



3D-TULOSETUN KERROSLEVYINSERTIN SUUNNITTELU

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2024

Tero Iljinen

Tarkastajat: Dosentti Harri Eskelinen

TkT Ilkka Poutiainen

Ohjaaja: DI Marko Lavila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Tero Iljinen

3D-tulostetun kerroslevyinsertin suunnittelu

Konetekniikan diplomityö

2024

68 sivua, 44 kuvaa, 6 taulukkoa ja 8 liitettä

Tarkastajat: Dosentti Harri Eskelinen ja TkT Ilkka Poutiainen

Avainsanat: lisäävä valmistus, 3D-tulostus, kerroslevyinsertti, vetokoe

Tässä diplomityössä tutkittiin lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistettujen kerroslevyinserttien lujuusominaisuuksia kerroslevyissä ja niitä verrattiin markkinoilla olevaan inserttiin. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, voidaanko kerroslevyinsertin valmistuksessa hyödyntää lisäävän valmistuksen muotovapauksia. Tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuuskatsauksen teoriapohjaa ja kokeellista tutkimusta.

Tutkimuksessa käytettyjen lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistettujen inserttien suunnittelu aloitettiin jakamalla osiin insertin ominaisuusvaatimukset onnistuneesta lujasta kiinnittymisestä rakenteeseen. Seuraavaksi näihin ominaisuusvaatimusten osiin kehitettiin luovia ratkaisuja aivoriihen avulla, joita yhdistelemällä saatiin kekseliäitä kokonaisuuksia. Tutkimuksessa kehitetyt insertit valmistettiin laserjauhepetimenetelmällä.

Tämän diplomityön tulosten johtopäätöksenä oli, että lisäävää valmistusmenetelmää voidaan hyödyntää kerroslevyinserttien valmistuksessa, kun rakennetta ei voida perinteisillä inserteillä liittää. Tämän diplomityön lopuksi ehdotetaan jatkotutkimusaiheita, joilla tulostettujen inserttien laajempaa hyödynnettävyyden potentiaalia voidaan selvittää.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Tero Iljinen

Design of the 3D-printed sandwich panel insert

Master's thesis

2024

68 pages, 44 figures, 6 tables and 8 appendices

Examiners: Docent Harri Eskelinen and Ilkka Poutiainen, D. Sc. (Tech.)

Keywords: additive manufacturing, 3D-printing, sandwich panel insert, tensile testing

The aim of this master's thesis was to study strength properties of sandwich panel inserts manufactured using additive manufacturing. The inserts were glued to the sandwich panel, and compared to commercially available sandwich panel inserts. The purpose of the study was to determine whether the manufacturing of the sandwich panel insert could benefit from the design freedom provided by additive manufacturing. Literature review and experimental study were used as research methods.

The design of the inserts manufactured using additive manufacturing in the study began by breaking down the requirements for successful strong attachment of the insert to the structure. Next, creative solutions were developed for these sections of the requirements through brainstorming sessions, combining them to achieve innovative solutions. The developed inserts in the study were manufactured using the laser powder bed fusion method.

As a conclusion of this master's thesis, it was found that additive manufacturing can be utilized in the production of sandwich panel inserts when the structure cannot be assembled using traditional inserts. Furthermore, suggestions for further research topics are provided to explore the broader potential applicability of the developed inserts.

KIITOKSET

Haluan kiittää diplomityöni toimeksiantajaa Etteplanin lisäävän valmistuksen osastoa sekä Patrian Mika Mustakangasta diplomityön aiheesta. Kiitos myös muille Patrian tiimin työntekijöille, jotka olivat osana työn etenemisessä. Diplomityö tehtiin osana Etteplanin ja Patrian osallistumaa FAME:n (Finnish Additive Manufacturing Ecosystem) DREAMS -projektia, jossa luodaan edellytyksiä lisäävän valmistuksen käytölle vaativissa teknologisissa kohteissa.

Lisäksi haluan kiittää Etteplanin lisäävän valmistuksen osaston asiantuntijaa Jania avusta eri ohjelmistojen kanssa sekä yleisistä työn etenemiseen liittyvistä neuvoista. Kiitos Etteplanin puolelta työtä ohjanneelle Markolle pohdiskeluavusta ja avusta johdonmukaisen esityksen luomisessa sekä hyvistä kommentteista ja neuvoista työn tarkastusvaiheessa. Haluan myös kiittää koulun puolelta työtä ohjannutta ja tarkastanutta Ilkka Poutiaista saamaan työlle alku ja oikea suunta. Sekä erityiskiitos puolisololleni työn oikoluvusta ja erityisesti kiitos tuesta ja mahdollisuudesta suorittaa tutkinto lapsiperhearjen keskellä.

Suhtauduin diplomityön tekoon kuin mihin tahansa muuhun koulutehtävään, mikä osaltansa auttoi kestäämään työn aiheuttamaa raskautta. En luonut itselleni paineita arvosanasta, vaan paineet kertyivät tehtävän ymmärtämisestä. Tehtävän ymmärtämisen vuoksi osaavalla ohjaamisella oli tärkeä merkitys. Merkittävin asia, joka paransi jaksamista ja motivaatiota työtä kohtaan olivat kehut, joita työn edetessä sain asiakkaan ja koulun suunnalta.

Itselleni tutkinnon suorittaminen työn ja lapsiperhearjen ohella on ollut haastavaa fyysisen ja henkisen jaksamisen puolesta. Tässä puolison tuen lisäksi ammattikorkeakoulun aikaiset kaverit, jotka ovat samaan aikaan suorittaneet maisterivaihetta, ovat auttaneet jaksamaan jaksamalla saman kokemuksen.

Siilinjärvellä 2.4.2024

Tero Iljinen

LYHENNELUETTELO

DMLM	Suora metallin lasersulatus (Direct Metal Laser Melting)
EBF3	Vapaa elektronisuihkumuodostus (Electron Beam Free Form Fabrication)
EBM	Elektronisuihkusulatus (Electron Beam Melting)
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EDM	Sähköpurkauskoneistus (Electrical Discharge Machining)
LWD	Laser lankasuorakerrostus (Laser Wire Deposition)
NPJ	Nanopartikkeli suihkutus (Nano Particle Jetting)
SLM	Valikoiva lasersulatus (Selective Laser Melting)
WAAM	Lankasyöttöinen valokaarisuorakerrostus (Wire Arc Additive Manufacturing)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	9
1.1	Tutkimusongelma ja tutkimuskysymys.....	9
1.2	Tutkimuksen tavoitteet.....	9
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	9
1.4	Rajaus.....	10
2	Kirjallisuuskatsaus.....	11
2.1	Komposiittikerroslevy.....	11
2.2	Kerroslevyinsertit.....	14
2.3	Metallin lisäävä valmistus.....	16
2.3.1	Lisäävän valmistuksen perusteet	16
2.3.2	Valmistusmenetelmät.....	16
2.3.3	Materiaalit.....	20
2.3.4	Lisäävän valmistuksen edut ja heikkoudet	22
2.4	Lisäävän valmistuksen suunnittelu	23
2.5	Testimenettelyt.....	28
3	Materiaalit ja menetelmät	29
3.1	Kerroslevyinsertin kehitys	29
3.1.1	Aivoriihi ja ideoiden valinta	29
3.1.2	Mallintaminen.....	33
3.1.3	Materiaalin valinta	33
3.1.4	Liiman virtauksen testaus	34
3.2	Testikappale ja insertit	34
3.3	Vetokokeet	39
3.3.1	Tason normaalisuuntainen vetokoe	39
3.3.2	Tasonsuuntainen vetokoe.....	40

4	Tulokset ja tulosten tarkastelu	42
4.1	Tason normaalisuuntaiset vetokokeet	42
4.2	Tasonsuuntaiset vetokokeet	48
4.3	Vertailu.....	54
4.3.1	Tulosvertailu	55
4.3.2	Ominaisuuksien vertailu	58
5	Johtopäätökset	60
6	Yhteenveto.....	63
	Lähteet	64

Liitteet

Liite 1. Ensimmäisen aivoriihen vaatimuksen 1 ideat

Liite 2. Ensimmäisen aivoriihen vaatimuksen 2 ideat

Liite 3. Ensimmäisen aivoriihen vaatimuksen 3 ideat

Liite 4. Ensimmäisen aivoriihen vaatimuksen 4 ideat

Liite 5. Ensimmäisen aivoriihen vaatimuksen 5 ideat

Liite 6. Toisen aivoriihen yhdistetyt ideat

Liite 7. Tason normaalisuuntaisten vetokokeiden voima-siirtymäkaaviot

Liite 8. Tasonsuuntaisten vetokokeiden voima-siirtymäkaaviot

1 Johdanto

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, voidaanko metallin lisäävän valmistusmenetelmän muotovapauksia hyödyntää komposiittirakenteen kerroslevyinserteissä parantamaan teknisiä ominaisuuksia tai saavuttamaan muuta etua. Tutkimuksessa suunnitellaan useita kerroslevyinserttivaihtoehtoja, joista valitaan muutama testaukseen ja verrataan markkinoilla olevaan perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettuun kerroslevyinserttiin. Tutkimuksessa määritetään kirjallisuuden perusteella inserttien toimintaan ja kestävyysliittyviä tekijöitä, jotka vaikuttavat asennetun insertin lujuusominaisuuksiin.

1.1 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymys

Lisäävän valmistuksen muotovapauksilla pyritään hakemaan ominaisuuksia, jotka mahdollistaisivat paremman kuormankeston. Lisäävällä valmistuksella on mahdollista luoda pintatekstuureja ja muotoja, jotka voivat auttaa kuormankeston parantamisessa.

Tutkimuskysymys: Mitä metallin lisäävän valmistuksen muotovapauksien ominaisuuksia voidaan hyödyntää komposiittirakenteen kerroslevyinserteissä?

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, voidaanko metallin lisäävällä valmistuksella valmistaa kerroslevyinsertti, jolla on paremmat tekniset ominaisuudet kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistetuilla inserteillä ja saavutetaanko lisäävän valmistuksen inserteillä muita hyötyjä.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelmänä tässä työssä käytetään kirjallisuuskatsausta ja kokeellista tutkimusta. Lisäksi hyödynnetään aivoriihimenetelmää. Kokeellisessa osuudessa testataan kerroslevyyn

asennettuja inserttejä kuormituskehässä. Lisäävällä valmistuksella valmistettujen inserttien tuloksia verrataan perinteisen insertin tuloksiin.

1.4 Rajaus

Tutkimuksen lisäävän valmistuksen suunnittelun rajoitukset on rajattu käsittämään vain metallin lisäävää valmistusta ja tarkemmin vain laserjauhepetisulatusmenetelmää. Muut valmistusmenetelmät eivät olleet Saatavissa tai soveltuvia tutkimuksessa valmistettaviin komponentteihin. Suorakerrostusmenetelmä ei ollut soveltuva tässä tutkimuksessa valmistettuihin komponentteihin, koska käytettävissä olevien suorakerrostuslaitteiden tarkkuus ei sovellu kierteiden valmistamiseen. Elektronisuihkuteknologialla voidaan valmistaa roikkuvia pintoja, kuten kierteitä, mutta teknologiaa käyttävää valmistajaa ei ole Saatavissa. Sideaiheen suihkutusta ja materiaalin pursotusta olisivat soveltuvia menetelmiä, mutta ne on rajattu pois tästä tutkimuksesta niiden vaatiman sintrauskäsittelyn vuoksi. Sintrausprosessi aiheuttaa muodonmuutoksia ja kutistumaa, mikä puolestaan johtaisi useisiin testivaiheisiin kierteen osalta.

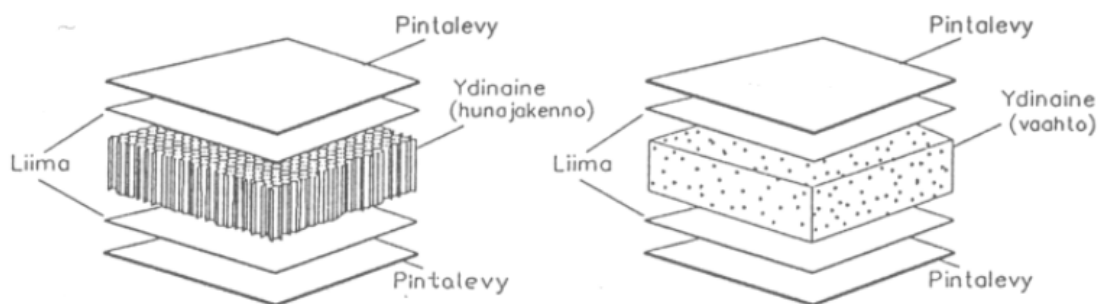
Inserttien lisäävän valmistuksen lisäksi työ keskittyy kerroslevyihin, joilla on laminoidut komposiittiset pintalevyt. Tutkimuksessa käytettävä kerroslevyn rakenne määräytyy sen mukaan, mitä asiakkaalla on saatavissa. Kerroslevyihin on Saatavissa useita erilaisia inserttejä, mutta tämä tutkimus perehtyy pääasiassa sokeisiin kierteitettyihin kerroslevyinsertteihin. Inserteille tehdään tason normaalisuuntainen ja tasonsuuntainen vetokoe. Väsytysokeita ja muotovaikutteita ei testata. Inserteille ja testikappaleille ei tehdä laskennallista lujuusanalyysiä.

2 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään tutkimuksen kannalta keskeisiin asioihin kokonaisku-
van hahmottamiseksi. Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään komposiittikerroslevyn raken-
teeseen ja rakenteiden ominaisuuksiin, markkinoilla olevien inserttien tarkoitukseen ja toi-
mintaperiaatteeseen sekä metallin lisäävän valmistuksen lainalaisuuksiin ja menetelmiin. Li-
säksi katsauksessa perehdytään metallin lisäävän valmistuksen materiaaleihin.

2.1 Komposiittikerroslevy

Kerroslevyjä käytetään niiden keveyden, lujuus-paino ja jäykkyys-paino suhteen vuoksi. Kuvassa 1 on havainnollistettu kerroslevyrakenne, joka koostuu kahdesta pintalevystä ja nii-
den välissä olevasta ydinmateriaalista sekä liimakerroksista, joilla materiaalit on liimattu
toisiinsa. Oleellisinta kerroslevyrakenteessa on, että pintalevyt on tarkoin liimattu tai lami-
noitu ydinmateriaaliin, muutoin rakenne menettää jäykkyytensä. Ydinmateriaalin tehtävä on
säilyttää määrätty etäisyys pintalevyjen välillä ja välittää tasonsuuntaiset leikkausvoimat
pintamateriaalista kohtisuoraan toiseen. Tämä kasvattaa kerroslevyrakenteessa hitausmo-
menttia ja näin tekee rakenteesta taivutusjäykemmän. (Saarela & Airasmaa & Kokko &
Skrifvars & Komppa 2019a; Rodríguez Ramírez 2018, s. 3.)



Kuva 1. Havainnekuva kerroslevyrakenteesta (Saarela et al. 2019a).

Kerroslevyrakenteessa pintalevy voi olla ortotrooppinen, yksikerroksinen isotrooppinen materiaali tai anisotrooppinen laminoitu komposiitti. Laminoitu komposiittinen ohut jäykkä pintalevy muodostuu polymeerimatriisista ja lujitteesta. Lujitetta voi esiintyä monessa eri muodossa, kuten partikkeli, hiutale tai kuitu. Kuitulujuitteet voidaan jakaa lyhyisiin ja jatkuviin kuituihin. Lyhyestä kuidusta valmistetaan kuitumattoa, jonka kuitua ei ole suunnattu. Kuituhakkeen kuidun pituus on tyypillisesti 50 mm. Jatkovaa kuitua voidaan hyödyntää kerroslevyjen pintamateriaalissa kudoksena. (Saarela & Airasmaa & Kokko & Skrifvars & Komppa 2019b.)

Ydinmateriaali on kevyttä ja yleensä kennorakenteinen, muita vaihtoehtoja ovat vaahto, verkko- tai ristikkorakenne. Tyypillisesti suurin osa kerroslevyn paksuudesta muodostuu ydinmateriaalista. Taulukossa 1 on esitetty yleisimmät matriisi- ja kuitumateriaalit sekä ydinmateriaalit. (Hause 2021, s. 1-2; Vuorinen & Mustakangas & Annala 2016, s. 3-10; Saarela et al. 2019a.)

Taulukko 1. Komposiittikerroslevyn materiaalit (Vuorinen, et al. 2016, s. 4–5; Saarela et al. 2019a).

Matriisi	Lujite	Ydin
Polyesterit	Lasi	Paperi
Vinyyliesterit	Hiili	Alumiini
Epoksit	Aramidi	Solumuovit (vaahdot)
Biopolymeerit	Hamppu	Balsa
	Puu	Muovi
	Pellava	

Komposiittikerroslevyn matriisi-, lujite- ja ydinmateriaaleista voidaan luoda teknisiä ominaisuusvaatimuksia vastaava yhdistelmä (Hause 2021, s. 2). Lujitemateriaalin valinnalla vaikutetaan ominaisuuksiin, kuten veto- ja puristuslujuuksiin, kimmomoduuliin, sähköjohtavuuteen, lämmönjohtavuuteen sekä moniin muihin ominaisuuksiin (Vuorinen, et al. 2016, s. 3). Komposiittirakenteessa lujitteen tärkein tehtävä on tarjota kokonaisuudessaan lujuutta ja jäykkyyttä rakenteelle. Matriisi on aine, joka ympäröi, sitoo ja lukitsee kuidut haluttuun asentoon. Näin komposiittimateriaalista saadaan jäykkä ja lujitekuidut suojattua ympäristön vaikutuksilta. (Saarela & Airasmaa & Kokko & Skrifvars & Komppa 2019c.)

Valtaosallisesti polymeerimatriisit ovat kertamuoveja, kuten polyesterit, vinyyliesterit ja epoksit, mutta myös kestumuoveja käytetään erikoisemmissa kohteissa. Kertamuovimatriisi valmistetaan sekoittamalla hartsia ja kovetetta. (Saarela & Airasmaa & Kokko & Skrifvars & Komppa 2019d; Vuorinen, et al. 2016, s. 4)

Polyesterit ovat edullisimpia ja niiden tekniset ominaisuudet ovat vaatimattomimmat. Polyesterillä on korkea kovettumiskutistuma ja korkea kovettumisnopeus, mutta niillä saadaan kohtalaiset mekaaniset ominaisuudet. Vinyyliesterit ovat hiukan hintavampia, mutta samalla niiden tekniset ominaisuudet ovat paremmat. Vinyyliesterit ovat sitkeämpiä ja kestävät paremmin lämpöä ja kemikaaleja. Vinyyliestereitä käytetään kohteissa joissa käsitellään happoja, niiden haponkestävyyden takia. Kuten polyesterillä, myös vinyyliesterillä on korkea kovettumiskutistuma. Epoksilla on parhaimmat tekniset ominaisuudet ja siksi sitä käytetäänkin erityisesti avaruus- ja ilmailuteollisuudessa sekä urheiluvälineiteollisuudessa. (Vuorinen, et al. 2016, s. 4; Saarela & Airasmaa & Kokko & Skrifvars & Komppa 2019f.)

Pintalevyn lujuusominaisuuksiin vaikuttaa lujitesuuntaus. Lujitekuidut kantavat pääosan kuitujen suuntaisesta vetokuormituksesta. Lujitteita voidaan myös kerrostaa eri suuntiin. Muovikomposiittilevyä, jossa lujitteet ovat kerroksittain tasossa, kutsutaan laminaatiksi. Taulukossa 2 selvennetään eri laminaattityypit. (Saarela & Airasmaa & Kokko & Skrifvars & Komppa 2019e; Saarela & Airasmaa & Kokko & Skrifvars & Komppa 2019h.)

Taulukko 2. Laminaattityypit (Saarela et al. 2019e).

Laminaattityyppi	Selite
Yhdensuuntaislaminaatti	Lujitekuidut ovat yhdensuuntaisesti, eli 0°-suunnassa
Ristikkäislaminaatti	Lujitekuidut ladottu kohtisuorasti toisiinsa nähden, eli 0° ja 90°-suunnissa
Kulmaladottu laminaatti	Lujitekuidut ladottu pareittain kulmaan jotka poikkeaa vain etumerkiltään, esimerkiksi -30° ja +30°
Balansoitu laminaatti	Balansoidussa laminaatissa on pareittain kulmaladottuja lujitteita, kuten kulmaladotussa laminaatissa. Suuntakulmiltaan eroavia kerroksia voi olla useita. Pääsuuntiin (0° ja 90°) ladotuilla kerroksilla ei tarvitse olla paria.

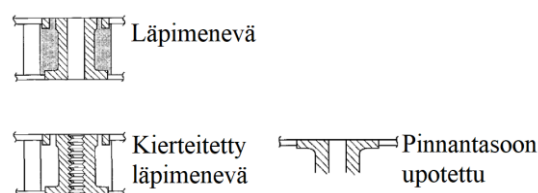
Saarela et al., (2019e) mukaan ”Kerrostien pinoamisjärjestyksen perusteella laminaatit luokitellaan *symmetrisiksi*, *antisymmetrisiksi* ja *epäsymmetrisiksi*”. Symmetrisissä laminaateissa materiaalit ja kerrossuuntaukset ovat symmetrisiä verrattuna keskitasoon. Antisymmetrisessä rakenteessa symmetria eroaa vain kulmaladottujen kerrostien balanssiparien suuntauksissa. Mikäli mainittuja symmetrioita laminaatista ei löydy, on kyse epäsymmetrisestä.

Ydinmateriaali valitaan käyttötarkoituksen perusteella riippuen käyttökohteesta ja siitä, millaisia ominaisuuksia ydinmateriaalin valinnassa vaaditaan ja painotetaan. Ominaisuudet joihin valinnalla vaikutetaan, ovat esimerkiksi paloluokitus, jäykkyys sekä äänen- ja lämmöneristävyys. (Saarela & Airasmaa & Kokko & Skrifvars & Komppa 2019g; Saarela et al. 2019a.)

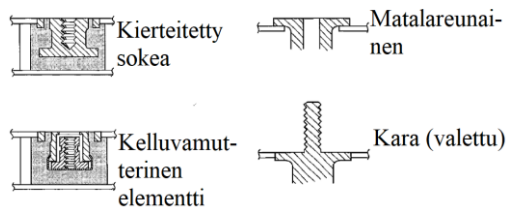
Liimakerrostien mekaanisten ominaisuuksien, jotka liittävät kerroslevyn pintalevyt ydinmateriaaliin, on oltava vähintään yhtä hyvät tai paremmat kuin ydinmateriaalilla. Muussa tapauksessa kerroslevyn rakenne saattaa pettää liimasaumojen heikkouden vuoksi. Liimavaihtoehtoja on lukuisia, mutta kerroslevyrakenteissa yleisesti käytetään polyuretaanipohjaisia liimoja. Tämänkaltaisissa rakenteissa käytetään usein myös liimakalvoja, jotka aktivoituvat lämmön avulla ja vähentävät näin liimajätteen määrää. (Péreira & Fernandes 2019, s. 2.)

2.2 Kerroslevyinsertit

Kerroslevyinsertit ovat kiinnityselementtejä, joilla mahdollistetaan tukeva kiinnitys kerroslevyyn. Inserttien tarkoitus on mahdollistaa kiinnitys eri paneelien kesken tai liittää jokin komponentti paneeliin. Kerroslevyinserttejä on neljää eri tyyppiä: läpimenevä, kierteitetty läpimenevä, kierteitetty sokea ja kelluvamutterinen elementti. Inserttityypeillä on myös erilaisia laipan muotoja: pinnan tasoon upotettu, matalareunainen ja kara. Nämä edellä mainitut variaatiot ovat esitettynä kuvassa 2. (Shur-lok 1999a. 1–4; Shur-lok 1999b. 1–3; Clarendon Specialty Fasteners 2021, s. 4.)

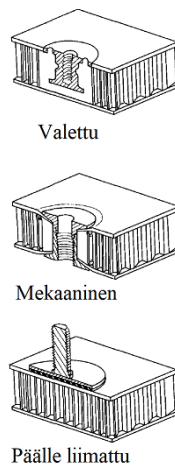


Kuva 2. inserttityypit (muokattu lähteestä Shur-lok 1999a, s. 3).



kuva 2 jatkuu. inserttityypit (muokattu lähteestä Shur-lok 1999a, s. 3).

Kuvassa 3 on esitetty inserttien asennustapoja, joita on kolmea eri tyyppiä: valettuja, mekaanisia ja päälle liimattuja. Valetuille inserteille tehdään reikä kerroslevyyn, jonne insertti upotetaan. Upotuksen jälkeen insertin laipassa olevista rei'istä kerroslevyn aukko täytetään liimalla, joka pitää insertin paikallaan ja jakaa kuorman tasaisemmin pintalevyihin. (Shur-lok 1999a, s. 3.)



Kuva 3. Inserttien asennustapoja (muokattu lähteestä Shur-lok 1999a, s. 2).

Mekaanisia inserttejä voidaan käyttää vain metallirakenteisten kerroslevyjen kanssa. Mekaaniset insertit ovat aina läpimeneviä, koska insertin pito perustuu puristukseen ja kiilautumiseen metallirakenteen kanssa. Päälle liimattuja inserttejä voidaan käyttää kaikenlaisilla tasisilla pinnoilla ja ne asennetaan kuumentamalla inserttiä, jolloin myös liima sulaa. Kun lämmönlähde poistetaan, pidetään inserttiä paikallaan, kunnes liima on jäähtynyt. Edellä mainittujen inserttityyppien ja eri asennustapojen lisäksi variaatioita on inserttien muodoissa ja siinä, kuinka insertti tarttuu liimaan. (Shur-lok 1999a, s. 4; Shur-lok 1999b, s. 2–3.)

2.3 Metallin lisäävä valmistus

Tässä alaluvussa kerrotaan mitä on metallin lisäävä valmistus ja miten se eroaa tavanomaisista valmistusmenetelmistä sekä millaiseen käyttötarkoitukseen metallin lisäävä valmistus soveltuu. Luvussa kerrotaan myös eri lisäävän valmistuksen menetelmistä ja mitä materiaaleja menetelmillä voidaan valmistaa sekä käydään läpi eri metallimateriaalien ominaisuuksia.

2.3.1 Lisäävän valmistuksen perusteet

Perinteiset muotoilevat ja poistavat valmistusmenetelmät ovat laajalti hyödynnettyjä perinteisiä menetelmiä. Näissä menetelmissä perusaine poistetaan joko suuremmasta raaka-aineesta tai muotoillaan valumuotin avulla, jonka jälkeen kappaletta tarvittaessa täydennetään poistavalla valmistusmenetelmällä. Toisin kuin perinteisissä menetelmissä, lisäävässä valmistuksessa perusainetta lisätään asteittain kerros kerrokselta, mahdollistaen näin monimutkaisempien rakenteiden muodostamisen, kuin mitä perinteiset menetelmät sallivat. (Kamara & Faggiani 2021, s. 8)

2.3.2 Valmistusmenetelmät

Lisäävän valmistustekniikan menetelmät on jaettu seitsemään eri luokkaan, joista kuudella eri menetelmällä voidaan valmistaa metallisia kappaleita. Standardin SFS-EN-ISO-ASTM 52900 (2021) mukaan nämä luokat ovat:

1. Jauhepetisulatus (englanniksi: powder bed fusion, PBF)
2. Suorakerrostus (englanniksi: direct energy deposition, DED)
3. Sideaineen suihkutus (englanniksi: binder jetting, BJT)
4. Materiaalin pursotus (englanniksi: material extrusion, MEX)
5. Materiaalin suihkutus (englanniksi: material jetting, MJT)
6. Kerroslaminointi (englanniksi: sheet lamination, SHL)

7. Valokovetus altaassa (englanniksi: vat photopolymerization, VPP)

Menetelmät 1 ja 2 valmistavat metallisen kappaleen suoraan raaka-ainetta sulattamalla joko lasersäteellä tai elektronisuihkulla. Suorakerrostuksessa raaka-aine voidaan sulattaa myös plasmakaarella. Molemmissa menetelmissä voidaan käyttää jauhemaista raaka-ainetta, mutta suorakerrostuksessa raaka-aineena voidaan käyttää myös lankaa. Kun elektronisuihkua käytetään, vaaditaan tyhjiö, jotta voidaan ehkäistä korroosio-ongelmia. Suurin ero menetelmien 1 ja 2 välillä on raaka-aineen annostelutapa ja rakennusaluista. (Sing & Tey & Tan & Huang & Yeong 2020, s. 17-20.)

Menetelmissä 3 ja 4 metallinen aines on sidoksissa yleensä muovimatriisiin, joka jälkikäsitteilyllä poistetaan ja kappale sintrataan. Menetelmillä 3 ja 4 voidaan käyttää raaka-aineena myös muoveja ja keraameja. (Mostafaei & Elliott & Barnes & Li, & Tan & Cramer & Nandwana & Chmielus 2021, s. 5.) Menetelmät 5 – 7 ovat soveltuvia pääosin muovi- ja komposiittimateriaaleille. Kerroslaminoinnilla voidaan valmistaa metallisia kappaleita, mutta menetelmästä hyötyvät kohteet ovat rajalliset. (Kamara & Faggiani 2021, s. 98-100.)

Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatusmenetelmässä jauhetta kerrostetaan asteittain kerros kerrokselta ja sulatetaan vain 3D-mallin mukaisesti valikoidut kohdat kyseiseltä kerrokselta. Tästä juontaa juurensa englanninkielinen markkinanimi selective laser melting (SLM). Jauhepetisulatuksesta voidaan englannin kielessä puhua myös markkinanimellä direct metal laser melting (DMLM), suomeksi suora metallin lasersulatus. Laserjauhepetisulatuksessa valmistusprosessi tapahtuu inerttikaasulla, argonilla tai tyrellä, täytetyssä kammiossa, jolla vähennetään hapen vahingollisia vaikutuksia rakenteessa. Elektronisuihkulla sulattava jauhepetimenetelmä tunnetaan markkinanimeltään elektronisuihkusulatus (electron beam melting, EBM). (Sing et al. 2020, s. 17-19.)

Suorakerrostus

Suorakerrostuksessa raaka-ainemateriaalia ja sulattavaa lämpöä syötetään kohteeseen samanaikaisesti. Lämpöenergiälähteitä suorakerrostuksessa ovat lasersäde, elektronisuihku, plasmakaari ja valokaari. (Kumar, et al. 2021, s. 167.) Raaka-aine voi olla joko jauhe- tai lankamuotoinen (Kandavalli & Edberk & Rajendran & Rajagopal 2021, s. 182). Jauhesuorakerrostuskoneissa jauhe yleensä puhalletaan inerttikaasulla, jolla suojataan sulanutta aluetta hapettumisongelmilta. Poikkeuksena elektronisuihkumenetelmä, jossa sulattaminen

tapahuu tyhjiössä. Suorakerrostusmenetelmissä jauhetta pystytään syöttämään sulaan useammasta suuttimesta, mikä mahdollistaa eri materiaalien sekoitusten käyttämisen. Jauhekoneilla on heikompi kerrostehokkuus kuin lankakoneilla, koska kaikkea jauhetta ei saada sulamaan ja tarttumaan rakenteeseen. Suorakerrostusmenetelmässä käytetty jauhekoko on usein suurempi kuin jauhepetimenetelmässä ja näin ollen se vaatii suuremman energiatiheyden. Suurempi jauhekoko nopeuttaa valmistusta, mutta heikentää pinnan laatua ja voi vaatia jälkikäsitteilyä. Tukirakenteita suorakerrostamisessa ei käytetä lainkaan tai erittäin harvoin, koska käytössä on moniakselisia kääntöpöytiä, jotka mahdollistavat valmistamisen eri asennoissa. Suorakerrostusmenetelmällä on mahdollista tehdä tuotteisiin korjaustoimenpiteitä tai valmistaa puolivalmiiseen kappaleeseen osuus, joka ei muilla menetelmillä ei ole mahdollista. (Sing et al. 2020, s. 20-21.)

Langansyöttöön perustuvia tekniikoita ovat lankasyöttöinen valokaarisuorakerrostus (englanniksi wire arc additive manufacturing, WAAM), laser lankasuorakerrostus (englanniksi laser wire deposition, LWD), vapaa elektronisuihkumuodostus (englanniksi Electron beam free form fabrication, EBF3). Lankasyöttöön perustuvien suorakerrostusmenetelmien materiaalinsyöttökärki on perinteinen käsihitsauspistooli, joka on liitetty 3-akseliseen robottiin. (Kandavalli, S. R. et al. 2021, s. 182-183.)

Sideaineen suihkut

Sideaineen suihkutuksen menetelmässä kerroksittain levitettävä jauhemateriaali sidotaan valikoivasti sideaineella. Sideaineena yleensä käytetään polymeeristä nestettä. Lopputulemana on halutun muotoinen kolmiulotteinen kappale. Kerrostamisen jälkeen prosessitila lämmitetään, jotta sideaine kovettuu. Kovetuksen jälkeen kappale voidaan poistaa jauhepedistä. Tässä vaiheessa kappaletta kutsutaan englannin kielisellä termillä ”green part”, joka voidaan suomentaa ”viherosaksi” tai ”raakakappaleeksi”, mikä tarkoittaa, ettei kappale ole vielä sovelia lopulliseen käyttökohteeseen. Raakakappale vaatii vielä jatkokäsittelyitä, kuten sintrauksen, jotta saavutetaan halutut mekaaniset ominaisuudet. Sideaineen suihkutuksen menetelmä ei vaadi tukirakenteita ulkonevien tai roikkuvien piirteiden tukemiseksi, kuten muut lisäävän valmistuksen menetelmät, sillä sitomaton jauhepeti alla tukee riittävästi rakennetta. (Mostafaei et al. 2021, s. 4-5.)

Materiaalin pursotus

Polymeeri tai polymeeri-metallikomposiitti filamenttia pursotetaan lämmitetyn suuttimen läpi, mikä pehmentää materiaalin. Materiaalia pursotetaan suuttimesta rakennusalustalle 3D-CAD -mallin mukaisesti kyseisen kerroksen poikkileikkauksen muotoinen alue. Materiaali kovettuu nopeasti pursotuksen jälkeen ja sitoutuu aiempaan kerrokseen. Teollisissa laitteissa on oma suuttimensa tukimateriaalille ja yksi tai useampi suutin valmistettavan kappaleen materiaaleille. Useamman suuttimen hyötynä on mahdollisuus vaihtaa materiaalia tai väriä (muovikappaleissa) kesken tulostuksen nopeasti. Edullisimmat järjestelmät käyttävät vain yhtä suutinta molempien rakenteiden tekemiseen. Metallisessa tulosteessa on seassa muovia joka poistetaan kuumentamalla ja lopuksi kappale vielä sintrataan. Materiaalin pursotuslaitteita on kolme eri tyyppiä, ruuvi-, mäntä- ja filamenttipursotin. Pursotintyyppi riippuu materiaalin syöttötavasta. (Kamara & Faggiani 2021, s. 92-93; Suwanpreecha & Manonukul 2022, s. 4.)

Materiaalin suihkutus

Materiaalin suihkutusmenetelmän toimintaperiaate on samankaltainen kuin sideaineen suihkutusmenetelmä, mutta suihkutettava materiaali ei ole sideainetta vaan materiaalia, jolla tulostettava kappale rakennetaan (Hendrixson 2022). Xjetin vuonna 2016 lanseeraama nanopartikkelisuihkutus (englanniksi NanoParticle Jetting, NPJ) mahdollistaa metallin ja keraamien lisäävän valmistuksen materiaalin suihkutusmenetelmällä (Hendrixson 2022; Metal AM 2016.). Xjetin (2023) oman sivuston mukaan heidän laite on yhä ainoa metallia ja keraameja materiaalin suihkutusmenetelmällä tulostava laite. Nanopartikkelisuihkutuksessa metalli tai keraaminen materiaali on suspensiomuodossa sidemateriaalin kanssa. Prosessissa suspensio- ja tukimateriaalia suihkutetaan valikoituihin kerrosrakenteen kohtiin. Prosessin aikana alustan lämpötila on 250°C, joka mahdollistaa partikkelien kiinnittymisen nesteen haihtuessa. Tukirakennemateriaali poistetaan liuottamalla kappaletta vedessä, sillä materiaali on vesiliukoista. Tässä vaiheessa viherosan tiheys on noin 60 %, joka mahdollistaa koneistuksen ja kiillotuksen tarvittaessa. Valmiissa tulosteessa eli viherosassa on vielä sidemateriaalia joka poistetaan sintraamalla. Sintrauksessa kappaleen jäljelle jääneet tukirakenteet ja sideaineet höyrystyvät sekä kappale saavuttaa lopullisen lujuuden ja tiheyden. Toistaiseksi menetelmän materiaalivalikoima on vähäinen. (Hendrixson 2022.)

Kerros laminointi

Lisäävän valmistuksen menetelmistä kerroslaminointi on vähiten hyödynnetty menetelmä sen heikon soveltuvuuden vuoksi. Kerroslaminointia käytetään eniten havaintomallien tekemiseen opetus-, markkinointi- ja suunnittelun hyväksyntätarkoituksiin. Kerroslaminoinnissa nimensä mukaisesti kerrostetaan arkkimateriaalia, kuten hiili- tai lasikuitukudoksia, paperia tai jopa ohuita metalliarkkeja. Paperiarkit liitetään yhteen liimaamalla ja kuitupohjaiset materiaalit termoplastisella matriisimateriaalilla. Metalliarkeit ultraäänihitsataan yhteen. Kolmiulotteinen muoto tehdään paperi ja kuitumateriaaleille joko veitsellä tai laserilla leikaten. Metallimateriaalia jyrksitään muutaman kerroksen välein. Metallin kerroslaminoinnissa käytettyä ultraäänihitsausta voidaan hyödyntää kahden eri materiaalin toisiinsa liittämiseen. Kerroslaminoinnilla on mahdollista tehdä monimutkaisia sisäisiä muotoja, sekä lisätä elektroniikkaa, kuten esimerkiksi antureita, keskelle rakennetta, sillä ultraäänihitsaus ei vahingoita lisättäviä komponentteja. Kerroslaminoinnin heikkous ilmenee jälkityöstövaiheessa, koska jälkikäsitteilyt lisäävät läpimenoaikaa ja kasvattavat kuluja. (Kamara & Faggiani 2021, s. 98.)

Valokovetus altaassa

Menetelmistä ainoa, jolla ei pysty valmistamaan metallisia kappaleita, on valokovetus altaassa. Menetelmä perustuu nestemäisen polymeerin kovettamiseen ultravioletivalon avulla. Ultravioletivaloa kohdennetaan tarkasti ja valikoivasti nestemäisen polymeerin pintaan, joka kovettuu ja tarttuu aiempaan kerrokseen tai alustaan. Valokovetusmenetelmä voi olla alaspäin tai ylöspäin suuntautuva. Alaspäin suuntautuvassa menetelmässä rei'itetty alusta menee kerros kerrokselta alaspäin nestealtaaseen ja nestepinta kipuaa valmistettavan kappaleen yläpuolelle, joka tasataan tasoittimella. Ylöspäin suuntautuvassa menetelmässä kappale kiinnittyy alustaan, joka nousee nestealtaasta kerros kerrokselta pitäen kappaleen lakipisteen lähellä altaan pohjaa. Valokovetus tapahtuu altaan pohjan läpi. (Kamara & Faggiani 2021, s. 88, 99-100.)

2.3.3 Materiaalit

Raaka-aineena eri lisäävän valmistuksen menetelmissä voidaan käyttää keraameja, polymeerejä ja metalleja sekä komposiitteja ja jopa suklaata voidaan pursottaa. Teoriassa lisäävässä valmistuksessa voidaan käyttää kaikkia metalleja, mikäli materiaalia on saatavana jauhemuodossa. Joissakin tapauksissa materiaalit voivat aiheuttaa turvallisuusriskejä

sulatusmenetelmissä niiden ominaisuuksien vuoksi. Sen sijaan, että ne sulaisivat, nämä materiaalit voivat syttyä palamaan. Näitä herkkiä metallimateriaaleja voidaan käyttää pursottavassa prosessissa. Yleisimmät käytössä olevat metallimateriaalit ovat seostamaton titaani (kaupallinen puhtaus), seostettu titaani, teräs, ruostumaton teräs, alumiini, kupari, koboltti-kromi, volframi ja inconelit. Inconelit ovat nikkelpohjaisia superseoksia. Myös arvometalleja kuten kultaa, hopeaa ja platinaa onnistutaan tulostamaan epäsuorasti vahamenetelmällä tai suoraan valikoivalla lasersulatuksella. (TWI Ltd 2021; Bourell & Kruth & Leu & Levy & Rosen & Beese & Clare 2017, s. 660-663.) Taulukossa 3 on esitetty yleisimmät metallijauheet ja niiden ominaisuudet.

Taulukko 3. Metallijauheet ja niiden ominaisuudet (GE Additive 2023).

Metallijauhe	Ominaisuus
Seostamaton titaani	- Äärimmäinen korroosiokestävyys - Sitkeä - Hitsattavuus - Useaa laatua joissa vahvuus- ja muovattavuusominaisuudet vaihtelevat.
Seostettu titaani	- Laajakirjoinen käytettävyys - Kevyt ja suorituskykyinen - Biosopeutuva lääketieteelliseen käyttöön
Ruostumaton teräs	- Eriomaiset mekaaniset ominaisuudet - Hitsattava - Korroosionkestävä
Seostamaton alumiini	- Tarkat yksityiskohdat, jopa 25 µm - Kevyt
Seostettu alumiini	- Korkea lujuus-paino suhde - Hyvä väsymisen- ja korroosionkesto - Nopea valmistaa
Koboltti-kromi	- Korkea lämmönkestävyys - Korroosio- ja kulutuskestävyys - Nikkelivapaa (esimerkiksi ortopediset tai dentaaliset sovellukset)
Inconelit	- Käytetty korkean rasituksen paikoissa - Korroosion kestävyys - Korkea lämmönkestävyys - Vastustaa kloridin aiheuttamaa pistesyöpymistä ja halkeilua

Edellä mainittujen metallijauhemateriaalien lisäksi on lankamateriaalina saatavissa myös tantaalia, volframia, niobia ja molybdeenia sekä monia eri teräslaatuja, kuten maraging-teräs ja työkaluteräs. Erikoisimmat materiaalit ovat soveltuvia vain prosessille jonka lämmönlähteenä on elektronisuihku. Sciaky inc.(2023) sivuston tekemän tarkastelun mukaan lanka on materiaalina halvempaa. Materiaalista riippuen hintaero voi olla jopa 141 %. (Sciaky Inc. 2023; Duan & Bai & Guo & Peng & Liu & Zhang & Zhang & Huang & Liu & Gao & Kong & Zhou & Wang 2023, s. 5426.)

2.3.4 Lisäävän valmistuksen edut ja heikkoudet

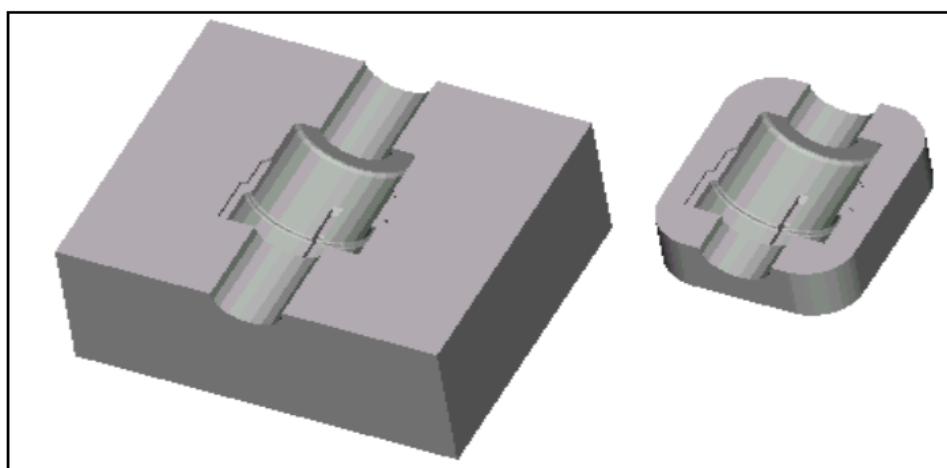
Vaikka lisäävä valmistus on nostamassa päätään tulevaisuuden valmistusmenetelmänä ja suunnannäyttäjänä kehittyvälle teknologialle, on sillä myös heikkoutensa. Taulukossa 4 on listattu lisäävän valmistuksen etuja ja heikkouksia.

Taulukko 4. Lisäävän valmistuksen edut ja heikkoudet (Jamshidinia &, Sadek & Wang & Kelly 2015, s. 21; Varotsis 2022; Tractus3D 2023).

Edut	Heikkoudet
Geometriset tai toiminnalliset piirteet ja niiden integrointi (engl. part consolidation)	Valmistusnopeus suurissa tuotantomäärissä
Nopeampi suunnittelusta-valmistukseen aika → Kätevä pienten kappalemäärien valmistamiseen → Soveltuu hyvin prototyyppien valmistamiseen	Tukirakenteet
Pintatekstuurit	Kokorajoitukset
Vähemmän materiaalihukkaa	Laitteen korkea hinta
Massaräätälöinti	Vaadittavat jälkikäsittelyt (esimerkiksi: tukirakenteiden poisto, sintraus, kuumakäsittelyt)
Rakenteen ja muotoilun optimointi	Prosessin kesto-aika (tulostusaika)
Vähentää valmistusvaiheita	3D-mallintamisen erityisosaaminen
Käänteinen suunnittelu	
Vähentää energian kulutusta	
Vähentää toimitusmatkoja ja -kustannuksia	

2.4 Lisäavan valmistuksen suunnittelu

Lisäävällä valmistuksella ei ole yhtä yleistä valmistusohjetta. Käytössä on kuitenkin DFAM (Design For Additive Manufacturing) menetelmä, minkä tarkoitus on parantaa osan tai kokonpanon muotoa, toiminnallisuutta ja valmistettavuutta. (Varotsis 2022.) DFAM menetelmän mukaan, mikäli tuote voidaan valmistaa pienin ponnistuksin perinteisillä valmistusmenetelmillä, se on kannattavampaa kuin käyttää lisäävää valmistusta. Kun kappaleen valmistaminen vaatii sähköpurkauskoneistusta (EDM, Electric Discharge Machining), vaativaa viisiakselista jyrsintää tai monikiinnitysasentoisia toimenpiteitä, tulee lisäävä valmistus järkeväksi vaihtoehdoksi. Taloudellisinta valmistusmenetelmää valittaessa täytyy ottaa huomioon valmistukseen käytettävä aika eri menetelmillä. Kappaleeseen, joka valmistetaan lisäävällä valmistusmenetelmällä, tulee suunnitella vain tarpeelliset geometriset muodot ja välttää tarpeetonta täyttöä. Kappaleen monimutkaisuus lisäävällä valmistusmenetelmällä ei suoranaisesti lisää valmistusaikaa ja kustannuksia, vaan kappaleen jähmetettyjen alueiden määrä. Kustannussäästöjä saadaan pitämällä kappaleen koko mahdollisimman pienenä. Alla olevassa kuvassa 4 on esitetty, kuinka vasemmanpuoleinen kappale on optimoitu jättämällä vain oleelliset geometriset muodot ja pyöristämällä kappaleen nurkat. (EOS GmbH 2013, s. 1-4; Varotsis 2022.)



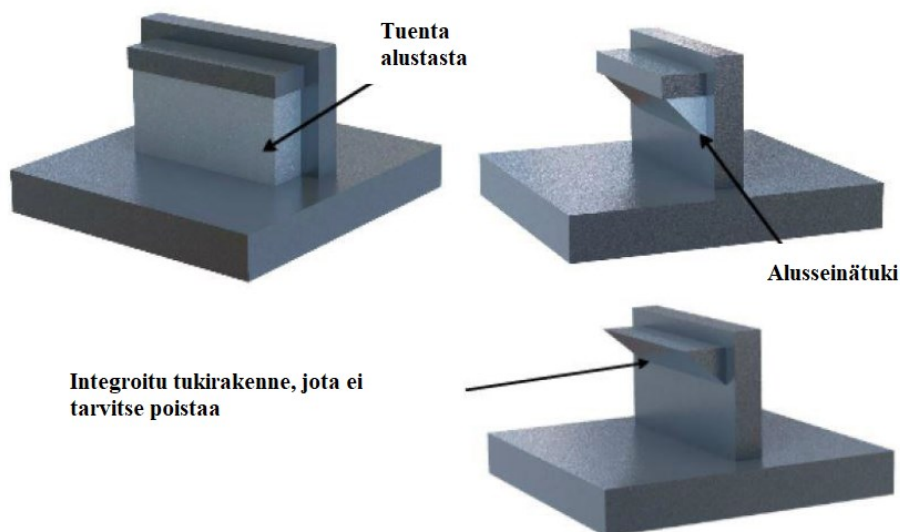
Kuva 4. Eroavaisuus optimoimattoman (vasen) ja optimoidun (oikea) geometrian välillä (EOS GmbH. 2013, s. 3).

Ulkonemat ja tukirakenteet

Lisäävän valmistuksen menetelmissä, joissa käytetään sulatukseen ja kiinteytykseen perustuvaa teknologiaa, vaaditaan joissain tapauksissa tukirakenteita (Mostafaei et al. 2021, s. 5). Tukirakenteilla tarkoitetaan rakennetta, joka tukee rakennetta valmistuksen aikana, mutta joka ei jää valmiiseen kappaleeseen. Tukirakenteiden määrän tulisi olla mahdollisimman vähäinen, mutta ovat toisinaan välttämättömiä. Tukirakenteiden tärkeitä toimintoja ovat:

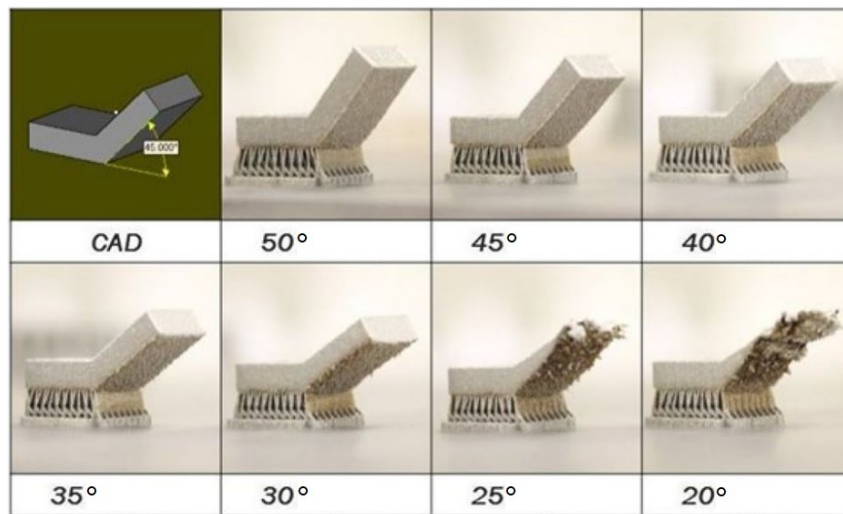
1. Tukevat erityisesti uutta sulatettavaa roikkuvaa pintaa.
2. Estävät epämuodostumia.
3. Haihduttavat lämpöä pois uudesta sulakerroksesta.
4. Tarjoavat valmistusaikaista tukea rakenteelle, ennen kuin rakenne on täysin valmis.

Vaikka tukirakenteet ovat jauhepetisulatuksessa välttämättömiä roikkuvilla muodoilla, niiden valmistaminen ja poistaminen kuluttaa aikaa ja energiaa. Siksi kappaleiden geometrian suunnittelussa tulisi huomioida mahdollisimman vähäinen tukirakenteiden tarve. Mikäli tuotteen geometriset muodot kuitenkin vaativat tukirakenteita, kappaleen asettelulla voi vaikuttaa tukirakenteiden määrään tai sijaintiin. Kuvassa 5 on esitetty eri vaihtoehtoja toteuttaa tuenta. (Crucible Design Ltd. 2015.)



Kuva 5. Tukirakenteiden suunnittelu (muokattu lähteestä Crucible Design Ltd. 2015).

Yleisohje sulattavan lisäävän valmistuksen rakenteille on, ettei ulkonemaa voida valmistaa ilman tukirakenteita alle 45° kulmaan vaakatasoiseen alustaan nähden. Nyrkkisääntönä on, että alle 45° kulmaan valmistettavissa muodoissa tarvitaan tukirakenteita. (EOS GmbH. 2023, s. 18; Leventon 2019.) Kuva 6 havainnollistaa, kuinka rakenne käyttäytyy eri ulkonemiskulmilla ilman tukirakenteita jauhepetisulatusmenetelmällä (Meng & Zhang & Quan & Shi & Tang & Hou & Breitskopf & Zhu & Gao 2020, s. 819).



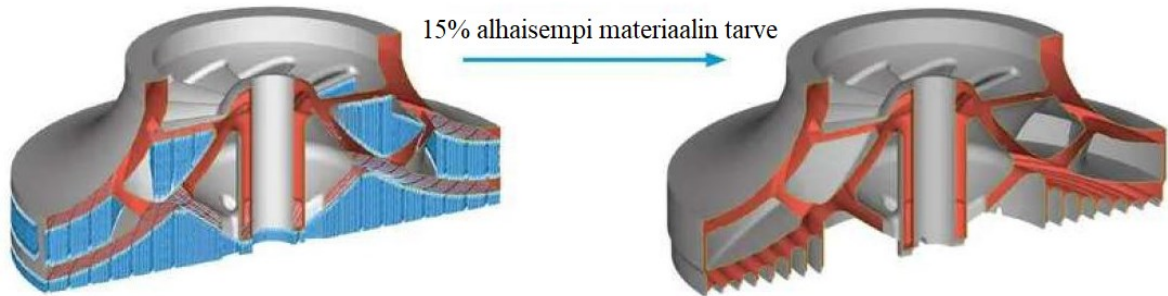
Kuva 6. Ulkonemiskulmien vaikutukset rakenteeseen (muokattu lähteestä Meng, L. et al. 2020, s. 819).

Alan asiantuntijat ovat kuitenkin selvittäneet, että joissain tapauksissa eri materiaaleilla päästään myös alle 45° nyrkkisäännön. Alla oleva taulukossa 5 on eritelty minimi ulkonemiskulmat eri materiaaleille jauhepetisulatusmenetelmällä. (Crucible Design Ltd. 2015.)

Taulukko 5. Minimi ulkonemiskulmat eri materiaaleille (Crucible Design Ltd. 2015).

Materiaali	Minimi ulkonemiskulma
Ruostumattomat teräkset	30 astetta
Inconelit	45 astetta
Titaanit	20-30 astetta
Alumiinit	45 astetta
Koboltti-Kromi	30 astetta

Kuva 7 havainnollistaa, että jotkin laitevalmistajat ovat pystyneet haastamaan nämäkin ulkonemiskulmat sekä kehittäneet prosesseja ja parametrejä, joilla voidaan valmistaa jopa 10° kulmassa ulkonevia geometrisia muotoja (EOS GmbH. 2023, s. 18; Leventon 2019).

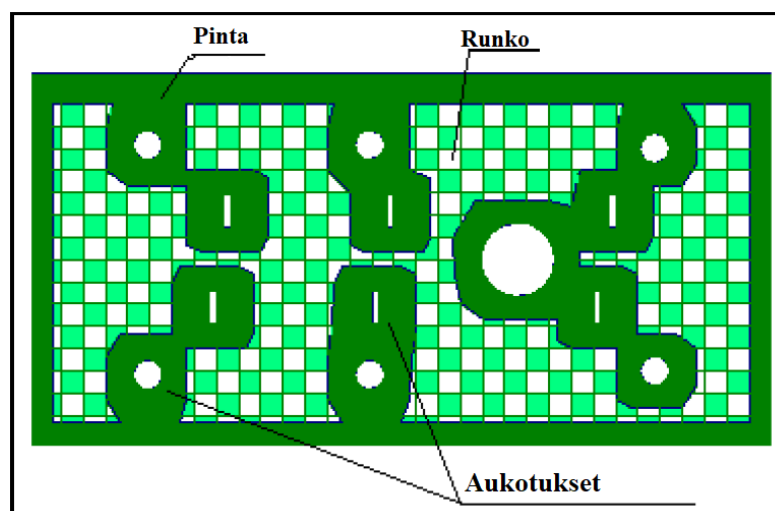


Kuva 7. Esimerkki totutusti tuetusta ja tuettomasta juoksupyörästä (muokattu lähteestä EOS GmbH. 2023, s. 9).

Tukematon rakenne vähentää tarvittavan materiaalin määrää, lisää tulostusnopeutta ja siten vähentää kustannuksia. Tukemattomalla rakenteella on mahdollista valmistaa tuotteita, joita muilla keinoin ei pystytä valmistamaan. (EOS GmbH. 2023, s. 18; Leventon 2019; Velo3D 2022.)

Pinta- ja runkorakenne & aukotus

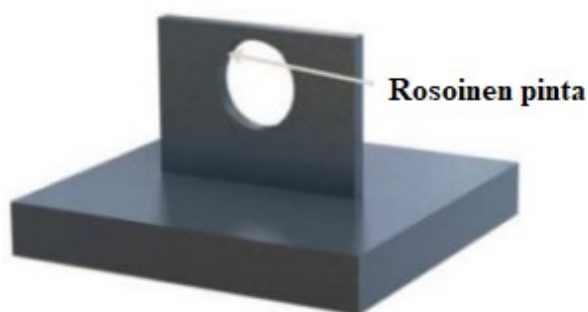
Perinteisillä valmistusmenetelmillä raaka-aine on tasalaatuista ja mahdollistaa reikien ja muiden aukotusten tekemisen vapaammin jälkikäteen, kuin lisäävällä valmistusmenetelmällä. Lisäävän valmistusmenetelmän jälkeinen reikien ja muiden aukotusten tekeminen kappaleeseen ei ole mekaanisesti yhtä vakaata, sillä lisäävällä valmistusmenetelmällä pinta- ja runkorakenne voidaan valmistaa eri parametreillä. Kuvassa 8 vihreä alue havainnollistaa pintarakennetta ja ruudukoitettu alue runkorakennetta. (EOS GmbH 2013, s. 4–5.)



Kuva 8. Pinta- ja runkorakenteen kerrosnäkö, jossa on aukotuksia (muokattu lähteestä EOS GmbH 2013, s. 4).

Pintarakenteen valmistetaan paksummaksi ja kerrospaksuus pienemmäksi maksimaalisen lujuuden ja kovuuden saavuttamiseksi. Runkorakenteen parametrit taas tuovat nopeutta ja säästävät valmistuskustannuksissa tinkimättä pinnan laadusta ja kappaleen vakaudesta. Aukotusten sijoittaminen runkoalueelle voikin johtaa rakenteen pettämiseen. (EOS GmbH 2013, s. 4-5.)

Kun kappaleeseen tehdään vaakatasoisia reikiä, 6 mm tai pienemmät reiät eivät tarvitse tukirakenteita. Suuremmat vaakatasoiset reiät vaativat tukirakenteen tai muuten kuvassa 9 esitetty alaspäin osoittava pinta on rosainen ja voi vaatia koneistamista.



Kuva 9. Reiän alaspäin osoittava pinta (muokattu lähteestä Crucible Design Ltd. 2015).

Jos aukon ei tarvitse olla pyöreä, voi aukotuksen yläosan tehdä kaltevaksi tai kaarevaksi, jolloin voidaan välttyä tukirakenteiden lisäämiseltä. Näillä keinoin voidaan parantaa tuottavuutta. (Crucible Design Ltd. 2015.)

2.5 Testimenettelyt

Inserttejä testataan erilaisin vetokokein. European cooperation for space standardization (ECSS) on määritellyt inserteille testimenettelyt, joita käytetään Euroopassa kehitetyissä avaruuslaitteissa. ECSS:llä testausryhmiä on kolmea eri tyyppiä, staattiset lujuusvaikutukset, geometriset vaikutukset ja dynaamiset lujuusvaikutukset. Staattisiin lujuusvaikutuksiin kuuluu tason normaalisuuntainen-, tasonsuuntainen-, taivutus- ja vääntötesti. Geometrisen vaikutuksen testeissä tarkastellaan reunaetäisyyttä ja inserttien välistä etäisyyttä. Dynaamiset lujuusvaikutukset sisältävät siniaaltokuormitustestin ja staattisen jäännösvahvuustesti. (ECSS 2011, s. 310.)

ECSS:n testimenettelymäärittelyssä koestettavan kappaleen koko on 80 mm x 80 mm. Poikkeustapauksissa, joissa kuormitustapauksen arvioidaan olevan suurempi, voidaan koestuskappaletta kasvattaa 100 mm x 100 mm kokoiseksi. Tason normaalisuuntaisessa vetokokeessa koestusjigin koestusaukon koko on ECSS:n määrittelyssä 70 mm. (ECSS 2011, s. 311.) Tasonsuuntaisessa testissä inserttiä vedetään kierteeseen asennetusta pultista leikkaavaan suuntaan. Testikappale on tuettu reunasta, jotta kappale ei luista. Koestusjigin runkolevyssä on U:n muotoinen aukko, johon vetokappale mahtuu. (ECSS 2011, s. 297.)

Testi tulee suorittaa elektronisesti ohjatulla kuormituskehällä, joka piirtää voima-siirtymä kuvaajaa. Staattisia lujuusvaikutuksia tutkiessa kuormitusnopeus on 2 mm/min. Kuormitusnopeus perustuu kuormitustapauksien minuutin mittaiseen keston, jonka aikana vaurioituminen usein tapahtuu. Staattisissa kuormitustapauksissa tutkitaan, mikä on suurin ulkopuolinen kuormitus, jota koestettava kappale kestää. (ECSS 2011, s. 296, 311.)

3 Materiaalit ja menetelmät

Tässä luvussa esitetään menetelmät, joita on käytetty tutkimuksen kohteena olevien inserttien kehittämiseen ja testaamiseen. Tutkimuksen kohteena on kerroslevyn asennetut lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistetut kerroslevyinsertit. Lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistettuja inserttejä verrataan markkinoilla olevaan inserttiin.

3.1 Kerroslevyinsertin kehitys

Kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin lisäävän valmistuksen lainalaisuuksiin ja markkinoilla oleviin inserttityyppeihin sekä käytiin läpi kerroslevyn rakennetta, jotta voitiin ymmärtää vaihtoehtoja inserttien ominaisuuksien parantamiseksi. Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa insertin tärkeimmät ominaisuudet jaettiin ominaisuusvaatimukseen ja aivoriihessä vaatimukseen kehiteltiin uusia ideoita. Ideoiden pohjalta mallinnettiin kokonaisuuksia, joissa ominaisuusvaatimukset yhdistyivät. Mallinnettuja kokonaisuuksia tarkasteltiin asiakkaan kanssa ja rajattiin ideoita, joiden kehitystä jatkettiin. Kehitykseen ja viimeistelyyn valittuja inserttejä jalostettiin valmistuskelpoisiksi. Ennen metallisten inserttien testaamista testattiin muovisilla inserteillä liiman virtausta rakenteeseen.

3.1.1 Aivoriihi ja ideoiden valinta

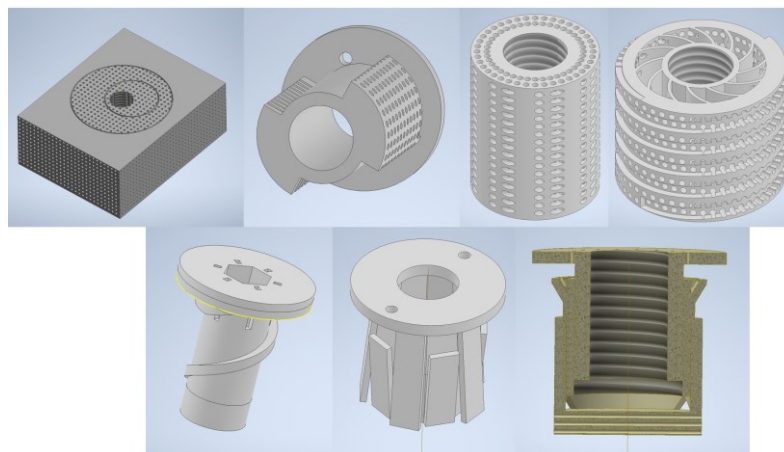
Tutkimuksessa kehitettyjen inserttien tulisi olla innovatiivisia ja tarjottava monipuolinen valikoima erilaisia lähestymistapoja. Inserttien kehityksellä pyritään saavuttamaan ominaisuuksia, jotka ovat toteutettavissa ainoastaan lisäävillä valmistusmenetelmillä. Lisäksi tavoitteena on paremmat tekniset ominaisuudet kuin markkinoilla olevilla perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistetuilla inserteillä. Laajan ideakirjon aikaansaamiseksi hyödynnettiin ryhmätyötä.

Insertin onnistuneella liitoksella on monta ominaisuusvaatimusta, jotka yhdessä tekevät insertistä lujan ja luotettavan. Aivoriihi on keino eriyttää nämä vaatimukset ja saada monipuolisesti kekseliäitä ideoita yksittäisille vaatimukselle. Tässä työssä inserttien liitoksen

ominaisuusvaatimukset on jaettu seuraavasti: tarttuvuus insertin ja liiman välillä, tarttuvuus kerroslevyyn, liiman lisäys ja ilman poistuvuus, paikoitus laminoinnin jälkeen sekä voiman jakautuminen pintalevyihin. Laminoinnin jälkeinen paikoitusominaisuus ei ole välttämätön kaikissa ratkaisuisa. Laminoinnin jälkeisellä paikoitusominaisuudella tarkoitetaan kerroslevyn valmistuksen yhteydessä asennettavaa inserttiä, jonka kierteen paikkaa voidaan hiukan säätää kerroslevyn valmistuksen jälkeen.

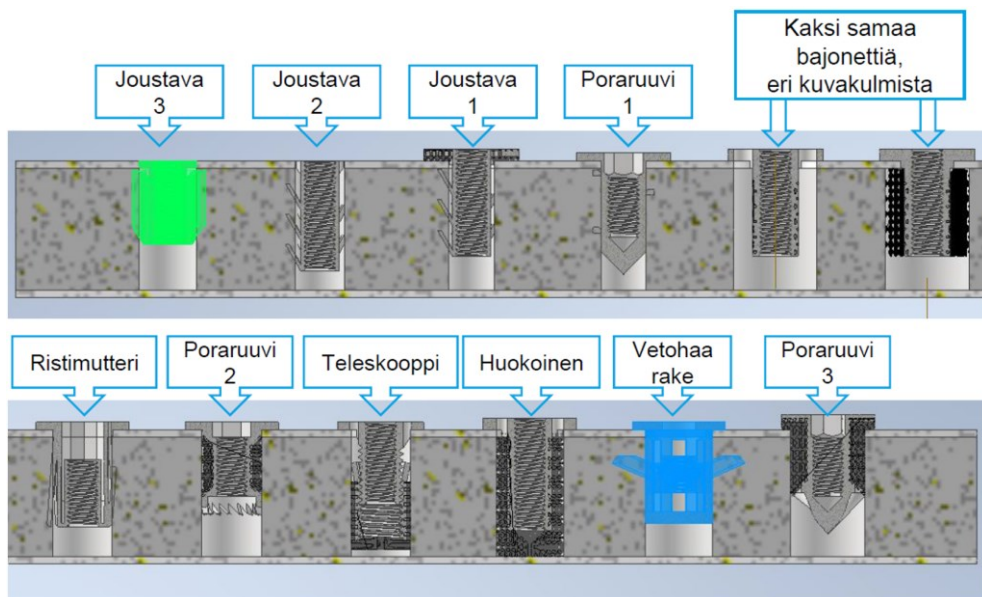
Aivoriihen ensimmäisessä vaiheessa ideoitiin yksittäiseen ominaisuusvaatimukseen ratkaisuja. Ryhmässä oli viisi henkilöä ideoimassa. Idean kehittelyyn käytettiin seitsemän minuuttia per ominaisuus. Lopuksi ideat käytiin läpi ja keskusteltiin niiden toimintaperiaatteesta. Kaikki aivoriihen ideat ovat katsottavissa liitteistä 1–5. Liite 1 sisältää ideat ominaisuusvaatimukseen 1 eli tarttuvuus insertin ja epoksin välillä. Liite 2 sisältää ideat ominaisuusvaatimukseen 2 eli tarttuvuus kerroslevyyn. Liite 3 sisältää ideat ominaisuusvaatimukseen 3 eli liiman lisäys ja ilman poistuvuus. Liite 4 sisältää ideat ominaisuusvaatimukseen 4 eli paikoitus laminoinnin jälkeen. Liite 5 sisältää ideat ominaisuusvaatimukseen 5 eli voiman jakautuminen pintalevyihin. Aivoriihessä ominaisuusvaatimuksista käytettiin termiä funktio, mikä selittää liitteiden 1–5 kuvissa nähtäviä termejä.

Hakemalla edellä mainittuihin ominaisuusvaatimukseen monipuolisia näkemyksiä, voitiin löytää tehokkaita ja tuottavia ratkaisuja, kun vaatimuksia yhdistettiin. Aivoriihen toinen vaihe pidettiin viikkoa myöhemmin, jossa pienemmällä ryhmällä yhdistettiin aiemman aivoriihen vaatimuksia. Nämä ideat on nähtävissä liitteessä 6. Näiden yhdistettyjen ideoiden pohjalta kehitettiin ja mallinnettiin havainnemallit (kuva 10) jotka esiteltiin asiakkaalle.



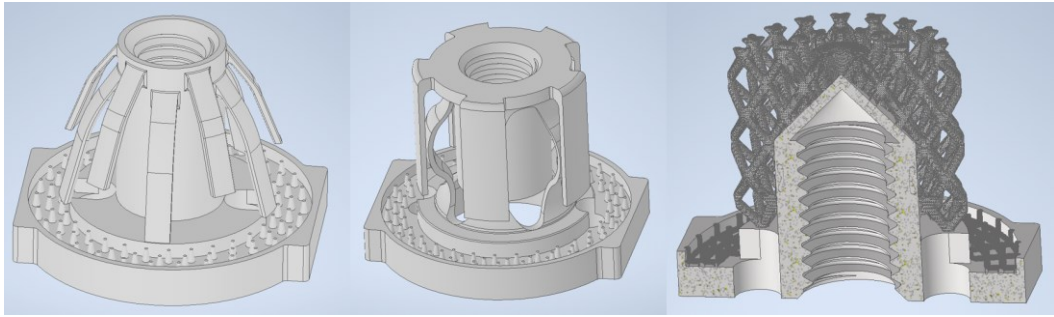
Kuva 10. Ensimmäiset esitellyt havainnemallit

Asiakkaan kanssa pidetyssä palaverissa tuotiin esille uusia näkökulmia ja kehitysideoita esitetyistä malleista. Tässä vaiheessa kerroslevyä valmistettaessa asennettavat insertti-ideat hylättiin niiden käyttötärpeettömyyden vuoksi. Seuraavassa vaiheessa luotiin tarkempia malleja sekä tehtiin uusia inserttityyppejä palaverin tuomien ideoiden pohjalta. Lopulta asiakkaalle esiteltäviä ehdotuksia tuli 11 erilaista (kuva 11) ja asiakasta pyydettiin rajaamaan vetokokeeseen menevät insertit kolmeen.



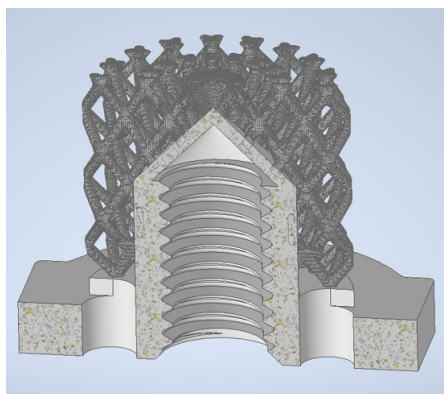
Kuva 11. Inserttiehdotukset, joista rajaus tehtiin

Ideoiden joukosta jätettiin pois porakärjet, niiden paikoituksen epätasaisuuden ja heikon toistettavuuden laadun vuoksi. Ehdotuksista jätettiin pois myös bajonetti -kiinnityksellinen ja moniosaiset insertit. Bajonettikiinnitteisen ongelmaksi todettiin pintalevyyn tehtävän aukotuksen kuormankantokyvyn mahdollinen heikkeneminen. Moniosaiset insertit, ”teleskooppi” ja ”vetohaarake”, nähtiin kalliina ratkaisuina, vaikkakin mahdollisesti toimiviksi joissain erikoistapauksissa. Jäljelle jääneiden ehdotusten perusteena oli toteutettavuus, soveltuvuus sarjatuotantoon sekä arvioitu kustannus. Vetokokeisiin valittiin kuvassa 12 olevat insertit: ”joustava 1”, ”ristimutteri” ja ”huokoinen”.



Kuva 12. Vetokokeisiin valitut insertit

Testiin valittujen inserttien geometriaa viimeisteltiin, jotta insertit olisivat tulostettavissa ja toiminnallisuudet toimisivat. Lisäksi insertit skaalattiin sopimaan kerroslevyyn, jota käytetään vetokokeessa. Jokaiseen laipalliseen inserttiin oli variaatiovaihtoehtona piikikäs laipan alunen. Piikikkään alusen toimintaperiaate on toimia liimakanavana, joka levittää asennuksessa käytettävä liiman laipan alle ilman erillistä käsin tehtävää liiman levitystä. Asiakkaan toiveesta tämä piirre lisättiin kaikkiin insertteihin, jotta nähtäisiin toimiiko kanava suunnitellusti. Testiin otettiin vielä neljäs tuloste, josta on poistettu piikit. Tällä neljännellä tulosteella verrattiin, onko piikikkäällä alusella vaikutusta tuloksiin. Ilman piikkejä valmistettavaksi insertiksi valikoitui ”huokoinen”-insertti (kuva 13) jonka laippa muokattiin tasaiseksi, mutta muutoin geometria säilyi samana.



Kuva 13. Neljännen tulostetun insertin malli, ilman piikikästä alusta

Valintaperusteena käytettiin insertin yksinkertaisuutta, joka vähentää muuttuvia tekijöitä ja sitä kautta parantaa vertailtavuutta.

3.1.2 Mallintaminen

Inserttien solidien osien mallinnusohjelmana on käytetty Autodesk Inventor 2022-ohjelmistoa. Latticerakenteet ovat mallinnettu Altair Inspire 2023 ohjelmalla. Mallinnuksen aikana inserteistä tehtiin monta eri versiota ja haettiin erilaisille piirteille toimivia ratkaisuja. Mallintamisen viimeisessä vaiheessa käytettiin apuna Inventorin lujuuslaskentaosiota, jolla tarkasteltiin materiaalin käyttäytymistä asennushetkellä. Analyysissä pyrittiin hakemaan joustaville rakenteille muoto, joka pitää jännitykset myötörajan alapuolella. Myös myötäävien rakenteiden optimoinnissa haettiin alhaista voimaa, jota kappaleen puristamiseen tarvitaan. Samalla kuitenkin seuraten ettei murtoraja ylity.

3.1.3 Materiaalin valinta

Materiaalia valittaessa tarkasteltiin ominaisuuksia, joita kappaleilla on. Huokoisissa inserteissä toiminnallisuus perustuu verkkorakenteen tuomaan lisäpinta-alaan, johon liima tunkeutuu ja tuo enemmän pitoa tasosta kohtisuoraan pois päin suuntautuvassa vedossa. Tämä toiminnallisuus vaatii materiaalilta ainoastaan vetolujuutta ja tarkkuutta valmistuksessa. Ristimutterirakenteessa luhistuvan rungon tulee olla sitkeä, jotta rakenne ei murtuisi vaan painuisi kasaan ja levittäisi tarraimia. Ristimutterille optimaalisesti toimivaa materiaalia valmistajalta ei löytynyt. Materiaalivaihtoehdoiksi jäivät 316L ruostumaton teräs ja titaani. Ruostumattoman teräksen myötöraja on alhainen, mutta venymä materiaalilla on suurempi kuin titaanilla. Titaanin venymä on todella pieni ja myötörajan ylittyessä se saattaa murtua helposti.

Joustavassa insertissä kappaleen tarttuvien elementtien tulisi joustaa, mutta materiaalin myötörajaa ei saisi ylittyä. Tähän tarkoitukseen titaani olisi sopiva materiaali, koska sillä on korkea myötöraja ja alhainen kimmokerroin. Nämä ominaisuudet antaisivat suunnittelulle laajemman toiminta alueen ja mahdollisuuden joustoon.

Kaikkia inserttejä yhdistää kierteen tulostettavuus ja toimivuus. Jotta inserttejä voidaan testata vetokokein, tulee kierteen olla toimiva. Jauhepetimenetelmällä titaanista tulostettu kierre ei ole puhdas ja kierteiden avaaminen voi koitua ongelmaksi. Näin materiaaliksi valikoitui ruostumaton teräs. Tulostettu kierre ruostumattomasta teräksestä ei ole myöskään

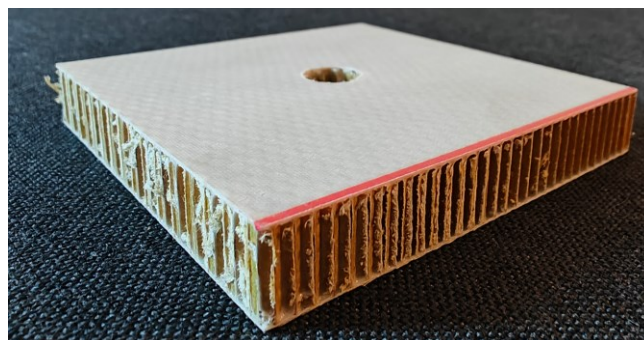
puhdas, mutta materiaalin käsittely on huomattavasti helpompaa ja kierre voidaan avata kiertapilla.

3.1.4 Liiman virtauksen testaus

Liiman virtaustestillä varmistettiin liiman leviäminen ja sen tarttuminen inserttiin. Virtaustestiä varten inserteistä tilattiin muovitulosteversiot ja rakennettiin testimuotti läpinäkyvästä polykarbonaattilevystä sekä akryyliputkesta. Koska joidenkin inserttien kierre on läpime-nevä, tarvittiin insertteihin kierteelle suoja. Suoja estää liiman virtaamisen avoimen pohjan kautta kierteelle. Suojana käytettiin M6x16 pidätinruuvia. Virtaustesti suoritettiin Bison epoxy universal -tuotteella, jonka avoin aika on puolitoista tuntia. Liima pursotettiin lääke-ruiskuun, jossa aine sekoitettiin ja pursotettiin inserttiin. Virtaustestissä käytettävä liima oli viskositeetiltaan notkeampaa, kuin testikappaleissa käytetty rakenneliima, joten tulos on suuntaa antava. Kierteen suojana käytettyjä pidätinruuveja käytettiin myös, kun testikappaleita valmistettiin.

3.2 Testikappale ja insertit

Testattava kokonaisuus koostuu kerroslevystä, insertistä ja rakenneliimasta. Testattavissa kappaleissa käytettiin 100 mm x 100 mm kokoista, 15,6 mm nimellispaksuudeltaan olevaa komposiittikerroslevyä (kuva 14), joka koostuu 15 mm paksusta paperihunajakennosta ja kahdesta pintalevystä, jotka ovat kaksikerroksisia 0,3 mm paksuja ristiinlaminoituja lasikuitukomposiittilaminaatteja.



Kuva 14. Testissä käytetty kerroslevy

Kaikki tulostetut insertit on valmistettu laserjauhepetimenetelmällä ja ne on asennettavissa 15 mm halkaisijaltaan olevaan reikään ja ne ovat kerroslevyn rajapinnasta mitattuna 13 – 14,5 mm korkeita. Materiaalina on käytetty 316L ruostumatonta terästä. Inserttien laipoissa olevien piikikkäiden alueiden tarkoitus on saada liima leviämään laipan ja pintalevyn väliin, ilman erillistä liiman levitystä, ja tuoda lisäpitoa pintalevyyn.

Joustava

Joustavan insertin suunniteltu toimintaperiaate perustuu kuvassa 15 näkyvien joustavien hakasten tarraamiseen pintalevyyn sekä pinta-alaan, johon rakenneliima tarttuu. Kun kyseistä inserttiä asennettiin, asennusreikää ei esitäytetty liimalla.



Kuva 15. Joustava insertti

Insertin kokonaiskorkeus on 16 mm, josta pintalevyn päälle jäävän laipan osuus on 3 mm. Hakasten paksuus on 0,5 mm ja leveys 1,85 mm. Massaa insertillä on 10,5 grammaa. Titaanista valmistettuna insertin massa olisi 6 grammaa.

Ristimutteri

Ristimutterin toimintaperiaate on asentaa insertti ensin kerroslevyyn, jonka jälkeen insertin kierreosuutta vedetään niittimutteripihdeillä kohti laipan pintaa. Kun kierreosuus nousee, kappaleen runkorakenne leviää. Leviämisen tarkoituksena on rikkoa hunajakennorakennetta ja nostaa kuvassa 16 näkyvät runko-osan ulkopuolella olevat hakaset pintalevyyn kiinni.



Kuva 16. Ristimutteri -insertti

Hunajakennon rikkomisella pyritään avaamaan liimalle lisää reittejä täyttämään kennorakenetta ja tuomaan lisää liimalla täytettyä pinta-alaa pintalevyn väliin. Lisäpinta-alalla pyritään jakamaan pintapainetta laajemmalle. Insertille ei tehty liimalla asennusreiän esitäyttöä. Insertin kokonaiskorkeus on 16,5 mm, josta laipan paksuus on 3 mm. Massa on 10 grammaa. Titaanista valmistettuna insertin massa olisi 5,8 grammaa. Liimatäyttöä tehdessä, huomionarvoista oli liiman virtaus insertin kierrerakenteen ja laipan avoimen reiän välistä. Että liiman virtausta saataisiin parannettua, insertin kierrerakenteen tulisi tiivistyä insertin laippaan, jotta injektioruiskulla tehdyllä paineella liima virtaisi pohjalle saakka.

Huokoinen piikikäs

Insertin nimen perässä termi ”piikikäs” viittaa insertin laipassa oleviin piikkeihin, kuten ristimutteri- ja joustavassa insertissä. Tarkentava termi tarvittiin, koska asiakas halusi vertailevan insertin ilman piikikästä laipan alusta. Kuten kuvasta 17 nähdään, insertin toimintaperiaate on yksinkertainen.



Kuva 17. Huokoinen piikikäs insertti

Insertin toimintaperiaate perustuu liiman tunkeutumiseen insertin verkkorakenteeseen, jonka tarkoitus on lisätä liiman ja insertin välistä pitoa pinta-alan ja mekaanisen lukittumisen avulla. Pinta-alaa verkkorakenteella on lisätty myös insertin pohjaan hyvän pohjapidon hakemiseksi. Että hyvä pohjapito voitiin varmistaa, asennusreikä esitäytettiin liimalla. Insertin kokonaiskorkeus on 17 mm, josta laipanpaksuus on 3 mm. Massa 10,3 grammaa. Titaanista valmistettuna insertin massa olisi 6 grammaa.

Huokoinen sileä

Huokoinen sileä insertti on muutoin identtinen huokoinen piikikäs insertin kanssa, mutta kuten kuvasta 18 nähdään, piikikäs laipan alunen on täytetty sileäksi.



Kuva 18. Huokoinen sileä insertti

Teknisesti ottaen toimintaperiaate on muutoin sama, mutta insertin laipan ja pintalevyn pinnan väliin täytyy asennusvaiheessa lisätä liimaa. Insertin massaa olisi mahdollista vähentää, ohentamalla laipan paksuutta. Testien helpottamiseksi laipan paksuutta ei muutettu. Insertin massa on 11,6 grammaa. Titaanista valmistettuna insertin massa olisi 6,7 grammaa. Tämän insertin asennuksessa lisättiin liimaa kerroslevyn reiän ympärille ja myös insertin sileään laippaan. Myös asennusreikä esitäytettiin.

Verrokki

Vertailukohtana tulostetuille inserteille toimii asiakkaalta saatu markkinoilla oleva kuvassa 19 näkyvä insertti.



Kuva 19. Vertailuun käytetty insertti

Insertin materiaali on alumiinia, mutta siinä on ruostumattomasta teräksestä valmistettu helical -kierreinsertti vahvistamassa rakennetta. Tulostetuissa inserteissä on tason pinnan päälle jäävä laippa, toisin kuin vertailukohtana käytetyissä inserteissä, jotka asennetaan pinnantasoon. Pinnantasoon jäävän laipan halkaisija on 17 mm ja insertin korkeus 12 mm. Massaa verrokki-insertillä on noin 3 grammaa. Kaikissa inserteissä on vähintään 9 mm syvä M6 kierre. Verrokki-insertit asennettiin normaalikäytänteiden mukaan, joihin kuului asennusreiän esitäyttö.

Testattavien inserttien kiinnittämiseen käytettiin 3M™ Scotch-Weld™ alhaisen tuoksun akryyliliimaa (DP8725NS). Liima pursotettiin lääkeruiskun tapaisella ruiskulla insertteihin.

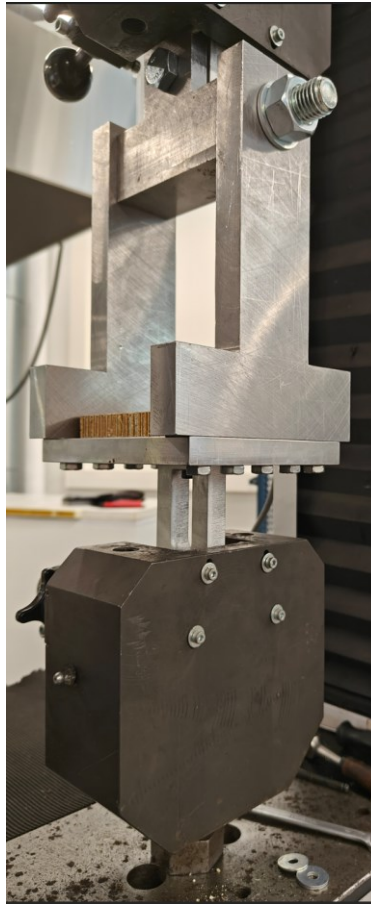
Verrokki-insertin sekä huokoisten-inserttien asennuksessa tehtiin reiän esitäyttö, jotta liimaa oli varmasti myös insertin ja toisen pintalevyn välissä. Liiman annettiin kovettua kolme vuorokautta noin +24 °C -asteessa ennen testaamista.

3.3 Vetokokeet

Dynaaminen testaaminen rajattiin pois työn alussa, eikä inserttien paikoituksen geometrisia vaikutuksia otettu huomioon. Tutkimuksessa suoritettiin staattisista lujuusvaikutuksista vain tason normaalisuuntaiset (englanniksi pull-out tai out-of-plane) ja tasonsuuntaiset (englanniksi shear-out tai in-plane) vetokokeet. Tason normaalisuuntaisessa vetokokeessa inserttiä vedettiin kierteeseen asetetusta pultista kohtisuoraan poispäin ja tasonsuuntaisessa vetokokeessa inserttiä vedettiin kierteeseen asennetusta pultista leikkaussuuntaisesti pois kerroslevyrakenteen välistä. Kumpaakin testiä varten tarvittiin kolme testikappaleita kaikilla inserttityypeillä. Testit suoritettiin Matertest FMT – MEC 100 kuormituskehällä Savonia-ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Kuormituskehän enimmäiskapasiteetti on 100 kN ja se on tarkoitettu staattisien kuormitustapausten tutkimiseen. Vetokokeita varten tarvitaan koestusjigit. Tason normaalisuuntaisessa vetokokeessa jigi oli asiakkaalta. Tasonsuuntaiseen testiin jigi valmistettiin myötäillen ECSS:n (2011) testissä käytettyä jigiä. Jigin mittoja suurennettiin toimimaan 100 mm x 100 mm kokoisilla testikappaleilla. Materiaalipaksuuksia muuttamalla kohdennettiin kiinni pitävän ja vetävän osan keskilinjat, jotta tulostettavien inserttien matalareunainen laippa oli vetävän osan pinnan tasossa, eikä se siten aiheuttanut taivutusta.

3.3.1 Tason normaalisuuntainen vetokoe

Tason normaalisuuntaisessa vetokokeessa inserttiä vedettiin kierteeseen asennetusta pultista (kuva 20). Kierteeseen asennettu pultin lujuusluokka oli 12.9. Testissä tutkittiin kuinka paljon kohtisuoraa vetoa rakenne kestää, ennen kuin rakenne pettää.



Kuva 20. Tason normaalisuuntainen vetokoe

Testin koestusjigin merkitsevin osa on koestusaukollinen levy, joka kannattelee testikappaletta. ECSS:n (2011) koestusjigissä koestuksen aukon halkaisija on 70 mm. Tätä koestusta tehdessä standardia ei tarvinnut noudattaa tai pyrkiä muiden tutkimusten kanssa suoraan vertailtavaan tilanteeseen, siksi testissä käytettiin asiakkaan koestusjigiä, jossa koestusaukon halkaisija oli 72 mm.

3.3.2 Tasonsuuntainen vetokoe

Tasonsuuntaisessa vetokokeessa rakennetta vedettiin inserttiin kiinnitetystä pultista, niin että se aiheutti testikappaleeseen leikkaavaa voimaa. Kuvasta 21 voi havainnoida kuormitusjigin rakennetta ja sitä, kuinka testattava kappale oli tuettu.



Kuva 21. Tasonsuuntainen kuormitusjigi sivusta ja edestä

Testin merkitsevimmät kohteet olivat vetolinja ja kierteeseen kiinnitetyn pultin suoruus. Mikäli pultti pääsi kääntymään, se aiheutti myös insertin kääntymisen ja näin ollen loi taivutusta. Kääntyminen heikensi tuloksien vertailtavuutta, koska testikappale hajosi eri tavalla. Jokaista inserttiä varten vaihdettiin uusi pultti, jotta pultin vioittuminen ei aiheuttanut tulosten vääristymistä. Pultit olivat lujuusluokaltaan 12.9.

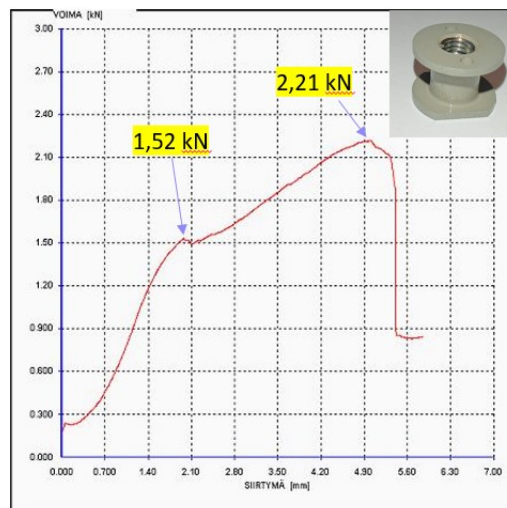
4 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Tässä luvussa esitetään ja käydään läpi testien tulokset, jotka testausmenetelmillä saatiin. Tuloksien esitys ja analysointi on jaettu kolmeen osaan. Ensiksi kerrotaan tason normaalisuuntaisten vetokokeiden tulokset, sitten tasonsuuntaisten vetokokeiden tulokset ja viimeisenä on vertailua inserttien kesken.

4.1 Tason normaalisuuntaiset vetokokeet

Verrokki

Kuvassa 22 on nähtävissä ensimmäisen vertailtavan insertin voima-siirtymäkaavio. Muiden verrokki-inserttien testikaaviot ovat nähtävissä liitteestä 7. Kaavion kuvaajan alkupäässä nähdään lineaarinen voimakehitys suhteessa siirtymään, jonka voimahuippu on 1,52 kN:ssa ennen voiman tasaantumista. Tässä pisteessä testikappale on kärsinyt plastisia muodonmuutoksia.



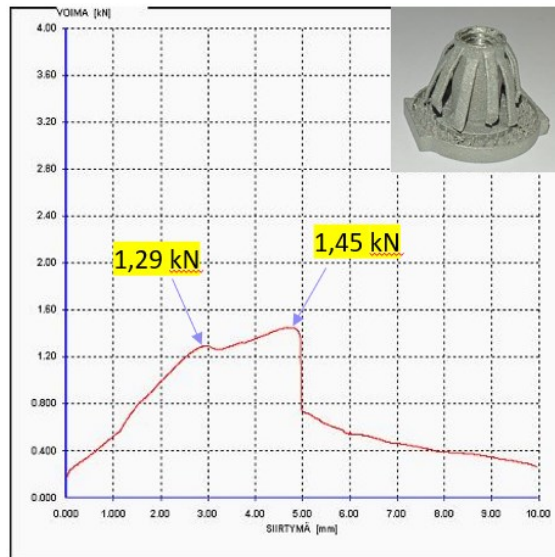
Kuva 22. Vertailtavan insertin tason normaalisuuntainen voimakaavio

Voima jatkaa notkahduksen jälkeen nousuaan. Tämä johtuu insertin pohjapidosta, joka kestää 2.21 kN:iin saakka, ennen kuin se irtoaa. Testiä suorittaessa kerroslevyn pohjapuolen

pintalevyssä oli selvästi havaittavissa kuoppa, joka pohjapidon pettäessä napsahti kuultavasti takaisin tasaiseksi. Kaavio kuvaa hyvin muiden vastaavien inserttien kaavioita.

Joustava

Kuten kuvan 23 kaaviosta voidaan huomata, joustavan insertin voima ei saavuta verrokki-insertin lukemia. Ensimmäinen notkahdus voimakäyrässä nähdään 1,29 kN kohdalla. Tässä kohtaa päällimmäinen pintalevy mahdollisesti murtuu. Myöhemmin nähtävä voiman kasvu liittyy inserttiä ympäröivän liiman pohjapitoon, joka yltää 1,45 kN:iin saakka.



Kuva 23. Joustavan insertin tason normaalisuuntainen voimakaavio

Muista testatuista joustavista inserteistä saatiin vastaavanlainen kaavio. Kaaviot ovat katsottavista liitteestä 7. Inserttiin suunnitellulla piikikkäällä alusella ei ole ollut merkitystä. Kuvasta 24 nähdään, että liima ei ole levinnyt suunnitellulla tavalla laipan alle ja luonut lisää tartuntapintaa. Jotta liima olisi virrannut piikikkäessä alusessa, olisi tarvittu viskositeetiltään notkeampaa liimaa tai enemmän painetta injektioruiskulla liimaa lisättäessä.



Kuva 24. Joustava insertti tason normaalisuuntaisen vetokokeen jälkeen

Inserttiä tarkemmin tutkimalla huomataan insertin joustavien hakasten jääneen melko kapealle alueelle. Tästä voidaan päätellä, etteivät hakaset ole tuottaneet lisäpitoa tukeutumalla pintalevyyn. Hakasten tulisi levitä enemmän ja jykevämmin, jotta hakaset pureutuisivat rakenteeseen paremmin, vahingoittamatta pintalevyä asennusvaiheessa. Ilman poisvirtauksessa on myös havaittavissa ongelmia. Yllä olevassa kuvassa 24 näkyy insertin pohjan puolella aukko, jossa liima ei ole tavoittanut kerroslevyn pohjaa. Tähän kohtaan on jäänyt ilmakupla liiman injektointivaiheessa.

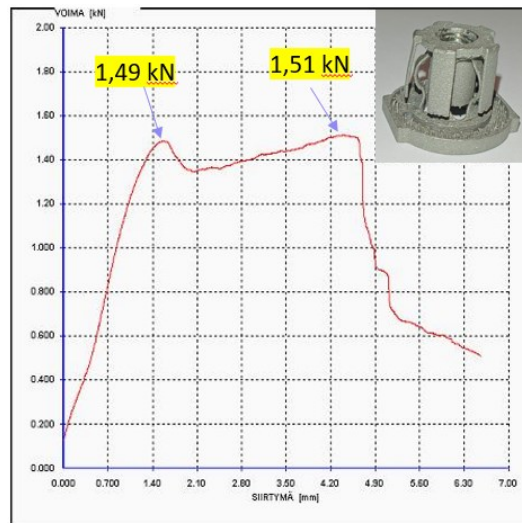
Ristimutteri

Ristimutteri-insertin toimintaperiaate näyttää kuvan 25 perusteella onnistuneen. Runkorakenne on painunut kasaan ja tartuntahakaset ovat levinneet. Liiman virtaus insertin pohjalle ja ympärille on ollut heikkoa.



Kuva 25. Ristimutteri-insertti tason normaalisuuntaisen vetokokeen jälkeen

Liiman parempi leviäminen olisi voinut parantaa vetokokeen tuloksia. Liima on kuitenkin päässyt leviämään laipan alla olevassa piikikkäessä osassa. Tulokset eivät kuitenkaan ole yhtä hyvät, kuin verrokki-insertillä. Kuvan 26 kuvaajan voimahuippu nousi lineaarisesti 1,49 kN:iin saakka, tarrautuen vielä yli 1,3 kN voimalla ensimmäisen vaurioitumisen jälkeen ja nostamalla voimaa aina 1,51 kN:iin asti ennen lopullista periksi antoa.

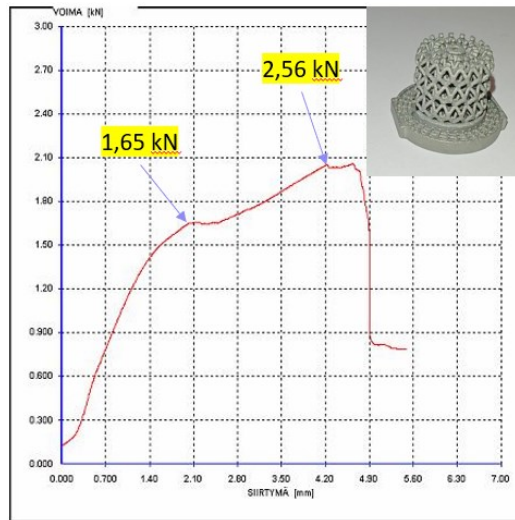


Kuva 26. Ristimutteri-insertin tason normaalisuuntainen voimakaavio

Toisen ja kolmannen ristimutterin testituloksissa on hieman alhaisemmat voimahuiput, mutta kuvaajat ovat hyvin samankaltaiset. Kaaviot ovat nähtävissä liitteestä 7.

Huokoinen piikikäs

Huokoinen piikikäs-insertti on kokeen perusteella hieman verrokki-inserttiä parempi. Kuvan 27 kuvaajasta nähdään, että ennen ensimmäistä voiman notkahdusta rakenne alkaa pettää. Vaurion tapahtuessa voimahuippu on 1,65 kN, joka on hieman yli verrokki-insertin lukemien.



Kuva 27. Huokoinen piikikäs-insertin tason normaalisuuntainen voimakaavio

Äärimäinen voimahuippu löytyy 2,56 kN kohdalta ja melko nopeasti sen jälkeen pohjapito irtoaa. Alla olevasta kuvasta 28 nähdään pohjan liimauksen onnistuminen, kun pintalevyä on irronnut ja jäänyt vetokokeen jälkeen insertin pohjaan.

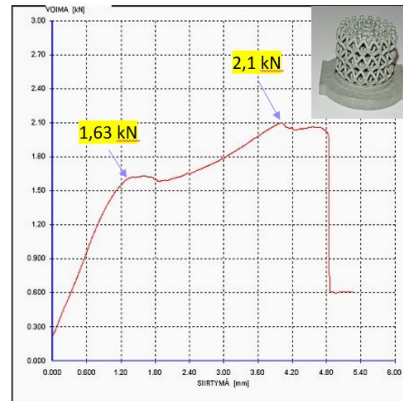


Kuva 28. Huokoinen piikikäs-insertti tason normaalisuuntaisen vetokokeen jälkeen

Insertin toimintaperiaate on täyttynyt, sillä liimautuminen muuhunkin rakenteeseen näyttää onnistuneen hyvin. Myös piikikkääseen aluslaippaan liima on levinnyt osittain.

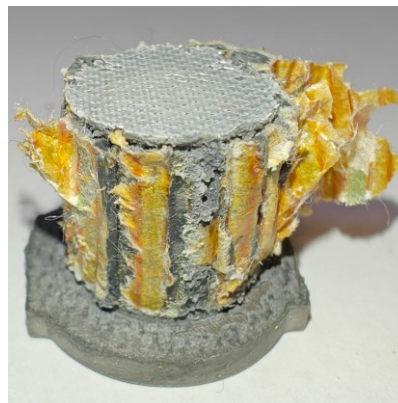
Huokoinen sileä

Sileä pinta huokoisessa insertissä ei näytä kuvan 29 mukaan muuttavan radikaalisti insertin käyttäytymistä. Vaikkakin insertin laippaan ja kerroslevyn pintaan reiän ympärille on levitetty liimaa käsin liiman tarttuvuuden varmistamiseksi.



Kuva 29. Huokoinen sileä-insertin tason normaalisuuntainen voimakaavio

Voimahuippu ensimmäiseen vaurioon saakka on 1,63 kN, mikä vastaa huokoinen piikikäs -insertin tuloksia. Tekstissä esitettyjen huokoinen piikikäs ja huokoinen sileä-inserttien kaavioiden voimahuiput nousevat vastaavanlaisesti pohjapidon menetykseen saakka, ollen huokoinen sileä-insertillä 0,46 kN matalampi. Mutta kun verrataan liitteessä 7 nähtäviin muihin huokosiin insetteihin, testitulokset ovat hyvin samankaltaisia. Kuvassa 30 nähdään liimauksen onnistuminen, kun kerroslevyn toinen pintalevy on revennyt irti insertin liimauksen alalta.



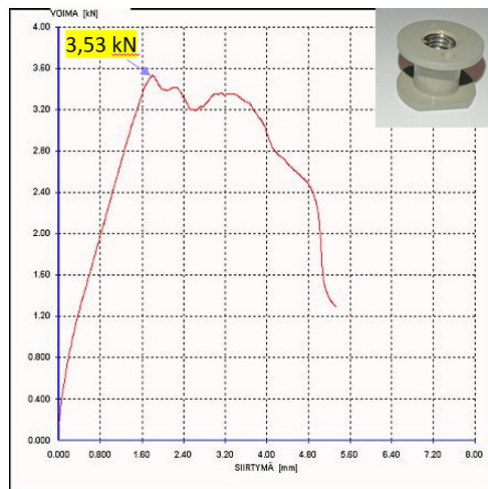
Kuva 30. Huokoinen sileä-insertti tason normaalisuuntaisen vetokokeen jälkeen

Liimauksen onnistumisesta kertoo myös hunajakennon tarttuminen inserttiin sekä ilmakuplien puuttuminen.

4.2 Tasonsuuntaiset vetokokeet

Verrokki

Verrokki-inserttien ensimmäisessä vedossa insertin ja vetävän palkin väliin jäi tilaa ja rakennelmaan tuli taivutusta, jonka seurauksena tulos ei ole vertailukelpoinen. Seuraavia testejä varten testikappaleen ja vetävän palkin väliin asetettiin aluslevyjä tukemaan testijärjestelyä, näin saatiin testeistä vertailukelpoisia tulostettujen inserttien kanssa. Ensimmäisen ja toisen vertailtavan insertin kuvaajat ovat nähtävissä liitteessä 8. Alla olevassa kuvassa 31 kuvaaja on viimeisenä testatusta verrokki-insertistä, sen tulos oli verrokeista paras.



Kuva 31. Verrokki-insertin tasonsuuntaisen vetokokeen voimakaavio

Lineaarisen nousun jälkeen rakenteeseen tulee plastisia muodonmuutoksia 3,53 kN:n kohdalla. Voimahuipun kohdalla kerroslevyn asennuspuolen pintalevy ja osa liimauksesta pettävät. Tarkastellessa kuvan 32 kerroslevyä, nähdään kerroslevyn pohjassa liimakasauma, joka on pitänyt inserttiä osittain kiinni vielä voimahuipun jälkeen, kunnes on kokonaan revennyt irti.

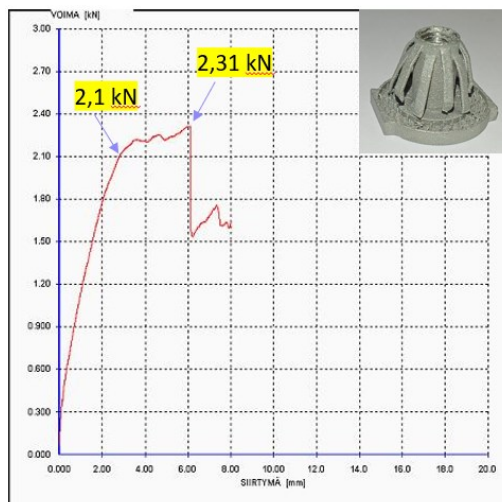


Kuva 32. Verrokki-insertti ja kerroslevy tasonsuuntaisen vetokokeen jälkeen

Insertin liiman tartunta ja täyttö on ollut hyvä, eikä liimaukseen ole jäänyt ilmakuplia.

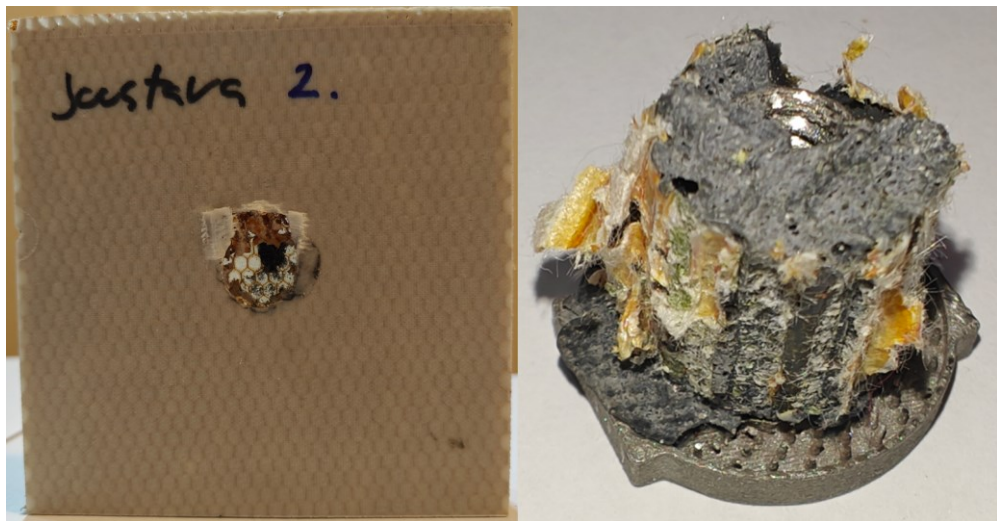
Joustava

Joustavien inserttien voimakaaviot poikkeavat keskenään paljon, mikä kertoo tuotteen epätasaisuudesta toistettavuudessa. Alla olevasta kuvasta 33 nähdään toisen joustavan insertin voimakaavio, mikä vaikuttaa olevan lähimpänä verrokki-insertin käyttäytymistä. Muut kuvaajat ovat nähtävillä liitteessä 8



Kuva 33. Joustavan insertin tasonsuuntaisen vetokokeen voimakaavio

Vaikka käyttäytyminen vetokokeessa on lähellä verrokkia, on huippuvoima paljon alhaisempi kuin verrokillä. Joustavalla insertillä päästään 2,1 kN:iin saakka ennen rakenteen vaurioitumista. Maksimaalinen voima kokonaisuudella on 2,31 kN:a, jonka jälkeen pohjapito pettää. Alla olevassa kuvasta 34 nähdään liiman levinneen myös insertin alle ja tehneen pohjapitoa.

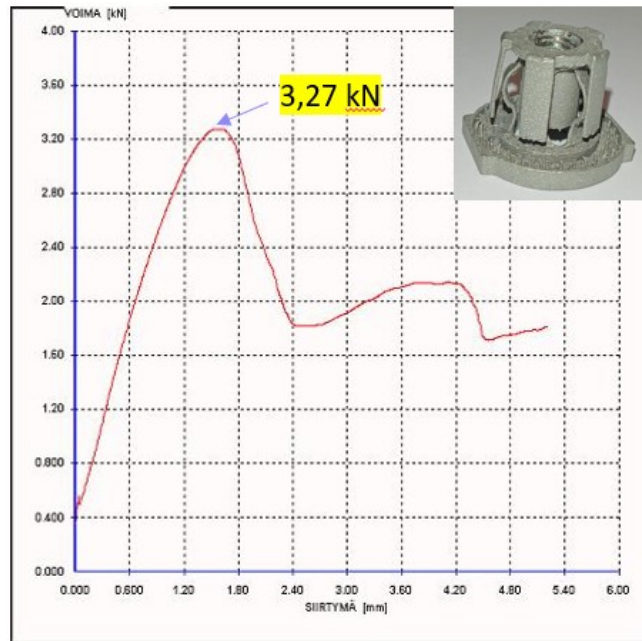


Kuva 34. Joustava insertti ja kerroslevy tasonsuuntaisen vetokokeen jälkeen

Yllä olevasta kuvasta 34 voidaan myös nähdä, ettei liima ole levinnyt hyvin piikikkäessä laipan alusessa. Kuten tason normaalisuuntaisessa vetokokekappaleessa, myös tässä insertissä on nähtävissä liimauksessa liimamassaan jäänyt ilmakupla.

Ristimutteri

Ristimutteri-insertin kolmannen ja viimeisen vedon tulos kuvassa 35 näyttää voiman nousevan lineaarisesti kunnes rakenne antaa kokonaan periksi. Tämän inserttityypin muut testitulokset näyttävät kaikki erilaisilta, mikä johtuu erilaisista liiman täytöistä. Joissain inserteissä osa liimasta on voinut yltää pohjaan, mikä on liitteessä 8 nähtävissä ensimmäisen notkahduksen jälkeen kasvavana voimana.



Kuva 35. Ristimutteri-insertin tasonsuuntaisen vetokokeen voimakaavio

Ristimutteri-insertin voimahuippu on 3,27 kN, joka on melkein yhtä paljon kuin verrokki-insertillä. Huomattavaa inserttien erossa on pohjaliimauksen vajavaisuus verrattuna verrokki-inserttiin. Alla olevasta kuvasta 36 nähdään toimintaperiaatteen täyttyneen.

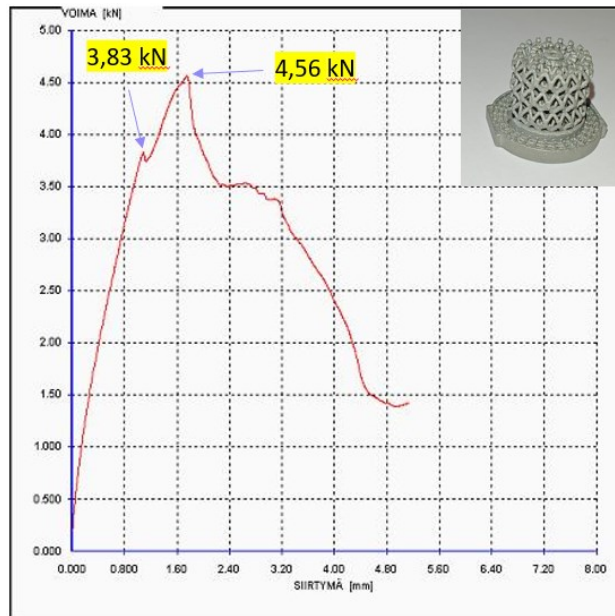


Kuva 36. Ristimutteri-insertti tasonsuuntaisen vetokokeen jälkeen

Insertin leviävät hakaset ovat avautuneet ja tarttuneet pintalevyyn. Myös insertin piikikkäässä alusessa liima on osittain levinnyt. Parannetulla liimanvirtauksella ja pohjapitoa parantavalla rakenteella voitaisiin kohentaa tämän inserttityypin tuloksia.

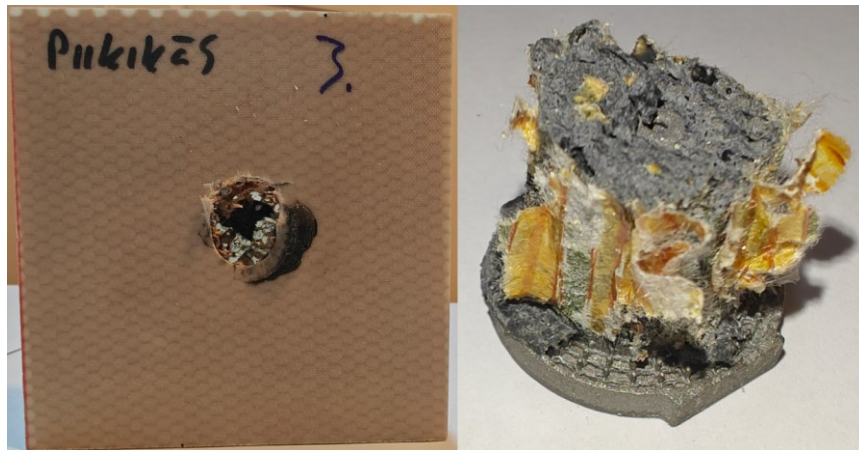
Huokoinen piikikäs

Huokoinen piikikäs-insertillä voimahuippu ensimmäisessä rakenteen vaurioitumiskohdassa on hieman suurempi, kuin verrokki-insertillä maksimaalinen kuormitus. Alla olevassa kuvassa 37 nähdään pieni notkahdus kohdassa 3,83 kN:a, voima nousee 4,56 kN:iin saakka.



Kuva 37. Huokoinen piikikäs -insertin tasonsuuntaisen vetokokeen voimakaavio

Tästä inserttityypistä saatiin yksi testitulos. Ensimmäisessä vetokokeessa kierteeseen kiinnitetty pultti kääntyi vinoon aiheuttaen rakenteeseen myös taivutusta ja näin ollen se ei ole verrannollinen muiden testien kanssa. Ensimmäisen testin kuvaaja on kuitenkin nähtävissä liitteestä 8. Toisen insertin testaaminen onnistui ongelmitta ja testitulos oli samankaltainen kuin viimeisellä insertillä. Testiohjelman kanssa tuli kuitenkin ongelmia, eikä dataa saatu tallennettua. Alla olevasta kuvasta 38 ilmenee liiman osittainen leviäminen piikikkääseen aluseen.

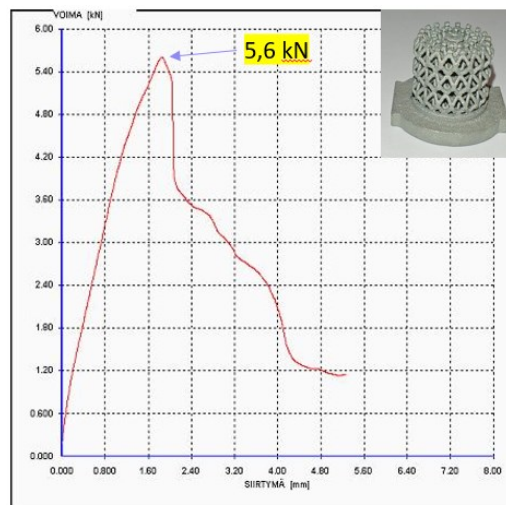


Kuva 38. Huokoinen piikikäs-insertti ja kerroslevy tasonsuuntaisen vetokokeen jälkeen

Insertillä liimatäyttö oli hyvä ja se tarttui hyvin ympäröivään rakenteeseen. Etenkin pohjalla ollut liima on pitänyt rakennetta kasassa.

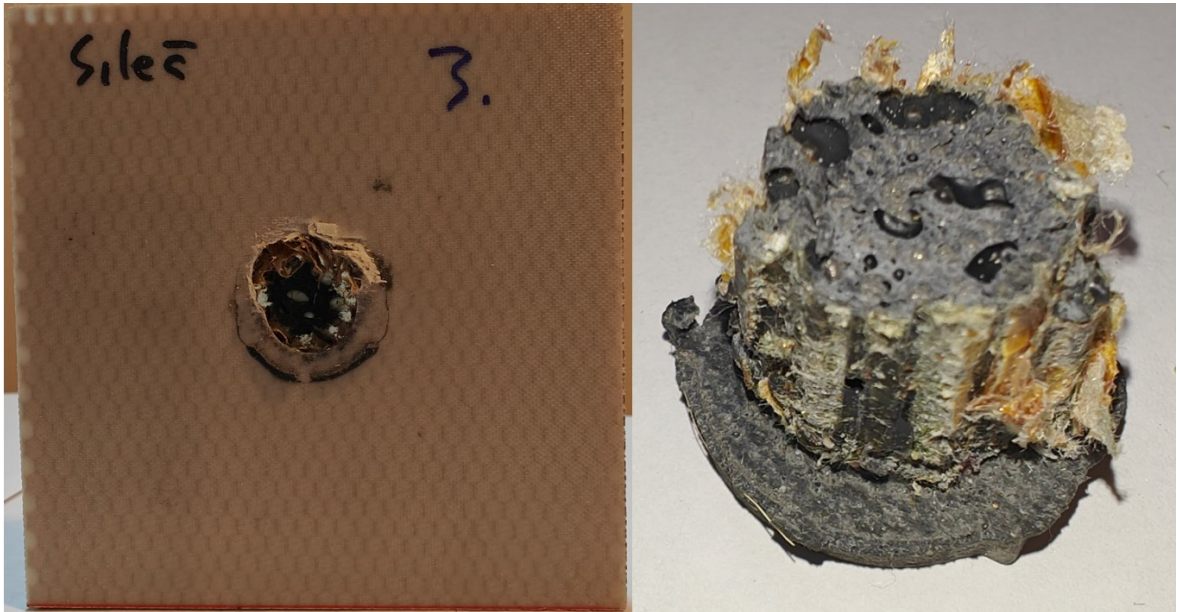
Huokoinen sileä

Kuten kuvasta 39 nähdään, kolmannen testatun huokoinen sileän-insertin voimakäyrän huippu on 5,6 kN:a. Tämän inserttityypin testeissä maksimaalinen voima on nousujohteinen. Ensimmäisessä testissä tulos oli 4,1 kN:a ja toisessa 4,5 kN:a. Tulokset ovat nähtävissä liitteessä 8.



Kuva 39. Huokoinen sileä-insertin tasonsuuntaisen vetokokeen voimakaavio

Olellaisimpana osana kyseisen insertin korkeisiin lukemiin on insertin pohjan liimauksen pito. Omaa osuuttaan on mahdollisesti tehnyt sileän laipan käsin suoritettu liimaus. Kuvassa 40 nähdään kerroslevyn pohjaan jääneet liimajäämät.



Kuva 40. Huokoinen sileä-insertti ja kerroslevy tasonsuuntaisen vetokokeen jälkeen

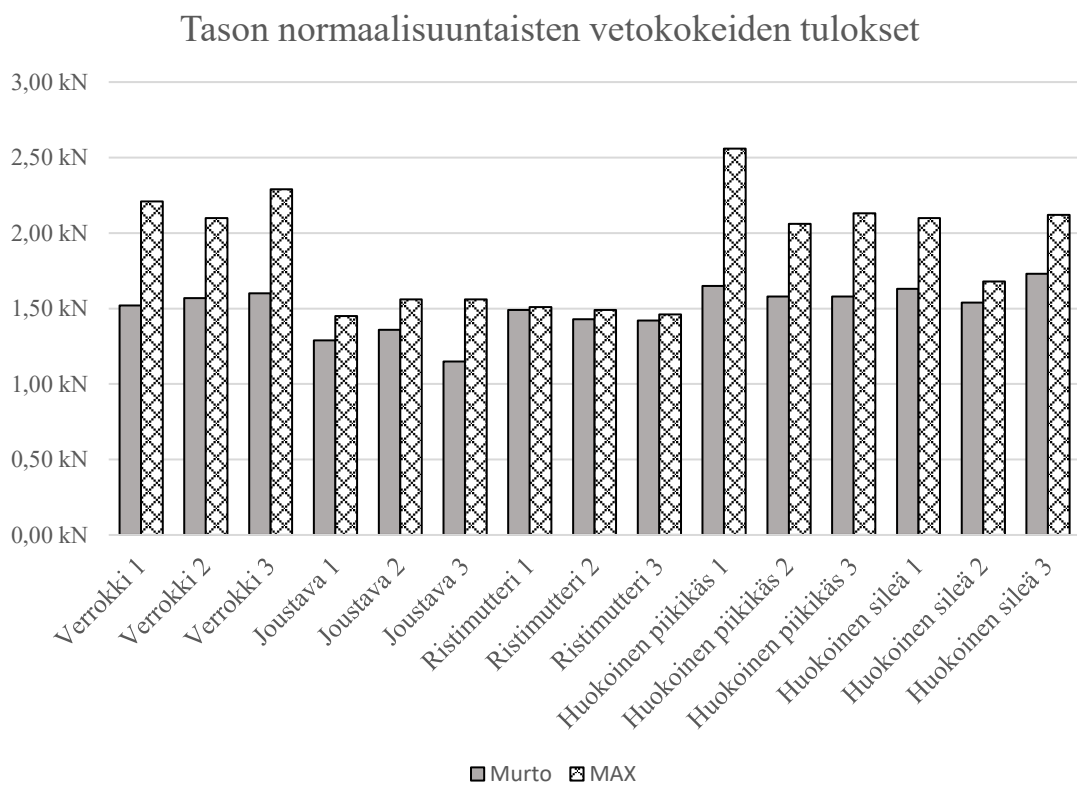
Kuten huokoinen piikikkäällä insertillä, myös sileän insertin lujuus perustuu pohjan liimauksen pitoon.

4.3 Vertailu

Tässä aluvussa vertaillaan inserttejä kokeiden tulosten perusteella. Vertailussa käytetään Excel-kaavioita, jotka on jaettu tason normaalisuuntaiseen ja tasonsuuntaiseen kaavioon. Ensimmäisenä esitetään kuvaajat kaikista testituloksista kategoriassaan ja seuraavaksi nähdään kategorioiden tulokset keskiarvovertailuna. Lopuksi tehdään yhteenveto, kuinka tulokset vertautuvat verrokkien tuloksiin.

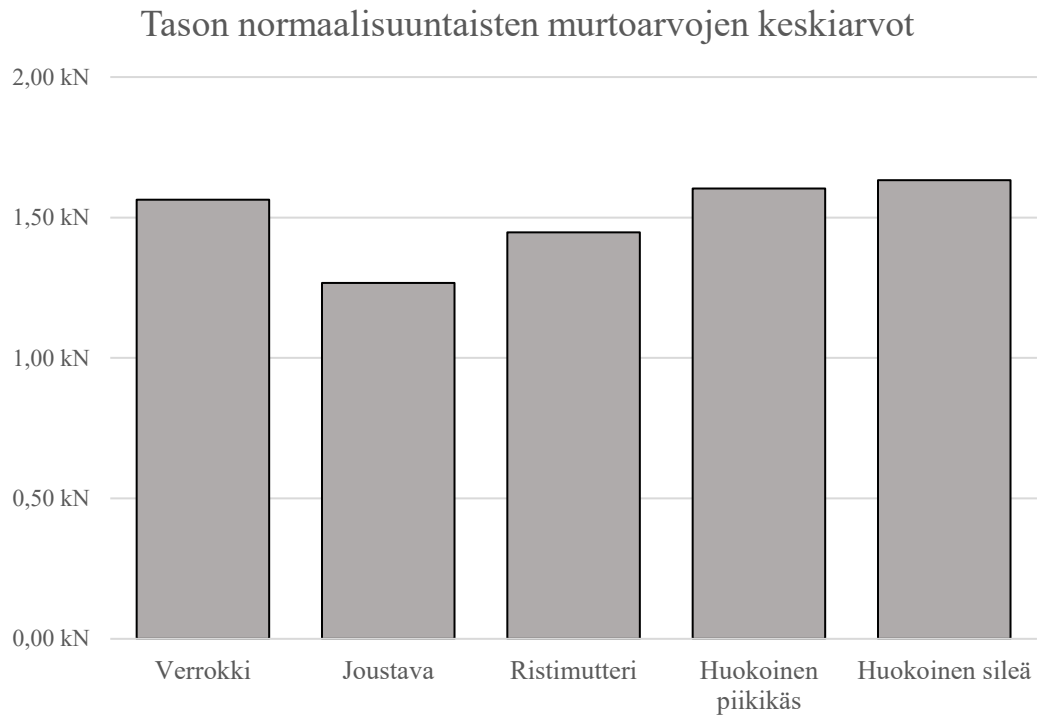
4.3.1 Tulokset

Kuvassa 41 esitetään tason normaalisuuntaisten testien tulokset pylväskaaviona. Kuvasta voidaan nähdä, että murtoarvo on kaikilla inserteillä lähes samalla tasolla. Murtoarvon eroihin voi vaikuttaa liiman tarttuvuus pohjapuolen pintalevyyn sekä muu liimauksen onnistuminen. Marginaalisia eroja voivat aiheuttaa myös yksilölliset erot kerroslevyjen työstöissä.



Kuva 41. Tason normaalisuuntaisten vetokokeiden tulosten pylväskaavio

Kun tarkastellaan voimia, huokoisten inserttien tulokset ovat samalla tasolla verrokkien kanssa. Maksimaalinen voima oli suurin niillä inserteillä, joilla pohjapito oli hyvä. Pohjapito näyttäytyy selkeänä kasvuna murtoarvohuipun jälkeen. Kuvassa 42 esitetään eri insertityyppien murtoarvojen keskiarvoja.

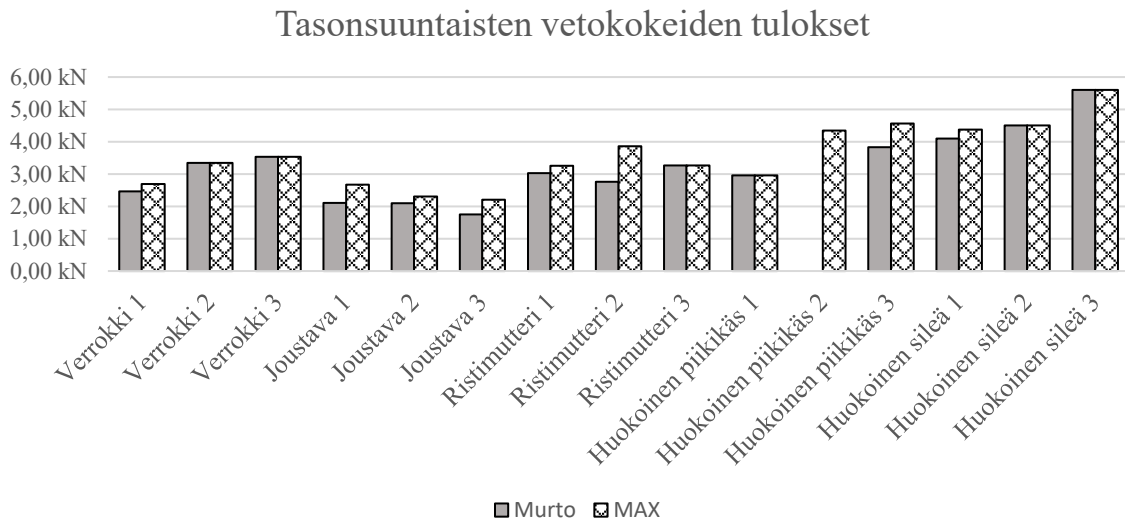


Kuva 42. Tason normaalisuuntaisten inserttien murtoarvojen keskiarvokaavio

Kuvasta 42 voidaan nähdä, että joustavan insertin arvo on selkeästi alhaisempi kuin muilla testatuilla inserteillä. Tämä saattaa johtua vähäisestä pinta-alasta pohjapuolen pintalevyn lähetyvillä sekä pohjapuolelle jääneestä ilmakuplasta.

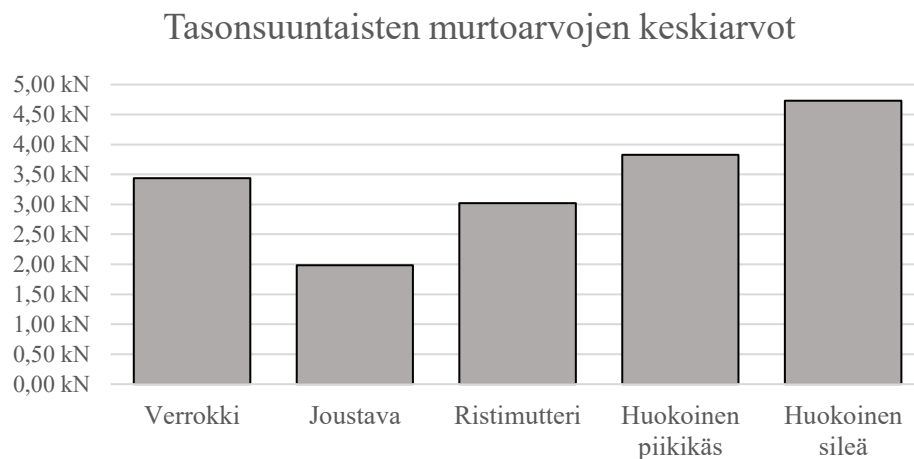
Ristimutterin tulos on verrokki-inserttiä alhaisempi. Liiman pohjakosketus ristimutterilla oli vähäinen, eikä se saanut juurikaan tukea pohjasta. Tämän huomioon ottaen tulos on verrattain hyvä. Tästä voidaan päätellä, että kaikkien inserttien murtorajalla tapahtuva notkahdus mahdollisesti johtuu pintalevyn ja hunajakennon pettämisestä. Kaikki huokoiset insertit ovat saavuttaneet hieman suuremmat arvot kuin verrokki-insertti. Ero toisiin tulostettuihin insertteihin voi myös johtua liimauksen laadullisista eroista. Vertaillessa huokoista piikikästä ja huokoista sileää inserttiä, ei testituloksissa ole nähtävissä merkittävää eroa laipan geometrian välillä. Tämä voi johtua siitä, että laipparakenteella on minimaalinen vaikutus tuloksiin.

Kuvassa 43 esitetään tasonsuuntaisten vetokokeiden tulokset pylväskaaviona.



Kuva 43. Tasonsuuntaisten vetokokeiden tulosten pylväskaavio

Osassa tuloksista on nähtävissä toisiinsa samanlaisiin insertityyppeihin poikkeavia tuloksia sekä yhden tuloksen puuttuminen. Nämä tapaukset on selitetty inserttikohtaisissa tulosten tarkastelussa. Merkittävimmät huomiot ovat joustavan insertin selvästi alhaisempi tulos ja huokoisten inserttien positiivinen erottuminen kaaviosta. Tässäkin tapauksessa yhteinen tekijä on pohjapito vastapuolen pintalevyn. Joustavalla insertillä pinta-ala kerroslevyn pohjalla on verrattavan pieni ja ilmakupla on haitannut tarttumista. Kuvan 44 murtoarvojen keskiarvokaaviosta nähdään inserttityyppien erot.



Kuva 44. Tasonsuuntaisten inserttien murtoarvojen keskiarvokaavio

Huokoisen piikikkään insertin kohdalla arvona on käytetty kolmannen ja ainoan onnistuneen vetokokeen tulosta. Perusteluna käyttää kolmatta vetokoetulosta keskiarvona perustellaan testidatattoman toisen vetokokeen olleen samankaltainen, kuin viimeinen vetokoe tällä insertityypillä. Myös verrokki-insertiltä on poistettu ensimmäinen epäonnistunut vetokoetulos keskiarvolaskennasta. Tässäkin testityypissä ristimutteri-insertin parempi liimaus olisi voinut saada tuloksista huomattavasti paremman. Kaaviosta voidaan huomata, että huokoisten inserttien arvot tasonsuuntaisessa kokeessa ovat selkeästi verrokkia paremmat. Etenkin huokoisen sileän insertin tulos on huomattavasti verrokkia suurempi. Yksiselitteistä vastausta tuloksiin ei ole, mutta huokoisten inserttien syvyys pintalevyn pinnasta on 2 millimetriä suurempi ja laipan liimaus voi lisätä voimankestävyttä.

4.3.2 Ominaisuuksien vertailu

Tarkastellessa lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistettujen inserttien hyödyllisyyttä, ei riitä pelkkien testitulosten vertailu. Vertailussa pitää ottaa huomioon myös muita seikkoja, kuten massa ja hinta. Alla olevassa taulukossa 6 on listattu eri ominaisuuksia jotka vaikuttavat inserttien hyödyllisyyteen.

Taulukko 6. Insertityyppien ominaisuuksien taulukointi

Inserttityyppi / Ominaisuus	Verrokki	Joustava	Ristimutteri	Huokoinen piikikäs	Huokoinen sileä
Materiaali	Al+ RST helical	316L	316L	316L	316L
Massa	3 g	10,5 g	10 g	10,3 g	11,6 g
Tason normaali-suuntaisen vetokokeen ka. tulos	1,56 kN	1,27 kN	1,45 kN	1,60 kN	1,63 kN
Tasonsuuntaisen vetokokeen ka. tulos	3,44 kN	1,99 kN	3,02 kN	3,83 kN	4,73 kN
Hinta	~3,5 €	~11 €	~12,5 €	~12,5 €	~12,5 €

Inserttien materiaali vaikuttaa työstettävyyteen, lujuuteen ja tässä tapauksessa suurin vaikutus sillä on massaan. Lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistetut insertit ovat yli kolme kertaa painavampia kuin verrokki-insertit. Tämä vaikuttaa etenkin painokriittisissä tuotteissa, kuten ilmailualalla. Vaihtamalla materiaalin ruostumattomasta teräksestä titaaniin, voidaan massaa pudottaa yli 40 prosenttia, jolloin verrokki-insertti olisi enää noin puolet kevyempi. Mikäli materiaali vaihdetaan titaaniin, tulee tutkia kierteen valmistettavuus. Tämä saattaa vaatia myös valmistusmenetelmän vaihtoa. Kirjallisuuskatsauksessa selvinneiden seikkojen mukaan sideaineen suihkutusta voisi olla sopiva valmistusmenetelmä, etenkin suuria sarjoja ajatellessa.

Taulukossa 6 mainitut lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistettujen inserttien hinnat perustuvat valmistajalta saatuun tarjoukseen. Tarjouskyselyssä kysyttiin hintaa, kun tulostus-tila täytetään huokoinen piikikäs insertillä. Inserttiä ei kuitenkaan voi pinota, joten tarjous on laskettu 118 insertille, mikä vastaa tulostusalustan yksikerroksista kapasiteettia kyseisellä insertillä. Muiden valmistettujen inserttien hinta on suhteutettu tutkimusta varten tilattujen inserttien hinnalla. Materiaalin vaihto titaaniin ei vaikuta hintaan merkittävästi. Verrokki-insertin suuntaa-antava hinta on saatu asiakkaalta.

Lisäävällä valmistusmenetelmällä on mahdollista valmistaa modulaarisia inserttejä. Ne olisi mahdollista räätälöidä jokaiseen kohteeseen erikseen ja ne olisi mahdollista saada muutamissa tunneissa omalla tulostimella.

5 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää voidaanko lisäävällä valmistuksella kehittää kerroslevyinserttien teknisiä ominaisuuksia paremmaksi kuin perinteisillä menetelmillä valmistetuilla inserteillä. Tämän tutkimuksen mukaan se on mahdollista. Inserttien tulostarkastelussa ilmenee muutamia rakenteiden heikkouksia, joita kehittämällä lisäävällä valmistusmenetelmällä voisi päästä samaan tulokseen verrokki-insertin kanssa.

Joustavalla insertillä tulokseen vaikutti liiman injektoinnissa pohjalle jäänyt ilmakupla sekä liiman tartuntapinnan vähäisyys kerroslevyn pohjan läheisyydessä. Ristimutterin heikkous liittyy myös liiman virtaukseen ja liiman tartuntapinta-alaan. Kehittämällä ristimutteriin tartunta-ala osion ja tiivistämällä nousevan kierreosan insertin ylälaitaan, saataisiin insertin liimanvirtausta ja pitoa parannettua.

Huokoisten inserttien tulokset olivat verrokin kaltaisia ja suunnittelu näyttää toteutuneen hyvin. Huokoisia inserttejä kannattaisi myös kehittää. Vaikuttaa siltä, ettei verkkorakennetta tarvita insertin sivuilla, vaan enemmänkin rouheaa laajaa pinta-alaa lähellä pohjapintalevyä. Toinen kehitettävä kohde huokoisissa inserteissä on liiman lisäys. Inserttejä asennettaessa kerroslevyissä ollut aukko esitäytettiin liimalla, sillä varmistettiin, että pohjalla oli liimaa. Koska asennusreikä esitäytettiin liimalla, siksi ei voida olla varmoja olisiko liima virrannut insertin alle. Mutta kuten joustavassa insertissä voitiin havaita, insertin pohjapuolelle olisi todennäköisesti jäänyt ilmatasku.

Huokoisia inserttejä valmistettiin laipan aluseltaan piikikkäitä ja sileitä. Tällä tutkittiin, vaikuttaako laipan alusen rakenteellinen ero insertin tuloksiin vetokokeissa. Tulosten perusteella ei voida kuitenkaan sanoa, oliko rakenne-erolla vaikutusta.

Tämän tutkimuksen vetokoetulosten perusteella lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistetuista inserteistä osa on parempia kuin, markkinoilla olevat perinteiset insertit. Kokonaisuudessa lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistetut insertit vaativat lisää tutkimusta ja kehitystyötä.

Tulosten keskiarvoja tarkastelemalla nähdään selvästi vastapuolen pintalevyyn tarttumisen suuri vaikutus. Kun inserteillä oli suuri pinta-ala vastapuolen pintalevyn läheisyydessä ja

liima oli levinnyt hyvin insertin ja pintalevyn väliin, kasvoi rikkoutumiseen vaadittavan voiman määrä.

Liiman tulisi virrata suoraan insertin pohjalle, jotta välttyttäisiin ilmataskuilta. Virtaustestaukseen tulisi löytää testikappaleisiin lisättävää liimaa viskositeetiltään vastaavampi materiaali, mikäli samaa liimaa ei ole käytettävissä jo injektointitestivaiheessa. Inserttien geometriaa pitäisi kehittää liiman virtauksen, tilavuuden ja pinottavuuden suhteen.

Tilavuuden ja pinottavuuden kehittämisessä tähdätään valmistuskustannusten alentamiseen. Kun insertin valmistamiseen käytetyn materiaalin tilavuus vähenee, vähenee myös sulatettavan materiaalin määrä, samalla se vaikuttaa tulostusaikaan lyhentävästi. Tilavuuden optimointi vähentää myös insertin massaa. Kun tilavuuden optimoinnin kanssa kehitetään insertti pinottavaksi tulostusalustalle, saadaan lisää tehokkuutta tulostukseen.

Jokaista inserttiä testattiin kolme kappaletta, jotta voitiin varmistua tulosten yhteneväisyydestä. Yksittäisellä tuloksella ei voida vakuuttua, että testikappale on hyvälaatuinen. Kun testikappaleita tehdään useampi, saadaan tuloksiin hajontaa. Mikäli hajonta ei ole suurta, voidaan varmistua tuotteen laadun olevan yhtenäinen. Tässä tapauksessa inserttikeskeisesti hajonta ei ollut suurta ja voidaan olettaa inserttityyppikohtaisen keskiarvon olevan luotettava. Testeissä kuitenkin tapahtui valitettavia käännteitä, jotka heikentävät joiltain osin tulosten yhteneväisyyttä ja luotettavuuden arviointia.

Lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistetut kerroslevyinsertit vaativat lisää kehitystä ja tutkimusta, jotta voidaan sanoa, onko lisäävästä valmistuksesta hyötyä kerroslevyinserttien kehityksessä. Jatkotutkimuskohteina inserttejä pitäisi kehittää seuraavilla osa-alueilla.

- Testaaminen erilaisilla kerroslevyillä
- Geometrian jatko- tai uudelleenkehittely sekä paino- ja hintaoptimointi
- Eri valmistusmenetelmät
- Erikoistapauksiin kehitettävät insertit

Ensimmäisenä jatkotutkimuskohteena voitaisiin tutkia inserttien ja testikappaleiden vaurioitumista eri paksuisilla pintalevyillä. Tällä variaatiolla voisi tulla esiin erilaisia käyttäytymisiä testikappaleen vaurioituessa.

Toisena ja ehkä tärkeimpänä jatkotutkimusaiheena geometrian parantamisessa tulisi keskittyä etsimään ratkaisuja, joilla saadaan laajemmalla alueelta tukea pintalevyistä sekä ratkaisuja liiman virtaamiseen pohjalta ylöspäin, jolloin ilmataskujen muodostuminen on epätoiminnaisempaa. Geometrian kehittämisessä tulisi ottaa huomioon kustannustehokkuutta parantavat tekijät, kuten inserttien tilavuus ja pinottavuus tulostaessa.

Kolmantena jatkotutkimusaiheena voisivat olla eri valmistusmenetelmät. Eri valmistusmenetelmillä on erilaisia hyötyjä ja haasteita. Esimerkiksi sideaineen suihkutuksella kierteen valmistaminen on laadukkaampaa ja pinoaminen helpompaa, mutta menetelmä vaatii osamista kutistuman hallinnassa. Eri valmistusmenetelmällä materiaalivalinta voi helpottua ja päästään lähemmäksi käytössä olevien inserttien massaa. Materiaalina voisi hyödyntää esimerkiksi alumiinia helical-kierreinsertillä tai titaania.

Neljäntenä jatkotutkimusaiheena voisi olla erikoistapauksiin kehitetyt insertit. Tämä osa-alue keskittyisi tapauksiin, joissa perinteisten inserttien käyttö ei ole mahdollista. Tutkimuskysymyksiä voisivat olla esimerkiksi tilanteet, joissa liitoksia tarvitaan kaksi tai useampi todella lähekkäin ja/tai erikoisiin suuntiin tai eri tasoihin.

Tutkimuskysymyksenä tässä tutkimuksessa oli: mitä metallin lisäävän valmistuksen muotovapauksien ominaisuuksia voidaan hyödyntää komposiittirakenteen kerroslevyinserteissä. Vastauksena kysymykseen ovat verkkorakenteet, optimointi, pikkutarkat yksityiskohdat ja geometrisesti haastavat rakenteet perinteisille valmistusmenetelmille.

6 Yhteenveto

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko metallin lisäävää valmistusta hyödyntää kerroslevyinserttien kehitykseen. Työn tarkoituksena oli selvittää ovatko lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistettujen inserttien tekniset ominaisuudet vetokoetilanteessa paremmat verrokkiin verrattuna ja onko lisäävällä valmistuksella muita hyötyjä. Kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin aiheen pääkomponentteihin. Teoriapohjan avulla toteutettiin aivoriihi, jossa määriteltiin insertin onnistuneen liitoksen tärkeimmät ominaisuusvaatimukset. Aivoriihen avulla kehitetyt ideat koottiin ja yhdisteltiin. Näiden pohjalta kehitettiin inserttien 3D-malleja.

Inserttejä arvioitiin ja rajattiin useaan otteeseen työn aikana ja lopulta päädyttiin valmistamaan neljä erilaista lisäävällä valmistuksella valmistettua inserttiä, joita verrattiin markkinoilla olevaan perinteisin menetelmin valmistettuun inserttiin. Perusteluina näiden neljän insertin valintaan olivat olettamukseen perustuvat toteutettavuus, soveltuvuus sarjatuotantoon ja alhaiset kustannukset verrattuna muihin. Insertit valmistettiin laserjauhepetisulatusmenetelmällä.

Vetokokeiden tulosten perusteella lisäävällä valmistusmenetelmällä päästään vertailtaviin tuloksiin perinteisin menetelmin valmistettujen inserttien kanssa. Osin tulokset olivat jopa parempia kuin vertailukohtana käytetyllä insertillä.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että lisäävällä valmistusmenetelmällä valmistettujen inserttien olevan vielä kaukana teollisesta sarjatuotannosta. Insertit vaativat sarjatuotannollista kehitystä, mikä puolestaan vaatii muiden lisäävän valmistuksen menetelmien käytön tutkimusta, kevyempien materiaalien hyödyntämisen tutkimusta sekä geometrista kehittelyä.

Lähteet

- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M. & Clare, A. (2017) Materials for additive manufacturing. *CIRP annals*. [verkkoaineisto] 66 (2), s. 660–663. <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/j.cirp.2017.05.009>
- Clarendon Specialty Fasteners (2021). *Potted inserts product catalogue* [PDF]. Saatavissa: <https://cdn.filestackcontent.com/vsce53slT6eU9CIWIXwv> [viitattu 10.1.2024].
- Crucible Design Ltd. (2015). *Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.crucibledesign.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-a-management-guide-download-original.pdf> [viitattu 14.8.2023].
- Duan, M., Bai, G., Guo, S., Peng, Y., Liu, X., Zhang, W., Zhang, X., Huang, Y., Liu, J., Gao, G., Kong, J., Zhou, Q. & Wang, K. (2023) “Dynamic tensile mechanical properties of 18Ni350 maraging steel fabricated by wire arc additive manufacturing,” *Journal of Materials Research and Technology*, 25, s. 5426. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.276>.
- ECSS (2011). *Space engineering Insert design handbook* [PDF]. Saatavissa: <https://www.abbottaerospace.com/downloads/ecss-e-hb-32-22a/> [viitattu 5.1.2024].
- EOS GmbH. (2013). *DMLS Design-Rules* [verkkoaineisto]. Saatavissa: https://www.3dimpuls.com/sites/default/files/download/dmls_design-rules_en.pdf [viitattu 8.8.2023].
- EOS GmbH. (2023). *Support-Free Printing of Closed Impellers* [verkkoaineisto]. Saatavissa: https://3d.eos.info/hubfs/GatedContent/EOS_Whitepaper_Support_Free_Impellers_en.pdf?utm_campaign=Support%20Free%20Metal%203D%20Printing&utm_medium=email&_hsmi=73439667&_hsenc=p2ANqtz-8AFNor7FeA1stpKKJx5psbH4S-c899dFySvhGll0hHgpBdhMPSoe31juvYF1Lh8JLdoSeJXM-Ole9rqqOH9RYdr3Pj-CGOXj9_kpelcieZJjKX9RY&utm_content=73439667&utm_source=hs_automation [viitattu 10.8.2023].

GE Additive (2023). Metal powders for additive manufacturing [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/metal-additive-manufacturing-materials> [viitattu 4.9.2023].

Hause, T. J. (2021) *Sandwich structures : theory and responses*. Cham, Switzerland: Springer. s. 1-2.

Hendrixson, S. (2022) “AM 101: NanoParticle Jetting (NPJ),” *Additive Manufacturing*. Saatavissa: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/am-101-nanoparticle-jetting-npj> [viitattu: 24.8.2023].

Jamshidinia, M. & Sadek, A. & Wang, W. & Kelly, S. (2015). Additive Manufacturing of Steel Alloys Using Laser Powder-Bed Fusion. *Advanced Materials and Processes*. 173. s. 21.

Kamara, S. & Faggiani, K. S. (2021) *Fundamentals of additive manufacturing for the practitioner*. First edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. s. 8–100.

Kandavalli, S. R., Edberk, A. S., Rajendran, K. D., & Rajagopal, V. 2021. A Progressive Review on Wire Arc Additive Manufacturing: Mechanical Properties, Metallurgical and Defect Analysis. Teoksessa: Natarajan, J., Cheepu, M. & Yang, C. *Advances in Additive Manufacturing Processes*. Singapore: Bentham Science Publishers Ltd. 2021. s. 182–183.

Kumar, S., Goel, S., Sharma, A. & Pandey, C. 2021. Direct Energy Deposition. Teoksessa: Natarajan, J., Cheepu, M. & Yang, C. *Advances in Additive Manufacturing Processes*. Singapore: Bentham Science Publishers Ltd. 2021. s. 167

Leventon, W. (2019). *Less support is a good thing—when 3D printing* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.thefabricator.com/additivereport/article/additive/less-support-is-a-good-thingwhen-3d-printing> [viitattu 10.8.2023].

Meng, L., Zhang, W., Quan, D., Shi, G., Tang, L., Hou, Y., Breitkopf, P., Zhu, J., & Gao, T. (2020) From Topology Optimization Design to Additive Manufacturing: Today’s Success and Tomorrow’s Roadmap. *Archives of computational methods in engineering*. [verkkoaineisto] 27 (3), s. 819. <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/s11831-019-09331-1>

Metal AM (2016) *XJet world’s first direct 3D metal ink-jet using nanoparticle jetting*. Saatavissa: <https://www.metal-am.com/>

xjet-present-worlds-first-direct-3d-metal-ink-jet-system-using-nanoparticle-jetting-technology/ [viitattu: 24.8.2023].

Mostafaei, A., Elliott, A., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P. & Chmielus, M. (2021) Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in materials science*. [verkkoaineisto] 119 (C), s. 4–5. <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>

Péreira, A. B. & Fernandes, F. A. O. (2019) Sandwich Panels Bond with Advanced Adhesive Films, *Journal of Composites Science*, 3(3), 79. s. 2. <https://doi.org/10.3390/jcs3030079>.

Rodríguez Ramírez, J. D. D. (2018) Analysis of the nonlinear behavior of inserts in sandwich structures : application to an innovative sizing method, *ResearchGate* [Väitöskirja]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/329827579_Analysis_of_the_nonlinear_behavior_of_inserts_in_sandwich_structures_application_to_an_innovative_sizing_method. s. 3

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. (2019a) Kerroslevyjen ydinaineet, *Komposiittirakenteet* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.lujitemuovi.fi/raaka-aineet/3-6-kerroslevyjen-ydinaineet/> [viitattu 11.9.2023].

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. (2019b) Lujitetuotteet, *Komposiittirakenteet* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.lujitemuovi.fi/puolivalmistet/4-1-lujitetuotteet/> [viitattu 11.9.2023].

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. (2019c) Lujitekuidut, *Komposiittirakenteet* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.lujitemuovi.fi/raaka-aineet/3-4-lujitekuidut/> [viitattu 11.9.2023].

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. (2019d) Kestomuovit, *Komposiittirakenteet* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.lujitemuovi.fi/raaka-aineet/3-2-kestomuovit/> [viitattu 11.9.2023].

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. (2019e) Komposiittirakenteet, *Komposiittirakenteet* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.lujitemuovi.fi/terminologiajamerkinnaat/2-4-komposiittirakenteet/> [viitattu 11.9.2023].

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. (2019f) Kertamuovit, *Komposiittirakenteet* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.lujitemuovi.fi/raaka-aineet/3-1-kertamuovit/> [viitattu 11.9.2023].

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. (2019g) Valmistusmenetelmät, *Komposiittirakenteet* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.lujitemuovi.fi/valmistustekniikka/5-1-valmistusmenetelmat/> [viitattu 11.9.2023].

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. (2019h) Laminaattien mekaaniset lyhytaikaisominaisuudet, *Komposiittirakenteet* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.lujitemuovi.fi/ominaisuudet/6-4-laminaattien-mekaaniset-lyhytaikaisominaisuudet/> [viitattu 11.9.2023].

SFS-EN ISO/ASTM 52900. 2021. *Lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Perusteet ja sanasto*. 2. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. s. 67. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

Sing, S. L., Tey, C. F., Tan, J. H. K., Huang, S. & Yeong, W. Y. (2020) '2 - 3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing', Teoksessa *Rapid Prototyping of Biomaterials*. Second Edition [verkkoaineisto]. Elsevier Ltd. s. 17–21.

Sciaky Inc., (2023). Benefits of Wire vs. Powder Metal 3D Printing [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder> [viitattu 5.9.2023].

Shur-lok, (1999a). *Fasteners for Sandwich Structure Catalog* [PDF]. Saatavissa: <https://www.shur-lok.com/documents/catalogs/sandwich-structure-catalog.pdf> s. 1–4 [viitattu 10.1.2024].

Shur-lok (1999b). *Advanced Composites Catalog* [PDF]. Saatavissa: <https://www.shur-lok.com/documents/catalogs/advanced-composites-catalog.pdf> s. 2–3 [viitattu 10.1.2024].

Suwanpreecha, C. & Manonukul, A. (2022) A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding. *Metals (Basel)*. [verkkoaineisto] 12 (3), s. 4. <https://doi.org/10.3390/met12030429>

Tractus3D (2023). Advantages of 3D printing (and disadvantages) [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://tractus3d.com/knowledge/learn-3d-printing/advantages-of-3d-printing/> [viitattu 18.8.2023].

TWI Ltd, (2021). *Can 3D Printing Use Metal? (Everything You Need To Know)* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/can-3d-printing-use-metal#WhatMetalscannotbe3DPrinted> [viitattu 4.9.2023].



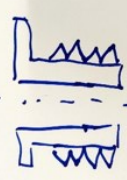
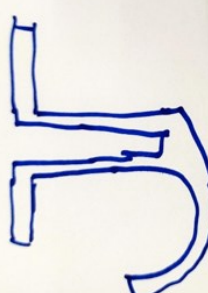

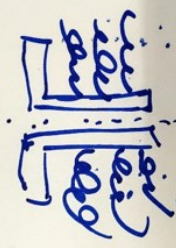
Varotsis, A. B. (2022). *What is design for additive manufacturing?* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.ntop.com/resources/blog/what-is-design-for-additive-manufacturing/> [viitattu 17.8.2023].

Velo3D, (2022). *Velo3D's Newest Metal AM Printer - Sapphire XC* [YouTube-video]. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=rHQiNGKCLxw> [viitattu 10.8.2023].

Vuorinen, J., Mustakangas, M & Annala, M. (2016). *Komposiitit - loputtomasti mahdollisuuksia* [PDF]. s. 1–10 Saatavissa: <https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/komposiitit/> [viitattu 11.9.2023].

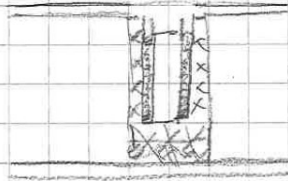
Xjet (2023) *Homepage - XJET*. Saatavissa: <https://xjet3d.com/>. [viitattu: 24.8.2023]

Liite 1. Ensimmäisen aivoriihen vaatimuksen 1 ideat

<p>Funktio 1 Ilkka "Kynsi"</p>  <p>Kynsi tarra pinnaan pinta ja epoksiin</p>	<p>Funktio 1 Ilkka "Pöppö"</p>  <p>Inspirantio pöppö</p> <p>aukkaavat siivekkeet</p> <p>Voivat tuhota osan hanaajakerroksesta</p> <p>Massalla reian täyttö (tai ei välttämätöntä?)</p> <p>Ei taida toimia vuotohtäytöille?</p>	<p>Funktio 7</p>  <p>Jyrkin hampaasto</p> <p>reni</p>
<p>Funktio 1</p>  <p>J-häntä</p> <p>reni</p>	<p>Funktio 1</p>  <p>Potturit</p> <p>reni</p>	<p>Funktio 1</p>  <p>Tarra koukerot</p> <p>reni</p>

Funktio 1

Tero

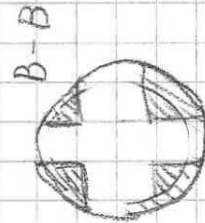
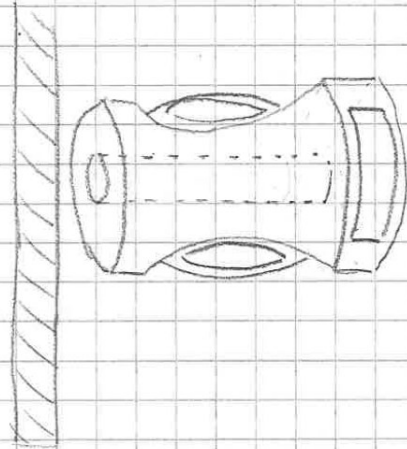


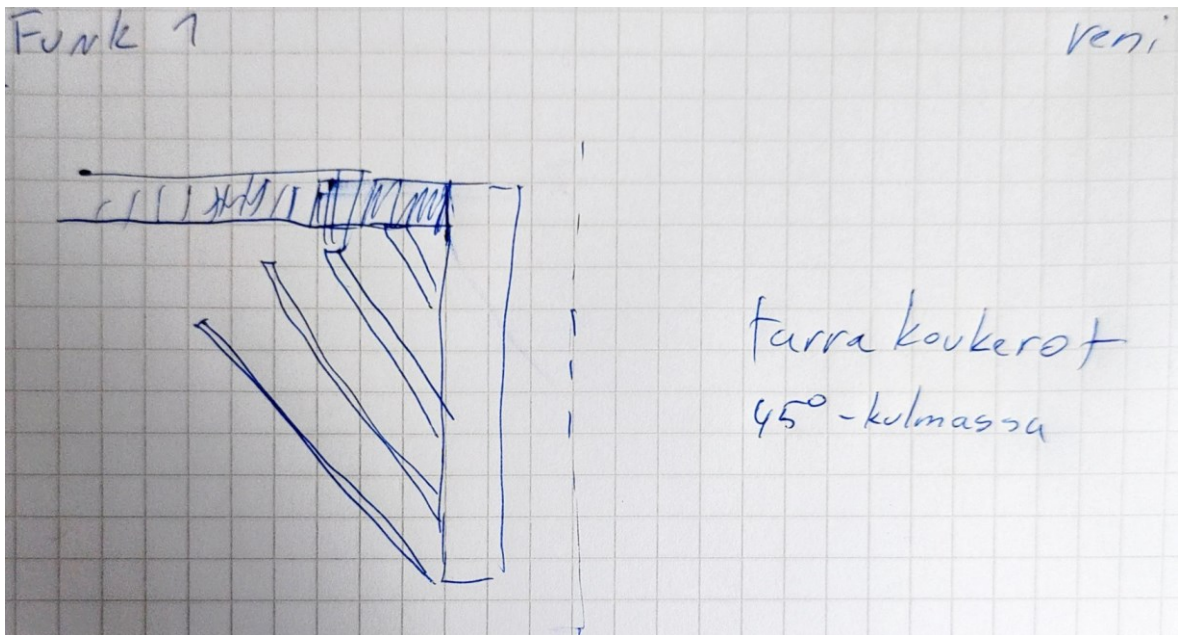
- Perinteinen insertti, mutta
 Verkkotekstauri ympärillä
 johon Epoksi voi tulla

①

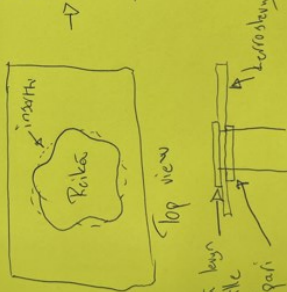







Tariffisuus insertin ja epoksin välillä

Sami Siivonen

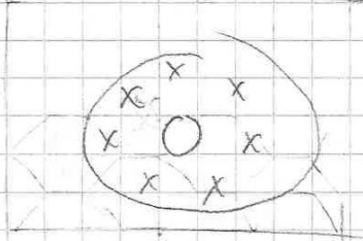




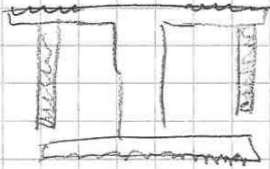
Liite 2. Ensimmäisen aivoriihen vaatimuksen 2 ideat

<p>Funktio 2 Iitea "Pipari"</p> <p>insertille pipari- leike / muoto → Pyöristettyä vatsaa jollain tavoin josta terrosteinen alle Lukittava epiteelilla</p>  <p>Top view joka löyry pipari terrosteinen</p>	<p>Funktio 2 Iitea "Kierre"</p>  <p>Kierre</p> <p>Tehdään kierre, josta standardimalli tai AM hirttejä mallien + avens- työkalu jolla potaus onnistuu</p>	<p>Funk 2</p>  <p>reni</p>  <p>Bayonetti kiinnitys (kukaan ei pyöräytä mitään)</p>
<p>Funk 2</p>  <p>reni</p>  <p>Potkurii- Kierre +lorirako</p>	<p>Funk 2</p>  <p>reni: Funk 2</p> <p>Asennuttavat siivokset</p>	<p>reni</p>  <p>Funk 2</p> <p>Vampyyrin hampaat</p>

Funktio 2 Tere



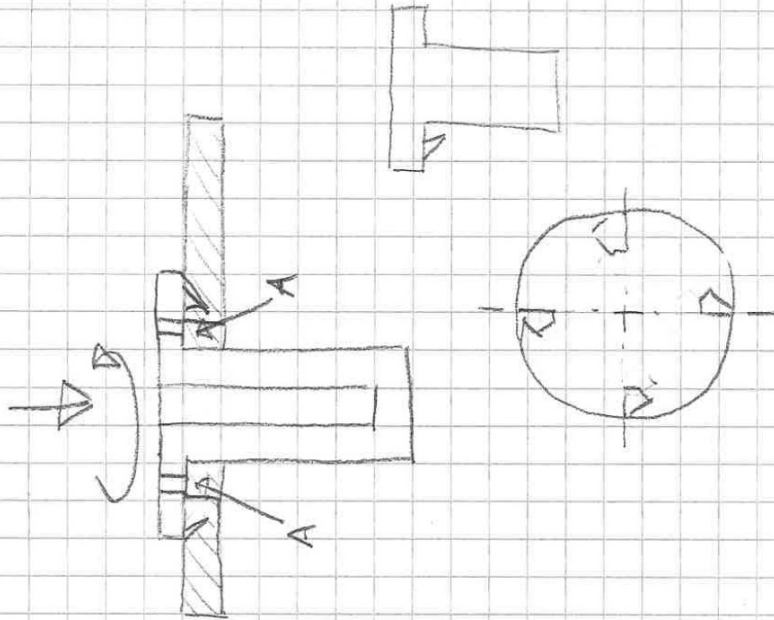
insertti joka upotetaan
kennorakentim.
kenno rakentim puolesta
osa + verhoakennepäällyste
myös pikkuiset pöly ja
pinta liitos



2

Tarjous kerronkyn

Sami Sivonen



Liite 3. Ensimmäisen aivoriihen vaatimuksen 3 ideat

Funktio 3 Iilka

Phase 1
Liima sisään

Phase 2
insinööri
pöytä

Phase 3
Pöytä
yliosa
liima

Funktio 3 Iilka

Liima sisään

Liimakanavat

Funktio 3 Iilka "Lima"

Ehkäsiimaqistodilla
liima gersattan karavie
pitkin sivulle ja
pohjalle

Liimakanavat

Funktio 3 Iilka "Hukoisuus"

Pohjassa hukkoisin
kohta josta ilma pöyryy pois

Funk 3

Reni

Sisäinen kanava
& suutin
motto

Funk 3

Reni

Sisäinen kanava

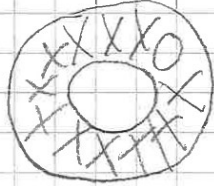
Funk 3

Reni

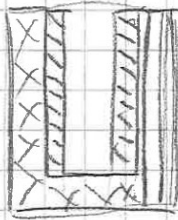
Pinnan
läpäisevä
pöytä-ilmä
reikä.

Funktio)

Terve



Pöytä insertti jossa
 ilman lähte laanava tai
 pohja täyttö.
 Muuten ulampikahä verkkoa



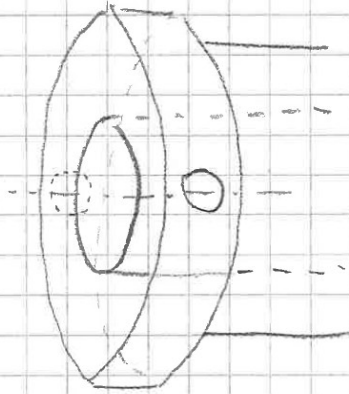
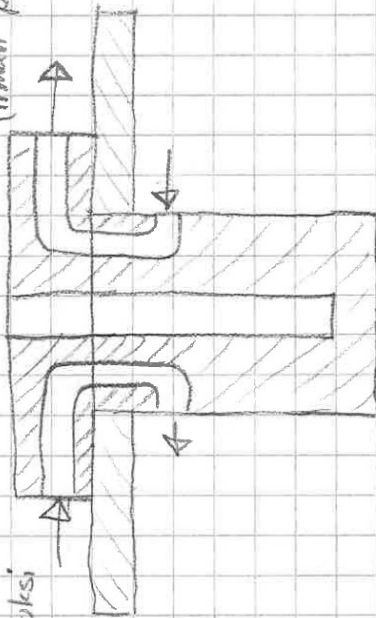
(3)

Liiman liiskäys ja ilman piistaruus

Suoritetaan
 custom työkalulla

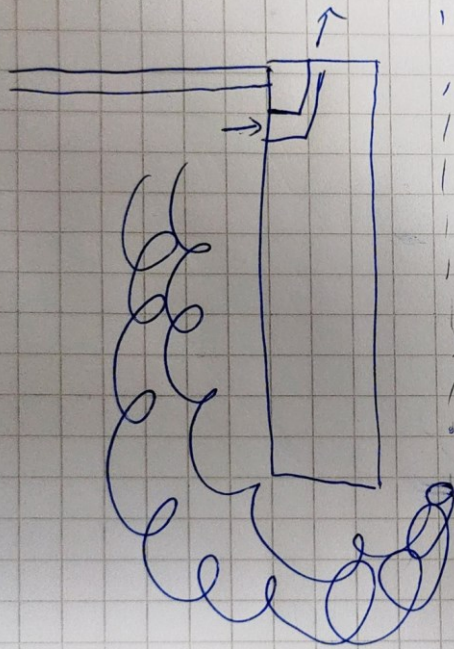
Alipaine
 (ilman poisto)

Epoiksi



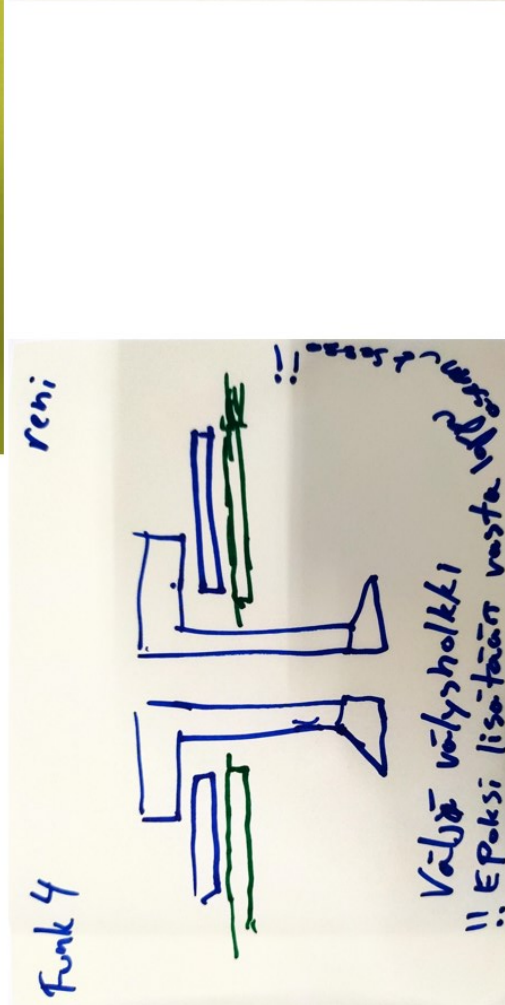
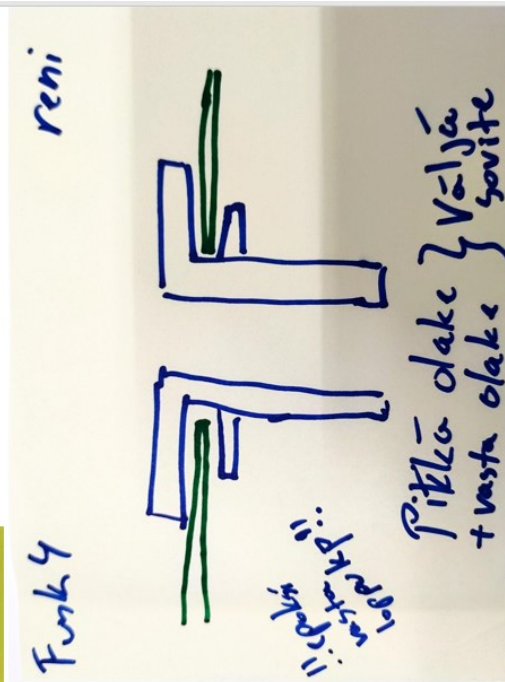
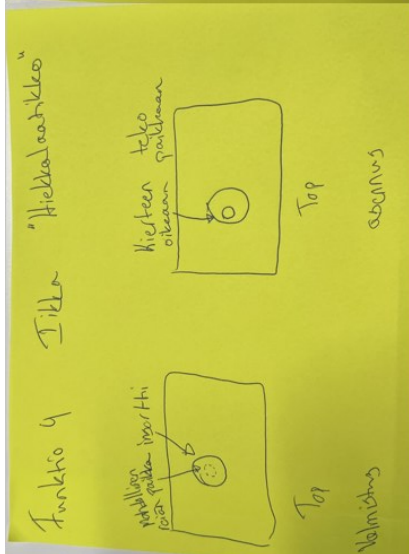
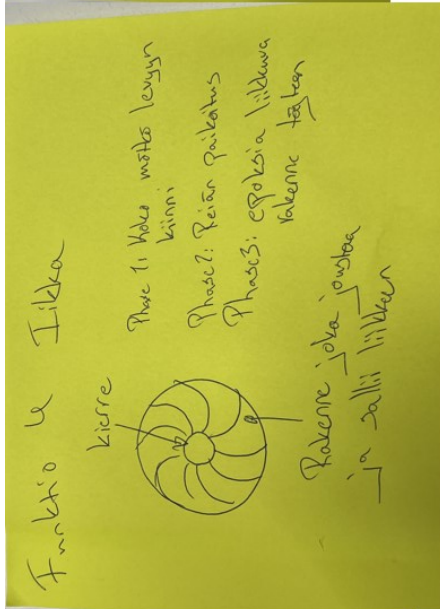
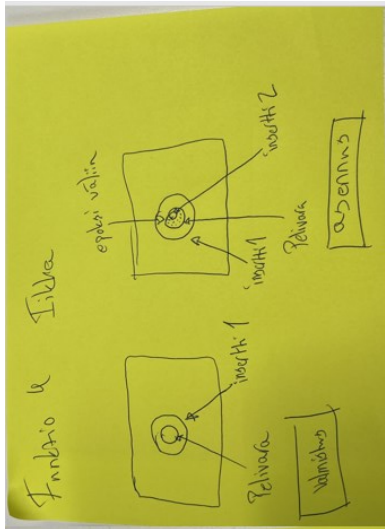
Funk 3

Pieni



Ilmanpoisto reikä
mahdollisimman
ylhäällä
asertissa

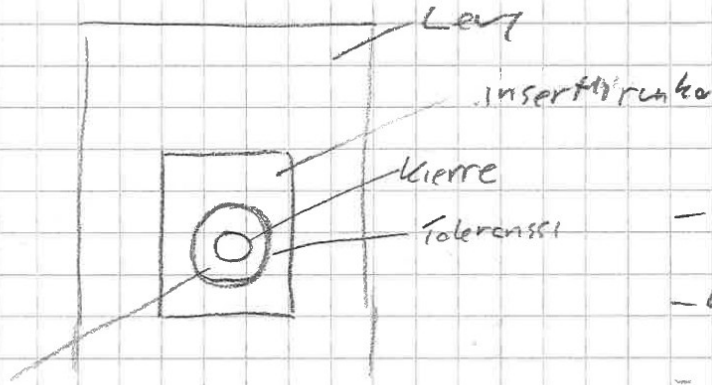
Liite 4. Ensimmäisen aivoriihen vaatimuksen 4 ideat



Pitkä olake } Välyä + vasta olake } sovite

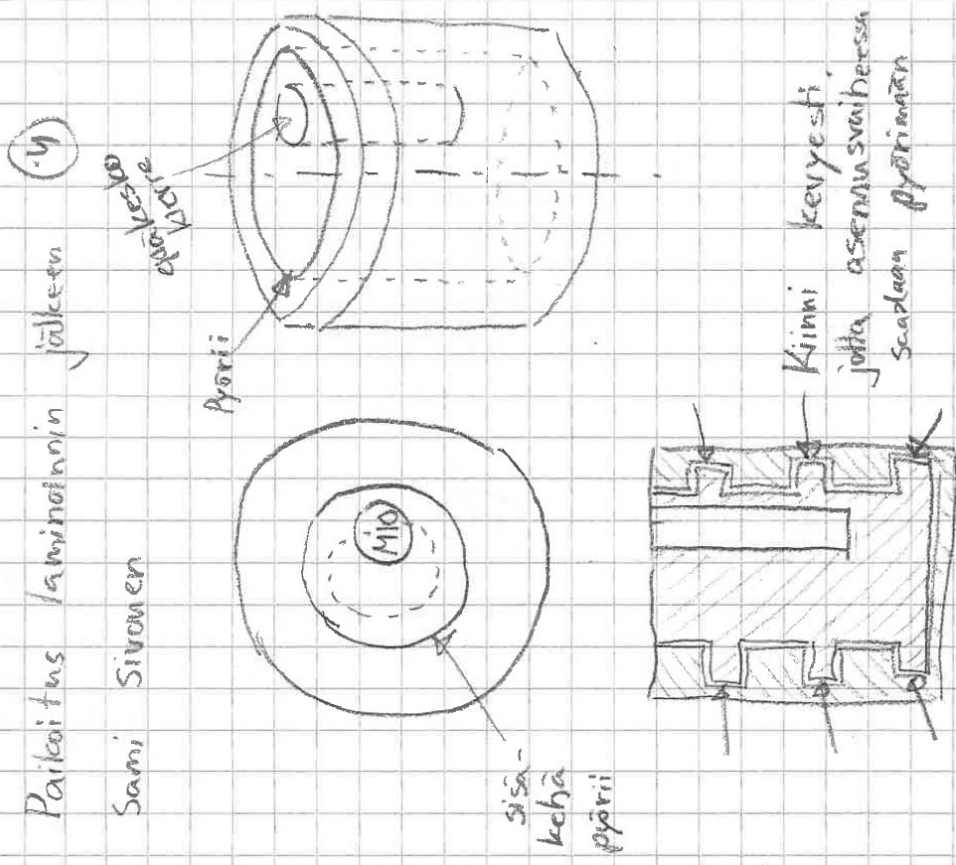
Välyä välysholkki !! Epöksi lisätään vasta

Funktio 4 Tero



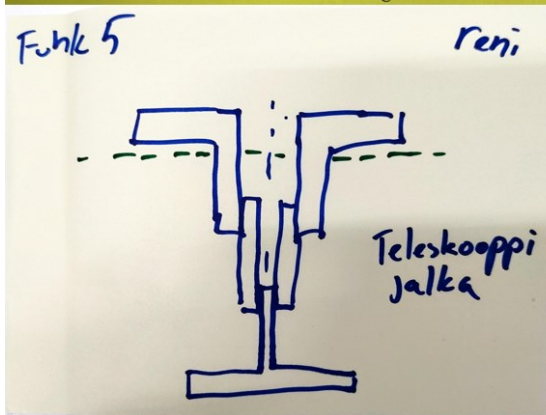
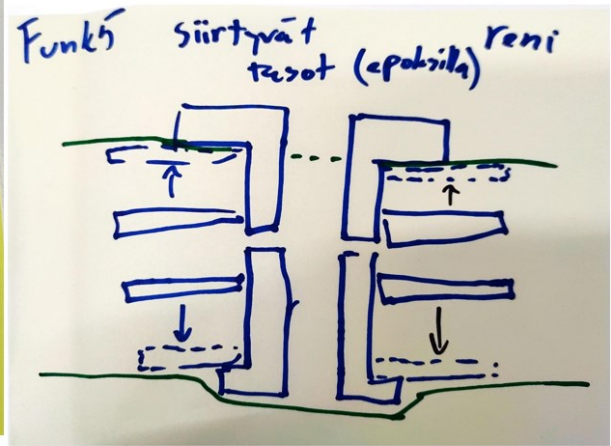
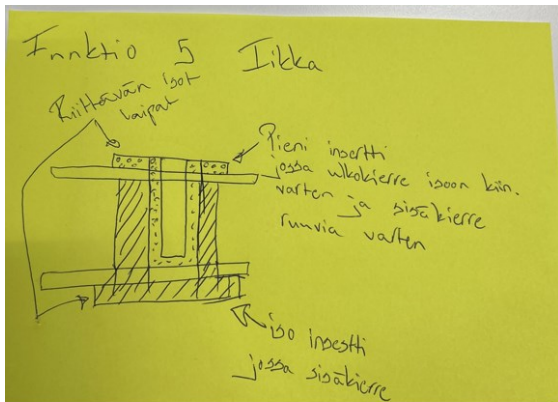
- insertin runko verhoakanteen
- kierre kiinniteky verhoakanteella
- pinta saagattu painumiselta

Epäoli lisätään myöhemmin
välystä aulasta

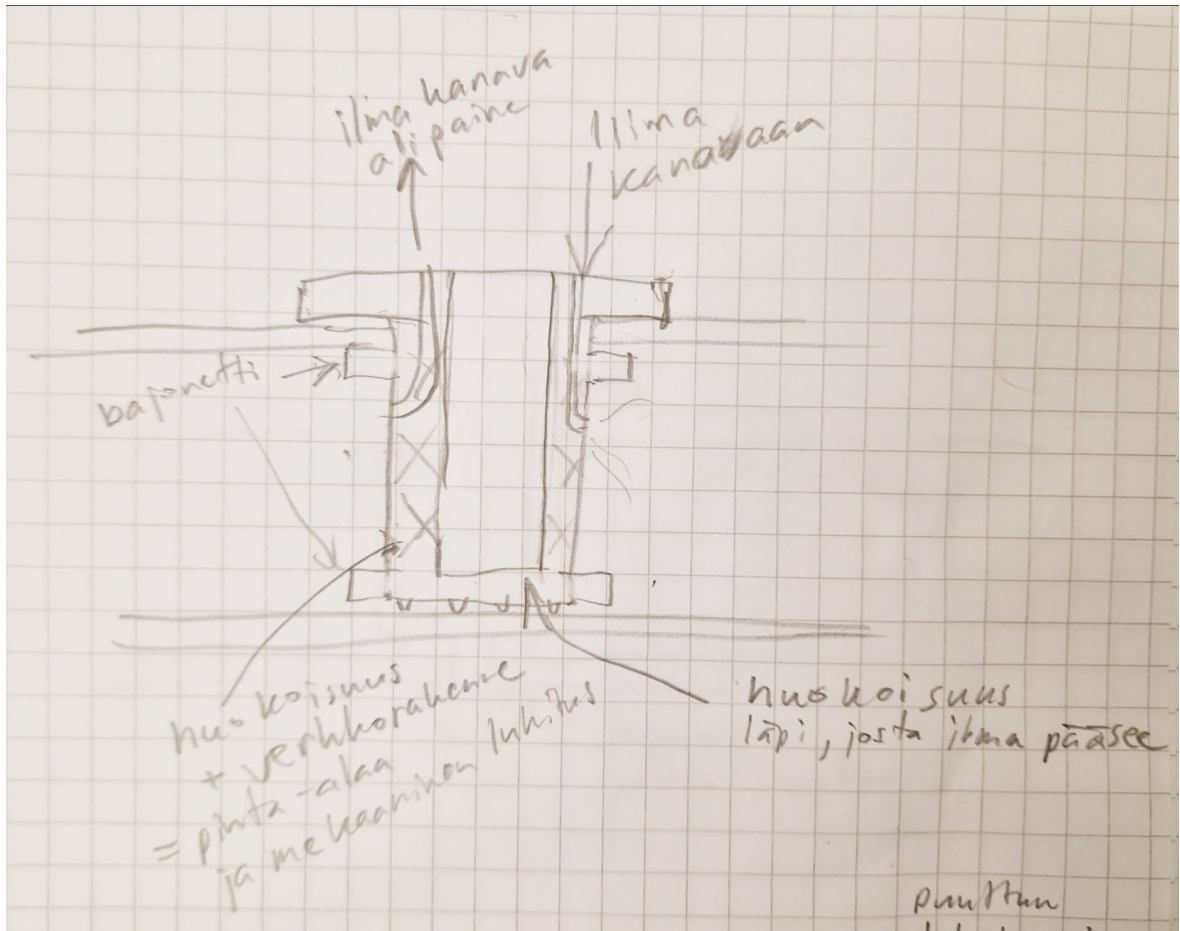


Palkoitus lammoinnin jälkeen
Sami Sivonen

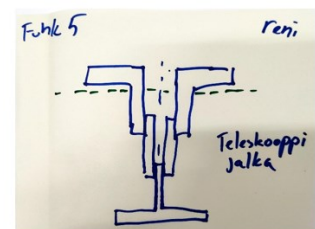
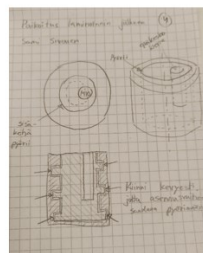
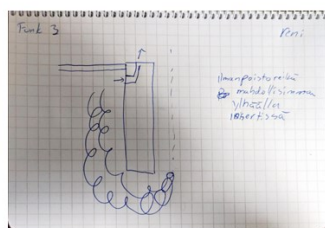
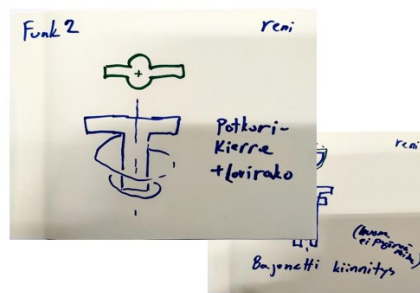
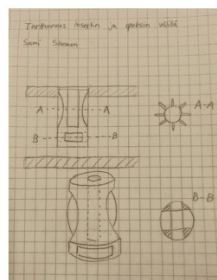
Liite 5. Ensimmäisen aivoriihen vaatimuksen 5 ideat



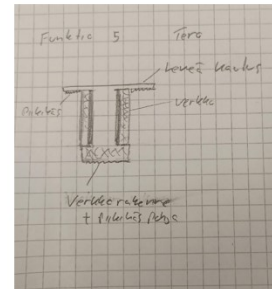
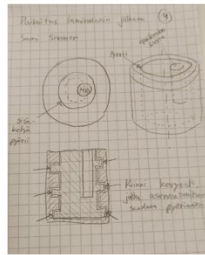
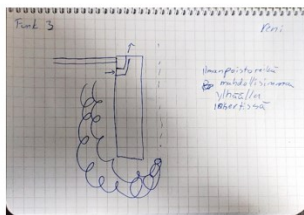
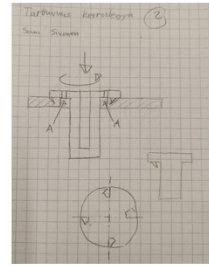
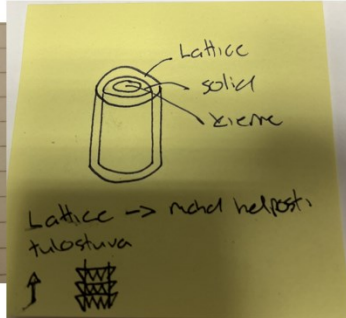
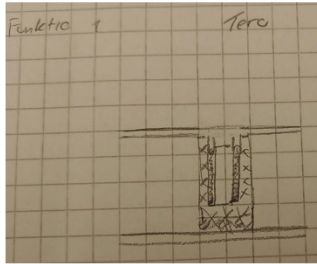
Liite 6. Toisen aivoriihen yhdistetyt ideat



Renin jalosteidokset 1

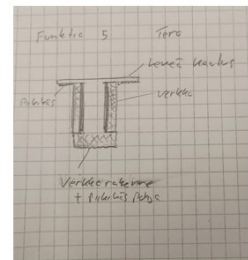
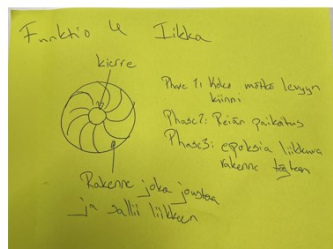
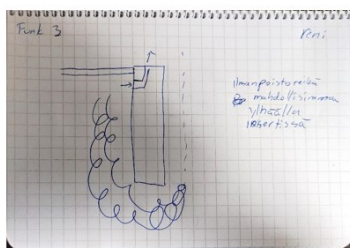
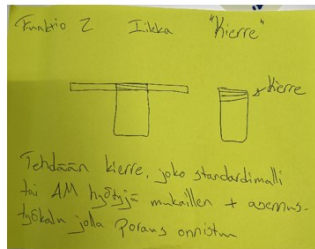
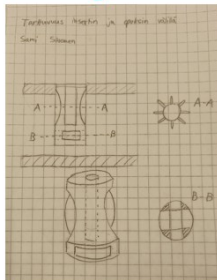


Renin jalosteidikset 4

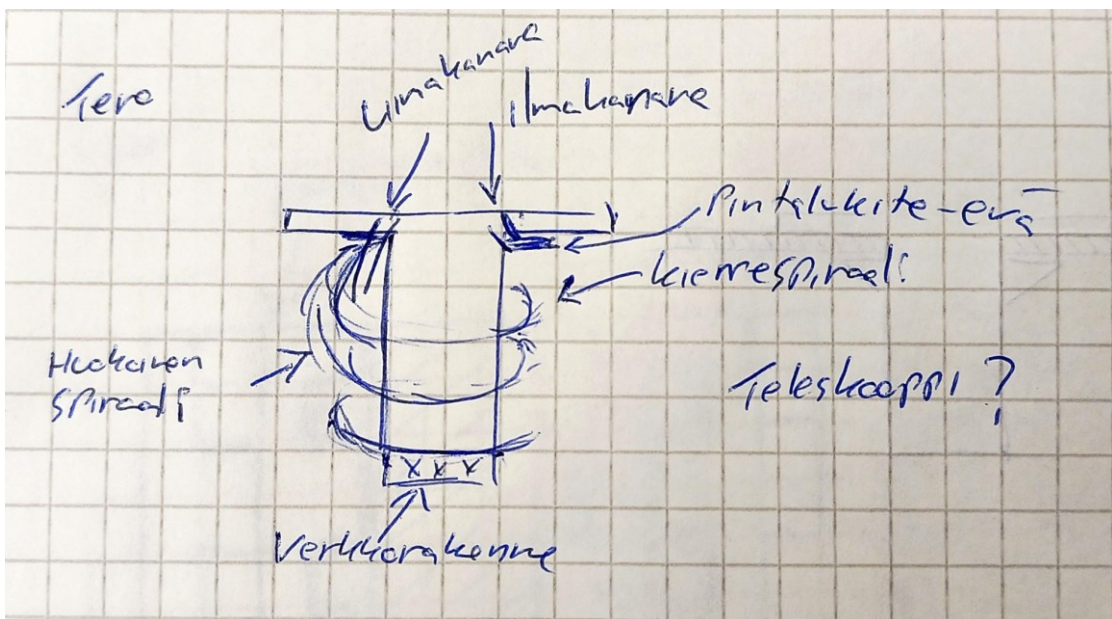
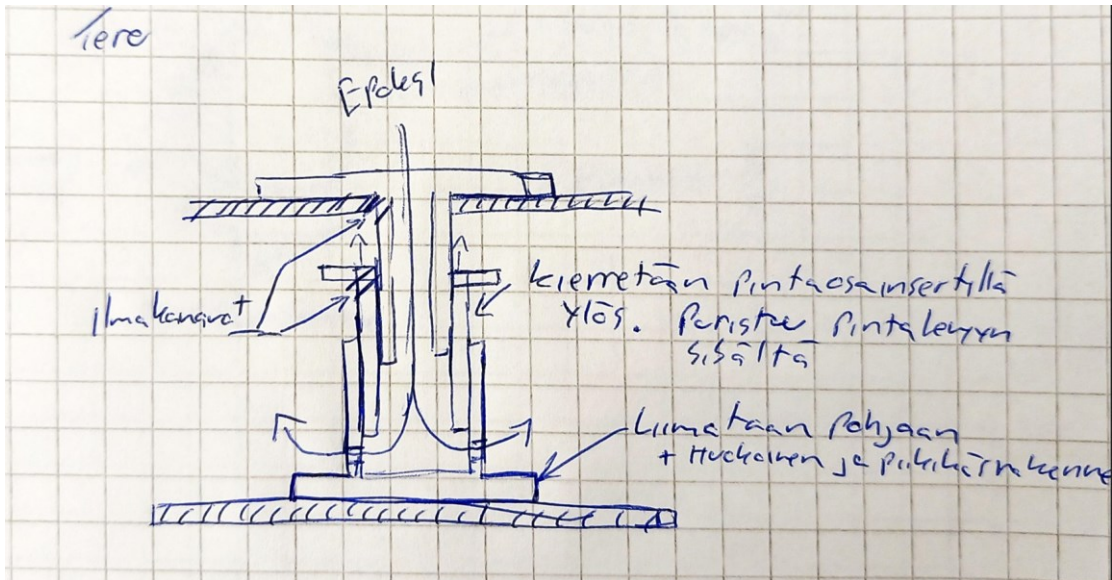
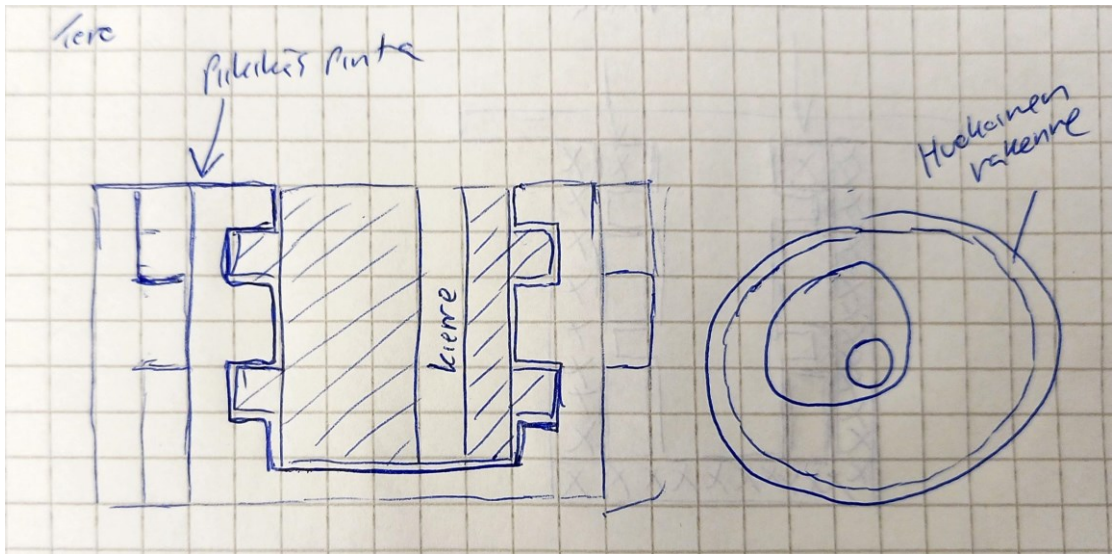


Internal

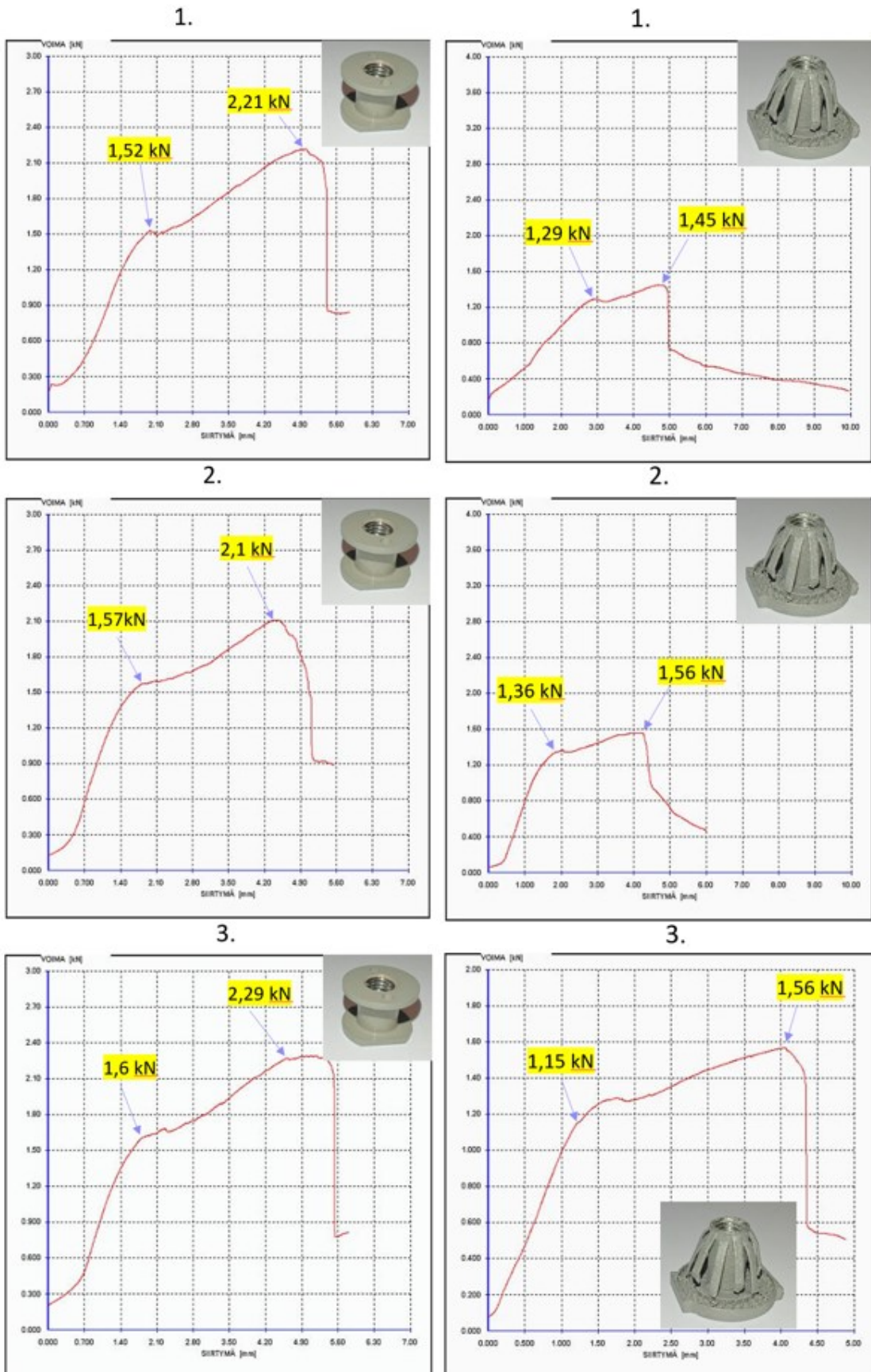
Renin jalosteidikset 5

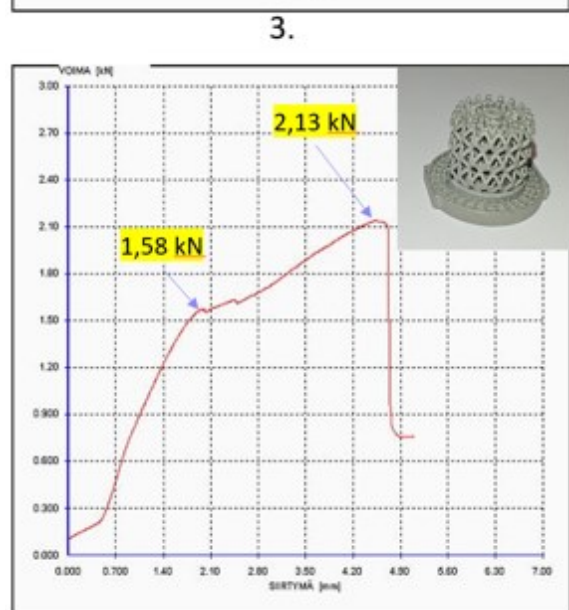
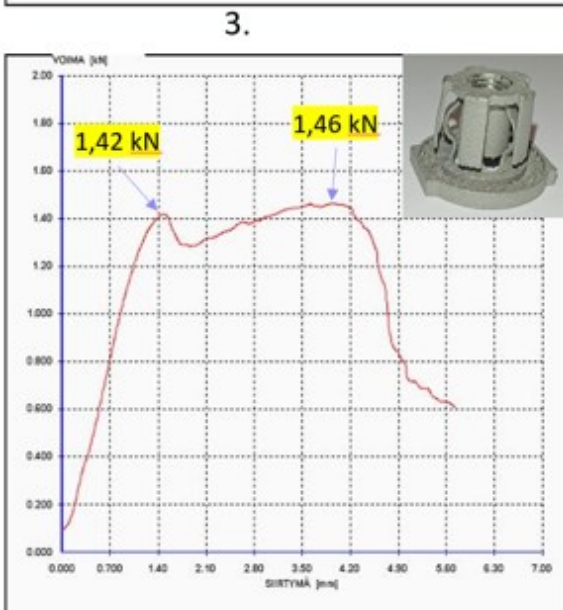
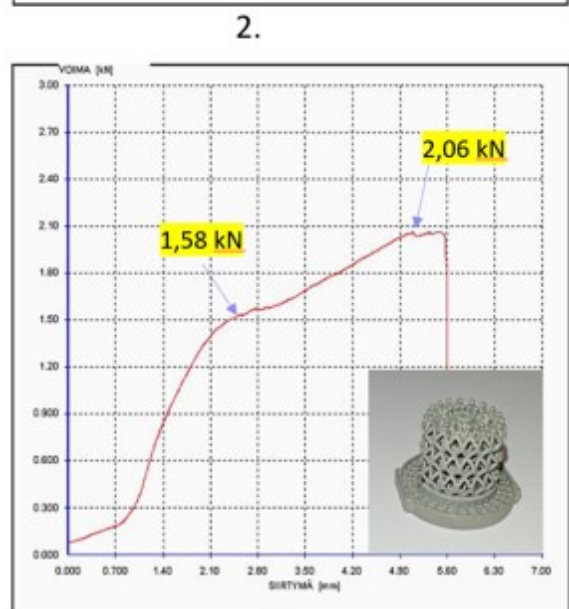
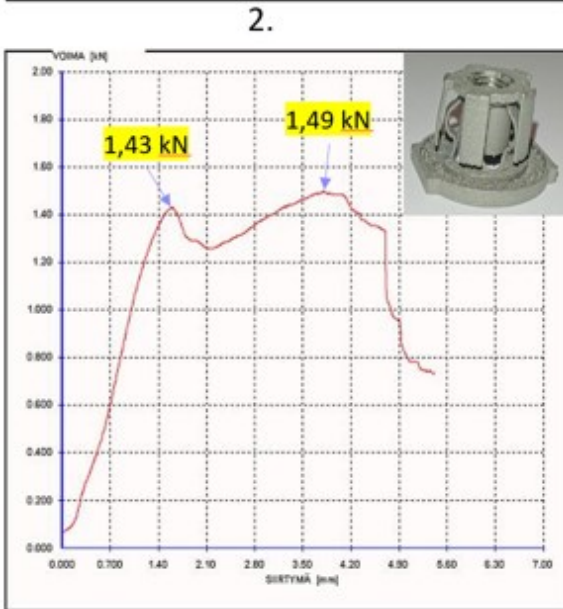
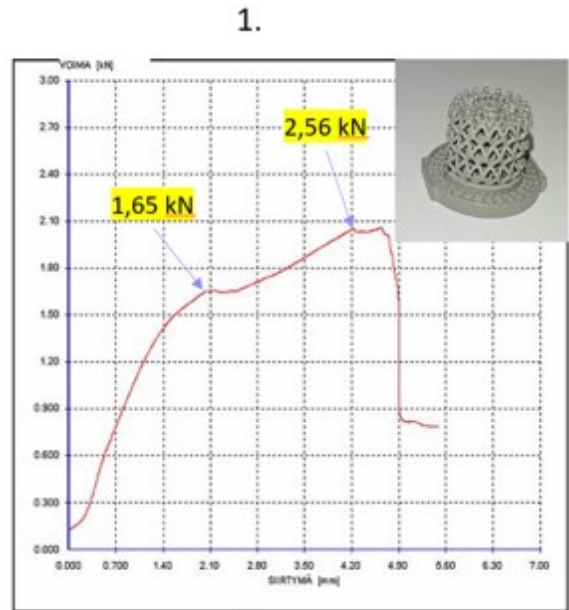
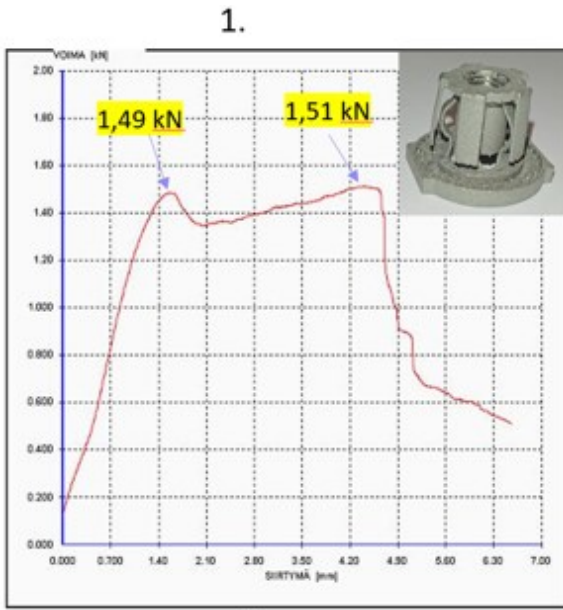


Internal

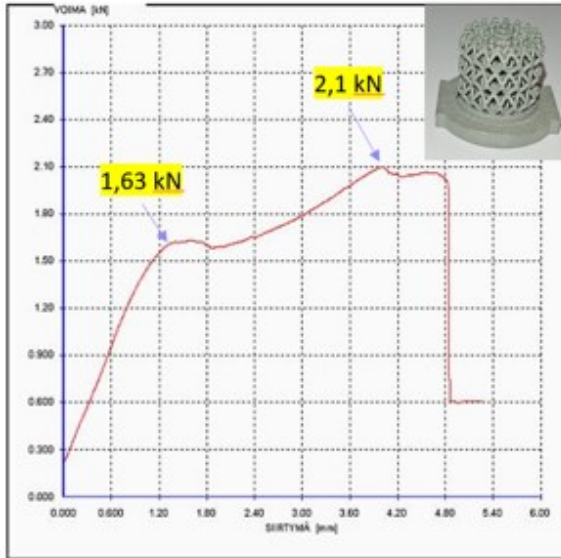


Liite 7. Tason normaalisuuntaisten vetokokeiden voima-siirtymäkaaviot

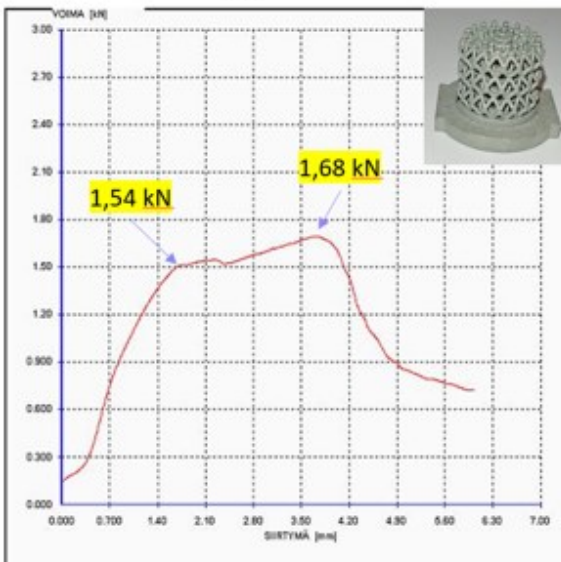




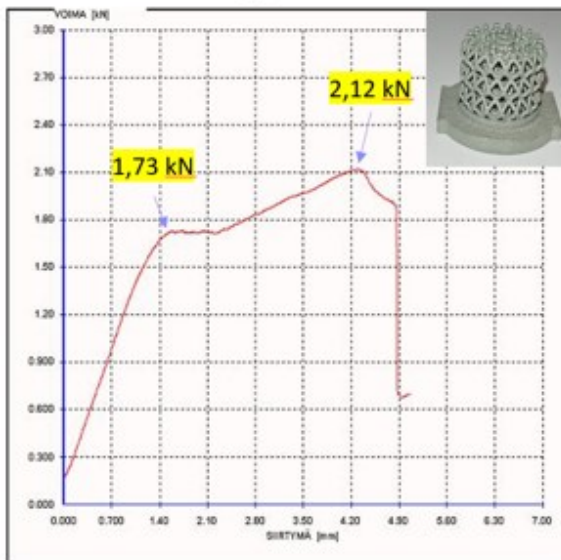
1.



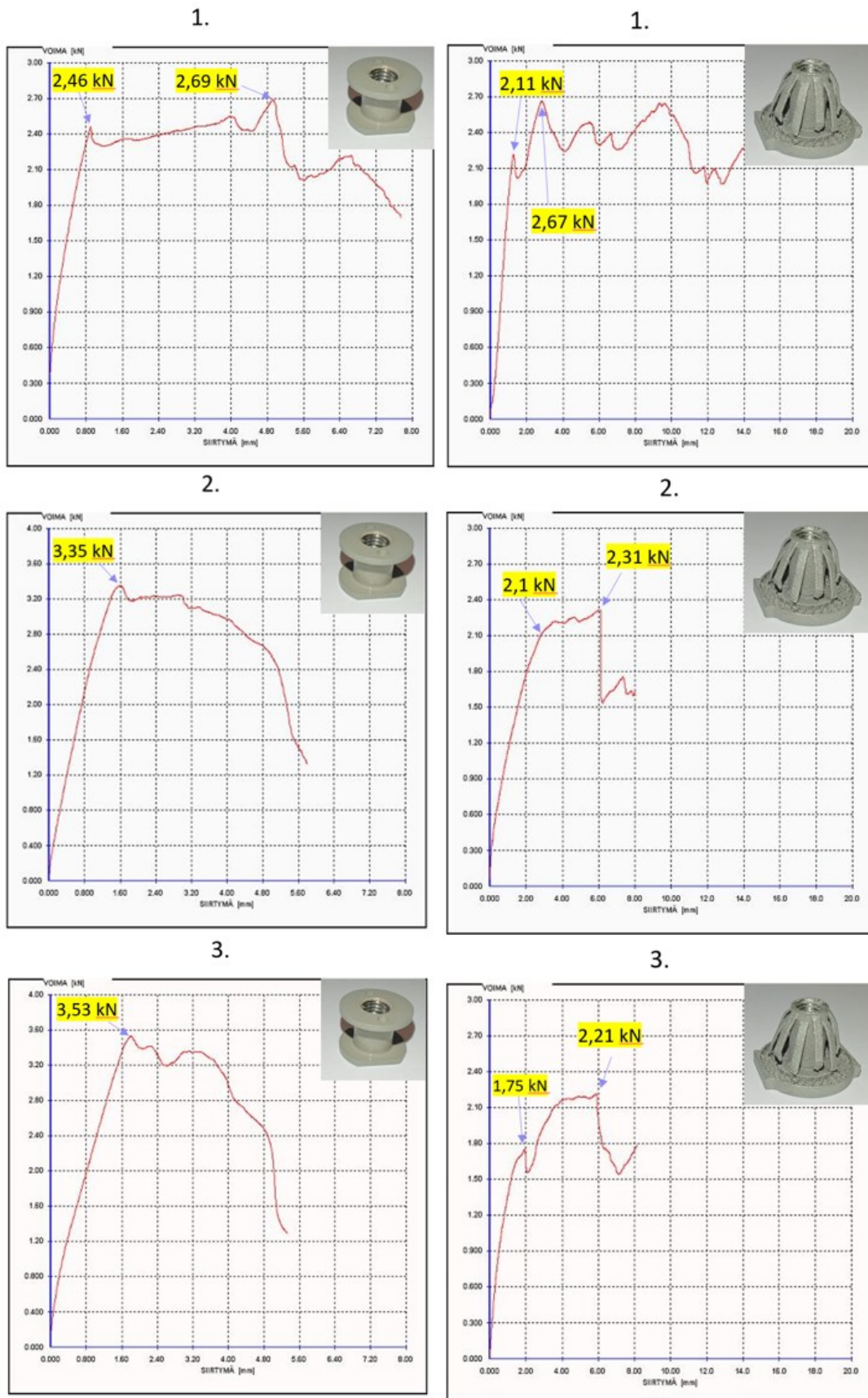
2.



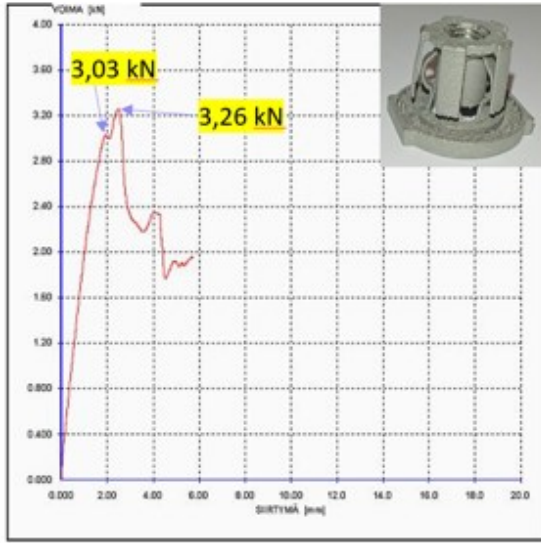
3.



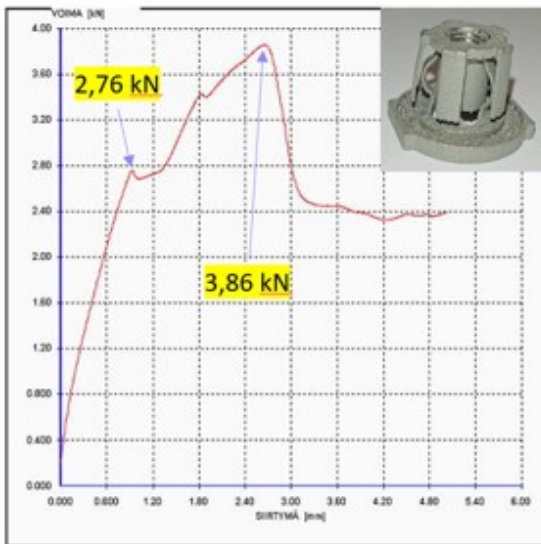
Liite 8. Tasonsuuntaisten vetokokeiden voima-siirtymäkaaviot



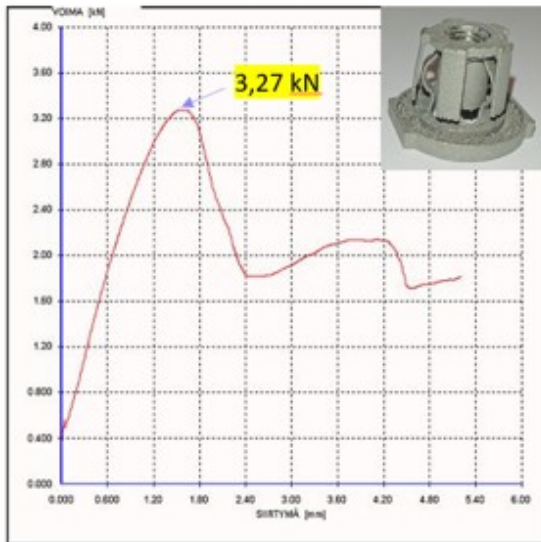
1.



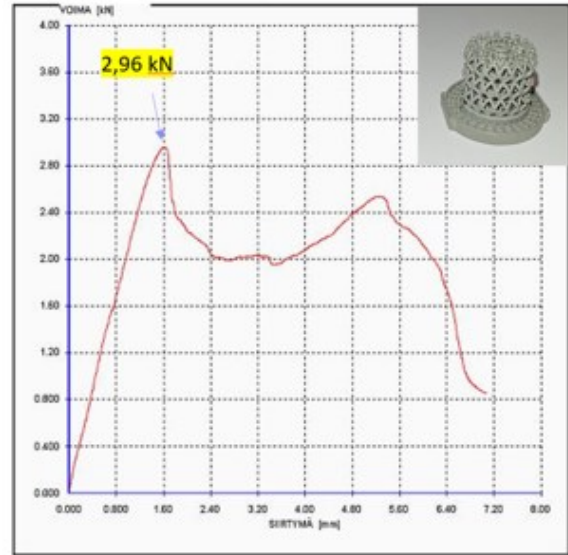
2.



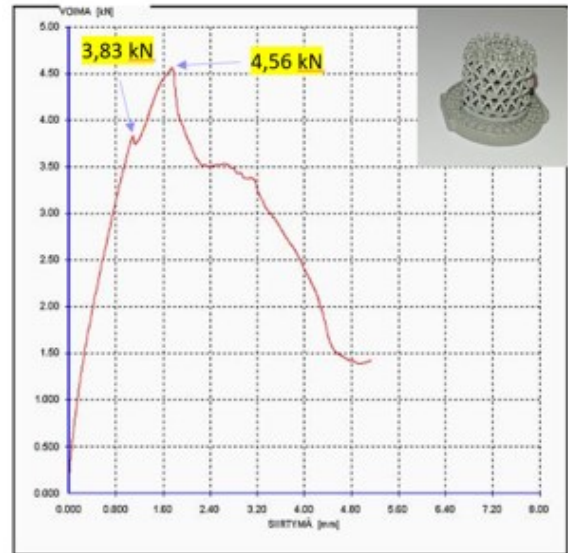
3.



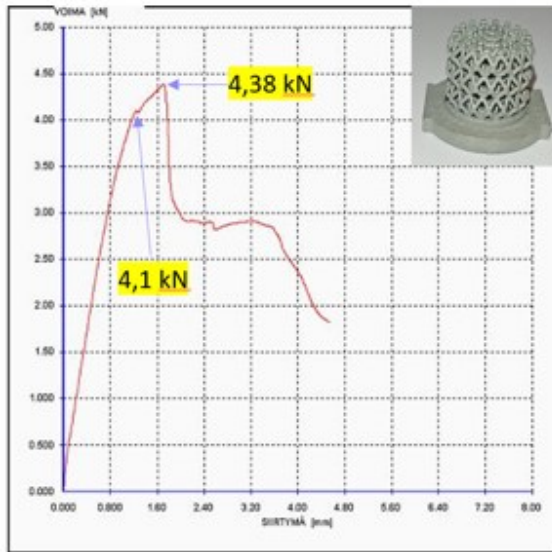
1.



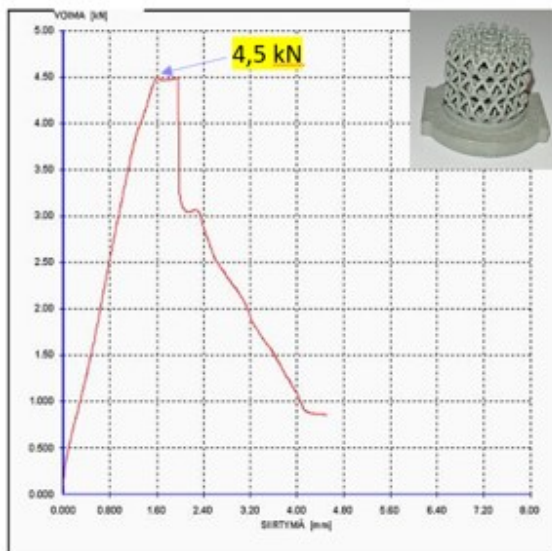
3.



1.



2.



3.

