (sininen) jossa on mukana tukimateriaali (vihreä).

Pursotettujen tulosteiden valmistuksen nopeuttamiseksi ja tulostuslaitteiden käyttöajan minimoimiseksi tulosteet tehtiin tässä työssä erikokoisina sarjoina. Sarjakoot tulostetuille kappaleille olivat 2x2 (neljä pylvästä), 3x3 (yhdeksän pylvästä), 2x5 (10 pylvästä) tai 4x4 (16 pylvästä).

uPrint SE plus -tulostimella (kuva 21) tulostusaika on noin 40 tuntia neljälle pylväälle ja tukimateriaalin poistoon tarvitaan 12–48 tuntia kestävä liuospesu riippuen mallin monimutkaisuudesta. Tässä työssä uPrint SE plus -tulostimella pylväitä tehtiin noin 60 kappaletta.



Kuva 21. uPrint SE plus, 3D-tulostin ja tulostusalue 203x203x152 mm [37].

Tässä työssä uPrint -tulostimella muovipylväät tulostettiin sarjoina, joista esimerkki 4x4 on kuvassa 22. Tulostinta käytetään myös teollisuudessa, ja sillä saadaan kappaleisiin tarkkoja tulostuspintoja ja/tai monimutkaisia muotoja. uPrint -tulostimen laadukas tulostaminen pohjautuu sen omaan suljettuun säiliöön, jossa on sisälämpötila +77 °C. Oma sisäinen lämpötila poistaa tulostusympäristön lämpötilavaihtelujen aiheuttamat muutokset, jotka voivat vaikuttaa tulostamisen laatuun. uPrint -tulostimien hinta vaihtelee välillä 10 000–20 000 euroa, ja ne käyttävät erikoisvalmisteista ABS -muovia.

Tulostettavan kerroksen korkeus on valmistajan antamien tietojen mukaan uPrint SE -tulostimella 0,254 mm ja uPrint SE Plus -tulostimella 0,254 mm tai 0,330 mm.



Kuva 22. uPrint -tulostimella tulostetut testikappaleet muodossa 4x4. Kuvan pylväiden mitat ovat 15x15x90 mm ja tulostuskerroksia on noin 360 (kerroksen paksuus 0,254 mm).

uPrint -tulostin käyttää myös ”pakollista tukimateriaalia” eli tulostin lisää aina tukimateriaalia kappaleiden ympärille. Monimutkaisissa kappaleissa liuospesua varten pitää mallintaa reikiä tai aukkoja, joista liuosneste pääsee kulkemaan. Liian pienet reiät hidastavat pesuprosessia ja kappaleen puhdistusta, ja siksi suositeltu minimi reiän halkaisija on 2 mm. Tulostetun kappaleen materiaali ei vaurioidu liuospesussa (kuva 23).



Kuva 23. Liuospesukone WaveWash Aalto-yliopiston ADDLab-laboratoriossa. WaveWash -pesukone käyttää tehokkaita liuotusaineita tukimateriaalien poistamiseen [38].

Ultimaker -tulostimella (kuva 24) arvioitu tulostusaika oli yli 20 tuntia 2x2 sarjalle eli neljälle kappaleelle. Tulostukset tehtiin pääosin yöaikaan, jolloin tulostinten käyttöaika saatiin parhaiten hyödynnettyä. Ultimaker 3 -tulosteita valmistettiin noin 40 kappaletta ja tulostamisen kokonaisaika oli noin 200 tuntia.



Kuva 24. Ultimaker 3, 3D-tulostimen tulostusalue 215x215x200 mm [39].

4.2 Testilaitteet ja -menetelmät

Eripituisten ja muodoltaan erilaisten testikappaleiden lujuusominaisuuksien määrittämisessä keskityttiin puristuskokeeseen ja sen avulla nurjahduskestävyyden määrittämiseen. Vetokokeiden käyttö olisi edellyttänyt tulostettujen testikappaleiden toisenlaista muotoilua kiinnityksen mahdollistamiseksi kokeen aikana.

Sopivan puristuslaitteen löytäminen pienten muovipylväiden testaamiseen oli odotettua vaikeampaa, ja laitteiden saaminen käyttövalmiuteen edellytti Aalto-yliopiston laboratoriohenkilökunnalta lisätyötä. Puristuslaitteiden käyttöaste todettiin oppilaitoksissa alhaiseksi, ja siksi puristuslaitteiden kunnostaminen tämän työn testikappaleiden puristamiseen edellytti käyttöhenkilöstölle merkittävää lisäpanostusta.

Ennen puristuskoea kaikki testattavat muovipylväät punnittiin ja mitattiin ja näitä menetelmiä tarkastellaan seuraavassa tarkemmin.

4.2.1 Kappaleiden punnitus

Pursotetut kappaleet punnittiin ja niiden tiheys laskettiin, jotta voitiin määritellä niiden rakennetta. Tulostettujen koekappaleiden punnituksessa käytettiin Mettler B6-A Balance, Semi-Micro B 6 -vaakaa, jonka tarkkuus on 0,0001 g (kuva 25). Vaaka on mekaaninen, ja sitä on käytetty valimoteollisuuden analyysilaboratoriossa Taalintehtaan Wärt-silän terässulaton toimiessa vuoteen 1980 saakka. Mettler -vaa'an vertailupunnuksia oli käytössä yhteensä 8 kpl (punnusten painot olivat 2–100 g), ja ne tarkastettiin muRata Electronics -vaa'alla Ohaus Analytical Plus, joka on kalibroitu 15.2.2019. Tämän vaa'an tarkkuus on 0,1 mg. Punnusten painojen ero muRatan ja Mettler -vaa'an välillä oli keskimäärin 0,0029 %.

Samassa tulostuserässä olevien samanmuotoisten muovipylväiden painoissa oli selviä eroja. Samalla huomattiin, että samanlaisten tulostimien samanlaisissa tulostuksissa oli myös selviä painoeroja (esitetty taulukossa 6 ja kuvassa 29). Kappaleiden tulostusmenetelmä aiheuttaa testikappaleisiin eroja, ja tämä näkyy punnitustuloksissa. Eri ohjelmien laskumenetelmillä saadaan erilaisia painotuloksia. Esimerkkinä eri punnitustuloksista on testikappale, joka oli umpinainen, PLA -muovia ja mitoiltaan 90 mm pitkä ja poikkileikkaukseltaan 16x16 mm neliö. Tämän testikappaleen paino kahdella eri ohjelmalla laskettuna antoi tuloksiksi

- 3D-mallina CATIA V5: $m = 30,08$ g
- Ultimaker Cura: $m = 31,1736$ g

Kappaleen punnitustulos Mettler -vaa'alla antoi tuloksen: $m = 30,1998$ g



Kuva 25. Mettler -vaaka B6-A, jota käytettiin testikappaleiden punnitsemiseen. Tekniset tiedot kuvassa oikealla puolella.

Punnitsemisen jälkeen kappaleet mitattiin työntömittaa ja mikrometriä käyttäen, jotta saataisiin käsitys kappaleen todellisista mitoista.

Tulostetut muovipylväät mitattiin (pituus, särmä tai halkaisija) työntömitalla Mitutoyo Corporation NTD12-15, jonka tarkkuus on 0,01 mm. Tuloksia verrattiin laskettuihin eli suunniteltuihin (CAD Catia V5R20 -tietokoneohjelma) arvoihin.

Seuraavaksi mitattiin muovipylväiden keskikohdalta läpimitat mikrometrillä ja verrattiin tuloksia ohjelmilla saatuihin mittoihin (tietokonemalli). Jokainen tulostetun pylvään keskimitta vaihteli, koska poikkipinta-ala ei ole säännöllinen (neliö tai pyöreä). Tulostetuista muovipylväistä mitattiin maksimi korkeus, joka ei muuttunut tulostuksen aikana. Tulostinten tulostustarkkuus kappaleiden valmistuksessa ei ole yhtä tarkkaa kuin tietokone-mallilla saadut tulostettavien mitat. Tulostimen tulostustarkkuus on riippuvainen muovimateriaalien ja laitteiden laadusta.

4.2.2 Puristuskokeet

Aalto-yliopiston konetekniikan laboratorion yleisaineenkoetuskone oli käytettävissä testausten alussa. Testausten edetessä käytettiin Metropolia AMK:n konelaboratorion aineenkoetuskonetta.

Aalto-yliopiston MTS Insight -aineenkoetuskoneella testattiin eri puristusnopeuksia välillä 0,5–10 mm/min ja testausnopeudeksi valittiin 2 mm/min. Puristuskokeessa 90 mm:n mittainen muovipylväs katkesi noin 10 mm:n puristuksen jälkeen eli puristusaikaa tarvittiin noin 5 min/testi.

Tulostettujen kappaleiden puristuksissa tallennettiin

- puristettu matka (mm)
- puristukseen käytetty voima (N)
- käytetty aika (min ja s)
- video kokeesta.

Puristustuloksissa todettiin merkittäviä eroja kappaleiden välillä, vaikka tulosteet olivat samasta tulostuserästä.

4.2.3 Koetulosten tallennus videointi- ja kuvaustekniikalla

Muovipylväiden käyttäytyminen puristuskokeessa taltioitiin videokuvauksena. Videokuvauksiin tallentui pylväsmäisten testikappaleiden muodonmuutos puristuksen aikana. Puristusta jatkettiin nurjahdustaivutukseen ja edelleen kappaleen murtumiseen asti. Kappaleista on otettu myös valokuvat ja ne on esitetty liitteessä 2. Puristuskokeessa saatiin tuloksia myös testikappaleista, jotka eivät nurjahtaneet.

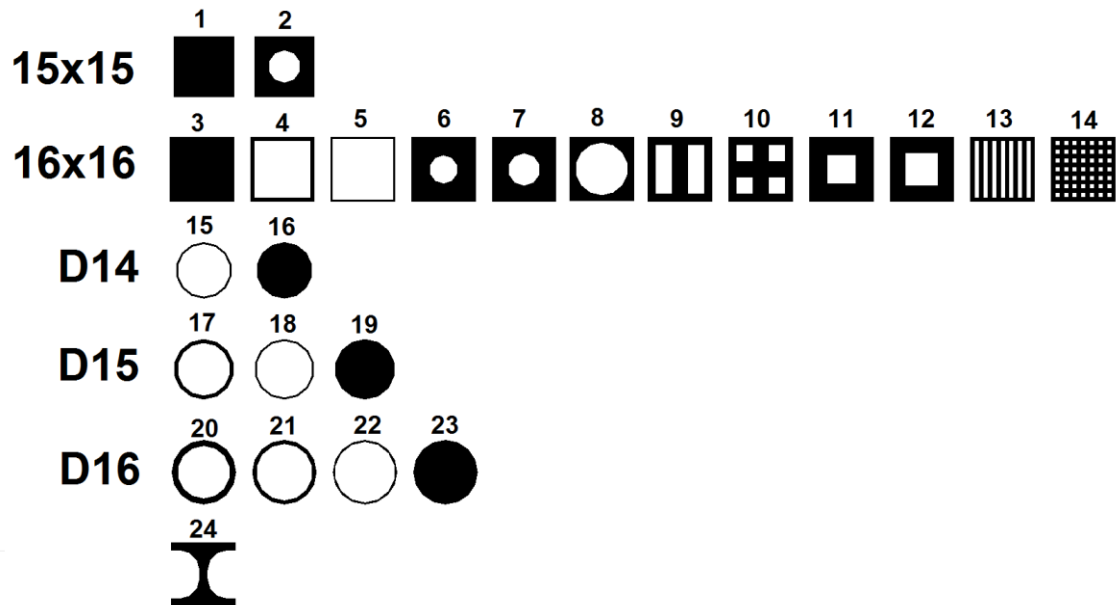
Liitteessä 2 on puristuskokeiden videokuvauksia, joissa nähdään erilaisia nurjahduksia eri pylväillä. Videoissa näkyy, kuinka 90 mm pitkät pylväät nurjahtavat ja 32/45 mm pitkät pylväät litistyvät. 90 mm:n pylväitä kuvattiin noin 5–10 minuuttia ja 32/45 mm pylväitä noin 8–15 minuuttia.

5 Tulokset

Tulokset perustuvat 3D-pursotustekniikalla tulostettujen muovipylväiden mittaustuloksiin. Tässä työssä Aalto-yliopiston ADDLab -laboratoriossa tulostettiin pursotusmenetelmällä kaikkiaan 111 muovipylvästä.

5.1 3D-tulostettujen pylväiden mitat

Poikkileikkaukseltaan erilaisten pylväiden, jotka on esitetty kuvassa 26, testaamisella tutkittiin poikkileikkauksen muotoilun vaikutusta pylvään nurjahduskestävyyteen.



Kuva 26. Periaatekuvat pylväiden poikkileikkauksista liittyen taulukkoon 3 (ulkomuoto, ulkomitta ja reikä).

Taulukossa 3 on esitetty tulostettujen muovipylväiden (24 erilaista poikkileikkausta) suunnitellut mitat, pinta-alat ja jäyhyysmomentit. Kappaleiden poikkipinta-alat ja jäyhyysmomentit määriteltiin CAD Catia -ohjelmalla, joka ei huomioi muovinpursotuksessa tapahtuvia mittamuutoksia.

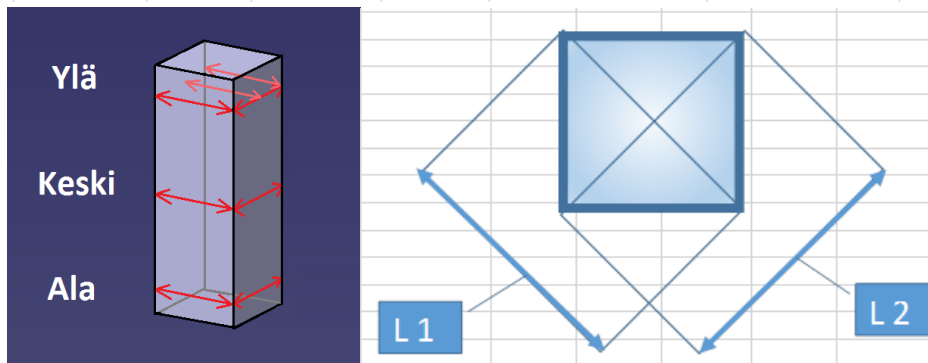
Taulukko 3. CAD Catia ohjelmalla määritettiin poikkileikkauksien pinta-alat ja jäyhyysmomentit testipylväille (yhteensä 24 erilaista poikkipinta-alaa). Sinisellä maalatut arvot (sarake I_x) ovat työssä käytetyt jäyhyysmomentit. Sarakkeessa I_y harmaalla maalatut arvot (numerot 9, 13 ja 24) ovat jäyhyysmomentit y-suunnassa jotka poikkeavat x-suuntaisista arvoista.

No	n/o	Ulkomuoto						Jäyhyysmomentti		
		Ulkomitta	Reikä	Ulko pinta-ala	Reikä pinta-ala	Poikkipinta-ala	I_x (m ⁴)	I_y (m ⁴)	I_{xy} (m ⁴)	
1	Neliö	15		225		225	4,22	4,22E-09	4,219E-09	-1,63E-55
2	Neliö	15	8D	225	50,27	174,73	4,02	4,02E-09	4,018E-09	-1,47E-39
3	Neliö	16		256		256	5,46	5,46E-09	5,461E-09	-4,14E-25
4	Neliö	16	14x14	256	196	60	2,26	2,26E-09	2,26E-09	-6,62E-24
5	Neliö	16	15x15	256	225	31	1,24	1,24E-09	1,243E-09	0,000
6	Neliö	16	7D	256	38,48	217,52	5,34	5,34E-09	5,343E-09	-5,29E-23
7	Neliö	16	8D	256	50,27	205,73	5,26	5,26E-09	5,26E-09	1,06E-22
8	Neliö	16	13D	256	132,73	123,27	4,06	4,06E-09	4,06E-09	0,00E+00
9	Neliö	16	2x 4x12	256	96	160	3,80	3,80E-09	4,31E-09	1,06E-22
10	Neliö	16	4x 4x4	256	64	192	4,35	4,35E-09	4,352E-09	2,12E-22
11	Neliö	16	7x7	256	49	207	5,26	5,26E-09	5,261E-09	0,000
12	Neliö	16	8x8	256	64	192	5,12	5,12E-09	5,12E-09	0,000
13	Neliö	16	7x 1x14	256	98	158	3,65	3,65E-09	3,86E-09	0,000
14	Neliö	16	49x 1x1	256	49	207	4,56	4,56E-09	4,557E-09	4,90E-17
15	Pyöreä	14D	-13D	153,94	132,73	21,21	0,48	4,84E-10	4,838E-10	0,000
16	Pyöreä	14D		153,94		153,94	1,89	1,89E-09	1,886E-09	0,000
17	Pyöreä	15D	-13D	176,71	132,73	43,98	1,08	1,08E-09	1,083E-09	0,000
18	Pyöreä	15D	-14D	176,71	153,94	22,78	0,60	5,99E-10	5,993E-10	0,000
19	Pyöreä	15D		176,71		176,71	2,49	2,49E-09	2,485E-09	0,000
20	Pyöreä	16D	-13D	201,06	132,73	68,33	1,82	1,82E-09	1,815E-09	0,000
21	Pyöreä	16D	-14D	201,06	153,94	47,12	1,33	1,33E-09	1,331E-09	0,000
22	Pyöreä	16D	-15D	201,06	176,71	24,35	0,73	7,32E-10	7,32E-10	0,000
23	Pyöreä	16D		201,06		201,06	3,22	3,22E-09	3,22E-09	0,000
24	I-palkki	16	I	256	146,54	109,46	1,49	1,49E-09	3,98E-09	0,00E+00

3D-tulostetun muovipylvään geometrisia mittoja tarkasteltiin seuraavan esimerkin avulla. Neliöpylvään (15x15 mm) mittauskohdat (ala, keski ja ylä) ja lävistäjät (L1 ja L2) mitattiin kuvassa 27 esitetyllä tavalla. Neliön 15x15 mm matemaattinen lävistäjä on 21,21 mm. Mittaustulokseksi saatiin keskiarvo 20,87 mm eli poikkeama on -0,34 mm (taulukko 4). Lävistäjän poikkeama johtuu muovipylvään kulmien pyöristymisestä 3D-tulostuksessa ja tulostusmuovi jäähtymisen aiheuttamasta kutistumisesta.

Taulukko 4. Neliöpylvään 15x15 mm teoreettiset ja mitatut arvot. Lävistäjän poikkeamaksi saatiin -0,34 mm (21,21–20,87 mm).

Teoreettinen neliö					
Sivut (mm)		Pinta-ala		L0 Lävistäjä (mm)	
S1	15	225 mm ²		21,21	
S2	15				
Lävistäjät	Ylä (mm)	Keski (mm)	Ala (mm)	Lka Keskiarvo (mm)	Poikkeama (Lka - L0) (mm)
L1 (mitattu)	20,839	20,817	20,917	20,87	-0,34
L2 (mitattu)	20,869	20,893	20,861		



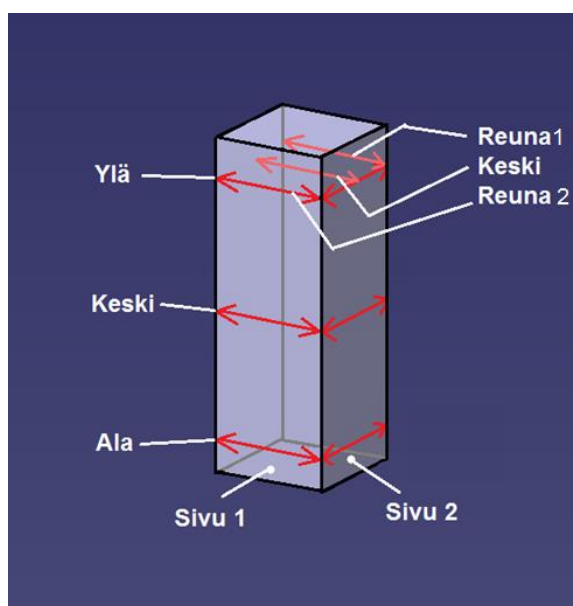
Kuva 27. Neliöpylvään mittauskohdat liittyen taulukkoon 4 Pylvään lävistäjien mittauskohdat (ylä, keski ja ala) on merkitty havainnekuvaan liittyen taulukon 4 arvoihin.

Pinta-alan mittausta varten mitattiin pylvään sivut (kuva 28). Näistä mitoista laskettiin pinta-ala ja sitä verrattiin laskennalliseen pinta-alan arvoon 225 mm². Mittauksissa saatiin suurin poikkeama keskikohdalla 1,36 % (keski) ja pienin alhaalla 0,57 % (ala) (taulukko 5).

Taulukossa 5 on pylvään 15x15 mm suunnitellun pinta-alan (225 mm²) ja toteutuneiden pinta-alojen poikkeamat. Verrattaessa tulostetun pylvään kolmesta kohdasta mitattuja arvoja todetaan vaihtelua kappaleen pituussuunnassa. Se on samaa suuruusluokkaa kuin toteutuneen ja suunnitellun mitan vaihtelu. Tulostuksessa syntyy muovipylväisiin epähomogeenisuutta, joka aiheuttaa pylväisiin mittapoikkeamia. Kappaleen sisäisten reikien mittaaminen ei ollut mahdollista, koska siihen ei ollut sopivaa mittausvälinettä. (Ilmareikien osuutta voisi ehkä mitata röntgentekniikkaa käyttäen). Edellä olevan perusteella tässä työssä käytettiin poikkipinta-alana suunniteltua pinta-alaa.

Taulukko 5. Pylvään poikkileikkauksen mittauskohdat ja -arvot (sivu 1 ja sivu 2) sekä pinta-
alat ja pinta-alojen poikkeamat.

Neliö	15x15	15	15	225	Pinta-ala poikkeama	
		Sivu 1 (mm)	Sivu 2 (mm)	Ala (mm ²)	mm ²	%
Ylä	Reuna	15,019	15,154	226,823	1,823	0,81
	Keski	14,969	15,024			
	Reuna	15,117	15,081			
	Keskiarvo	15,035	15,086			
Keski	Reuna	15,015	15,223	228,064	3,064	1,36
	Keski	14,963	15,101			
	Reuna	15,086	15,224			
	Keskiarvo	15,021	15,183			
Ala	Reuna	15,035	15,099	226,282	1,282	0,57
	Keski	14,980	14,963			
	Reuna	15,083	15,096			
	Keskiarvo	15,033	15,053			
Keskiarvojen erotus (max - min)				1,782	mm	
mitattujen keskiarvosta				0,78	%	



Kuva 28. Pylvään poikkileikkauksen mittauskohdat taulukkoon 5 liittyen.

Muovipylväissä havaittiin silmämääräisellä tarkastetulla merkittäviä muoto-poikkeamia 3D-pursotusmenetelmällä tulostuksen jälkeen. Tästä syystä kaikkia pylväitä (111 kpl) ei valittu testattaviksi, sillä muoto-poikkeavien mukaanotto olisi lisännyt hajontaa lopputu-

loksissa. Tässä työssä mekaanisiin testeihin käytettiin 78:aa pylvästä, joista määritettiin nurjahduskestävyys.

5.2 Pylväiden punnitus

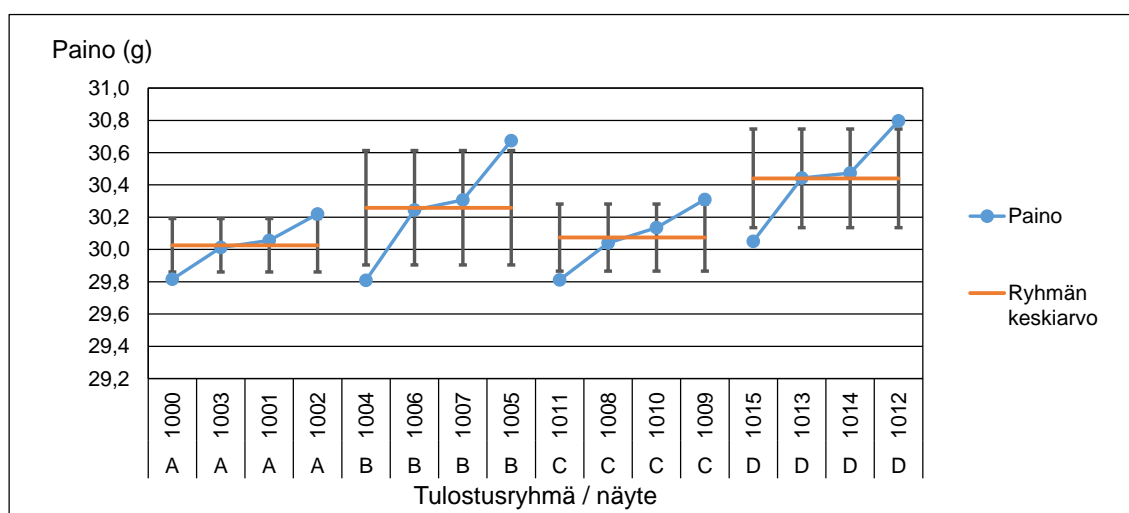
Muovipylväiden testit aloitettiin punnitsemalla pylväiden paino. Mitatun painon avulla voitiin määrittää pylvään tiheys sen rakenteen arvioimiseksi (huokoisuuden vaikutus). Pylväiden paino ja pylväisiin liittyvät kaikki muut testitulokset on koottu liitteen 3 taulukoon. Taulukossa 6 on esitetty 78 pylvään puristuskimmokerroin G , jännitykset R_{max} , R_e , $5\% R_{max}$, $45\% R_{max}$ ja niitä vastaavat puristumat $e R_{max}$, $e R_{e,0,2}$, $e 5\% R_{max}$, $e 45\% R_{max}$, pinta-alat, pituus, paino, tiheys, muovilaatu ja tulostussuunta.

Muovipylväistä (111 kpl) tulostettiin suurin osa neljän pylvään valmistuserinä. Valmistuserien (4x4) välisiä ja erien sisäisiä tasaisuuksia tarkasteltiin vertailemalla punnitustuloksia. Pylväiden (pituus 90 mm, neliö 16x16 mm) materiaalina käytettiin PLA-muovia. Taulukossa 6 on esitetty valmistuserien A, B, C ja D (jokaisessa erässä neljä numeroitua muovipylvästä) pylväiden punnitut painot. Näiden valmistuserien hajonnat on koottu kuvaan 29. Muovipylväiden pienin paino oli 29,8084 g ja suurin 30,7973 g. Kuvassa 29 on esitetty valmistuserien painojen keskiarvot ja poikkeamat.

Kuvassa merkitty sininen mittauspiste edustaa pylvään painoa (g) ja punainen vaakaviiva on tulostusryhmän eli neljän pylvään painon keskiarvo. Kuvassa tulostusryhmittäin esitetty pystysuuntainen viiva on mittaustulosten keskipoikkeama (pienin 0,17 ja suurin 0,36). Jokaisessa neljän kappaleen tulostusryhmässä (A, B, C ja D) on yksi pylväspaino, jonka poikkeama alaspäin on suurempi kuin standardipoikkeama (0,7–1,5 %) ja yksi, jonka poikkeama ylöspäin on suurempi standardipoikkeama (0,6–1,4 %) yli keskiarvon. Hajontaa syntyy pursotettujen pylväiden tiheysvaihtelusta ja pylväiden mittojen epätarkkuudesta.

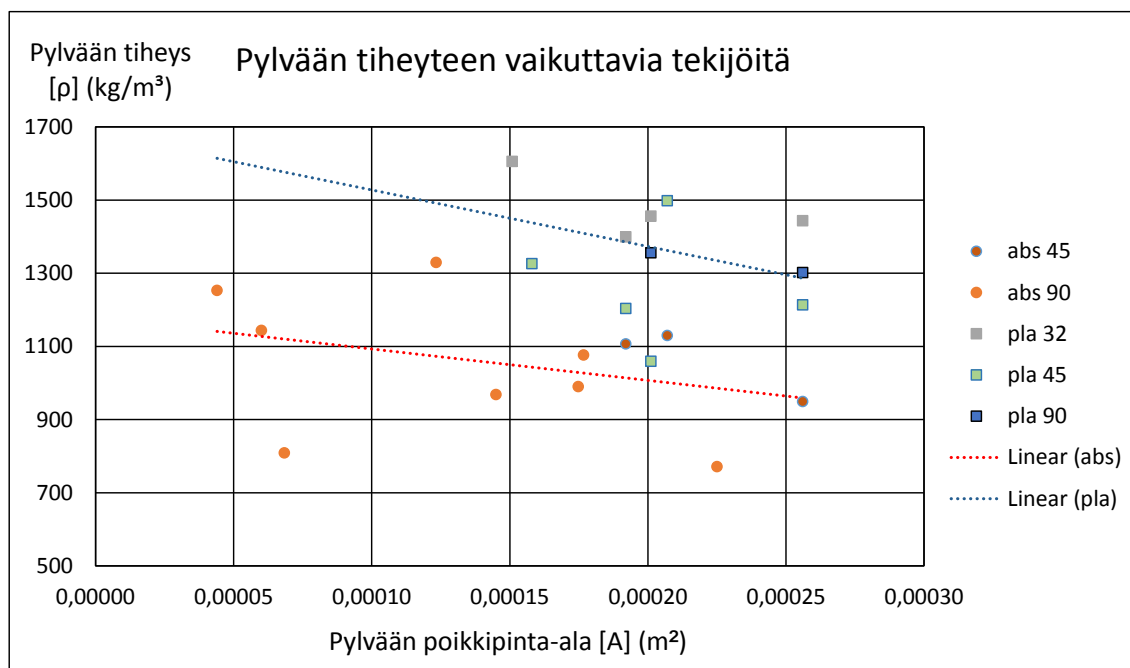
Taulukko 6. Valmistuserät A, B, C ja D. Punnitustuloksista on laskettu keskiarvot (Paino Ka) ja prosentuaaliset poikkeamat (max - Ka) ja (min - Ka).

Näyttenumero	Näytteen paino (g)			
	Valmistuserä			
	A	B	C	D
1000	29,8156			
1003	30,0121			
1001	30,0565			
1002	30,2190			
1004		29,8084		
1006		30,2452		
1007		30,3063		
1005		30,6737		
1011			29,8110	
1008			30,0407	
1010			30,1351	
1009			30,3095	
1015				30,0505
1013				30,4425
1014				30,4726
1012				30,7973
Paino Ka	30,0258	30,2584	30,0741	30,4407
Paino max	30,2190	30,6737	30,3095	30,7973
Paino min	29,8156	29,8084	29,8110	30,0505
max – Ka	0,6 %	1,4 %	0,8 %	1,2 %
min – Ka	-0,7 %	-1,5 %	-0,9 %	-1,3 %



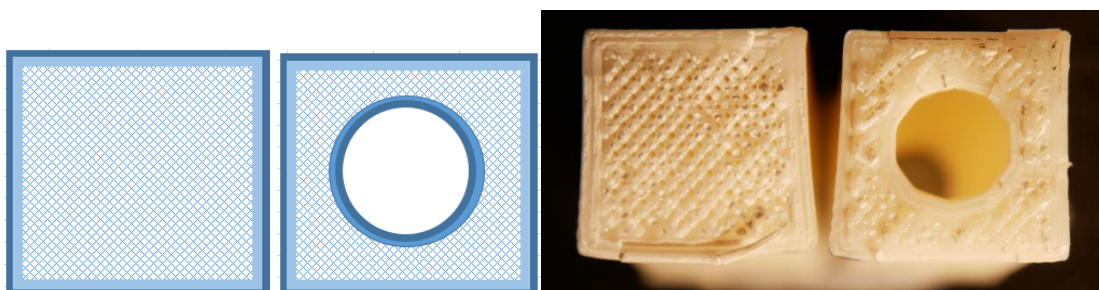
Kuva 29. Punnitustulokset testikappaleista. Yhteensä 16 pylvästä (pituus 90 mm, poikkileikkaus 16 mm neliö ja materiaali PLA). Pystyakselilla kappaleen paino (g) ja vaak akselilla näyttenumero (kpl).

Muovipylväiden (testissä yhteensä 78 kpl) tiheyden vaikuttavista tekijöistä tarkasteltiin muovilaatuja (ABS ja PLA), pylväiden pituuksia (32 mm, 45 mm, ja 90 mm) ja pinta-aloja. Mittauspisteen merkintä on pyöreä muovilaadulle ABS ja neliö muovilaadulle PLA (kuvassa 30). Mittauspiste on laskettujen tiheystulosten keskiarvo. Kuvan tuloksista havaitaan että ABS on kevyempää kuin PLA.



Kuva 30. Pylvään tiheyden ja pinta-alan riippuvuus kahdella eri muovilla (ABS ja PLA) ja eri pylväspituuksilla.

Pursotettujen pylväiden rakenteeseen syntyi merkittäviä eroja tiheyden riippuen ulkopinnan määrästä. Muovipylvään ulkoreuna on tiheämpää kuin pylvään sisus (kuva 31). Reiällisen pylvään kokonaistiheys on suurempi kuin umpinaisen.

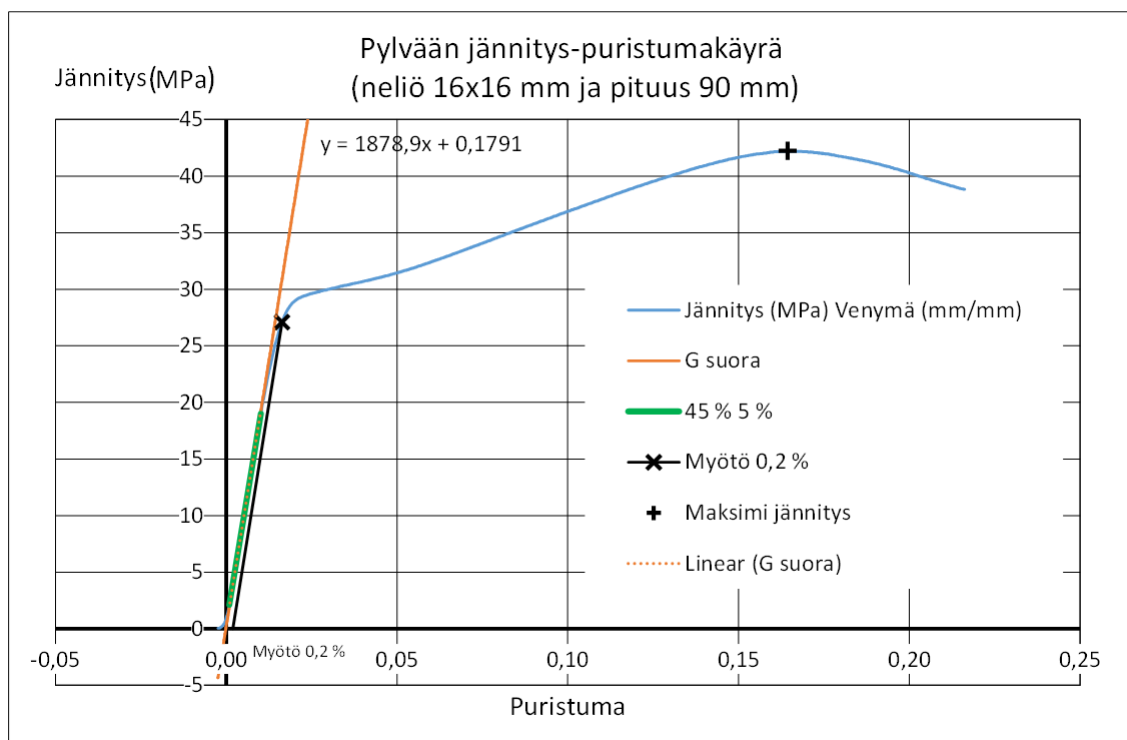


Kuva 31. Vasemmalla havainnekuvat pylväiden poikkipintojen rakenteista ja oikealla kuvat tulostettujen ja murtuneiden muovipylväiden poikkipinnoista (16x16 mm ja reiän halkaisija on 8 mm).

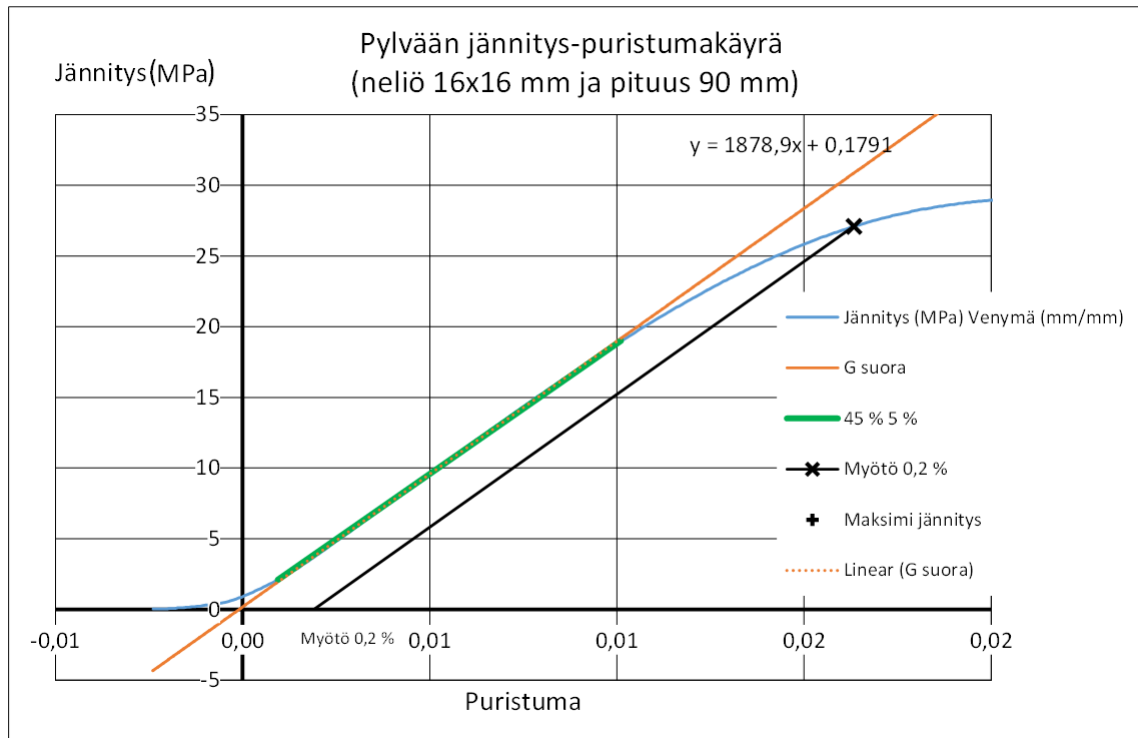
5.3 Mekaaniset testit

Veto-puristuskoneella (yleisaineenkoetuskoneella) mitattiin muovipylväisiin kohdistuvaa voimaa ja syntyvää siirtymää. Tuloksista on laskettu puristuskimmokerroin [G] (MPa), suurin jännitys [R_{\max}] (MPa), myötöjännitys [$R_{p0,2}$] (MPa) ja puristuma [e] (liite 3). Puristuskimmokerroin määritettiin voima-puristumatiedoista, pylvään pituudesta ja pinta-alasta. Puristuskimmokertoimen avulla määritettiin jännitys-puristustiedoista myötölujuus.

Jännitys–puristuma-käyrään (kuvat 32 ja 33) on merkitty vihreä jana kimmokertoimen [G] (MPa) määrittämiseksi. Janan päätepisteet ovat 5 % ja 45 % maksimijännityksestä ja niitä vastaavat puristumat. Näiden päätepisteiden välisiä mittaustuloksia on käytetty kimmokertoimen määrittämiseen (funktio LINEST, pienimmän neliösumman menetelmä). Myötöjännitys on määritetty suoralla, jonka kulmakerroin on sama kuin kimmokerroin ja sen nollapiste on kohdalla 0,2 % puristuma. Edellä mainitut tulokset on liitteessä 3.



Kuva 32. Puristuma–jännitys-käyrästä (sininen viiva) määritetään R_{\max} (+), G (punainen viiva) ja $R_{e0,2}$ (x musta viiva).



Kuva 33. Puristuma-asteikossa esitetty kimmokertoimen suora ja myötölujuuden suora (tarkennus kuvasta 32).

Kimmokerroin laskettiin taulukko-ohjelmalla voima–siirtymä-tiedoista. Ensin määritettiin jännitys ja puristuma sopivalla laskentavälillä, jossa siirtymä–jännitys -muutos on lineaarinen. Laskentaväli vaihteli tulostettujen kappaleiden kesken, riippuen syntyneen käyrän muodosta. Tässä työssä puristuskimmomoduuli määriteltiin taulukkolaskentaohjelman funktiolla (LINEST) jännitys välillä 5 % – 45 % maksimijännityksestä ja niitä vastaavista puristuman arvoista.

Kimmokertoimen laskennasta on esimerkki taulukossa 7 (näyte numero 2):

Taulukko 7. Puristuskimmokertoimen määrittämiseksi käytetyt tiedot ja tulokset pohjautuen kuvaan 33.

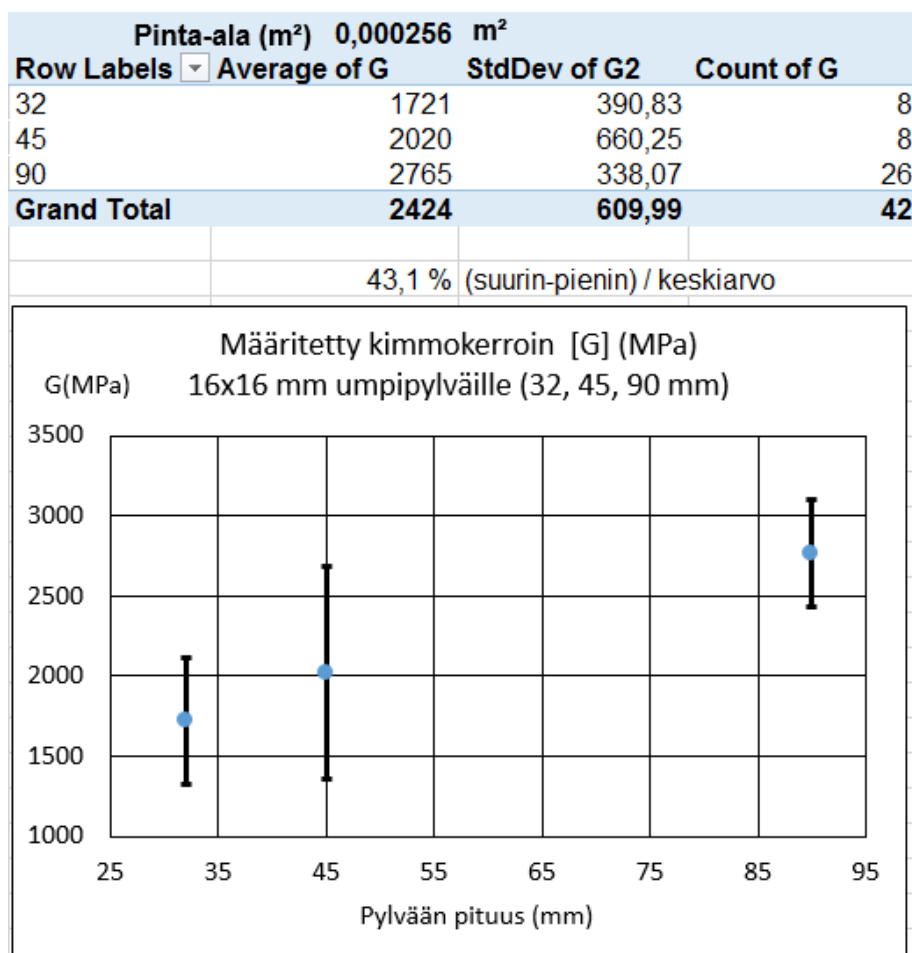
Maksimi jännityksestä	Jännitys (MPa)	Puristuma	G (MPa)
100 %	42,23	0,1644	
45 %	19,00	0,0101	1879
5 %	2,11	0,0009	
Re	27,10	0,0163	

Kimmokerroin (MPa) ei ole vakio vaan näyttää riippuvan pylvään pituudesta. Vertaamalla esimerkiksi metallien kimmokertoimiin voidaan todeta, että niiden kimmokertoimet ovat aina vakiot.

Muovipylväiden kimmokertoimia eri pylväspituuksille on kuvassa 34. Kuvassa on pylväspituudet 32, 45 ja 90 mm, joiden poikkileikkaus on 16x16 mm, ja yhteensä on 42 pylvästä.

Kimmokertoimen arvoiksi tulostetuille pylväille saatiin pisimmälle 2741 MPa (90 mm keskiarvo) ja lyhimmälle 1628 MPa (32 mm keskiarvo). Pylväille 45 mm saatiin näiden väliltä arvo 2020 MPa.

Koetulokset umpinaisista 16x16 mm pylväistä antoivat kimmokertoimiksi kuvassa 34 esitetyt tulokset.

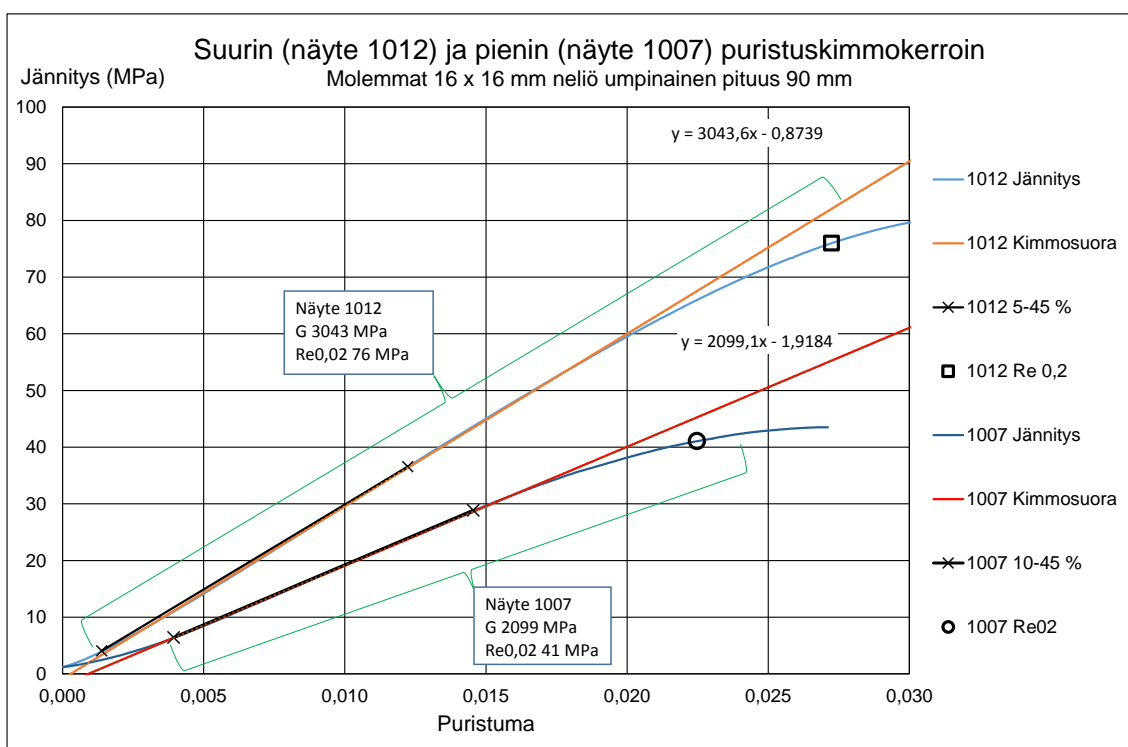


Kuva 34. Kimmokertoimet eri pylväspituuksille (poikkileikkaus umpinainen 16x16 mm).

Samanlaisten näytteiden välillä havaittiin lujuusominaisuuksien vaihtelua. Myötölujuudessa oli eroa jopa 60 %. Esimerkkeinä tästä ovat näytteet 1007 ja 1012 taulukko 8 ja kuva 35. Molemmat näytteet olivat umpinaisia ja PLA -muovista (neliömuoto 16x16 mm ja pituus 90mm).

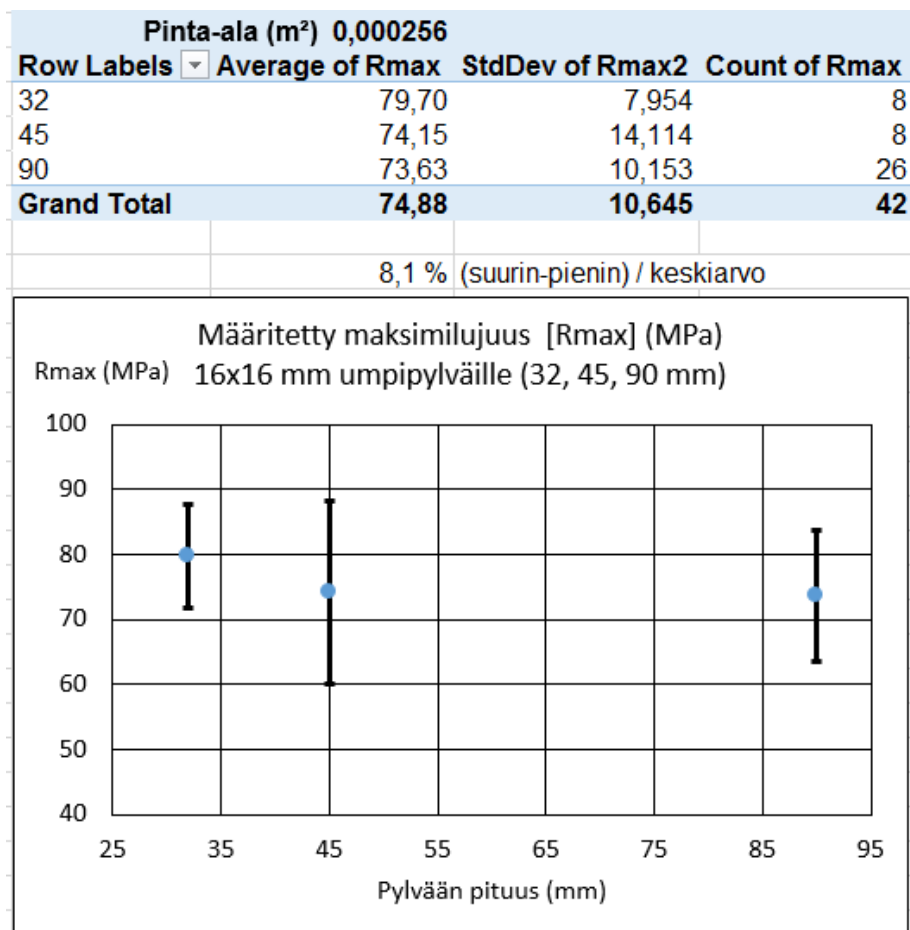
Taulukko 8. Kahden samanlaisen näytteen lujuusominaisuudet ja niiden erot.

Näyte		1007	1012	erotus	erotus %
G	MPa	2099	3044	944	36,7 %
Re_{0,2%}	MPa	41,06	75,96	35	59,6 %
R_{max}	MPa	64,16	81,21	17	23,5 %
l	mm	90	90	0	0,0 %
d □	mm	16	16	0	0,0 %
A	mm ²	256	256	0	0,0 %
m	g	30,3063	30,7973	0,49	1,6 %

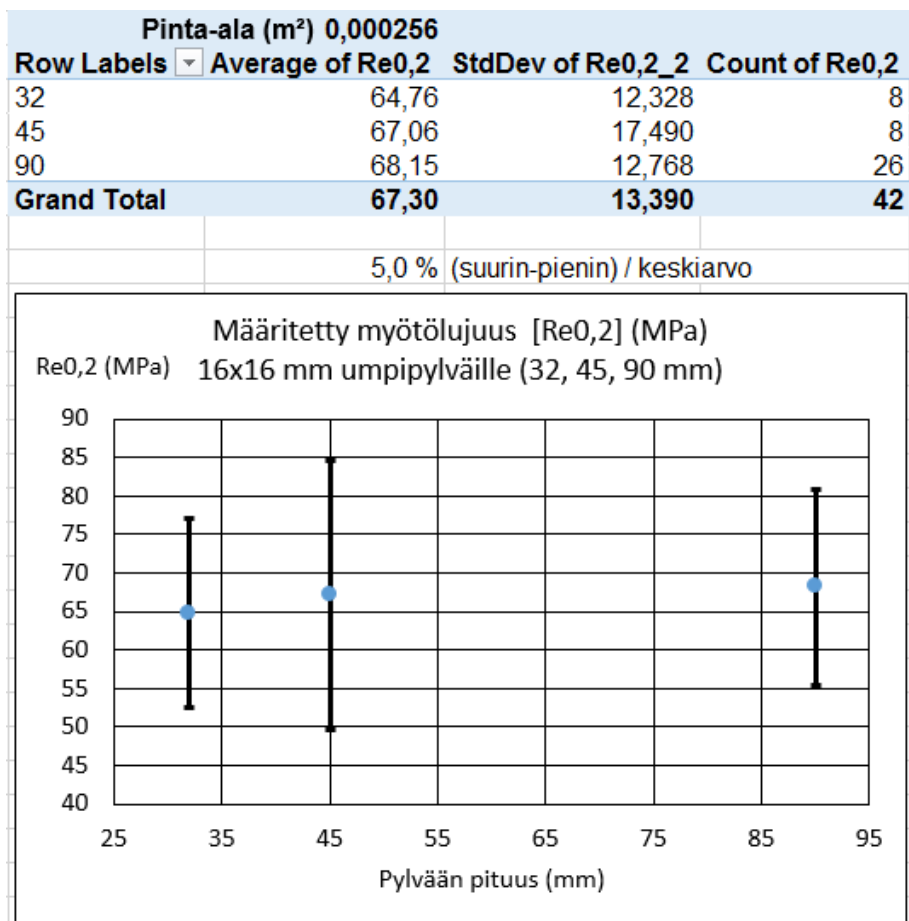


Kuva 35. Kahden samanlaisen näytteen (suurimman G = 3044 MPa ja pienimmän G = 2099 MPa) puristuskimmo kertoimet taulukon 8:n mukaan.

Pylväiden suurimman jännityksen ja myötöjännityksen riippuvuutta pylväiden pituudesta on esitetty kuvissa 36 ja 37 (42 kpl).



Kuva 36. Maksimi jännityksen (MPa) riippuvuus pylvään pituudesta (sininen piste keskiarvo ja poikkeama pystyviiva yksi keskihajonta).

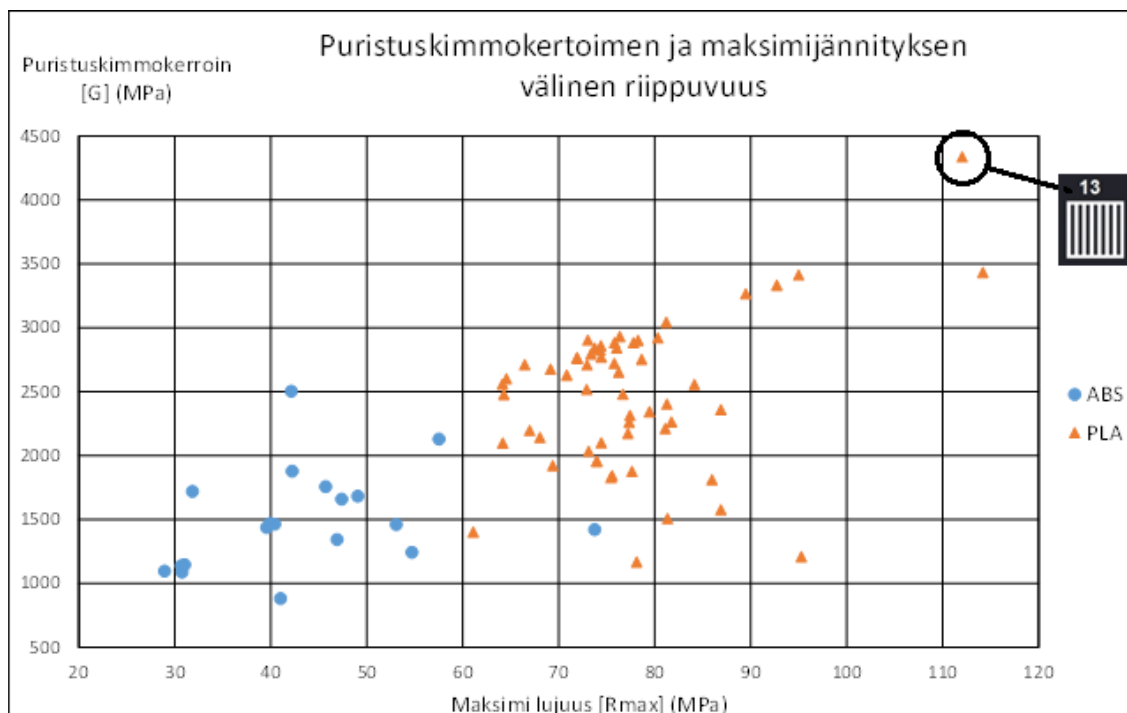


Kuva 37. Myötöjännityksen (MPa) riippuvuus pylvään pituudesta (sininen piste keskiarvo ja poikkeama pystyviiva yksi keskihajonta) ja myötölujuus (MPa).

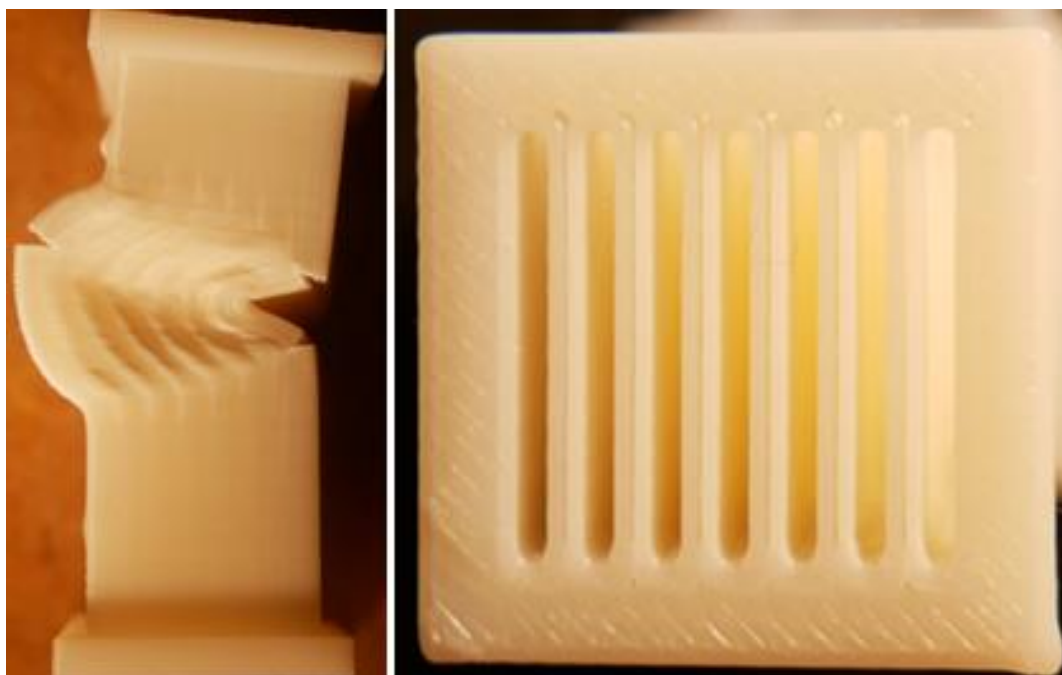
Liitteen 3 taulukon tiedoista saadaan sekä puristuskimmokerroin [G] (MPa) että maksimi lujuus [R_{max}] (MPa) (kuva 38). Maksimijännityksen kasvaessa myös kimmokerroin kasvaa.

ABS -muovin puristuskimmokerroin vaihtelee välillä 900–2500 MPa ja maksimi lujuus 30–75 MPa. Vastaavasti PLA puristuskimmokerroin vaihtelee välillä 1100–3500 MPa ja maksimi lujuus 60–95 MPa.

Poikkeava mittaustulos (puristuskimmokerroin) 4338 MPa ja (maksimi lujuus) 112 MPa saatiin muovipylvästä, jossa on viivamainen reikärakenne sisällä. Havainnekuva pylvään poikkileikkauksesta on mittauspisteeseen liitettyä. Pylvään näytenumero on 0011 ja poikkileikkauksen muoto on esitetty kuvassa 26 ja taulukossa 3 rivillä 13 (kuva 39).



Kuva 38. Puristuskimmokerroimen riippuvuus maksimi lujuudesta. Muovit ABS ja PLA. Rakennokuva 13 on kuvasta 26.



Kuva 39. Pitkittäiset raot (1x14 mm) eli lamellimainen rakenne, näytenumero on 0011. Tälle saatiin puristuskimmokerroimen suurin arvo 4338 MPa ja suurin maksimi jännitys 112 MPa kuvassa 38.

5.4 Nurjahdustulokset

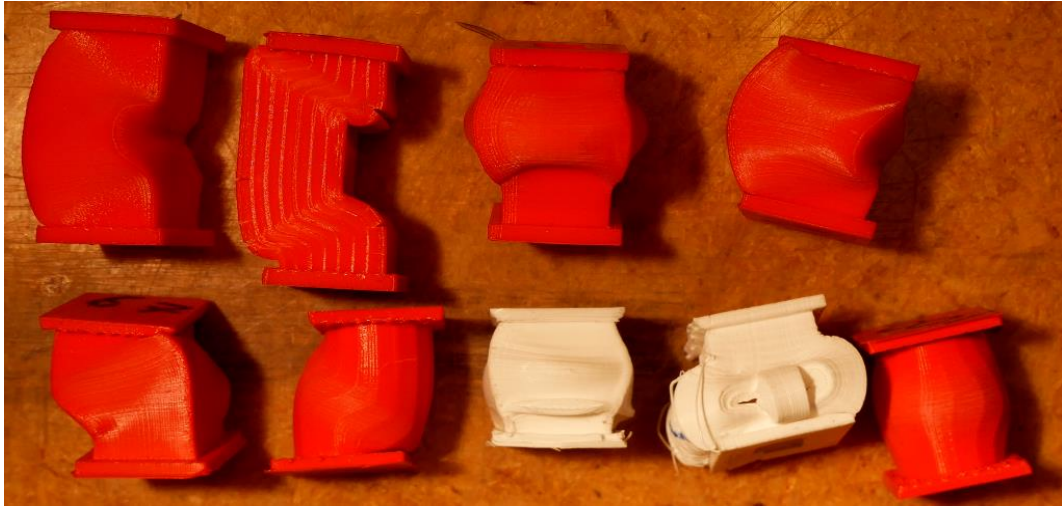
Muovipylväiden nurjahdusta tarkasteltiin Eulerin neljän nurjahdustapauksen pohjalta. Nämä nurjahdustapaukset on esitetty kohdassa 3.1. Tulokset on koottu taulukkoon 9.

Taulukko 9. Pylväiden pituudet, rajavoimat ja maksimi voimat.

		Euler 2		
Poikkileikkaus (mm)	I (mm ⁴)	μ		
15x15	4,22E-09	1		$P_n = \mu \frac{\pi^2 EI}{L^2}$
Pylvään pituus (mm)	P_n (kN)	Suurin [F_{max}] (kN)		
32	69988	24386		Ei nurjahda
45	41553	22240		Ei nurjahda
90	14216	24318		Voima ylittää nurjahdusrajoituksen

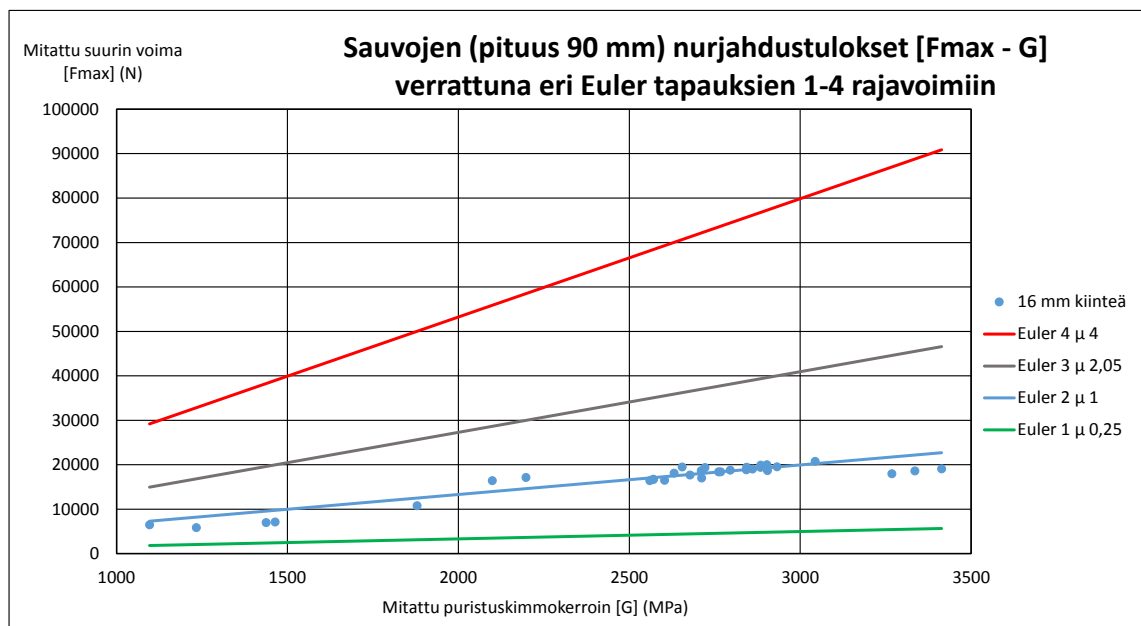
		Euler 2		
Poikkileikkaus (mm)	I (mm ⁴)	μ		
16x16	3,22E-09	1		
Pylvään pituus (mm)	P_n (kN)	Suurin [F_{max}] (kN)		
32	53403	24386		Ei nurjahda
45	31706	22240		Ei nurjahda
90	10847	24318		Voima ylittää nurjahdusrajoituksen

Tuloksena saatiin, että lyhyet pylväät (32 mm ja 45 mm) eivät nurjahda, sillä niiden nurjahduksen rajavoima on suurempi kuin mitattu maksimi voima. Kuvassa 40 esitetään muovipylväitä puristuksen jälkeen.

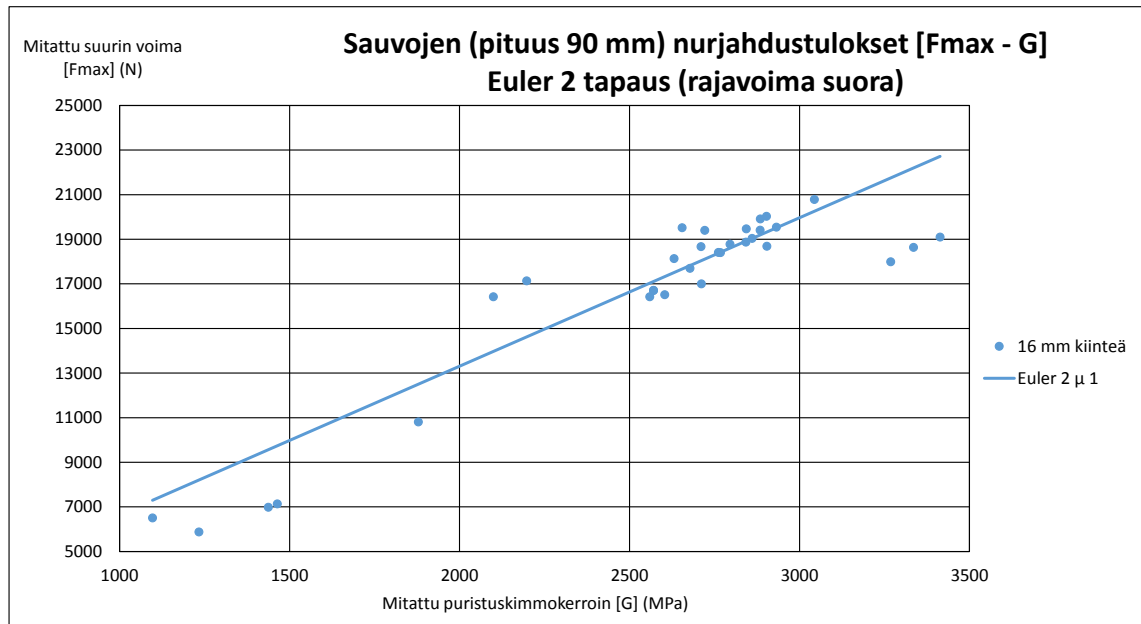


Kuva 40. Muovipylväitä kuvattuna puristuksen jälkeen. Nurjahdusta ei tapahdu lyhyillä pylväillä (32 mm ja 45 mm).

Eulerin nurjahdustapausten rajavoimasuorat ja koetulokset on esitetty kuvassa 41 ja 42. Eulerin tapaus 2 vastaa saatuja nurjahdustuloksia.



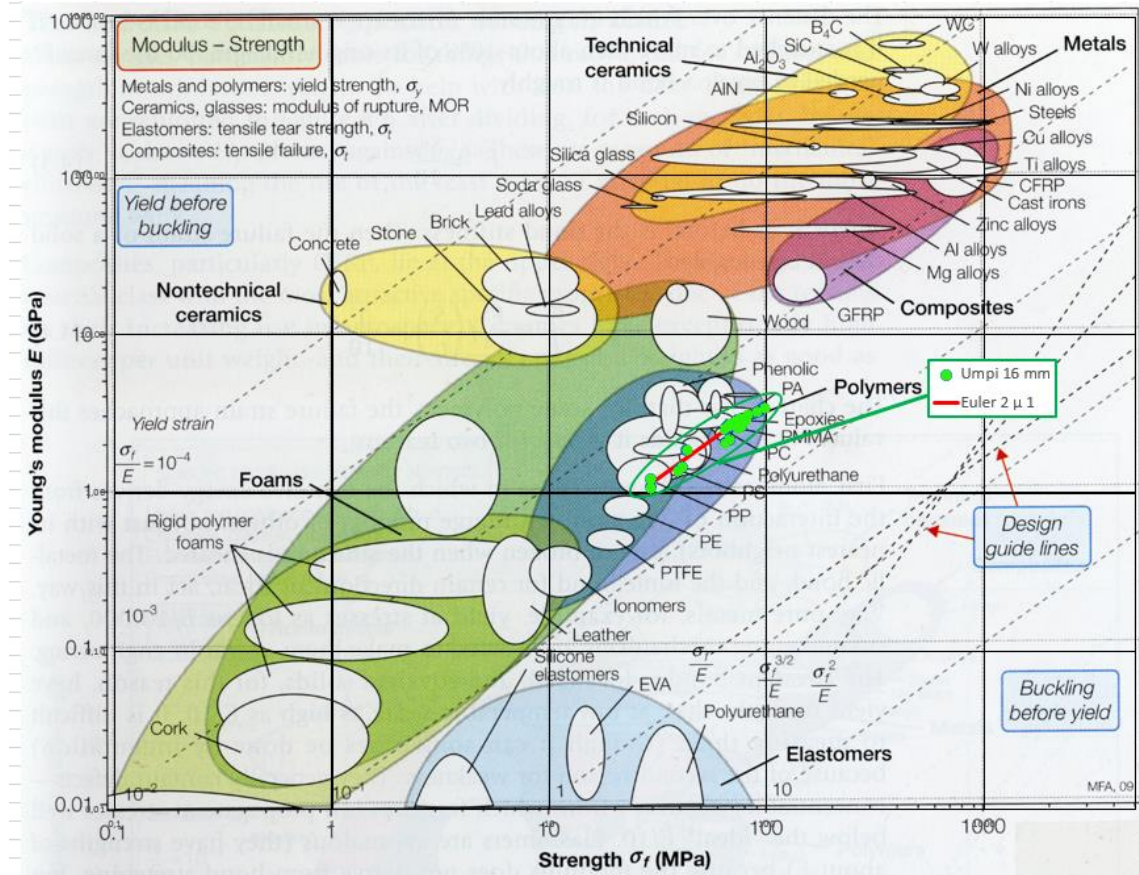
Kuva 41. Koetulosten vertailu Eulerin nurjahdustapauksiin. Saadut tulokset noudattavat Euler 2 -tapausta.



Kuva 42. Muovipylväiden (30 kpl) nurjahdustulokset.

Tuloksia täydennettiin seuraavaksi nurjahdusvoiman määrittämisellä (jäyhyysmomentti). Muovipylvään pituudella 90 mm maksimi lujuus on suurempi kuin lyhyempien pituuksien 32 mm ja 45 mm lujuudet, vaikka pitkä nurjahti ja lyhyet eivät nurjahda. Mahdollisena syynä saatuun tulokseen on tulostettujen pylväiden epätasaisen rakenne. Tämä voi johtua tulostustekniikan (epätasainen langansyöttö) epätarkkuudesta ja/tai syötettävän muovilangan ominaisuuksien epätasaisuudesta.

Kuvassa 43 on esitetty saadut 16x16 umpipylväiden testitulokset. Tulokset noudattavat graafisen esityksen polymeereille annettuja arvoja [24, s. 69].



Kuva 43. Muovipylväiden testitulokset kuvasta 42 liitettynä teoriaosan 3 kuvaan 16.

6 Tulosten arviointi

6.1 Testimenetelmien kehittäminen

Muovien lujuusominaisuuksien määrittämiseen käytettävien testimenetelmien luotettavuutta ja tarkkuutta on parannettava nykyisestä tasosta. Käytössä olevien veto- ja puristuskokeiden tulosten hajontaan vaikuttaa testikappaleiden laadun tasaisuus ja testimenetelmien luotettava toistettavuus. Tulostettavien muovikappaleiden tiheysvaihtelu ja geometrinen rakenne (infill) vaikuttaa ratkaisevasti testitulokseen. [31.] Muovimateriaalien kaupallisten nimikkeiden suuri määrä ja erilaisten tulostuslaitteiden valmistukseen

liittyvät ominaisuudet eivät edistä tulostettujen kappaleiden tasaisuutta. Tämä epätasaisuus näkyy testituloksissa. Testitulosten käytettävyys tuotteiden suunnittelussa edistäisi valmiiden kappaleiden käytettävyyttä ja vähentäisi valmistuskustannuksia, jotka syntyvät ylimääräisistä virhekustannuksista.

6.2 Tulosten käytettävyys suunnittelussa

Tulostettujen kappaleiden lujuusominaisuuksien avulla voidaan edistää valmistusmateriaalien optimaalista käyttöä. Jatkotutkimuksissa tulee keskittyä syvemmin yhteen muovimateriaaliin ja yhteen tulostuslaitteeseen. Tulostuslaitteen toimivuus materiaalin syötössä ei saa aiheuttaa epäjatkuvuuskohtia vaan langansyötön on toimittava tasaisesti koko kappaleen valmistuksen ajan. Häiriötön langansyöttö varmistaa tasalaatuisen tulostuksen ja testikappaleiden valmistuksen toistettavuuden samoilla parametreilla. Valmiiden tuotteiden lujuusvaatimusten ja käyttöolosuhteiden tunteminen ja niihin sopivan valmistustekniikan valitseminen hyödyntävät käytettävien osien tuotannollistamista.

Tulostuksessa käytettävien ohjelmistojen hallinta ja niiden tietojen siirto ovat mahdollisia kansallisesti ja kansainvälisesti. Tiedonsiirto on erityisen tärkeätä lääketieteessä, koska ihmiskehoon asennettavissa tulostettavissa osissa vaaditaan erityistä turvallisuutta, mittatarkkuutta, keveyttä ja lujuutta [40; 41]. Muodonmuutoksen seurantaan on kehitetty tarkempia kuvantamismenetelmiä, joista digitaalinen kuvakorrelaatio olisi mielenkiintoinen testimenetelmä tulostettujen muovipylväiden puristuksen seurannassa. Tällä hetkellä tätä testiä on käytetty vetokokeissa [42]. Tarkempien tulostuksessa käytettävien ohjelmistojen kehitys avaa uusia mahdollisuuksia entistä parempien ja optimoitujen rakenteiden suunnitteluun ja uusien biomateriaalien löytämiseen erityisesti lääketieteessä [43; 44; 45].

7 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä saatujen puristuskokeiden tulosten perusteella voidaan ennakoida pursottomalla 3D-tulostettujen muovipylväiden muotoilun vaikutusta nurjahduskestävyyteen. Siihen vaikuttavat muovipylväiden erilaiset poikkileikkaukset. Poikkileikkauksen ollessa umpinainen saatiin pienempiä nurjahdusjännitystuloksia kuin muovipylväällä, jossa oli reikä pylvään keskellä ja pituussuunnassa. Poikkileikkauksen ollessa lamellimainen (pylvään poikkileikkaus viivareikäinen) saatiin puristuskimmokertoimen arvoksi lähes kaksi kertaa korkeampia arvoja ABS- ja PLA -muovipylväille. Verrattaessa testitulosten arvoja kimmomoduulin ja lujuuden suhteen havaittiin niiden noudattavan teoriaosuuden graafista esitystä.

Muovipylväiden tulostuksessa syntyvä epätasainen laatu ja puristustestien epätarkkuus vaikuttivat hajontaan mittaustuloksissa. Tulostuslaitteiden käytössä esiintyi odottamattomia ongelmia. Pylväiden tulostus pursottamalla oli hidasta ja pursotuksessa käytetyn langan syöttö häiriöaltista. Tulostusajan pitkä kesto rajoitti tulostimien saatavuutta testikappaleiden valmistukseen. Pylväiden nurjahduslujuuden testaukseen käytössä olevat puristuslaitteet olivat vaikeasti kontrolloitavissa luotettavien mittaustulosten aikaansaamiseksi. Muovipylväiden asettaminen puristuspintoja vasten ennen puristusta aiheutti mittausvirhettä ja hajontaa tuloksiin. Jatkokehittämistä tarvitaan nopeampien tulostusmenetelmien saamiseksi. Tavoitteena on tulostaa erittäin lujia rakenteita ja valmistaa ne minimaalisella materiaalikäytöllä. Tämä edellyttää sisärakenteen hallintaa sekä erilaisten hybridien käytön ja lamellimaisten rakenteiden parempaa tuntemusta 3D-tulostamisessa.

Muodonmuutoksen seuranta videokameralla onnistui hyvin, ja varmempi kiinnitys ja kuvauskulma tarkentaisivat jatkossa mittaustulosten luotettavuutta. Digitaalisella kuvakorrelaatiota käyttämällä muodonmuutoksesta saataisiin tarkempaa tietoa.

Tekoälyn uudistavia mahdollisuuksia ei vielä osata arvioida mutta sen käyttöönotto tulee muuttamaan tulostuksen eri vaiheita. Tekoälyn käyttäminen diagnoosien tekemisessä nopeuttaa terveysteknologiassa tehtäviä analyyseja ja mahdollistaa etätulostuksen globaalisti.

Lähteet

- 1 Wohlers, T., Campbell, I., Diegel, O. & Kowen, J. 2018. Wohlers Report 2018: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Colorado, USA: Wohlers Associates.
- 2 Partanen, J. 2015. Ei vain tulostamista. Metallitekniikka 1/2015.
- 3 Burns, N. 2015. Product innovating using metal 3D printing. Esitelmä TTY. <<https://youtu.be/t0ZXZgOrFj8>> Viitattu 28.10.2015.
- 4 Björk, T. 2014. Koneenosien suunnittelu. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- 5 Piili, H. & Salminen, A. 2019. LUT-raportti <<https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159972/L%c3%a4ht%c3%b6kohdat%203D-tulostuksen%20opetukseen%20ja%20koulutukseen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Viitattu 11.12.2019.
- 6 Piili, H. 2018. Metallin 3D-tulostuksen teolliset sovellukset. Esitelmä 30.10.2018, Vaasa. <<https://www.merinova.fi/wp-content/uploads/2018/10/Metallin-3D-tulostuksen-teolliset-sovellukset-Vaasa-LUT-Piili-FV.pdf>> Viitattu 15.12.2019.
- 7 SFS-EN ISO/ ASTM 52900: 2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia.
- 8 Partanen, J. 2014. 3D-tulostuksen teknologiat. Esitelmä. <http://www.konepajamiehet.org/Jouni_Partanen.pdf> 5/2014. Messukeskus Helsinki. Viitattu 11.12.2019.
- 9 Vihinen, J. 2015. 3D tulostustekniikat. Esitelmä. TTY. <https://www.vtt.fi/files/services/mav/3D%20-tulostustekniikat_Vihinen.pdf> 28.10.2015. Viitattu 14.12.2019.
- 10 Lehtinen, P. 2017. Direct digital manufacturing: projection stereolithography and incremental sheet forming. Aalto University publication series. Dissertations 178/2017. <<https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/28067?show=full>> Viitattu 13.10.2017.
- 11 WU M. B. 2015. Recent advances in 3D printing or biomaterials, Journal of biological Engineering 9 Article number 4. Viitattu 10.12.2019.
- 12 Jokinen, A. & Riipinen T. 2016. Lisäävän valmistuksen keskeiset materiaalit ja niiden ominaisuudet. Espoo: Tutkimusraportti VTT-R-039977-16. Viitattu 9.12.2019.

- 13 EOS LaserProFusion. 2019 <<https://youtu.be/4AdPrfcMUdQ>> Viitattu 7.1.2020.
- 14 Viitanen ym.2016. Materiaalia lisäävän valmistuksen (3D tulostus) kaasu- ja hiukkaspäästöt eri työvaiheissa. Helsinki: Unigrafia.
<<http://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131891/Materiaalia%20lis%c3%a4%c3%a4v%c3%a4n%20valmistuksen%20%283D-tulostus%29%20kaasu-%20ja%20hiukkasp%c3%a4%c3%a4st%c3%b6t%20eri%20ty%c3%b6vaiheissa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Viitattu 7.1.2020
- 15 Työterveyslaitos. 2016. Malliratkaisu 3D-tulostuksen kemikaaliturvallisuus työpaikoilla. <<https://mb.cision.com/Public/5751/2134887/86ab1364ec6d8361.pdf>> Viitattu 20.12.2019.
- 16 Ultimaker. 2019. Introducing the Ultimaker S5 Pro Bundle <<https://youtube.be/QeiJPYGxTxc>> Viitattu 27.11.2019.
- 17 Laitinen, T. 2015. VTT <<https://docplayer.fi/14855097-Metallitulostuksen-materiaalit.html>> (Päivitetty Gartner Hype Cycle 2018). Viitattu 3.12.2019.
- 18 Nyman, H. & Poutasuo, T. 2004. Muovikirja - Arkitavaraa ja designesineitä, s. 210. Helsinki: WSOY. Viitattu 25.11.2019.
- 19 Tina M. O. Department of Chemistry and Chemical Biology Baker Laboratory. Cornell University Ithaca New York 11.1.1999. Viitattu 25.11.2019.
- 20 ABSplus materiaalikela <https://www.plot-it.co.uk/p/stratasys_p430_absplus_ivory_cartridge_340_21200> Viitattu 10.11.2019.
- 21 Varadharajan Murali Manoj. 2013. Optimization Of Structures Shape and weight optimization of structural members, Thesis 2013 Hochschule Ostwestfalen Lippe University, Germany. Viitattu 11.11.2019.
- 22 Telko. 2016. Käyttöturvallisuustiedote. Palosuojatut muovit. <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1793567/FI/Ladattavat_dokumentit/Telko%20-%20Palosuojatut%20muovimateriaalit%202018.pdf> Viitattu 9.10.2019.
- 23 Stratasys uPrint SE Plus vs 3DS CubePro Trio. 2015 <https://www.youtube.com/watch?v=_XMxlkNwHlw> Viitattu 4.1.2020.
- 24 Ashby, Michael F. 2011. Materials Selection in Mechanical Design. BH USA: Elsevier.
- 25 Laakko, Timo.1998. Tuotteen 3D-CAD-suunnittelu. Helsinki: WSOY.

- 26 Raukola, J. 2019. Wärtsilä. The effect of 3D printing on production. Esitelmä 3.12.2019. Lappeenranta. <https://mfg40.fi/wp-content/uploads/2019/12/W%C3%A4rt_sil%C3%A4-LUT-AM-Seminar-3.12.2019.pdf> Viitattu 2.1.2020.
- 27 Tutkijat aikovat valmistaa tekoelimiä 3d-printterillä. 2017. Toimittaja Raeste, J-P. Julkaisu 23.1.2017. <<https://www.hs.fi/talous/art-2000005056625.html>> Viitattu 15.12.2019.
- 28 Karhunen, J., Lassila, V., Pyy S. & Ranta. A., 2017. Lujusoppi. Helsinki: Unigrafia Oy.
- 29 Pennala, E. 2002. Lujusopin perusteet. Helsinki: Otatieto.
- 30 Farbman, D. & McCoy, C. 2016. Material testing of 3D Printed ABS and PLA samples to guide mechanical design. Conference MSCE2016-8668 27.6.2016. USA Virginia, Mechanical Properties ABS and PLA <https://www.researchgate.net/publication/308709141_Materials_Testing_of_3D_Printed_ABS_and_PLA_Samples_to_Guide_Mechanical_Design> Viitattu 6.11.2019.
- 31 Socie, D. 2015. Analytical Strength Model for 3D printed parts. Research Paper. Aalto yliopisto. Viitattu 10.10.2019
- 32 Cumini, A. & Katajisto J. 2017. Polymeerimateriaalien tulostaminen ja testaaminen. Tamk Journal. <<http://tamkjournal.tamk.fi/polymeerimateriaalien-tulostaminen-ja-testaaminen/>> Viitattu 4.1.2020.
- 33 Seppälä, J. 2005. Polymeeritekniikan perusteet. Espoo: Otatieto.
- 34 Törmälä, P.1983. Polymeeritiede ja muovitekniikka. Espoo: Otakustantamo.
- 35 Lindroos, V., Sulonen M., Veistinen, M. 1986. Uudistettu Miekko-ojan Metallioppi. Helsinki: Otava.
- 36 Standards by ISO/TC 261 Additive manufacturing <<https://www.iso.org/committee/629086/x/catalogue/>> Viitattu 20.11.2020.
- 37 Verkkodokumentti: uPrint SE Plus Mechanical Properties. 2017. Viitattu 11.11.2019.
- 38 Wavewash cleaning agent <<https://www.rnd-tech.com/shop/product/ecoworks-tablets-cleaning-agent-case-of-24/155>> Viitattu 25.11.2019.
- 39 Ultimaker3 Specification sheet. 2016. <<https://ultimaker.com/download/21471/Ultimaker%20%20Extended%20specification%20sheet.pdf>> Viitattu 25.11.2019.

- 40 Kantareddy, S.N.R. 2016. Saving Weight with Metallic Lattice Structures: Design Challenges With A Real-World Example. Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27 Annual International Solid Freedom Fabrication Symposium- An Additive manufacturing Conference.
- 41 Roopavath, U. K. 2019. Optimization of extrusion based ceramic 3D printing process for complex bony designs
<<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0264127518308608?token=3076AA0187900FCF93A700AB507CE4B9C778C2B0B4C73737758164CEC0753BC797EA7211FDAFA0F6E72B8035B605C445>> Viitattu 10.11.2019.
- 42 Hokka, M. 2016. Digitaalinen kuvakorrelaatio, DIC. TTY. Muovi 4/16 s. 30–31.
- 43 3D Printing - New business opportunities.2015. Dr Ir. Bart Van der Schueren
<<https://www.youtube.com/watch?v=uuNBbmOIBhs>> Viitattu 28.10.2015.
- 44 McAlpine, K. 3D printing 100 times faster with light Michigan Engineering, Stereolitografian tulevaisuus artikkeli.Julkaisu 11.1.2019 <<https://news.engin.umich.edu/2019/01/3d-printing-100-times-faster/>> Viitattu 30.11.2019.
- 45 Cabrera, D. 2016. Biobots CEO Danny Cabrera. Julkaisu 12.12.2016
<<https://www.techrepublic.com/article/how-biobots-5k-3d-bioprinter-could-make-doctors-and-medicines-more-effective/>> Viitattu 25.10.2019.

Ultimaker2 Simple Manual. Lehtinen, J. 17.9.2014

ULTIMAKER²
SIMPLE MANUAL



CREATED FOR ULTIMAKER² USERS

2014

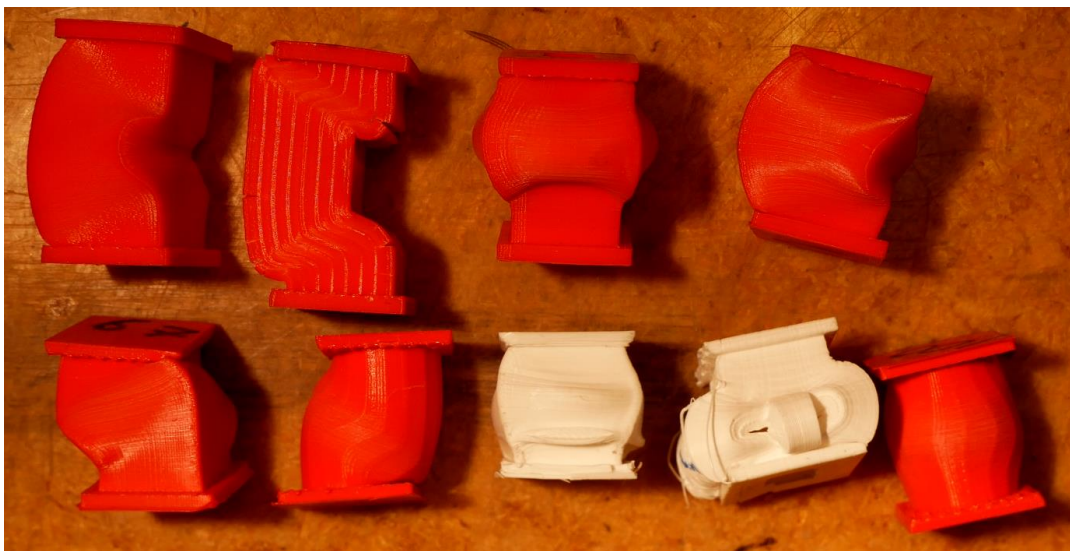
(PAGES 13)

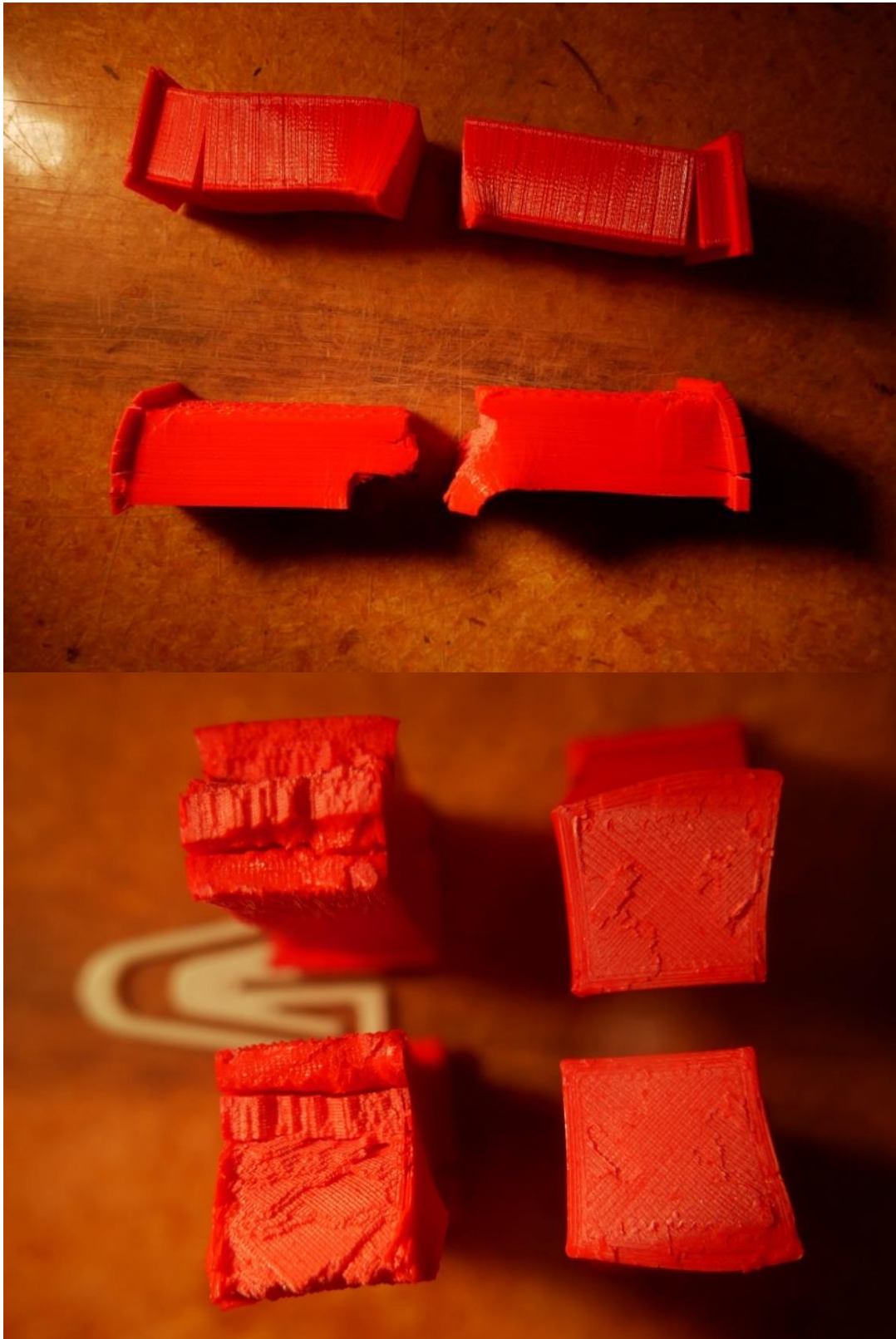
<https://drive.google.com/file/d/1ZoIG9xNBMAg2kS_-GvO1kk9sDBUNLg7d/view?usp=sharing>

Videoita ja kuvia puristustesteistä

Videoita: https://youtu.be/4zcmM_fxx5Y

Kuvia puristustesteistä:





3D-tulostettujen pylväiden mittaustuloksia

Numero	G (MPa)	Puristuskimmokerroin		Jännitys [R] (MPa)		Puristuma [ε] ()		Pinta-ala (mm²)		Pituus L (mm)	Paino m (g)	Tiheys ρ (kg/m³)	Muovi	Tuotustus suunta	
		R _{max}	Re	5 % R _{max}	45 % R _{max}	e R _{max}	e R _{0,2}	Ulko	Reikä / reiät						Todellinen [A] (m²)
2	1879	42,227	27,099	2,111	19,002	0,164	0,016	0,001	0,010	0,010	45	10,9456	950	abs	pysty
3	2315	77,422	73,751	3,871	34,840	0,040	0,001	0,001	0,015	0,015	45	16,6280	1443	pla	pysty
4	2143	68,021	66,155	3,401	30,609	0,037	0,033	0,001	0,014	0,014	45	10,7588	1245	pla	pysty
6	1421	73,738	63,924	7,374	40,556	0,067	0,050	0,007	0,031	0,031	45	10,9930	954	abs	pysty
7	1461	53,073	40,346	2,654	23,883	0,208	0,029	0,001	0,016	0,016	45	10,1246	1172	abs	pysty
8	883	41,016	25,329	4,102	22,559	0,324	0,030	0,004	0,025	0,025	45	10,8768	944	abs	pysty
10	2504	42,135	38,501	4,214	23,174	0,054	0,030	0,003	0,018	0,018	45	8,5277	987	abs	pysty
11	4338	112,032	103,841	5,602	50,414	0,034	0,026	0,001	0,012	0,012	45	7,9915	1124	pla	pysty
12	1343	46,908	38,695	4,691	25,800	0,054	0,031	0,003	0,019	0,019	45	10,5262	1130	abs	pysty
13	1244	54,688	32,708	2,734	24,609	0,338	0,028	0,002	0,020	0,020	45	10,0473	1163	abs	pysty
14	1721	31,833	31,683	3,183	22,283	0,019	0,020	0,001	0,012	0,012	90	6,1762	1144	abs	pysty
15	1138	30,667	27,158	1,533	15,333	0,037	0,026	0,001	0,013	0,013	90	17,2713	853	abs	pysty
16	1577	86,875	64,578	8,688	47,781	0,664	0,043	0,005	0,030	0,030	32	16,2839	1988	pla	pysty
17	1660	47,379	40,279	4,738	26,059	0,042	0,026	0,003	0,016	0,016	90	12,6381	968	abs	pysty
18	1097	28,933	24,656	2,893	15,913	0,038	0,024	0,002	0,014	0,014	90	16,7936	829	abs	pysty
19	1088	30,756	26,594	3,076	16,916	0,039	0,026	0,003	0,015	0,015	90	12,8102	633	abs	pysty
20	1469	39,889	34,302	3,989	21,939	0,038	0,025	0,003	0,015	0,015	90	15,0731	958	abs	pysty
22	2361	86,875	76,946	4,344	39,094	0,040	0,034	0,001	0,016	0,016	45	16,6467	1445	pla	pysty
23	2568	84,115	81,412	4,206	37,852	0,038	0,034	0,001	0,014	0,014	45	12,9706	1501	pla	pysty
24	2174	77,198	76,896	3,860	34,739	0,038	0,036	0,000	0,014	0,014	45	13,9553	1498	pla	pysty
25	3335	92,708	86,955	4,635	41,718	0,034	0,028	0,001	0,012	0,012	90	29,4538	1628	pla	pysty
26	3268	89,475	82,416	4,474	40,264	0,034	0,027	0,001	0,012	0,012	90	29,2015	1614	pla	pysty
27	1438	39,555	33,799	1,978	17,800	0,045	0,025	0,001	0,012	0,012	90	17,1033	1075	abs	pysty
28	1464	40,404	34,387	2,020	18,182	0,048	0,025	0,001	0,012	0,012	90	17,1541	1079	abs	pysty
29	2100	74,427	72,304	3,721	33,492	0,040	0,036	0,001	0,015	0,015	45	9,0590	1048	pla	pysty
30	1683	49,046	42,324	2,452	22,071	0,042	0,027	0,001	0,013	0,013	90	16,0772	1022	abs	pysty
31	2518	72,891	72,692	3,645	32,801	0,031	0,030	0,000	0,012	0,012	45	12,0760	1048	pla	vaaka
32	2825	74,305	73,398	3,715	33,437	0,030	0,028	0,001	0,011	0,011	45	9,6854	1070	pla	vaaka
33	3434	114,182	111,730	5,709	51,382	0,038	0,034	0,001	0,014	0,014	45	12,8595	1488	pla	pysty
34	2921	80,313	79,625	4,016	36,141	0,031	0,029	0,000	0,011	0,011	45	9,4013	1088	pla	pysty
36	1828	75,430	74,730	3,771	33,943	0,045	0,042	0,000	0,017	0,017	45	11,8048	1025	pla	vaaka
37	2754	78,633	78,334	3,932	35,385	0,031	0,030	0,000	0,012	0,012	45	12,0519	1046	pla	vaaka
38	1955	73,957	72,242	3,698	33,281	0,043	0,038	0,001	0,016	0,016	45	9,6999	1072	pla	vaaka
39	2480	64,271	63,502	6,427	32,135	0,030	0,027	0,001	0,011	0,011	45	8,5730	992	pla	pysty
40	2770	74,427	72,398	3,721	33,492	0,032	0,028	0,000	0,011	0,011	45	9,1725	1062	pla	pysty
41	1955	73,957	72,242	3,698	33,281	0,043	0,038	0,001	0,016	0,016	32	9,7778	1520	pla	vaaka
42	1234	29,245	29,189	1,462	13,160	0,026	0,026	0,001	0,010	0,010	90	9,7778	540	pla	vaaka
43	1842	75,547	75,677	3,777	33,996	0,043	0,042	-0,001	0,017	0,017	45	12,1976	1059	pla	pysty

Puristuskimmokerroin		Jännitys [R] (MPa)		Puristuma [ε] (‰)		Pinta-ala (mm²)		Pituus L (mm)	Paino m (g)	Tiheys ρ (kg/m³)	Muovi	Tulostus suunta					
Numero	G (MPa)	R _{max}	Re	5 % R _{max}	45 % R _{max}	e R _{max}	e Re _{0,2}						e 5 % R _{max}	e 45 % R _{max}	Ulko	Reikä / reiät	Todellinen [A] (m²)
44	2034	73,112	71,619	3,656	32,900	0,041	0,037	0,000	0,015	256	0	0,000201	45	9,3788	1037	pla	pysty
45	1147	31,026	27,626	1,551	13,962	0,037	0,026	0,001	0,012	256	64	0,000068	90	4,9783	810	abs	pysty
47	1757	45,700	41,176	4,570	25,135	0,034	0,025	0,002	0,014	177	133	0,000044	90	4,9618	1253	abs	pysty
48	2130	57,517	50,412	2,876	25,883	0,041	0,025	0,001	0,012	256	133	0,000123	90	14,7502	1330	abs	pysty
65	2481	76,684	76,464	7,668	42,176	0,035	0,034	0,004	0,035	256	kesto linja	0,000158	45	10,8655	1528	pla	pysty
66	2404	81,258	76,201	8,126	44,692	0,046	0,038	0,007	0,022	256	0	0,000256	45	16,4884	1431	pla	pysty
67	1921	69,359	62,869	6,936	38,148	0,131	0,038	0,006	0,023	256	0	0,000256	32	11,3557	1385	pla	pysty
68	1876	77,629	71,790	3,881	34,933	0,346	0,044	0,004	0,021	256	0	0,000256	32	11,4576	1399	pla	pysty
99	2345	79,433	75,649	7,943	43,688	0,045	0,037	0,006	0,021	201	0	0,000201	32	9,4859	1474	pla	pysty
100	2262	77,339	74,299	7,734	42,537	0,044	0,038	0,006	0,022	201	0	0,000201	32	9,4954	1476	pla	pysty
103	1168	78,098	46,283	7,810	42,954	0,490	0,045	0,010	0,041	256	0	0,000256	32	10,1744	1242	pla	pysty
104	1208	95,258	46,529	4,763	42,866	0,578	0,043	0,006	0,039	256	0	0,000256	32	9,8730	1205	pla	pysty
105	1813	85,964	49,502	4,298	38,684	0,504	0,031	0,003	0,023	201	0	0,000201	32	8,7125	1354	pla	pysty
111	2211	81,083	78,468	8,108	44,596	0,048	0,042	0,007	0,024	256	64	0,000192	32	9,3738	1526	pla	vaaka
112	1403	61,099	49,898	6,110	33,604	0,125	0,040	0,006	0,026	256	64	0,000192	32	7,8254	1274	pla	pysty
113	2265	81,746	80,147	8,175	44,960	0,046	0,041	0,006	0,023	201	50	0,000151	32	7,7488	1606	pla	vaaka
1000	2711	66,434	61,716	6,643	36,538	0,032	0,025	0,003	0,014	256	0	0,000256	90	29,8156	1294	pla	pysty
1001	2761	71,918	66,387	7,192	39,555	0,035	0,027	0,003	0,015	256	0	0,000256	90	30,0565	1305	pla	pysty
1002	2842	73,738	68,918	7,374	40,556	0,034	0,028	0,004	0,016	256	0	0,000256	90	30,2190	1312	pla	pysty
1003	2904	73,020	66,049	7,302	40,161	0,033	0,025	0,002	0,014	256	0	0,000256	90	30,0121	1303	pla	pysty
1004	2767	71,891	66,194	7,189	39,540	0,034	0,027	0,004	0,016	256	0	0,000256	90	29,8084	1294	pla	pysty
1005	1507	81,332	69,313	8,133	44,733	0,070	0,049	0,007	0,031	256	0	0,000256	90	30,6737	1331	pla	pysty
1006	2884	75,813	70,155	7,581	41,697	0,034	0,027	0,003	0,015	256	0	0,000256	90	30,2452	1313	pla	pysty
1007	2099	64,156	41,063	6,416	28,870	0,050	0,022	0,004	0,015	256	0	0,000256	90	30,3063	1315	pla	pysty
1008	2860	74,383	68,333	7,438	40,911	0,035	0,026	0,003	0,015	256	0	0,000256	90	30,0407	1304	pla	pysty
1009	2932	76,348	70,614	7,635	41,991	0,034	0,027	0,004	0,016	256	0	0,000256	90	30,3095	1316	pla	pysty
1010	2795	73,363	67,272	7,336	40,350	0,035	0,027	0,003	0,015	256	0	0,000256	90	30,1351	1308	pla	pysty
1011	2678	69,145	64,089	3,457	31,115	0,034	0,026	0,001	0,012	256	0	0,000256	90	29,8110	1294	pla	pysty
1012	3044	81,207	75,960	4,060	36,543	0,033	0,027	0,001	0,012	256	0	0,000256	90	30,7973	1337	pla	pysty
1013	2843	76,043	71,353	7,604	41,824	0,034	0,028	0,003	0,015	256	0	0,000256	90	30,4425	1321	pla	pysty
1014	2884	77,797	72,953	3,890	35,009	0,034	0,027	0,001	0,012	256	0	0,000256	90	30,4726	1323	pla	pysty
1015	2710	72,949	68,170	3,647	32,827	0,035	0,028	0,001	0,012	256	0	0,000256	90	30,0505	1304	pla	pysty
1020	2631	70,836	69,879	3,542	31,876	0,032	0,030	0,002	0,013	256	0	0,000256	90	29,4983	1280	pla	pysty
1021	3413	94,991	93,973	4,750	42,746	0,033	0,031	0,002	0,014	256	0	0,000201	90	29,7453	1644	pla	vaaka
1022	2560	64,152	62,288	6,415	32,076	0,032	0,029	0,004	0,015	256	0	0,000256	90	29,1949	1267	pla	vaaka
1023	2197	66,957	62,700	6,696	43,522	0,041	0,032	0,004	0,021	256	0	0,000256	90	29,5966	1285	pla	vaaka
1024	2903	78,258	74,983	7,826	43,042	0,034	0,030	0,004	0,016	256	0	0,000256	90	29,8320	1295	pla	vaaka
1025	2655	76,250	76,016	3,813	34,313	0,033	0,032	0,002	0,014	256	0	0,000256	90	29,7616	1292	pla	vaaka
1026	2721	75,781	74,542	7,578	41,680	0,034	0,031	0,004	0,017	256	0	0,000256	90	29,6706	1288	pla	vaaka
1027	2603	64,535	61,731	6,454	35,494	0,032	0,027	0,003	0,015	256	0	0,000256	90	29,2750	1271	pla	vaaka