

Sami Tuominen

3D-TULOSTEIDEN LUJUUSOMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN

3D-TULOSTEIDEN LUJUUSOMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN

Sami Tuominen
Opinnäytetyö
Kevät 2024
Auto- ja työkonetekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikka, Auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Sami Tuominen

Opinnäytetyön nimi suomeksi: 3D-tulosteiden lujuusominaisuuksien tutkiminen

Työn ohjaajat: Jari Viitala ja Kai Jokinen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2024

Sivumäärä: 54 + 12 liitettä

Tässä työssä tutkittiin 3D-tulosteiden lujuusominaisuuksia ja näiden parannusmahdollisuuksia. Työssä suunniteltiin ja valmistettiin myös vetopenkki vetoko-keiden suorittamista varten. Tutkimuksessa keskityttiin FFF-tulostusmenetelmään ja PLA-, PETG-, ABS-materiaaleihin. Tavoitteena oli perehtyä eri jälkikäsittelymenetelmiin ja tutkimustuloksiin.

3D-tulosteiden lujuusominaisuuksien jälkikäsittelymenetelmiä etsittiin valmistajien internetsivuilta, foorumeilta ja YouTubesta. Työssä tutustuttiin tarkemmin 3D-tulosteiden hehkuttamiseen ja uudelleen sulatukseen suolassa sekä galvanointiin.

Potentiaalisimmaksi menetelmäksi osoittautui tutkimuksien perusteella uudelleen sulatus suolassa. Valmistetulla vetopenkillä testattiin 3D-tulosteita eri täytösteilla.

Asiasanat: 3D-tulostus, FFF, lujuusominaisuus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering, Option of Automotive Engineering

Author(s): Sami Tuominen
Title of thesis: Strength Study of 3D Prints
Supervisor(s): Jari Viitala and Kai Jokinen
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2024
Pages: 53 + 12 appendices

This study focused on 3D prints and how to improve their strength properties. Study concentrated to FFF method and to PLA, PETG and ABS materials. Main goal was to find different post-processing methods and studies about them. Traction test bench was also designed and manufactured for practical tests.

Different sources were used to find studies about these post-processing methods, eg. manufacturers websites, forums, and YouTube. Most interesting methods that were found are annealing, re-melting in salt and galvanization.

After researching methods, the most potential was re-melting in salt. Practical traction tests were done with basic 3D print samples with different infill percents.

Keywords: 3D printing, FFF, strength

ALKULAUSE

Haluan kiittää OAMKia työn mahdollistamisesta sekä tilojen ja välineiden tarjoamisesta. Iso kiitos myös labra-insinööreille, Jarille ja Tomille, koneiden käytännön opastuksessa. Eikä unohdeta vertaistukijoita, eli opiskelijakavereita, jotka kannustivat työn loppuun saattamisessa.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	8
2 3D-TULOSTUS	9
2.1 3D-tulostusmenetelmät	10
2.1.1 SLA – stereolithography	10
2.1.2 DLP – Digital Light Processing	11
2.1.3 MSLA – Masked Stereolithography	11
2.1.4 SLS – Selective Laser Sintering	12
2.1.5 FFF – Fused Filament Fabrication	13
2.2 FFF 3D-tulostusmateriaalit	14
2.3 3D-tulosteiden ominaisuuksien parantaminen	17
2.3.1 Hehkutus	17
2.3.2 Uudelleensulatus suolassa	18
2.3.3 3D-tulosteiden galvanointi	19
3 VETOPENKIN SUUNNITTELU JA VALMISTUS	21
3.1 Lujuusoppi yleisesti	21
3.2 Jännitys ja muodonmuutos	22
3.3 Materiaalien lujuusominaisuudet	23
3.4 Tyypillisimmät kuormituslajit	26
3.5 Voimantuoton valinta	26
3.6 Hydromekaniikka	27
3.6.1 Paine	27
3.6.2 Hydraulinen puristin	28
3.7 Ominaisuuksien määrittely	29
3.7.1 Vetopenkin hydraulikkakomponentit	30
3.7.2 Rungon suunnittelu ja 3D-mallinnus	33
3.7.3 Rungon lujuustarkastelu	35
3.7.4 Rungon valmistus	39
3.7.5 Kiinnitysleukojen suunnittelu ja valmistus	40
4 TESTAUSKAPPALEET JA NIIDEN VETOKOKEET	44
4.1 Materiaalit	44
4.2 Kappaleiden valmistus	45

4.3 Vetokokeet	46
4.4 Vetokokeiden tulokset	48
5 YHTEENVETO	50
LÄHDELUETTELO	51
LIITTEET	54

1 JOHDANTO

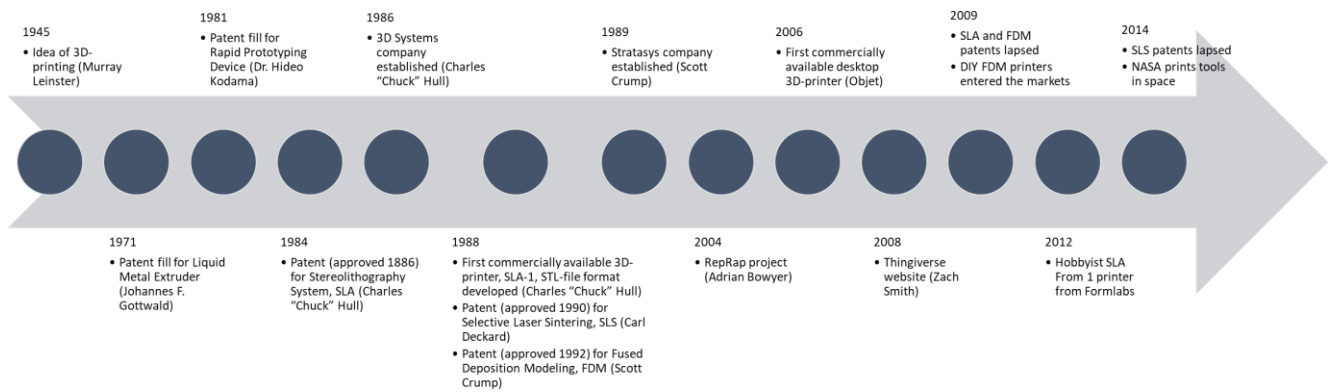
Tämän työn tarkoituksena on tutkia 3D-tulostuskappaleiden lujuusominaisuuksia ja sitä, kuinka niiden mekaanista lujuutta voidaan kasvattaa eri menetelmin. Työssä myös suunnitellaan ja valmistetaan vetopenkki vetokappaleiden testaamiseen. Tavoitteena on tuottaa toimiva ja käytännöllinen vetopenkki sekä tehdä lujuusmittausvedot kyseisellä vetopenkillä. Työssä käydään yksityiskohtaisesti läpi vetopenkin valmistusvaiheet. Vetopenkistä ja sen komponenteista tuotetaan myös tarkat valmistuspiirustukset.

Työn aihe rajataan teorian osalta lujuusoppiin, hydraulikkaan ja 3D-tulostusmateriaalien ominaisuuksiin. 3D-tulosmateriaalien osalta keskitytään yleisimpiin materiaaleihin, kuten PLA, PETG ja ABS. Haasteina työssä on tuottaa vetotarpeisiin mukautuva vetopenkki ja siihen sopiva voimanmittaussysteemi.

Lopuksi esitellään 3D-tulostettujen testikappaleiden vetotulokset, joissa on käytetty eri sisätäyttötilavuutta. Tuloksia verrataan valmistajan ilmoittamiin vetolujuusarvoihin.

2 3D-TULOSTUS

3D-tulostus kuuluu materiaalia lisäävään valmistusmenetelmään, josta puhutaan Suomessakin sen englanninkielisellä nimellä, AM (Additive Manufacturing). Tässä menetelmässä digitaalisesta 3D-mallista tuotetaan fyysinen 3D-malli lisäämällä materiaalia kerros kerrokselta toisin kuin esim. koneistuksessa, jossa materiaalia poistetaan. 3D-tulostus yleistyi maailmalla 2000-luvun alkupuolella, kun vanhat patentit alkoivat raukeamaan. (1.) 3D-tulostuksen historiaa kuvassa 1.



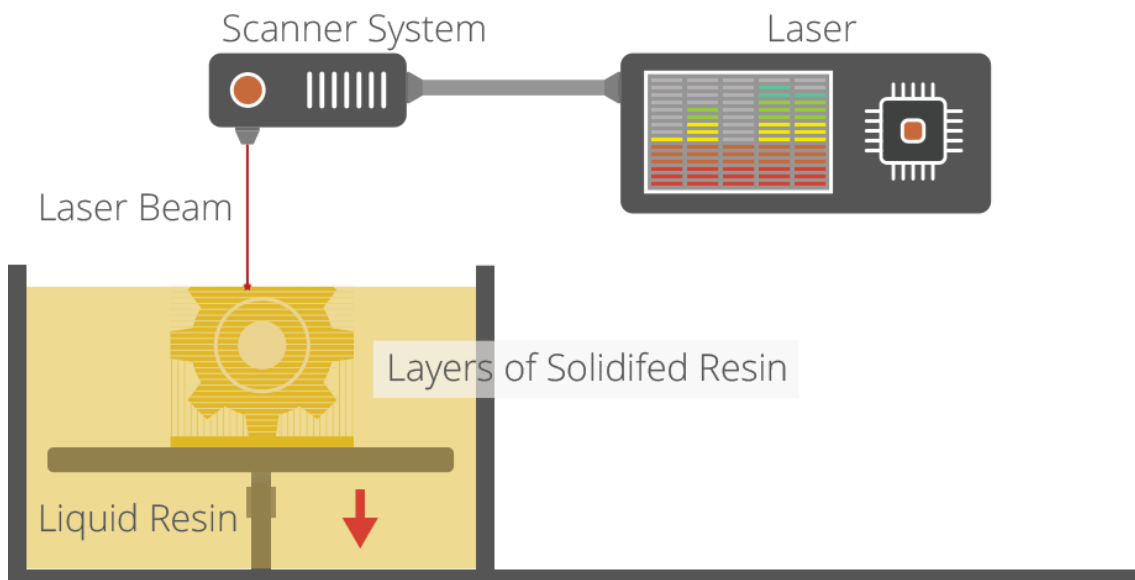
KUVA 1. 3D-tulostuksen historian virstanpylväät (2).

2.1 3D-tulostusmenetelmät

Yleisimpiä 3D-tulostusmenetelmiä ovat SLA (Stereolithography), DLP (Digital Light Processing), MSLA (Masked Stereolithography), SLS (Selective Laser Sintering) ja FFF (Fused Filament Fabrication). Näillä kaikilla menetelmillä on omat erikoispiirteensä ja ominaisuutensa. Tämän takia jokin menetelmä sopii tiettyyn käyttötarkoitukseen paremmin kuin joku toinen. (3.) Eri menetelmät esitellään seuraavissa luvuissa.

2.1.1 SLA – stereolithography

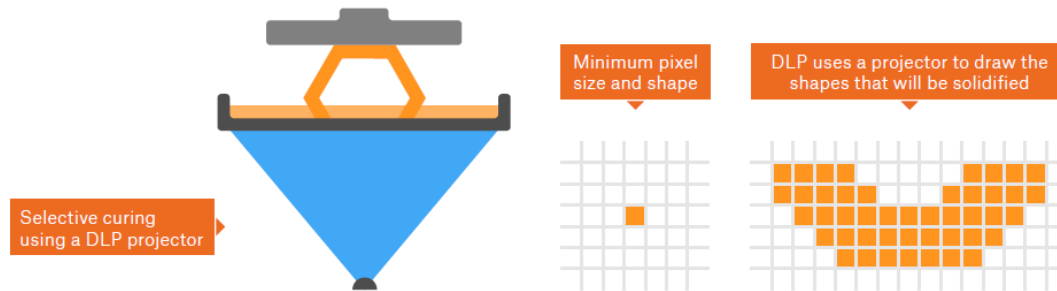
SLA on ensimmäinen kehitetty 3D-tulostusmenetelmä. Menetelmässä fotopolymeriä eli resiiniä kovetetaan tarkan laserin avulla. Tulostusalusta on upotettuna resiiniin ja sitä liikutetaan kuvan 2 mukaisesti Z-suunnassa tulostuksen aikana kerros kerrokselta alaspäin. Menetelmä vaatii tukirakenteet tulostettavalle kappaleelle. Tulostuksen jälkeen kappaleet on viimeisteltävä puhdistamalla ja kovettamalla ne lämmitettävässä UV-kaapissa. (3.) SLA-tulosteiden mittatarkkuus on eri tulostusmenetelmien parhaasta päästä, sen ollessa $\pm 0,15$ mm (4, s. 63).



KUVA 2. SLA-tulostimen toimintaperiaate (3).

2.1.2 DLP – Digital Light Processing

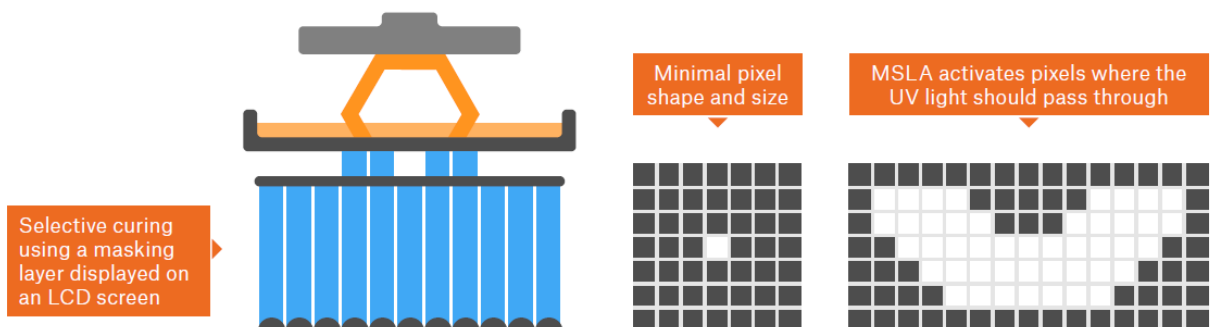
DLP-menetelmässä kovetaan resiiniä digitaalisen projektorin avulla (kuva 3). Resoluutio XY-tasolle määräytyy projektorin pikseleiden koon perusteella. Tämä mahdollistaa yhden kerroksen kovettamisen kerralla, tehden siitä huomattavasti nopeamman SLA-menetelmään nähden. (1.)



KUVA 3. DLP-tulostusmenetelmä (3).

2.1.3 MSLA – Masked Stereolithography

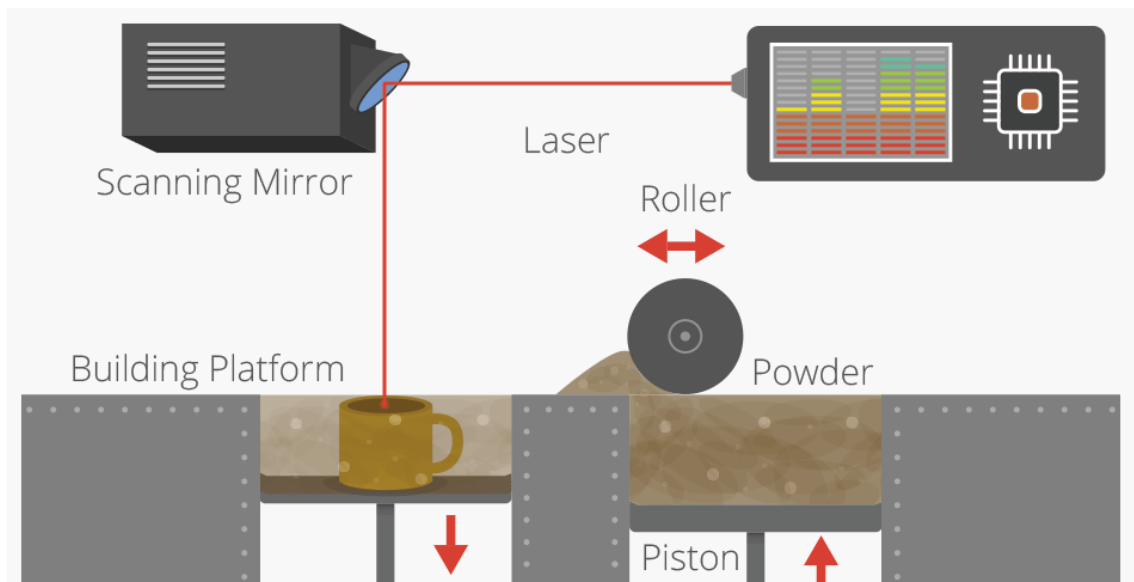
MSLA-menetelmässä resiinin kovettaminen tapahtuu tehokkaiden UV-ledien avulla, joiden valo ammutaan osittain läpinäkyvän LCD-kalvon läpi (kuva 4). UV-valo läpäisee ainoastaan kalvon valkoiset pikselit. MSLA-menetelmässä saadaan siis myös kovettua koko kerros kerralla. DLP- ja MSLA-menetelmissä käytetään pikseleiden rajoja tasoittavaa tekniikkaa, joka tapahtuu keskiarvoistamalla viereisten pikseleiden valon määrää. (1.)



KUVA 4. MSLA-tulostusmenetelmä (3).

2.1.4 SLS – Selective Laser Sintering

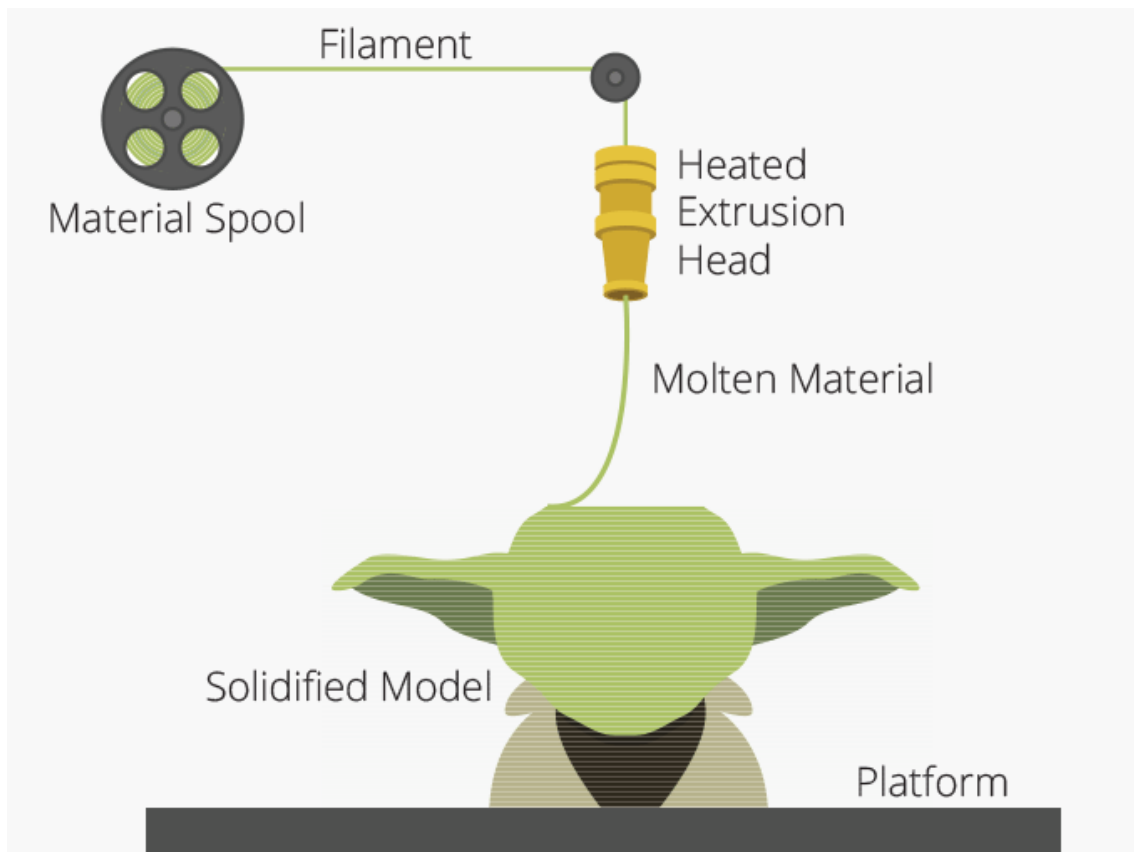
SLS-menetelmässä käytetään raakamateriaalina muovijauhetta. Tulostuskammion lämpötila nostetaan lähelle materiaalin sulamispistettä, jonka jälkeen muovijauheesta sintrataan laserin avulla haluttu poikkipinta (kuva 5). Kerroksen valmistumisen jälkeen tulostusalusta liikkuu halutun kerrosvahvuuden verran alaspäin ja täyttöterä vetää uuden jauhekerroksen edellisen päälle. Sintraamaton muovijauhe jää tukemaan kappaletta, eliminoiden näin tukimateriaalin käytön. Tulostuksen jälkeen kammion annetaan jäähtyä ja kappaleet puhdistetaan sekä puhalletaan valituilla metodeilla. Muovijauheesta voidaan kierrättää jopa 50 %. (4, s. 74–75.)



KUVA 5. SLS-tulostusmenetelmä (3).

2.1.5 FFF – Fused Filament Fabrication

FFF-menetelmä on kaikista tunnetuin ja edullisin verrattuna muihin menetelmiin. Tässä menetelmässä muovilankaa sulatetaan ja pursotetaan tulostuspään suutimesta suoraan tulostusalustaan (kuva 6). Tulostuslangan halkaisija on yleensä joko 1,75 mm tai harvemmin käytössä oleva 3,0 mm. FFF-tulosteet eivät välttämättä tarvitse jälkikäsittelyä ja ne ovat turvallisempia verrattuna resiini- ja jauhetulosteisiin. Resiini on kovettamattomana terveydelle haitallista ja jauhetulostuksen pöly voi kulkeutua hengityselimiin. FFF-tulosteissa haittapuolena on tulosteisiin jäävät muita menetelmiä näkyvämmät kerrosrajat ja heikompi tarkkuus. (1, s. 11.)



KUVA 6. FFF-tulostusmenetelmä (3).

2.2 FFF 3D-tulostusmateriaalit

Tässä kappaleessa perehdytään FFF-menetelmän materiaaleihin ja niiden ominaisuuksiin. Tunnettuja materiaalivalmistajia ovat esimerkiksi Stratasys, Prusa-ment, Ultimaker ja colorFabb.

Yleisimpiä materiaaleja ovat PLA (polymaitohappo), PET (polyetyleenitereftalaatti), ABS (akrylinitriilibutadieenistyreeni) ja Nylon (nailon). Valikoimissa on myös PC (polykarbonaatti), TPU (termoplastinen polyuretaani), HIPS (iskunkestävä polystyreeni) ja PPSU (polyfenyylisulfoni) sekä näiden komposiittiyhdistelmiä. Tässä työssä keskitytään yleisimpiin materiaaleihin, joita voidaan tulostaa melkein kaikilla FFF-menetelmän tulostimilla. Kuvassa 7 tuplasuuttimella tulostettu kahden värin PLA-tuloste.



KUVA 7. PLA-muovista tulostettu prototyyppi (5).

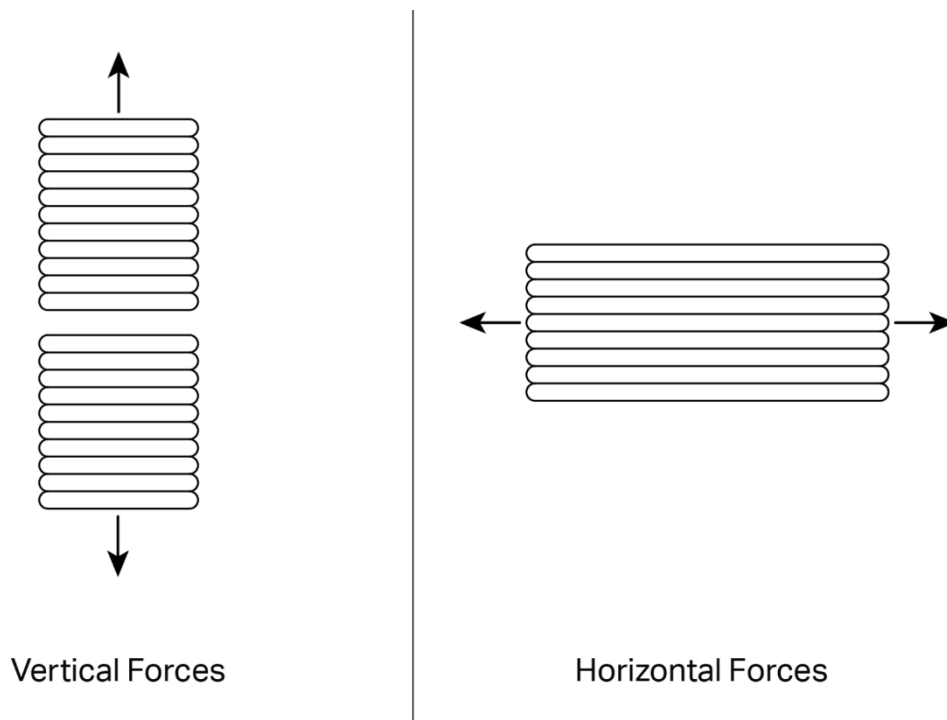
FFF-materiaalien lujuusominaisuudet

Vertaillaan Prusament PLA-, PETG- ja ASA-muovin (ABS-muovia vastaava) lujuusominaisuuksia. Nämä lujuusarvot on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Materiaalien mekaanisia ominaisuuksia (liitteet 9–11).

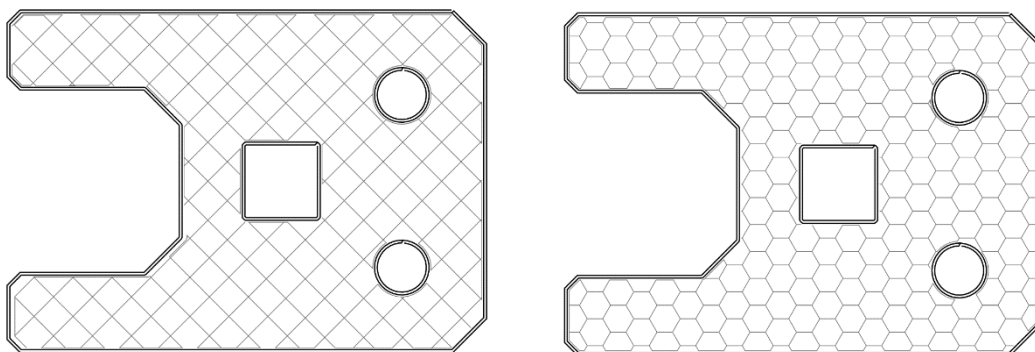
	Prusament PLA	Prusament PETG	Prusament ASA
Materiaalin murtolujuus [MPa]	57 ±1	46 ±1	40 ±1
Tulosteen murtolujuus XY [MPa]	51 ±3	47 ±2	42 ±1
Tulosteen murtolujuus Z [MPa]	17 ±3	30 ±5	11 ±1
Kimmokerroin [GPa]	2,2	1,5	1,6

Kuten taulukon 1 arvoista näkyy, FFF-tulostusmenetelmässä tulostussuunnalla on huomattava vaikutus kappaleiden lujuuteen. Tulostetut kappaleet ovat anisotrooppisia, eli niiden mekaaniset ominaisuudet eivät ole samat joka suuntaan. Mekaaniset ominaisuudet ovat heikommät Z-suunnassa, mikä johtuu tulostuskerroksien välisestä adheesiosta. XY-suunnassa materiaali tulostuu yhtenäisesti ja vastaa lujuudeltaan raakamateriaalin ominaisuuksia. (4, s. 165–166.) Kuvassa 8 on havainnollistettu tulostussuuntien eroa.



KUVA 8. Tulostussuunnan vaikutus kappaleiden lujuuteen (6).

FFF-tulostusmenetelmä mahdollistaa kappaleiden tulostuksen halutulla täytöllä, toisin kuin muissa tulostusmenetelmissä. Tämä täyttöaste vaikuttaa myös kappaleen lujuuteen poikkipinta-alan muuttuessa. Yleinen käytetty täyttöaste tulosteissa on 20 % eli tulosteen tilavuudesta 80 % on ilmaa. Täyttökuvioita on olemassa useita erilaisia, joiden avulla voidaan vaikuttaa kappaleen ominaisuuksiin. Nopea ja käytännöllinen täyttökuvio on suorakulmio, jossa tulostuspää tekee vähiten käännöksiä. Hunajakennokuvio on rakenteeltaan lujempi mutta hitaampi tulostaa tulostuspään joutuessa tekemään useita suunnanmuutoksia. (4, s. 167–168.) Kuvassa 9 on esitelty täyttökuviot



KUVA 9. Vas. suorakulmiokuvio ja oik. hunajakennokuvio (6).

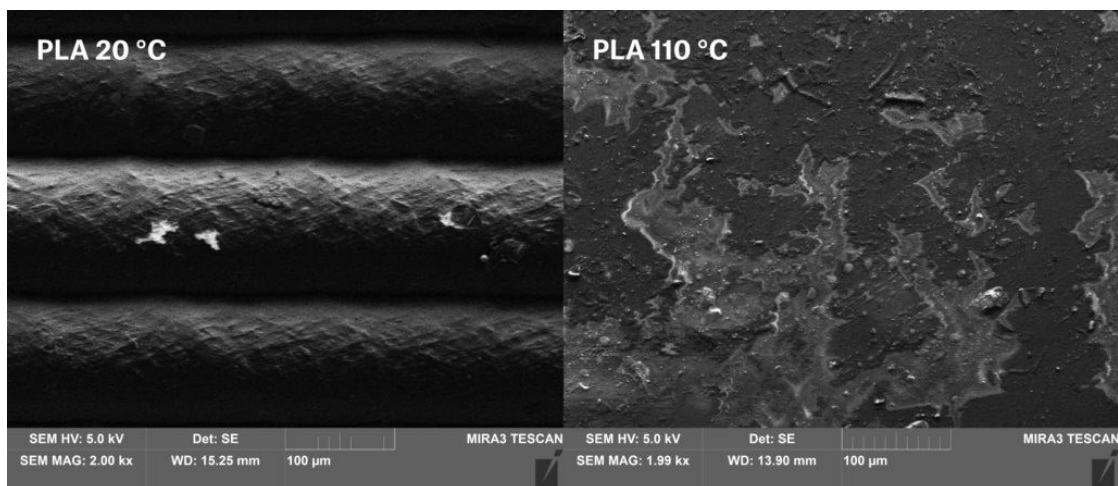
2.3 3D-tulosteiden ominaisuuksien parantaminen

3D-muovitulosteiden mekaanisia ominaisuuksia voidaan parantaa jälkikäsittelyillä, joista osa on vielä kokeellisia. Näitä ovat erilaiset lämpö- ja pintakäsittelyt, joita käydään läpi seuraavissa luvuissa.

2.3.1 Hehkutus

Hehkutusta käytetään metalli- ja muovivalupuolella sisäisten jännityksien vähentämiseen. Hehkutuksessa kappale lämmitetään lasittumislämpötilan yläpuolelle, mutta ei sulamispisteeseen asti. Tällä lämpötila-alueella materiaalin mikrorakenne pääsee järjestyseen tasaiseksi. Muoveilla mikrorakenne vaihtelee amorfisen ja puolikiteisen välillä. Mekaanisten ominaisuuksien kannalta materiaalin kiteinen rakenne luo kappaleesta vahvemman. (7.)

Puolikiteiset materiaalit, kuten PLA ja PETG, ovat hyviä hehkutuksen kohteita. 3D-tulostuksessa materiaalin nopea lämmitys ja jäähdyttäminen lisäävät amorfisuutta. Hehkutus järjestää näistä materiaaleista tulostettujen kappaleiden molekyyliketjut kiteisemmiksi. Kuvassa 10 on esitetty PLA-tulosteen mikrorakenteen muutos hehkutuksessa. Kappaleiden vetolujuus XY-suuntaan paranee 10–20 % verrattuna käsittelemättömiin kappaleisiin. Z-suuntainen kerroksien välinen vetolujuus ei parane hehkutuksessa. Hehkutuksen haittapuolena on kappaleen mittojen muuttuminen prosessin aikana. (8.)



KUVA 10. PLA-tulosteen mikrorakenne tulostuksen jälkeen ja hehkutuksen jälkeen (8).

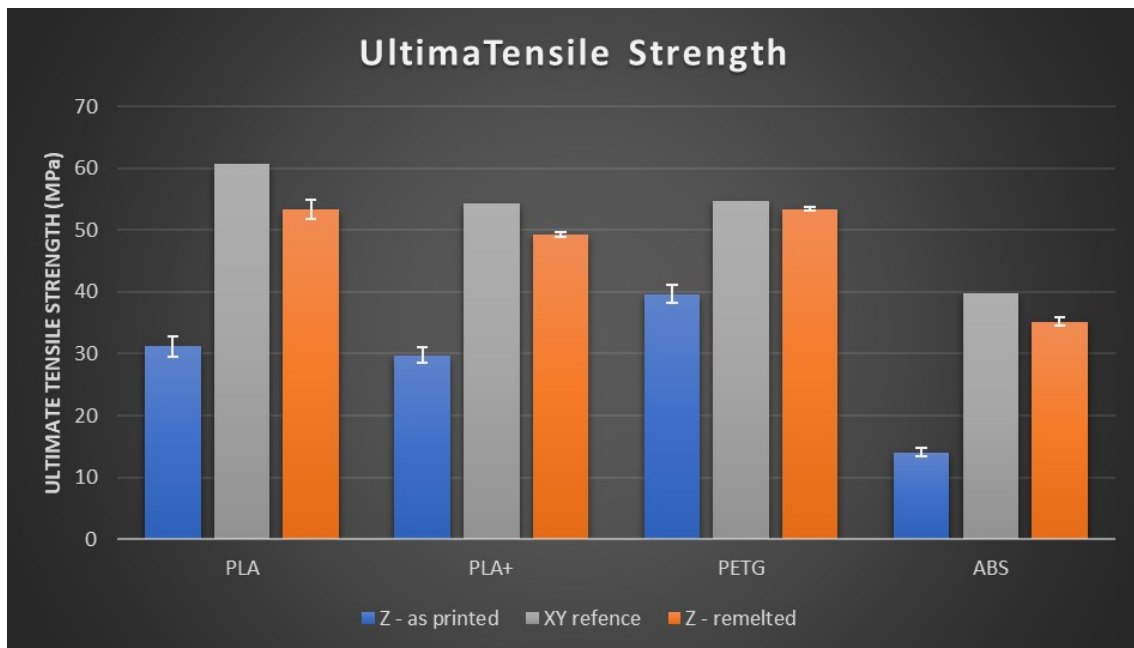
2.3.2 Uudelleensulatus suolassa

Tässä menetelmässä 3D-tulostetut kappaleet upotetaan suolaan, minkä jälkeen ne sulatetaan uunissa. Jäähdytymisen jälkeen jäljelle jää lähes muovivalukappaleen ominaisuudet omaava tuloste (kuva 11). (9.)



KUVA 11. ABS-tulosteen murtumispoikkipinta, vas. käsittelemätön ja oik. suolassa sulatettu (9).

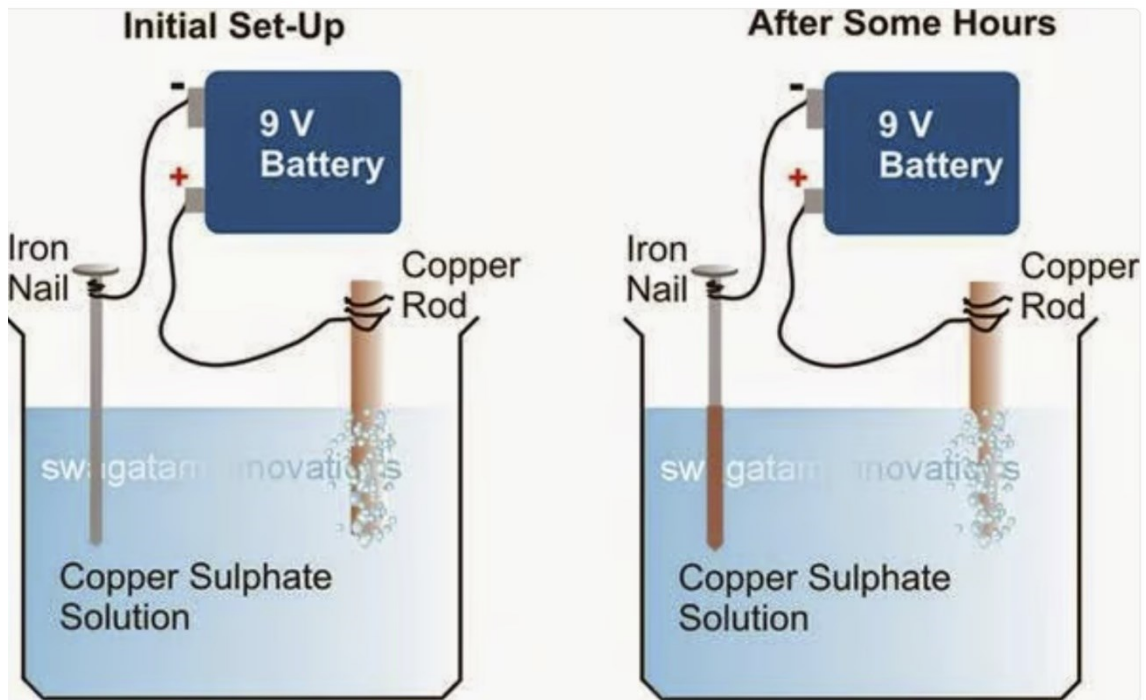
Menetelmässä on kriittistä suolan raekoko, jonka täytyy olla mahdollisimman pieni. Raekoko vaikuttaa suoraan kappaleen ulkopinnan laatuun. Hienojakoisempi suola myös pakkaantuu, eli sen avulla saadaan tuettua kappale ja näin alkuperäiset mitat säilyvät paremmin. Lämpötilalla on myös suuri merkitys. Kappaleen täytyy sulaa tasaisesti, jotta materiaalista tulee yhtenäistä, eikä se pala. Tulostettavan kappaleen täytön täytyy olla 100 %. ABS-muovilla Z-suunnan lujuutta saatiin kasvatettua 150 %. (9.) CNCkitchen-kanavan tutkimustulokset esitetty kuvassa 12.



KUVA 12. Vetolujuuksien vertailua suolassa sulatuksen jälkeen (9).

2.3.3 3D-tulosteiden galvanointi

Galvanointi on prosessi, jossa kappale pinnoitetaan ohuella metallikerroksella. Muovitulosteiden pinta maalataan ensin esimerkiksi kuparimaalilla, joka johtaa sähköä. Kontrolloidulla elektrolyysillä saadaan aikaiseksi sähkösaostuminen, jossa metallikationit siirtyvät positiivisesti varautuneesta anodikappaleesta negatiivisesti varautuneeseen katodikappaleeseen (kuva 13). (10.)



KUVA 13. Galvanointiprosessi (10).

SLA-tulosteet sopivat tähän prosessiin paremmin, sillä niiden pinnanlaatu on parempi kuin FFF-tulosteissa. FFF-tulosteiden kerrokset täytyy joko hioa tai ABS-materiaalin tapauksessa liuottaa pinta asetonihöyryn avulla. (10.) Galvanoinnin avulla mekaaninen lujuus voidaan jopa kaksinkertaistaa (11).

3 VETOPENKIN SUUNNITTELU JA VALMISTUS

Tässä luvussa perehdytään lujuusopin ja hydrauliiikan teoriaan, jota tarvitaan vetopenkin suunnittelussa. Läpi käydään myös varsinainen vetopenkin ja kiinnityseleukojen suunnittelu, mallintaminen, käytännön työt sekä hydrauliiikkajärjestelmä yleisesti.

3.1 Lujuusoppi yleisesti

Kappaleen koko ja muoto määräytyvät yleensä kappaleen tehtävän ja kuormituksen mukaan (kuva 14). Lujuusopin avulla kappaleelle voidaan antaa sellaiset mitat ja muodot, joilla osa vaatimuksista tulee täytetyksi. Lujuusopin tärkeimmät tehtävät ovatkin seuraavat:

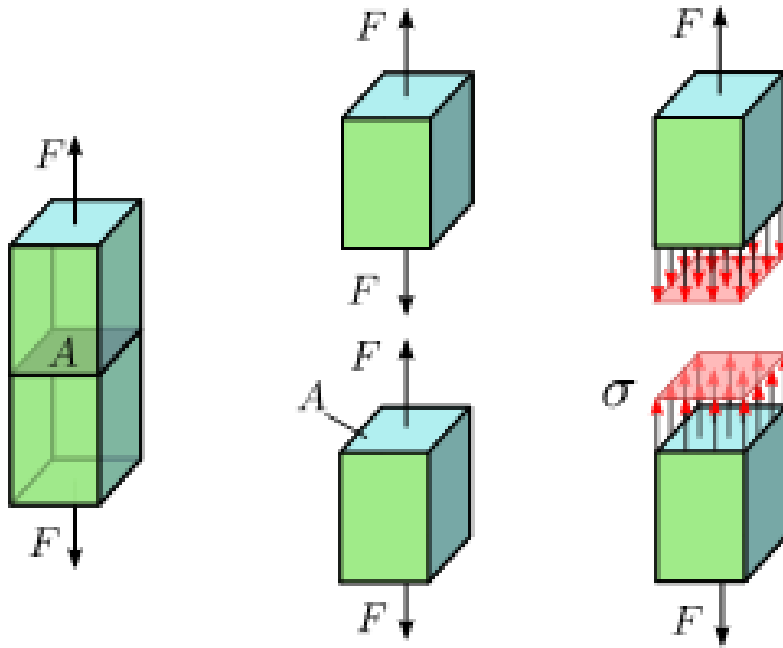
- kuormitetun kappaleen sisäisten jännityksien määrittäminen
- ulkoisten voimien aiheuttamien muodonmuutoksien tutkiminen
- kappaleiden mitoittaminen sisäisten rasituksen ja ulkoisten muodonmuutoksien kestämiseksi.



KUVA 14. Kuormitettu kappale.

3.2 Jännitys ja muodonmuutos

Ulkoisten voimien aiheuttamien sisäisten rasitusten voidaan katsoa kohdistuvan johonkin tasopintaan, joka jakaa kappaleen kahteen osaan (kuva 15). Tälle leikkauspinnalle kohdistuva voima tai momentti voi jossain tapauksessa olla tuhoisa ja toisessa täysin vaaraton. Tällä rasitukselle on luotu yleispätevä suure, jännitys, joka ilmaisee rasituksen suuruuden eri kappaleissa näiden koosta riippumatta.



KUVA 15. Jännityksen määrittämisen periaate.

Jännitys määritellään riittävän pieneen pinta-alkioon kohdistuvan kokonaisvoiman F kanssa yhdensuuntaisen osavoiman ΔF ja kyseisen pinta-alkion pinta-alan ΔA suhteena. Kyseinen suure on siis sama kuin paineella [Pa tai N/m^2], yleisesti käytetään myös [N/mm^2]. Kaavana esitettynä. (12, 1.3.)

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (\text{KAAVA 1})$$

jossa

σ = kokonaisjännitys

F = voima

A = leikkauspinta-ala.

Käytännön laskuja varten on kuitenkin kokonaisjännitys korvattu kahdella jännityskomponentilla, jotka ovat pintaa vasten kohtisuora normaalijännitys σ ja pinnan suuntainen leikkausjännitys τ (12, 1.3).

Aina kun kappaleessa esiintyy jännitystä, tapahtuu kappaleessa myös muodonmuutoksia. Tällöin kappaleen tietty kohta on siirtynyt alkuperäiseen asemaansa nähden. Tämä esitetään kaavana seuraavanlaisesti. (12, 1.3.)

$$\Delta L = L - L_0 \quad (\text{KAAVA 2})$$

jossa

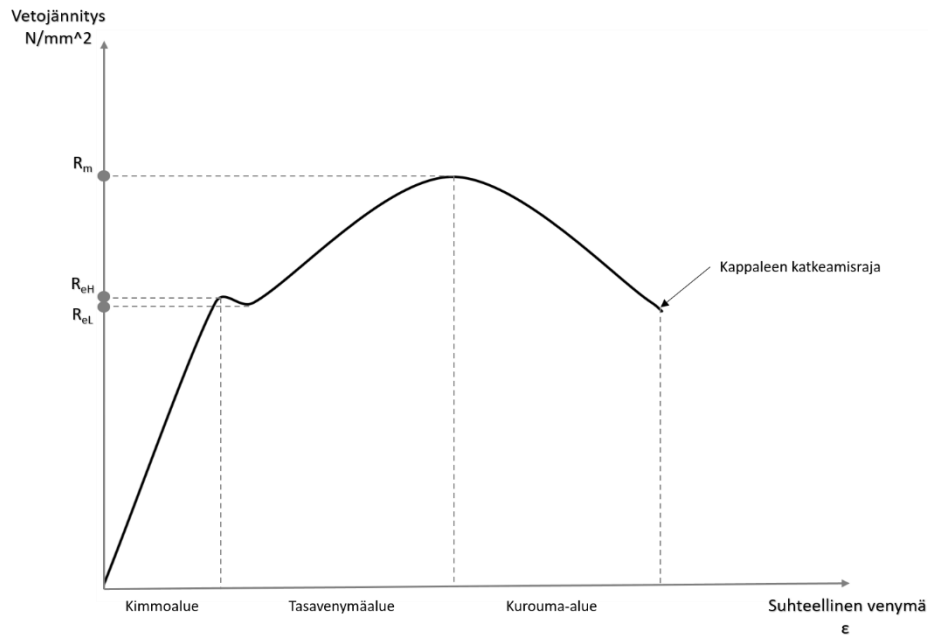
ΔL = pituuden muutos

L = muodonmuutoksen jälkeinen pituus

L_0 = alkuperäinen pituus.

3.3 Materiaalien lujuusominaisuudet

Kappaleen materiaalin lujuusominaisuudet täytyy tuntea, jotta laskettuja arvoja voidaan käyttää hyödyksi. Kappaleiden lujuusominaisuudet voidaan testata mm. vetokokeella, jossa pyöreäpoikkipintaista kappaletta vedetään niin kauan, että se menee poikki. Vetokokeen tarkoituksena on selvittää, kuinka suuri pituudenmuutos ΔL saadaan tietyllä vetovoimalla ΔF ja paljonko kappale maksimissaan kestää vetovoimaa. Vetokokeen tulos tallennetaan tiedonkeruulaitteiston avulla koneelle, joka muodostaa automaattisesti voiman ja muodonmuutoksen välisen kuvaajan (kuva 16). (12, 1.4.)



Kuva 16. Jännitys-venymäkuvaaja S235-rakenneteräkselle.

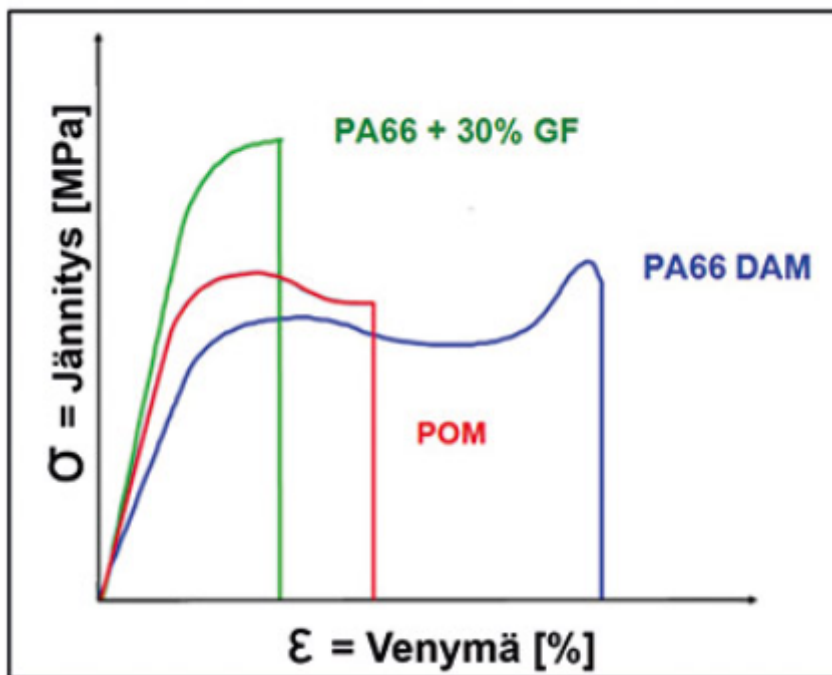
Kuvasta 16 käy ilmi S235-rakenneteräksen käyttäytyminen vetokokeessa. R_{eH} on materiaalin ylempi myötölujuus, josta kappale palautuu vielä alkuperäiseen muotoon jännityksen loputtua (kimmoalue). Alemman myötörajan R_{eL} jälkeen kappale venyy tasaisesti ilman poikkipinta-alan kuroutumista murtorajaan R_m asti. Murtorajan R_m jälkeen kappaleeseen syntyy kuroumakohta ja jännitys alkaa laskea venymän kasvaessa aina kappaleen katkeamiseen asti. (12, 1.4.)

Lujuuslaskennassa täytyy tehdä joitakin oletuksia ja yksinkertaistuksia, jotta voidaan muodostaa yksinkertainen ja yleispätevä teoria. Oletuksia ovat:

- Materiaalien oletetaan olevan tiettyyn rajaan asti lineaarisesti kimmoisia, vaikka se pitää paikkaansa lähinnä teräksien osalta. Tämä raja voi olla myötöraja, 0,2-raja tai joskus myös murtoraja.
- Materiaalien oletetaan olevan homogeenisia, eli aineen ominaisuudet olisivat joka kohdassa samanlaiset. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole, vaan esimerkiksi metallien rakenne koostuu huokosista, ainekeräytymistä ja raerajoista.

- Aineen oletetaan olevan myös isotrooppista eli sen ominaisuudet ovat joka suuntaan samanlaiset. Poikkeuksena puu, jossa syiden suunnat on otettava huomioon.
- Kappaleen muodonmuutokset saattavat vaikuttaa ulkoisien kuormitusten sijaintiin, mitkä saattavat vaikuttaa kappaleen sisäisiin rasituksiin. Oletetaan kuitenkin, että muodonmuutokset ovat niin pieniä, ettei niitä tarvitse ottaa huomioon. (12, 1.5.)

Muoveilla on myös lineaarinen jännitysalue, josta kappale palautuu alkuperäiseen muotoonsa. Muovit voivat olla lujia, sitkeitä ja/tai kovia. Näillä muovityypeillä on erilaiset jännitys-venymäkuvaajat (kuva 17). (13.) 3D-tulosteissa pitää myös ottaa huomioon tulostussuunta (katso luku [2.2.1](#)).



KUVA 17. Eri muovien jännitys-venymäkäyriä (13).

3.4 Tyypillisimmät kuormituslajit

Kuormituslajit jaetaan karkeasti voiman aiheuttaman muodonmuutoksen mukaan, joita ovat seuraavat:

- veto ja puristus, jossa voima kohdistuu kappaleeseen pituussuunnassa
- taivutus, jossa ulkoinen voima taivuttaa kappaletta tavallisesti poikittaisessa suunnassa
- leikkaus, jossa poikittainen kuormitus pyrkii leikkaamaan kappaleiden vastakkaiset pinnat
- vääntö, jossa kappale kiertyy ulkoisen momentin takia.

3.5 Voimantuoton valinta

Kappaleiden vetämiseen tarvitaan voimanlähde, jolla vetovoima saadaan aikaiseksi. Vaihtoehtoina vertailussa olivat hydraulinen puristin ja paineilmapuristin sekä vetoruuvi. Taulukossa 2 on vertailtu näiden voimantuottotapojen hyvät ja huonot puolet. Lopulta valittiin hydraulisylinteri voimantuottotavaksi sen teho-/painosuhteen ja yksinkertaisuuden takia.

TAULUKKO 2. Voimantuottotapojen vertailu (14, s. 9–14).

Voimantuottotapa	Hyvät puolet	Huonot puolet
Hydraulipuristin	Teho/painosuhte Suunnittelun vapaus	Liikkeen tarkkuus Mahdolliset nestevuodot
Paineilmapuristin	Teho/painosuhte Suunnittelun vapaus	Vaatii isomman sylinterin kuin hydraulinen Hitaan liikkeen toteuttaminen hankalaa
Vetoruuvi (sähkö)	Liikkeen tarkkuus Ei tarvitse letkuja/putkia	Ohjaus monimutkaisempi Kuormituksen suojaus

3.6 Hydromekaniikka

Hydromekaniikassa käsitellään virtausopin osa-alueita, jotka jaetaan ulkoisten voimien alaisten nesteiden tasapainotiloja käsittelevään hydrostatiikkaan ja nesteen virtausta tarkastelemaan hydrodynamiikkaan (15, s. 301–302).

3.6.1 Paine

Nesteessä ja kaasussa ei esiinny leikkaus- tai vetojännitystä. Kappaleeseen, jonka on ympäröinyt neste tai kaasu, aiheutuu kuitenkin puristusvoima. Tämä mekaanistakin tuttu paine *pascal* [N/m² tai Pa] on myös tärkeä suure hydraulikassa. Pascal on nimetty ranskalaisen matemaatikon ja fyysikon Blaise Pascalin (1623–1662) mukaan. Paine määräytyy kohtisuoraan pinta-alaa A [m²] kohdistuvan voiman F [N] suuruudesta, kaava 3. Paineen SI-yksikön ollessa pieni, on käytössä myös käytännöllisempi yksikkö baari [bar]. 1 bar = 100 kPa = 0,1 MPa. (15, s. 301-302.)

$$p = \frac{F}{A} \quad (\text{KAAVA 3})$$

jossa

p = paine

F = voima

A = pinta-ala.

3.6.2 Hydraulinen puristin

Hydraulinen puristin (kuva 18) on toimilaitte, jossa käytetään hyväksi pinta-alojen suhdetta. Pienempään pumppumäntään, jonka pinta-ala on A_1 , kohdistetaan ulkoinen voima F_1 . Nesteeseen syntynyt paine p välittyy kuormamännälle, jonka pinta-ala on A_2 . Paineen p ollessa sama molemmilla männillä, saadaan kuormamännän voima F_2 laskettua soveltamalla kaavaa 4. (15, s. 305.)

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (\text{KAAVA 4})$$

jossa

F_1/F_2 = voima (pumppu-/kuormamäntä)

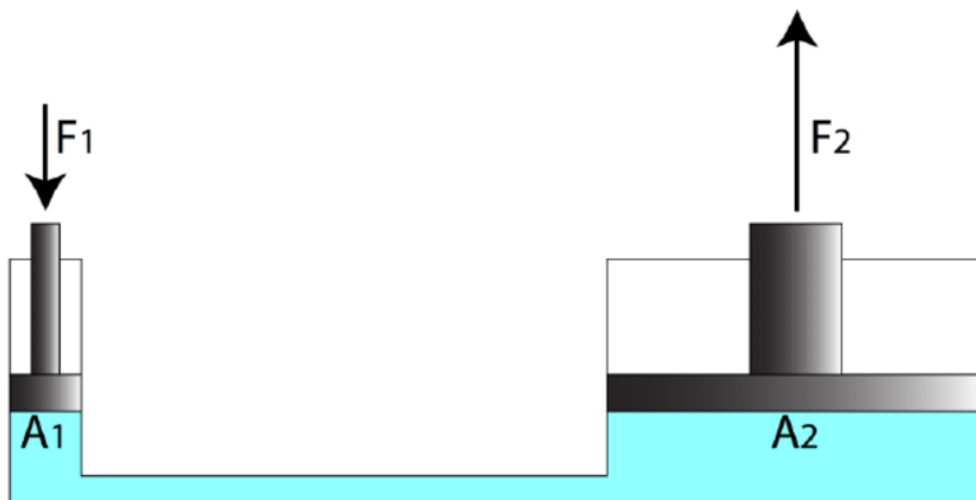
A_1/A_2 = pinta-ala (pumppu-/kuormamäntä).

Nesteen ollessa lähes kokoon puristamatonta, säilyy nestetilavuus samana mäntien liikkuaessa. Näin ollen kuormamäntä liikkuu pumppumännän liikuttaman tilavuuden verran. Tästä voidaan johtaa kaava 5 mäntien liikematkoille. (15, s. 305.)

$$A_1 s_1 = A_2 s_2 \quad (\text{KAAVA 5})$$

jossa

s = männän liikematka.



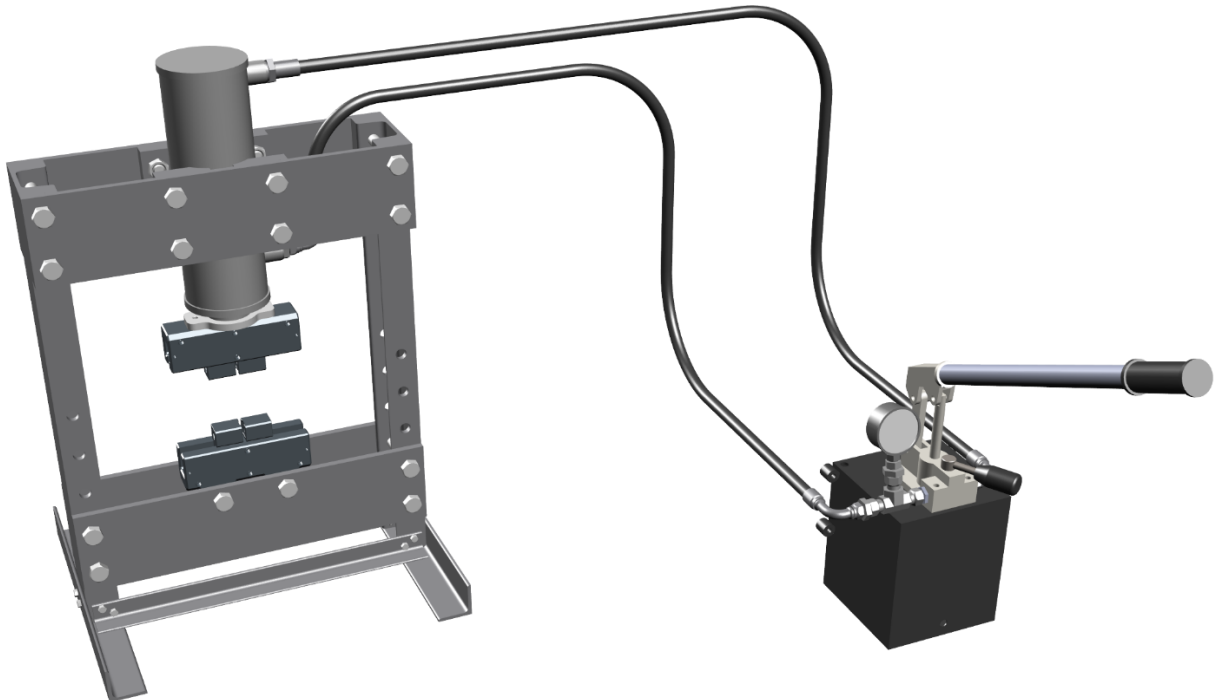
KUVA 18. Hydraulisen puristimen konsepti (16).

3.7 Ominaisuuksien määrittely

Vetopenkillä on tarkoitus tehdä vetotestejä lähinnä 3D-tulostetuille kappaleille. Tätä varten minimi veto- ja puristusvoimaksi määritettiin 15 kN. Käyttöpaineeksi määritettiin 100 bar. Tarvittava hydraulikkasyylinterin männän pinta-ala $A_{m\grave{a}nt\grave{a}}$ voidaan määrittää kaavan 3 avulla.

$$A_{m\grave{a}nt\grave{a}} = \frac{F}{p} = \frac{15000 \text{ N}}{10 \text{ MPa}} = 1500 \text{ mm}^2$$

Tämä tarkoittaa männän halkaisijaksi muutettuna n. 43,7 mm:n halkaisijaa. Testikappaleiden pituudelle annettiin rajaksi 50–200 mm. Leveyden rajaksi testattaville kappaleille asetettiin 400 mm, jolla mahdollistetaan mahdolliset taivutusjännitysmittaukset. Vetokoneen tulisi olla myös turvallinen käyttää, luotettava ja suhteellisen helposti liikuteltavissa. Rungon materiaalivalinnassa päädyttiin S235-rakenneteräkseen sen hitsattavuuden, saatavuuden ja riittävän lujuuden vuoksi. Malli vetopenkistä kuvassa 19.



KUVA 19. Vetopenkin valmis malli.

3.7.1 Vetopenkin hydraulikkakomponentit

Hydrauliikkasyylinteri

Hydrauliikkasyylinteriksi valikoitui koulun tiloissa ylimääräisenä ollut järeä, halkaisijaltaan 100 mm:n sylinteri (kuva 20). Kun männän varren halkaisija on 60 mm, muodostuu toiminnallisiksi pinta-aloiksi plus-suunnalle A_t 7854 mm² ja miinus-suunnalle A_v 5027 mm². Hydrauliikkasyylinterin teoreettinen työntövoima F_t [N] ja vetovoima F_v [N] 100 baarin paineella voidaan laskea kaavalla 3, sylinterin sisäiset kitkat eivät ole merkityksellisiä tässä tapauksessa. Tarkemmat tiedot sylinteristä löytyvät liitteestä 3.

$$F_t = 10 \text{ MPa} * 7854 \text{ mm}^2 = 78540 \text{ N}$$

$$F_v = 10 \text{ MPa} * 5027 \text{ mm}^2 = 50270 \text{ N}$$

Todettakoon voimien riittävän tarpeisiin.



KUVA 20. Vetopenkin hydraulikkasyylinteri.

Hydrauliikkapumppu, -säiliö ja -painemittari

Hydrauliikkapumpuksi suunniteltiin aluksi sähköhydraulista pumpppua, jolla virtausnopeus olisi saatu vakioitua. Toteutuksessa päädyttiin kuitenkin IKH:n HKPD25 2-toimiseen käsipumppuun, joka yksinkertaisti järjestelmää huomattavasti. Pumpun maksimipaine on 250 bar, mikä riittää käyttötarkoitukseen mainiosti. Hydrauliikkaöljysäiliöksi valikoitui 5 litran HKPT5, joka oli suoraan yhteensopiva pumpun kanssa (kuva 21). Painemittariksi valittiin 25 baariin asti näyttävä HPM63025AK IKH:lta. Koekappaleiden voimankesto määritetään tässä työssä pelkästään hydrauliöljyn paineen avulla, minkä takia päädyttiin pienemmän skaalan painemittariin.



KUVA 21. Valmis hydrauliikkapumppuyksikkö säiliöllä ja painemittarilla.

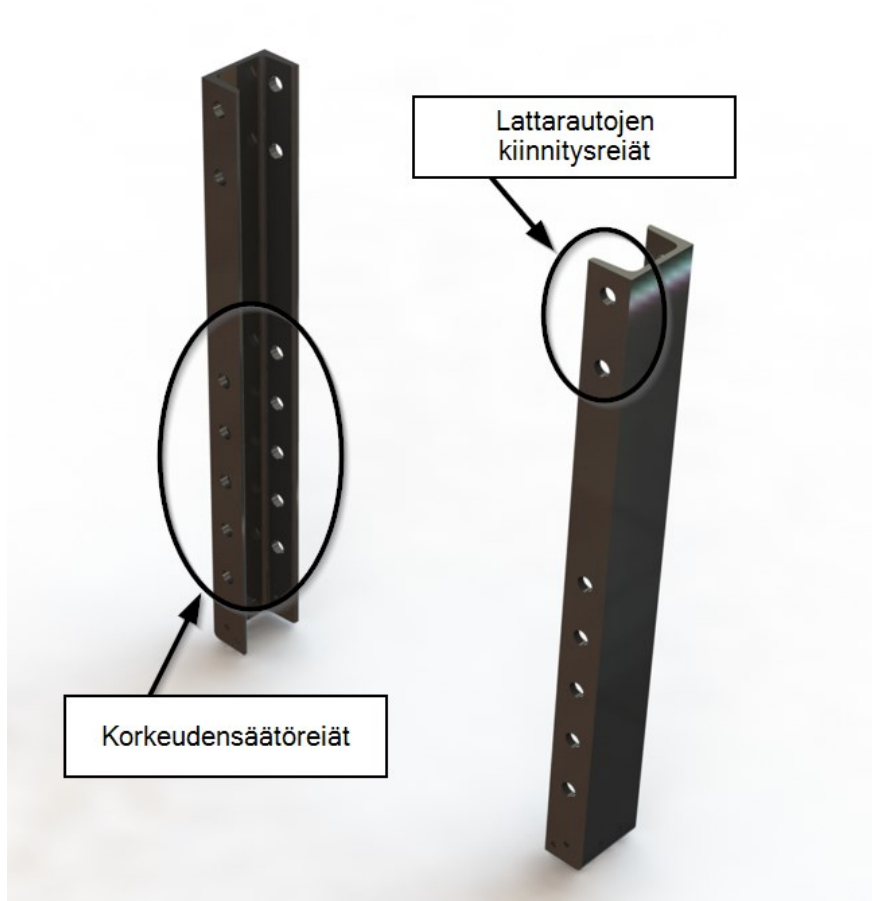
Muut hydrauliiikkatarvikkeet

Hydrauliikkaletkujen haluttiin olevan kestäviä ja sopivanpituisia, joten ne teetettiin IKH:lla Bridgestone R2K06 (EN 857 2SC / DIN 20022-2SC standardin) -letkusta (liitteet 5 ja 6). Tälle letkulle valmistaja lupaa työpaineen rajaksi 350 bar ja räjähdyspaineeksi 1400 bar.

Lisäksi tarvittiin adaptereita ja liittimiä painemittarin liittämiseksi. Nämä on listattu valmistuspiirustuksissa (liite 1). Hydrauliikkaöljynä käytettiin Viiman Basic 46 -öljyä.

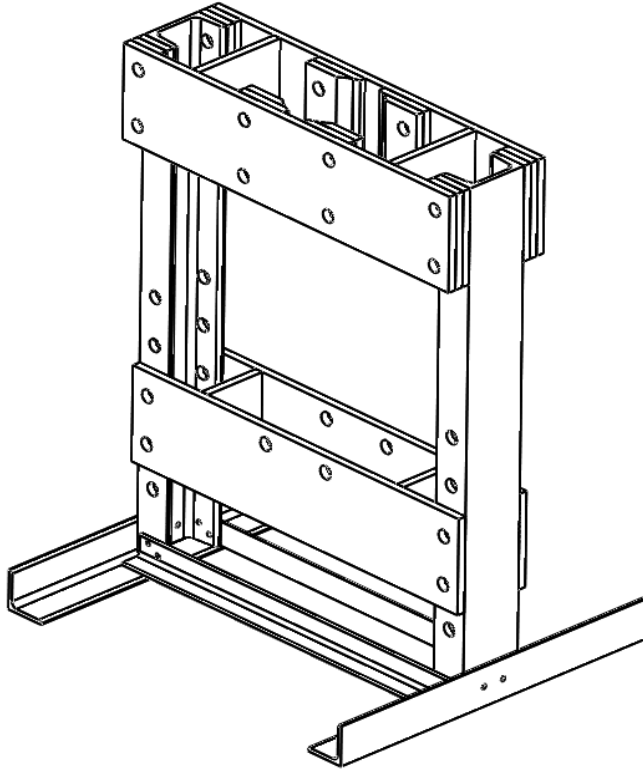
3.7.2 Rungon suunnittelu ja 3D-mallinnus

Lähtökohtana vetopenkin suunnittelulle oli hydraulikkasyylinterin koko, jonka ulkohalkaisija oli 115 mm ja pituus 335 mm. Sylinteri istutettiin kahden ison 10x120x500 mm lattaraudan väliin ja lattaraudat puolestaan koropaloilla UNP 80 -pystypalkkeihin. Myös alakisko, johon oli tarkoitus kiinnittää leuat, tehtiin samaisesta lattaraudasta. Tälle kiskolle suunniteltiin UNP-palkkiin 4 eri korkeutta reikien avulla, jotka ovat symmetrisen välimatkan (60 mm) päässä toisistaan (kuva 22). Rakennetta tukemaan ja pitämään pystyssä lisättiin vielä kulmaraudat poikittain ja pitkittäin. Tarkat mitat osista löytyvät piirustuksista (liite 2).



KUVA 22. UNP-palkkien 3D-mallit.

Rungon osat mallinnettiin SolidWorksilla käyttäen "Weldments" → "Structural Member" -komentoja, mistä saatiin suoraan leikkauslista ja pituudet vakioiteräsprofileille (kuva 23).

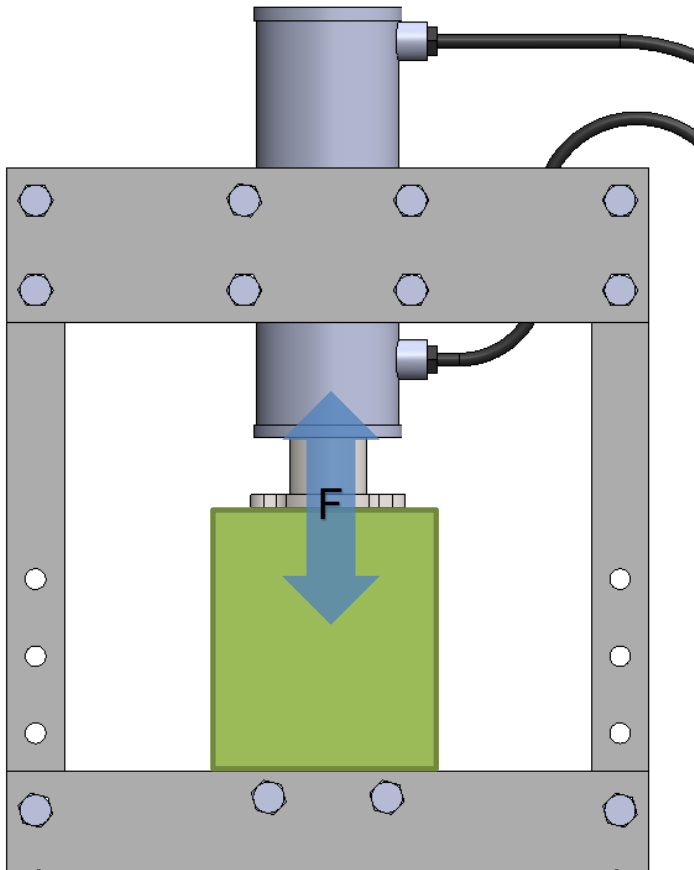


KUVA 23. Valmis 3D-malli vetopenkin rungosta

Ainoastaan lattaraudan profiilia ei löytynyt valmiista kirjastosta, joten sille täytyi tehdä oma profiili. Vetopenkin kaikki osat, paitsi UNP-pystypalkit ja alhaalla olevat kulmaraudat, ovat samaista lattarautaa. Liitoseliminä käytettiin 8.8-lujuusluokan M16- ja M6-ruuveja.

3.7.3 Rungon lujuustarkastelu

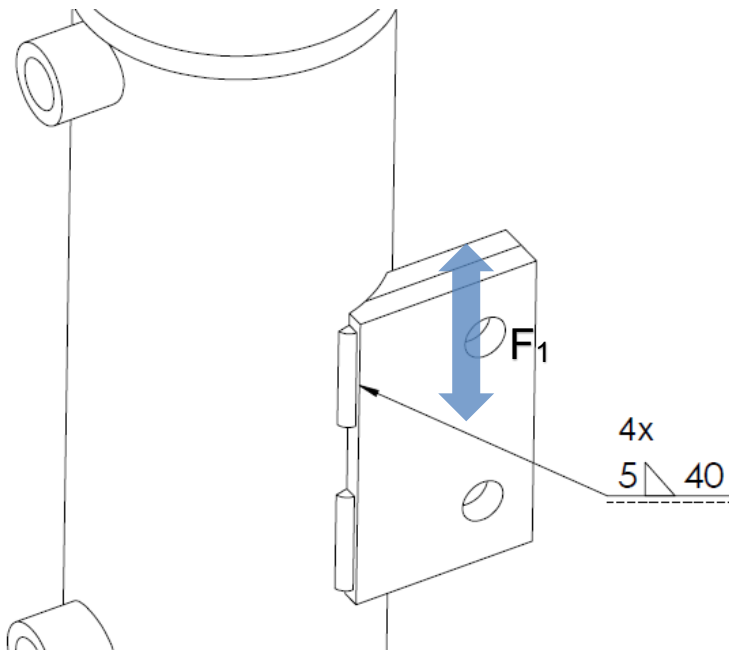
Lujuustarkastelussa keskityttiin olennaisiin veto- ja puristustilanteissa syntyvien voimien aiheuttamiin kuormituksiin (kuva 24). Niiden avulla määritettiin tarkistettaviksi kohteiksi hydraulisylinlerin adaptoreiden hitsiliitokset ja M16-pulttien kuormitukset.



KUVA 24. Kuormitustilanne.

3.7.3.1 Hydraulisyylinterin hitsiliitoksien kuormitus

Hydraulisyylinterin kiinnityksessä käytettiin pienahitsiä liittämään sylinteri 20x120 mm:n lattarauta-adaptoreihin, jotka kiinnitetään pulteilla varsinaiseen runkoon (kuva 25). Teoreettiseksi a-mitaksi pienahitsille määriteltiin 5 mm ja pituudeksi 40 mm, joita on 4 kappaletta per lattarauta-adapteri.



KUVA 25. Hydraulikkasyylinterin hitsiliitokset.

Voimankesto pienahitsille saadaan $[F_1]$ laskettua hitsiliitokselle yhdelle adapterille käyttämällä yksinkertaistettua laskentatapaa SFS 2373 -standardin mukaisesti. Laskennassa jännityksen oletetaan aina olevan epäedullisinta, eli leikkausjännitystä. Poikkipinta-alana $[A]$ käytetään pienahitsin korkeuden ja pituuden tuota. (17.)

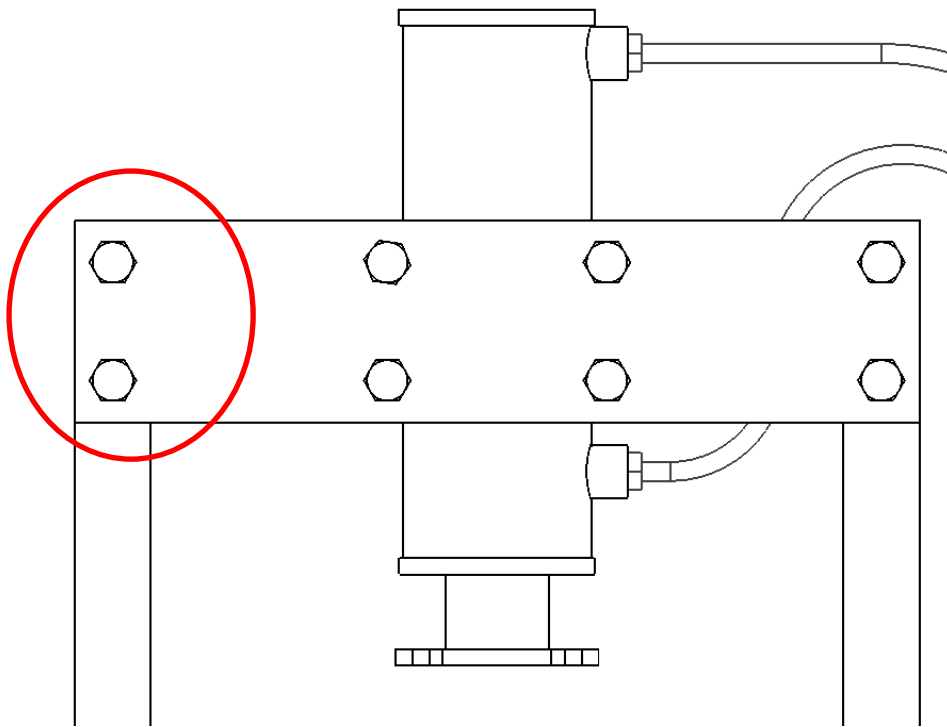
$$F_1 = Q_w * A = 141 [MPa] * 4 * 5 [mm] * 40 [mm] = 112800 N$$

Kun laskentaan lisätään vielä varmuuskerroin 1,5, saadaan sylinterin hitsiliitoksien kokonaisvoimankestoksi $[F_{kok}]$ neljällä adapterilla seuraava tulos.

$$F_{kok} = \frac{F_1 * 4}{1,5} = 300800 N \approx 300 kN$$

3.7.3.2 M16 pulttien kuormitustarkastelu

Keskitytään toisen yläreunan kuormituksen tarkasteluun, johon kohdistuu puolet hydraulikkasynterin veto/työntövoimasta (kuva 26). Tarkastellaan asiaa yksittäisen pultin leikkausvoiman keston kannalta.



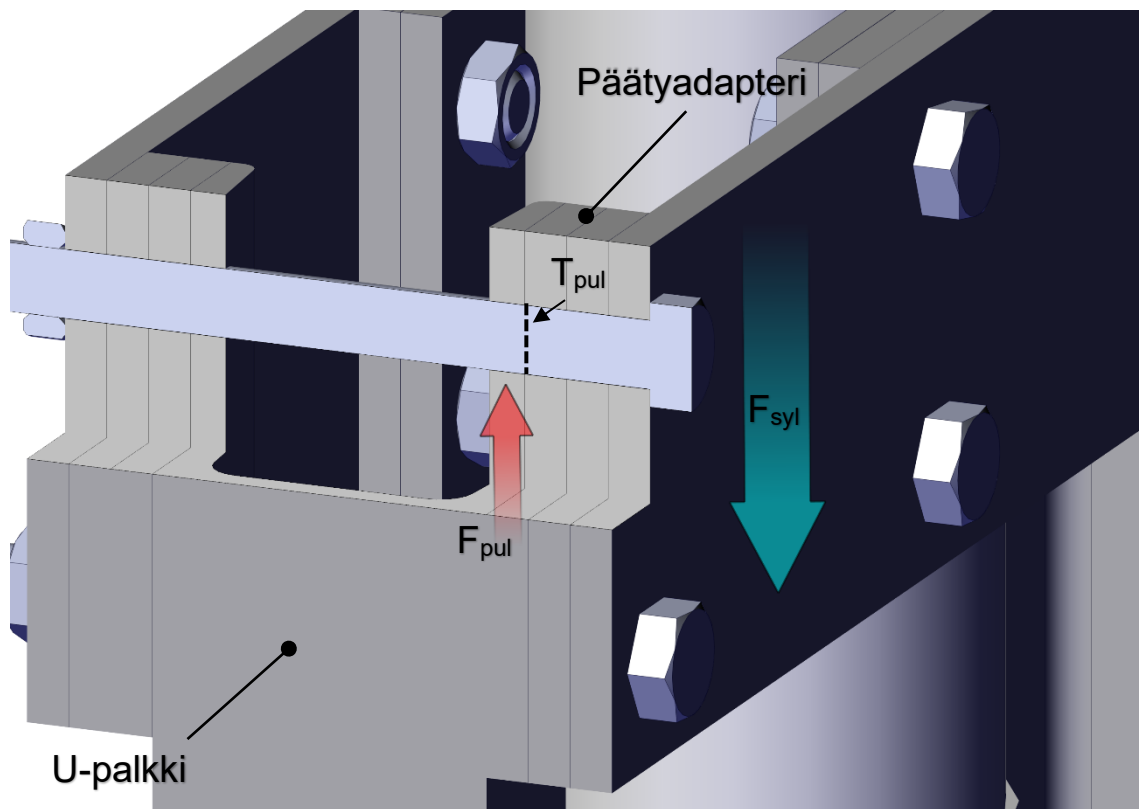
KUVA 26. Pulttien kuormitustilanteen tarkastelualue.

Tarkastelussa keskityttiin ylänurkkien DIN 931 M16x160 mm 8.8 -osakierrepulttien leikkausvoimien kestoan (kuva 27). Tarkastelussa oletetaan, että kitkavoima on nolla ja kaikki sylinterin vetovoima kohdistuvat pultteihin leikkausvoimina. Pulttien halkaisija leikkausvoimien, eli U-palkin ja päätyadaptoreiden väliseltä kohdalla on 16 mm. Pulttien leikkausjännityksen kesto τ on 464 MPa, joka saadaan kertomalla pultin murtolujuus 0,58:lla (18, s. 277, 845). Näillä tiedoilla saadaan maksimileikkausvoimankesto F_{pul} [N] yhdelle leikkauspinnalle määritettyä kaavasta 1 johtamalla.

$$F_{pul} = \tau * \pi * r^2 = 464 \text{ MPa} * \pi * (8 \text{ mm})^2 = 93293 \text{ N}$$

Ylälaidan pulttien kokonaismäärän ollessa 4 kpl, on leikkauspintojen määrä yhteensä 8 kpl. Tähän kun lisätään vielä varmuuskerroin 1,25, saadaan kokonaisleikkausvoimaksi seuraava tulos.

$$F_{pkok} = \frac{F_{pul} * 8}{1,25} = 597074 \text{ N} \approx 597 \text{ kN}$$



KUVA 27. M16-pulttien leikkausvoimatarkastelu.

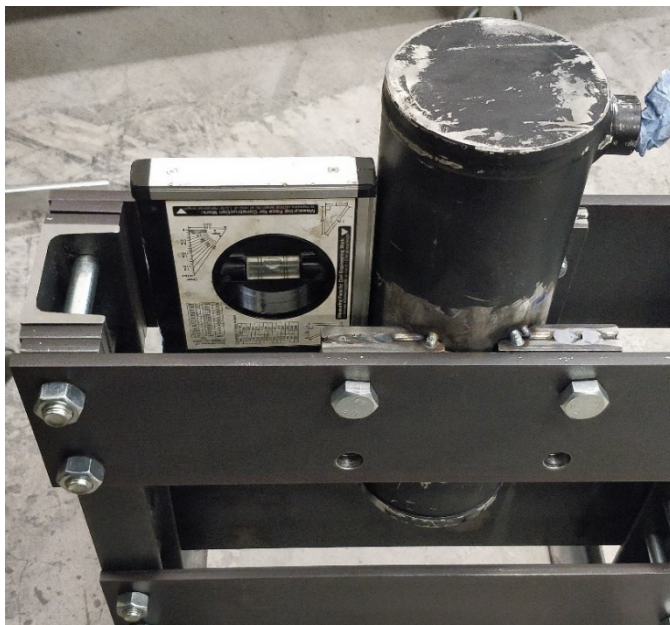
Todennetaan vielä vetopenkin kestävä hydrauliikkasynterin aiheuttaman työntövoiman F_t 100 baarin paineella vertaamalla sitä hitsausliitoksen kokonaiskestovoimaan F_{kok} .

$$\frac{F_{kok}}{F_t} = \frac{300800 \text{ N}}{78540 \text{ N}} = 3,83$$

3.7.4 Rungon valmistus

Rungon teräsprofiilit tilattiin Oulun Palametalli Oy:sta täyspitkinä profileina, eli ne täytyi leikata oikeisiin mittoihin. Rungon osien valmistuspiirustukset löytyvät liitteestä 2.

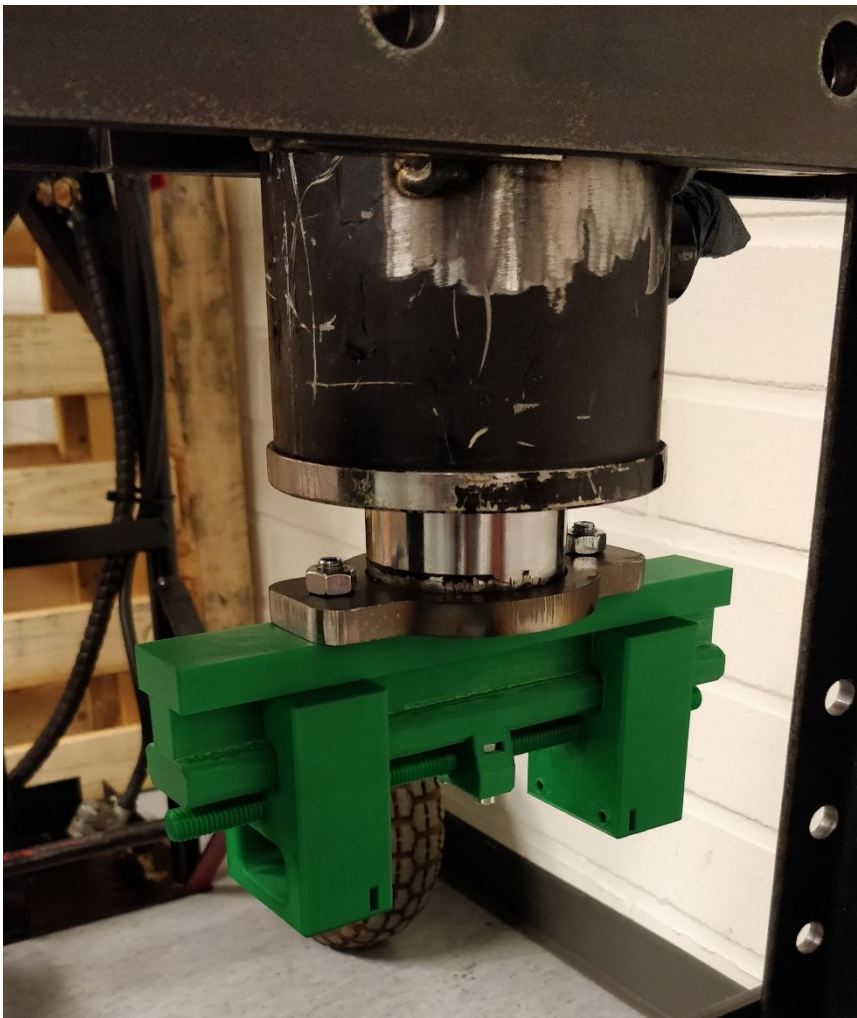
Profiilit leikattiin oikean pituisiksi metallivannesahalla. Reikien poraamiseen käytettiin manuaalista jyrsinkonetta. Hydraulikkasynterinin kiinnityslattaraudat leikattiin ensin, minkä jälkeen ne hitsattiin pareittain kiinni toisiinsa (liite 2). R55-pyöritys tehtiin manuaalisesti kulmahiomakoneella apuviivoja hyväksi käyttäen. Mäntäadapteri hitsattiin synterinin männänvarren päähän. Hydraulikkasynterini kiinnitettiin kiinnitysrautoihin hitsaamalla. Tässä käytettiin apuna vesivaakaa, jotta synterini kiinnittyisi mahdollisimman suoraan (kuva 28).



KUVA 28. Hydraulikkasynterinin kiinnittäminen vetopenkin runkoon.

3.7.5 Kiinnitysleukojen suunnittelu ja valmistus

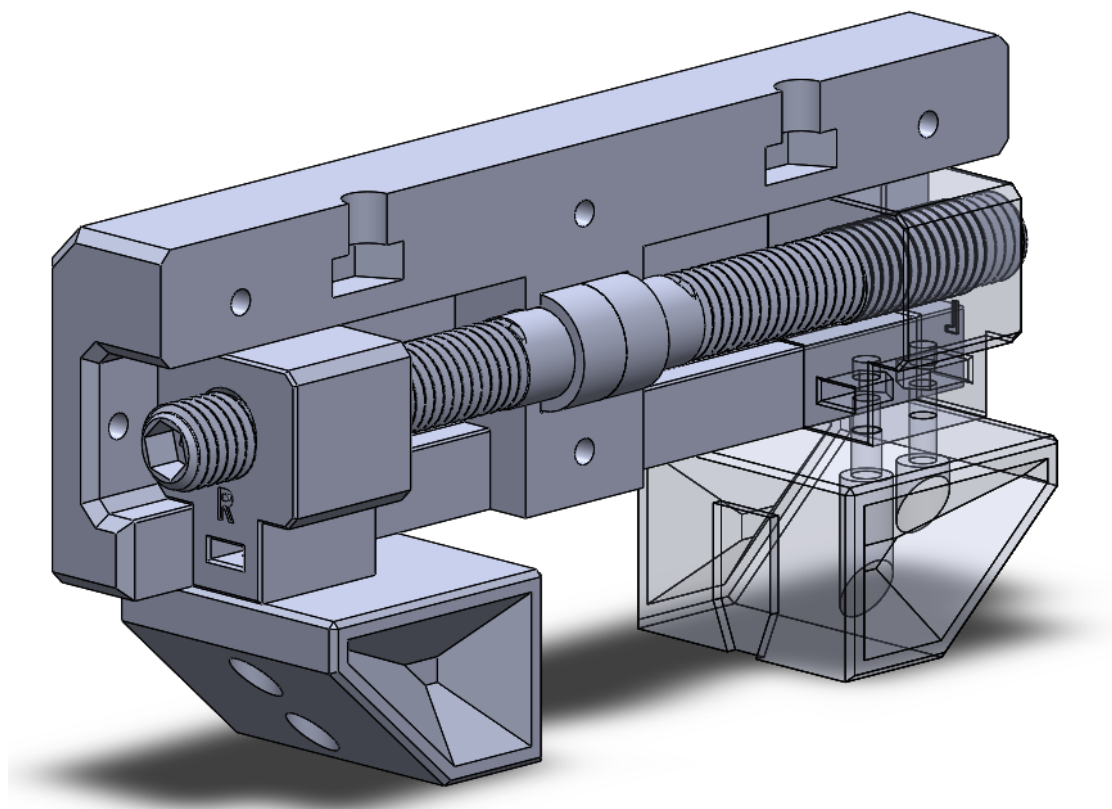
Kiinnitysleukojen suunnittelussa haettiin mallia työstökoneiden keskittävistä kiinnitysmekanismeista. Kyseisissä mekanismeissa leuat vedetään kiinni yhteen kierretankojen avulla, joista toisessa on myötäkierre ja toisessa vastakierre. Valmistuksessa käytettiin apuna 3D-tulostusta prototyyppien valmistamiseen, mutta myös lopulliset leuat valmistettiin tulostamalla. Ensimmäinen versio kiinnitysleuoista (kuva 29) 3D-tulostettiin kokonaan PLA-muovista. Huomattiin kuitenkin, että kun kierreosat on tulostettu samasta materiaalista, syntyy niiden välille enemmän kitkaa. Kierteen koko oli tässä versiossa M10.



KUVA 29. PLA-materiaalista 3D-tulostettu ensimmäinen versio kiinnitysleuoista.

Toinen versio

Toisesta versiosta tehtiin tukevampi ja leukaosat laitettiin kulkemaan leuanrungon sisällä (kuva 30). Kierteen koko muutettiin M14:ksi ja tangot tulostettiin PETG-muovista. Tämä materiaalin vaihdos kierretangon osalta vähensi kierreosien tarttumista toisiinsa.

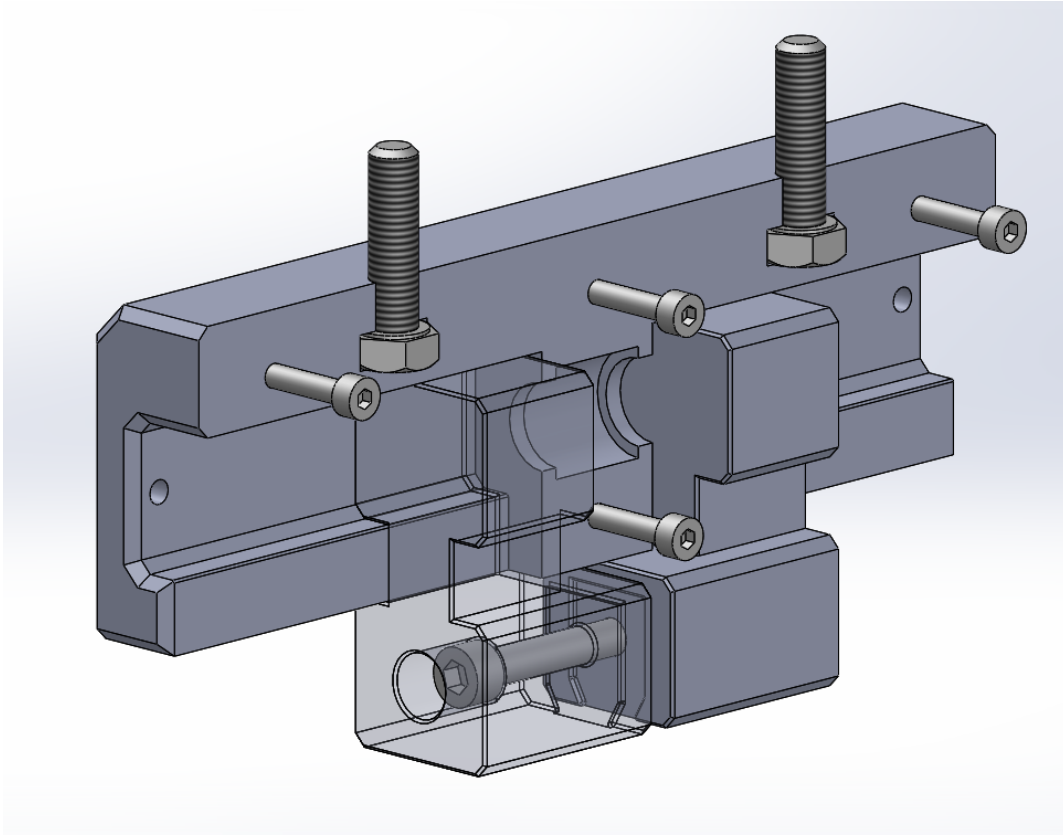


KUVA 30. Versio 2 kiinnitysleuoista (kuvasta piilotettu toinen puolisko rungosta).

Kierretangot tulostettiin erillisinä ja ne yhdistettiin niiden väliin tulevalla kuusiopallalla. Kierreosiin tehtiin myös merkinnät helpottamaan niiden kasausta. Varsinaiset leuat olivat vaihdettavat ja kiinnitetyt M4-pulteilla kierrepalikoihin. Leukoihin tehtiin vedettävien kappaleiden muotoiset kolot.

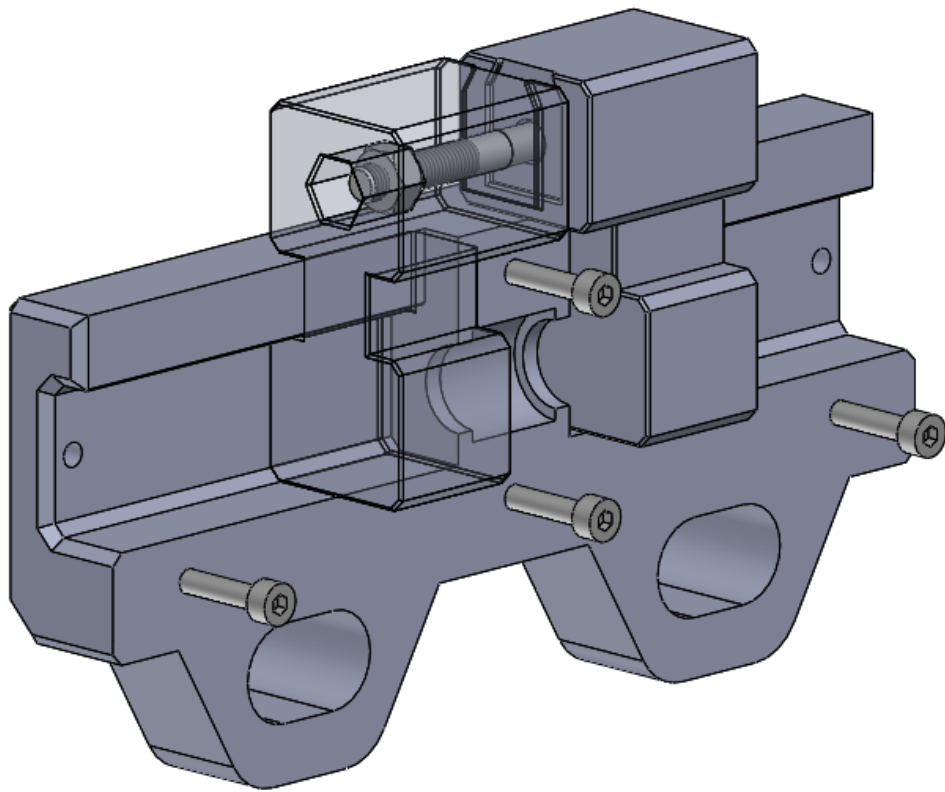
Viimeinen versio

Viimeisestä versiosta tehtiin yksinkertaisempi, koska todettiin muovikierteiden olevan liian heikkoja tarpeeksi suuren puristusvoiman muodostamiseksi. Runko säilytettiin samana, muuten osat vaihtuivat (kuva 31). Tarkemmat tiedot liitteessä 7.



KUVA 31. Viimeisin versio yläpuolisesta kiinnitysleukasysteemistä (toinen puolisko rungosta piilotettu).

Leuat tehtiin yhtenäisinä kappaleina ja vedettävän kappaleen puristuskohtaan tehtiin M6-pultin reiät. Alaleuan runkoon tehtiin väljät reiät, jotka kompensoivat mahdollisen sylinterin kieroon asennuksen (kuva 32). Tarkemmat tiedot alakiinnitysleuasta liitteessä 8.



KUVA 32. Alaleukasysteemin viimeinen versio (toinen puoli rungosta piilotettu)

4 TESTAUSKAPPALEET JA NIIDEN VETOKOKEET

Tässä luvussa käydään läpi testauskappaleiden materiaalit, valmistus, vetoko-
keet. Käytetyt työvälineet/ohjelmistot:

- SolidWorks 2018
- PrusaSlicer 2.0.0
- Prusa i3 MK3S 3.7.1 - 2266
- Vetopenkki

4.1 Materiaalit

Testattavaksi materiaaleiksi valittiin Prusamentin PLA Pearl Mouse ja PETG Jet
Black muovit (kuva 33).

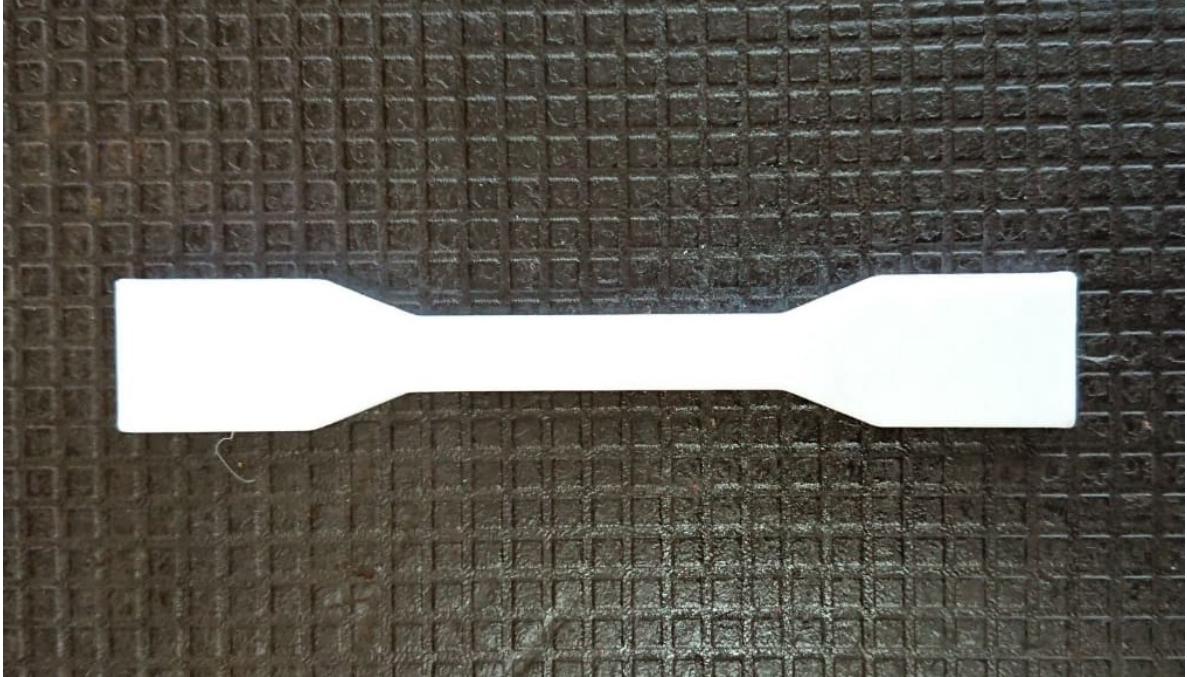


KUVA 33. Prusament pakkauslaatikko, filamenttikela ja mallituloste (19).

Prusament-filamentti on Tšekkiläisen Prusa Research:n valmistamaa 3D-tulos-
tuslankaa, joka julkaistiin syksyllä 2018. Filamentit tulevat 1 kg:n pakkauksissa
1,75 mm:n paksuisena lankana, jonka halkaisijalle luvataan toleranssiksi $\pm 0,02$
mm. Filamenttikeloissa on myös painatettuna QR-koodi, josta näkee kyseisen
langan valmistustiedot. Tarkemmat tiedot materiaalien ominaisuuksista löytyvät
liitteistä 9 ja 10.

4.2 Kappaleiden valmistus

Testauskappaleet mallinnettiin SolidWorks -ohjelmalla ja viipaloitiin PrusaSlicer -ohjelmalla. Ensimmäinen versio kappaleesta (kuva 34) oli yhteensopiva kiinnitysleukojen ensimmäisen version kanssa.



KUVA 34. Ensimmäinen versio testikappaleesta, paksuus 4 mm ja leveys 6 mm ohuimmasta kohdasta.

Ensimmäisen version leukasysteemillä ei saanut tarpeeksi pitovoimaa kappaleen kiinni pitämiseksi vedon ajaksi. Lopuksi päädyttiin avustamaan kiinnipitoa liimapuristimilla vedon onnistumiseksi. Tarvittava voima jäi myös liian pieneksi luotettavan tuloksen saamiseksi.

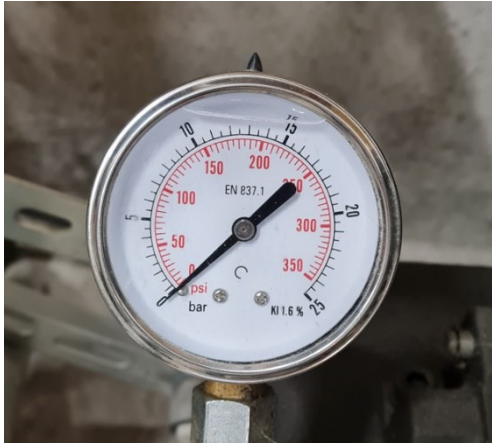
Toisesta versiosta (kuva 35) tehtiin pidempi, leveämpi, paksumpi, ja päihin lisättiin reiät pultteja varten, tarkat mitat löytyvät piirustuksesta (liite 12). Pulttikiinnityksellä haluttiin varmistaa kappaleen kiinni pysyminen. Kappaleita tulostettiin yhteensä 24, jakaantuen puoleksi PLA- ja PETG-materiaaleihin sekä siitä vielä täyttöasteen mukaan kahteen 6 kappaleen sarjaan. Täyttöasteina käytettiin 20 % ja 100 %. Kaikki kappaleet tulostettiin vaakatasossa.



KUVA 35. Toinen versio testikappaleesta, vas. PETG ja oik. PLA.

4.3 Vetokokeet

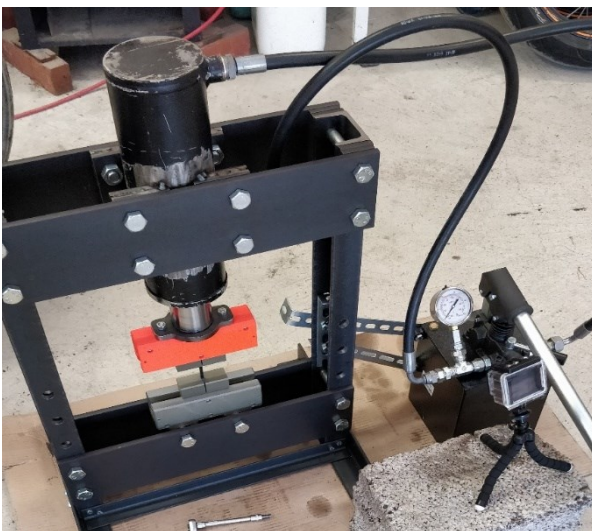
Varsinaiset vetokokeet aloitettiin määrittämällä voimahäviöt hydraulikkasynterille, jotka olivat vedettäessä männän ja varren painovoima sekä kitkavoimat tiivistepinnoilla. Näiden yhteishäviö määritettiin yksinkertaisesti paineesta, joka tarvittiin männän ylöspäin nostamiseksi tasaisella nopeudella. Määritys suoritettiin kuvaamalla painemittaria (kuva 36) ja tekemällä 10 tasaista pumppausta, joista laskettiin keskiarvoksi paineelle $1,0 \pm 0,1$ bar. Tämä on voimaksi muutettuna 502 N männän varren puolelta. Käytetyn painemittarin skaala oli 0–25 bar.



KUVA 36. Häviöiden määrittäminen paineen mittauksen avulla.

Varsinaiset vetokokeet suoritettiin kuvaamalla vetopenkkiä ja painemittaria, minkä jälkeen videolta tarkistettiin maksimipaine (kuva 37). Testikappaleiden vetokokeet tehtiin seuraavassa järjestyksessä:

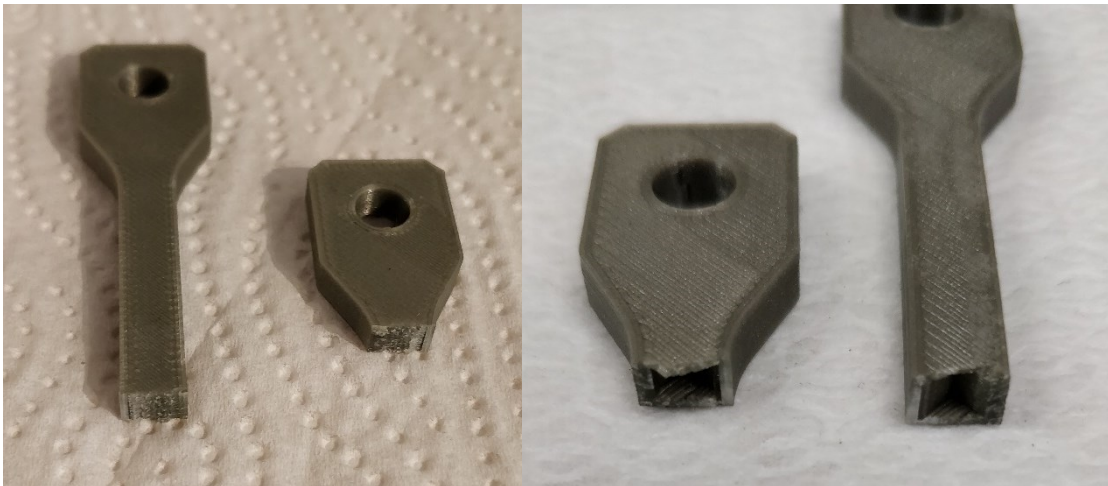
1. PLA, 20 % täyttö
2. PETG, 20 % täyttö
3. PLA, 100 % täyttö
4. PETG, 100 % täyttö



KUVA 37. Vetokokeiden suoritusjärjestelyt.

4.4 Vetokokeiden tulokset

Testikappaleet rikkoutuivat kaikki samalta alueelta, varresta alkavasta kaaresta (kuva 38). Kuvasta näkee 20 % ja 100 % prosenttien täytön eron testikappaleissa.



KUVA 38. PLA testikappaleet vedon jälkeen, vas. 100 % ja oik. 20 %.

Vetovoimat, jotka vaadittiin testikappaleiden rikkomiseen, laskettiin kaavan 5 avulla. Tuloksista vähennettiin luonnollisesti häviöpaine. Esimerkkinä ensimmäinen veto.

$$F = (3,0 \text{ [bar]} - 1,0 \text{ [bar]}) * 101000 * 0,0050265 \text{ [m}^2\text{]} = 1015,4 \text{ N}$$

Vetolujuuden määrittäminen vedetyille kappaleille tapahtui kaavan 1 avulla, jossa täytyi ottaa huomioon kappaleen poikkipinta-ala muuttuvan täyttöasteen mukaan. Lopulliset tulokset löytyvät taulukosta 3. Esimerkkinä ensimmäinen veto.

$$\sigma = \frac{1015,4 \text{ [N]}}{14,8 \text{ [mm}^2\text{]}} = 68,6 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

TAULUKKO 3. Vetokokeiden tulokset.

Veto #	PLA 20%		PLA 100%		PETG 20%		PETG 100%	
	F [N]	σ [MPa]	F [N]	σ [MPa]	F [N]	σ [MPa]	F [N]	σ [MPa]
1	1015,4	68,6	2132,3	74,6	964,6	65,2	1624,6	56,8
2	1015,4	68,6	2030,7	71,0	964,6	65,2	1675,3	58,6
3	1015,4	68,6	2030,7	71,0	964,6	65,2	1776,9	62,1
4	1015,4	68,6	2030,7	71,0	964,6	65,2	1675,3	58,6
5	1015,4	68,6	2030,7	71,0	964,6	65,2	1624,6	56,8
6	1015,4	68,6	2030,7	71,0	964,6	65,2	1624,6	56,8

Kun verrataan tuloksia valmistajan teknisissä tiedoissa ilmoitettuihin vetolujuuksiin, ovat lujuudet suuremmat vedetyissä. Prusament PLA:n ilmoitettu vetolujuus horisontaalisesti tulostettuna on $50,8 \pm 2,4$ [MPa] (liite 9) ja PETG:n (liite 10) 47 ± 2 [MPa]. Ero isoimmillaan PLA:lla oli 23,8 MPa / 47 %. PETG ero taas oli 18,2 MPA / 39 %.

5 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tutkia FFF-tulostusmenetelmän materiaalien lujuusominaisuuksia ja sitä, kuinka niitä pystyi mahdollisesti kasvattamaan. Potentiaalisin menetelmä oli suolassa sulatus, minkä avulla voidaan parantaa Z-suunnan lujuutta jopa 150 %.

Työn toisena tarkoituksena oli suunnitella hydraulinen vetopenkki. Vetopenkin suunniteltu modulaarisuus toteutui ja penkin rakentaminen sujui ilman isoja ongelmia tai muutoksia. Haastavimpia kohtia oli sylinterin saaminen suoraan ja sen hitsaaminen. Toinen haastava kohta oli kiinnitysleukojen suunnittelu, joka lopulta toteutui tulosta ja testaa -menetelmällä. Vetopenkkiin on myös tulevaisuudessa mahdollista suunnitella ja valmistaa erilaisia kiinnikkeitä, joilla mahdollistetaan erilaiset testausympäristöt.

Vetokokeiden tulokset olivat mielestäni suuntaa antavat ja sopivat ainoastaan keskinäiseen kappalevertailuun. Vetopenkissä olisi pitänyt olla erillinen voimakennonanturi, jolla olisi saatu tarkempia tuloksia. Nyt hydraulinesteenpaineen muuttaminen voimaksi oli epätarkka analogisen painemittarin ja käsipumpun takia sekä suhteessa ison sylinterin vuoksi. Sähköinen painemittari olisi parantanut voimien taltioimista. Lisäksi olisi ollut tuloksien havainnoinnin kannalta hyödyllistä saada kappaleen venymä taltioitua.

LÄHDELUETTELO

1. Stříteský, Ondřej 2019. Basics of 3D Printing with Josef Prusa. Praha: Prusa Research a.s.
2. Haines, Justin 2022. History of 3D printing: When was the 3D printing invented? All3DP. Hakupäivä: 1.4.2023. <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>.
3. 3D Printing Industry 2023. The Free Beginner's Guide. Hakupäivä 25.4.2023 <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide>
4. Redwood, Ben, Schöffer, Filemon & Garret, Brian 2020. The 3D Printing Handbook. Amsterdam: Coers & Roest.
5. Ultimaker 2023. Valokuva. Ultimaker PLA for S series: Versatile, colorfull, easy to print. Hakupäivä: 2.8.2023. <https://ultimaker.com/materials/s-series-pla/>.
6. Markforged 2023. 3D Printing Settings Impacting Part Strenght. Hakupäivä 4.8.2023. <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-settings-impacting-part-strength>.
7. Carolo, Lucas 2023. Annealing PLA for stronger 3D prints: 2 Easy Ways. All3DP. Hakupäivä 13.8.2023. <https://all3dp.com/2/annealing-pla-prints-for-strength-easy-ways/>.
8. Kočí, Jakub 2019. How to improve your 3D prints with annealing. Prusa Blog 6.12.2019. Hakupäivä 13.8.2023. https://blog.prusa3d.com/how-to-improve-your-3d-prints-with-annealing_31088/.
9. CNC Kitchen 2020. Testing the strenght of 3D prints re-melted in salt. CNC Kitchen blog 24.10.2020. Hakupäivä 13.8.2023. <https://www.cnckitchen.com/blog/testing-the-strength-of-3d-prints-re-melted-in-salt>.

10. Loth, Nick 2023. Electroplating 3D Prints – All You Need to Know. All3DP Blog 7.6.2023. Hakupäivä 15.8.2023. <https://all3dp.com/1/electroplating-3d-prints-all-you-need-to-know/>.
11. Breaking Taps 2021. Stronger 3D Printed Parts with Electroplating. Hakupäivä 15.8.2023. https://www.youtube.com/watch?v=cp_EOxEyNHs&t=542s.
12. Saarineva, Jarmo 1995. Lujuusoppi Peruskurssi. Tampere: Pressus Oy.
13. Bruder, Ulf 2016. Osa 13 - raaka-ainetiedot ja mittausmenetelmiä. Muoviyhdistys ry:n verkkolehti 27.7.2016. Hakupäivä 22.11.2023. <https://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/20/osa-13-raaka-ainetiedot-ja-mittausmenetelmia/>.
14. Rissanen, Sami 2022. Hydraulisynterinin korvaaminen sähköisellä toimilaitteella työkonekäytössä. Tampereen ammattikorkeakoulu. Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 22.3.2023. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2022120827297>
15. Inkinen, Pentti & Tuohi, Jukka 2012. Momentti 1 Insinöörifysiikka. Helsinki: Otava.
16. Basic, Josip 2016. Valokuva. Turbulent history of fluid mechanics. ResearchGate. Hakupäivä 1.3.2023. https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-a-hydraulic-press-system_fig3_291821947
17. SFS 2373. Hitsaus. Staattisesti kuormitettujen teräsrakenteiden hitsausliitosten mitoitus ja lujuuslaskenta. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Hakupäivä 5.4.2023. <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/SFS/ID2/2/798.html.stx>
Vaatii lisenssin.
18. Valtanen, Esko 2022. Tekniikan taulukkokirja. Jyväskylä: Genesis Kirjat Oy.

19. Koslow, Tyler 2018. Prusa Research Brings Material Production In-House with Prusament Filament. All3DP. Hakupäivä 17.7.2019.
<https://all3dp.com/4/prusa-research-brings-material-production-house-prusament-filament/>.

LIITTEET

Liite 1 Vetopenkin piirustukset

Liite 2 Vetopenkin rungon piirustukset

Liite 3 Hydrauliiikkasynterin piirustus

Liite 4 Mäntäadapterin piirustus

Liite 5 Hydrauliiikkaletku 1 piirustus

Liite 6 Hydrauliiikkaletku 2 piirustus

Liite 7 Yläkiinnitysleuan piirustus

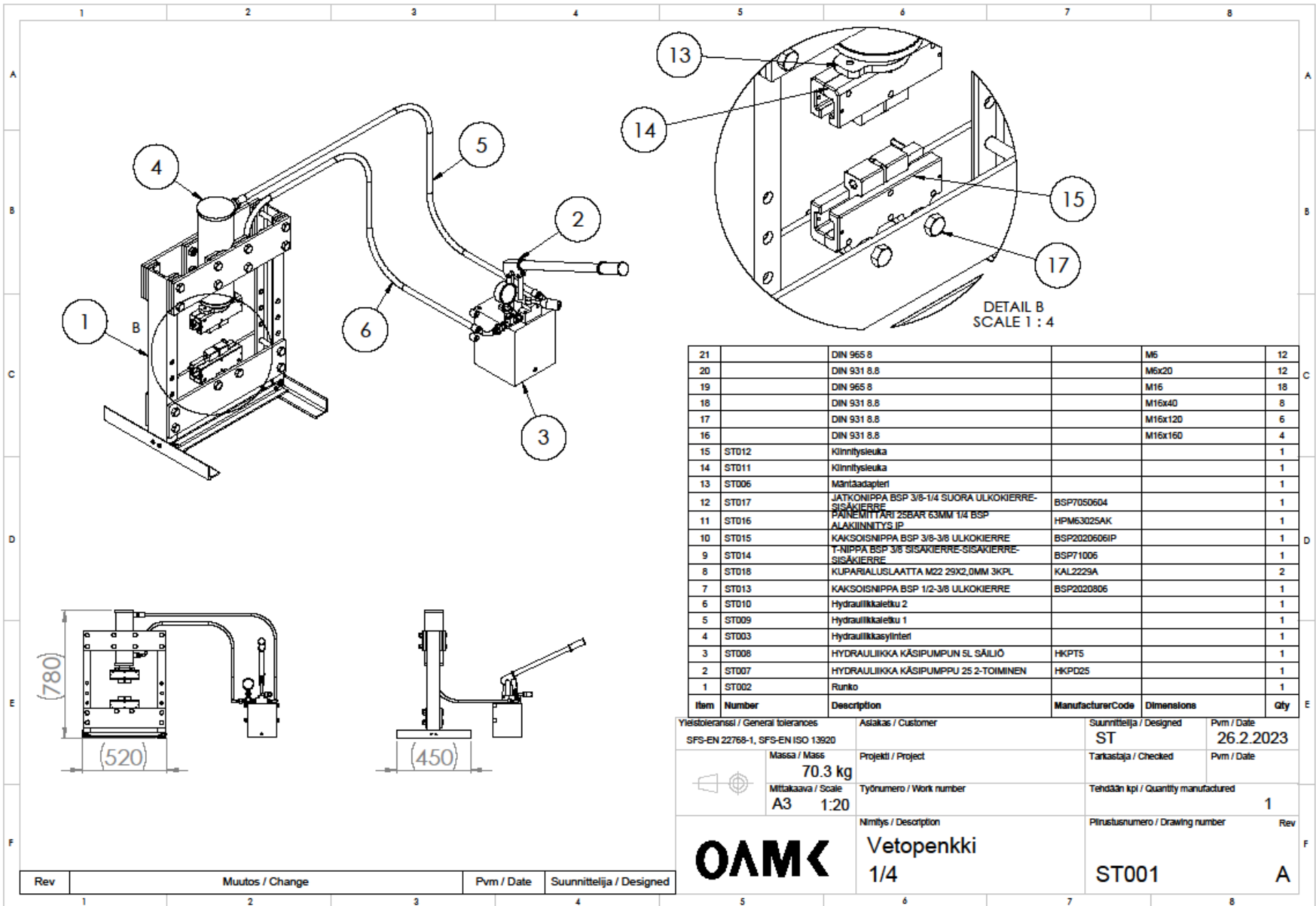
Liite 8 Alakiinnitysleuan piirustus

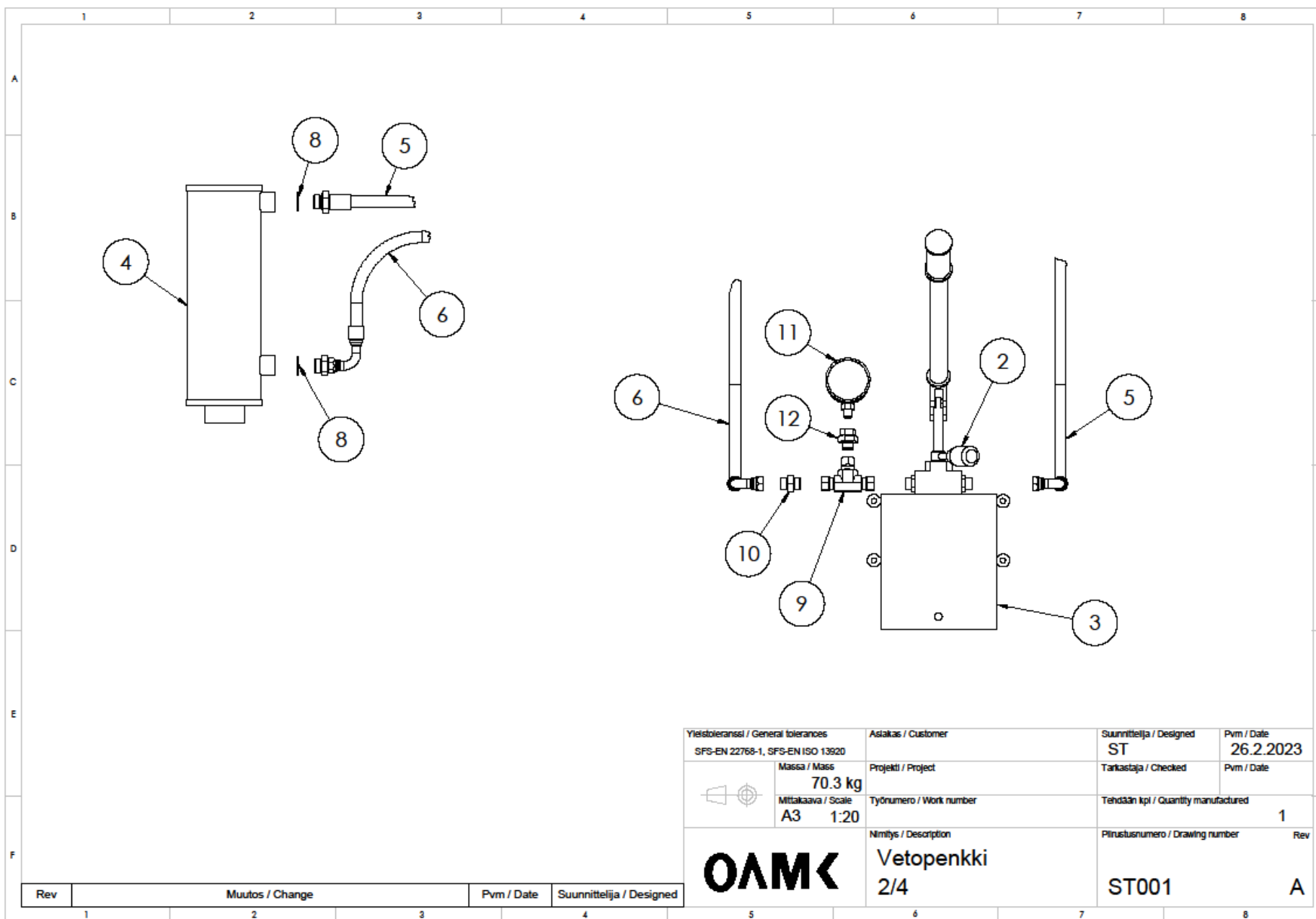
Liite 9 Prusament PLA tekniset tiedot


Liite 10 Prusament PETG tekniset tiedot

Liite 11 Prusament ASA tekniset tiedot

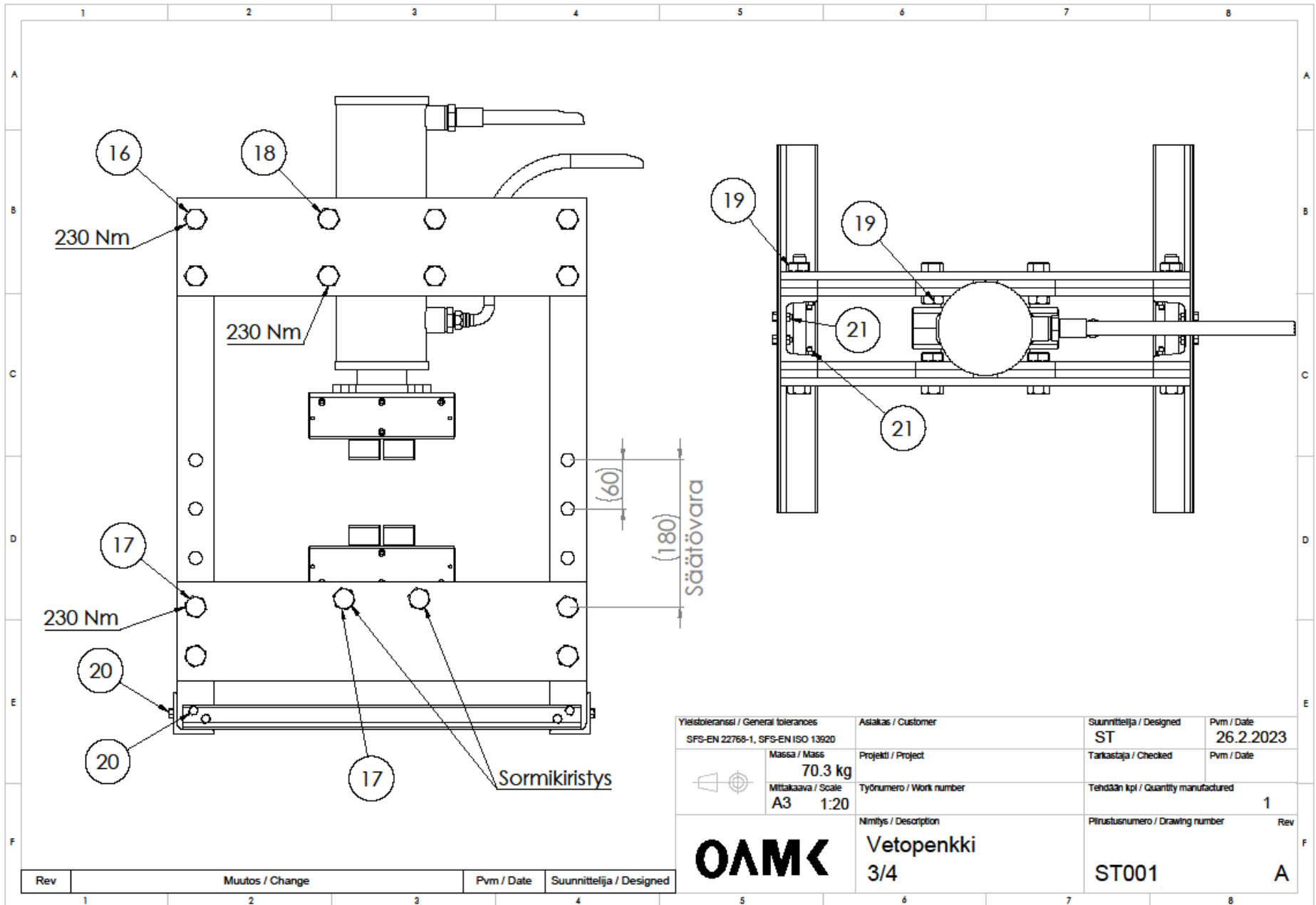
Liite 12 Testikappaleen piirustus

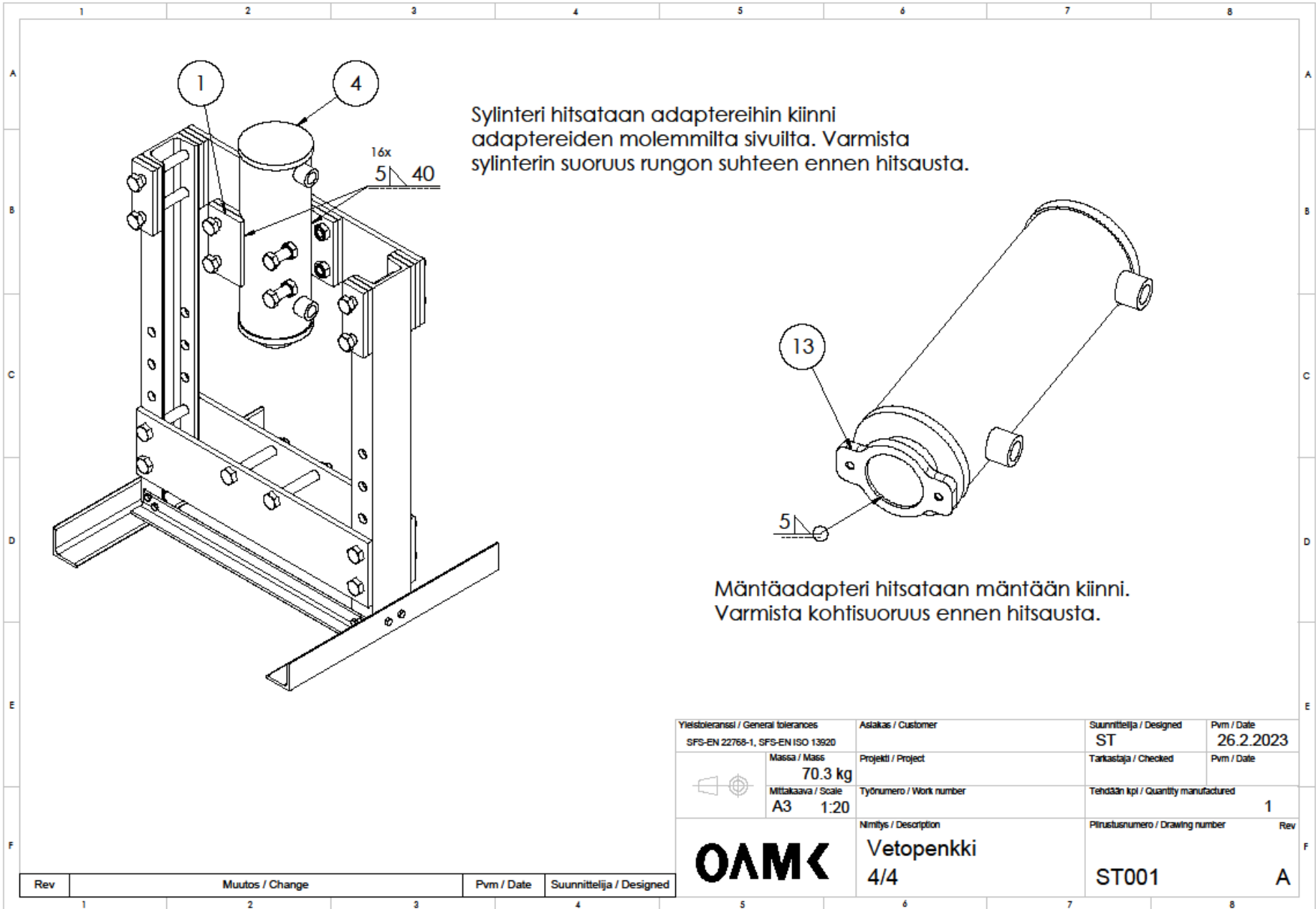


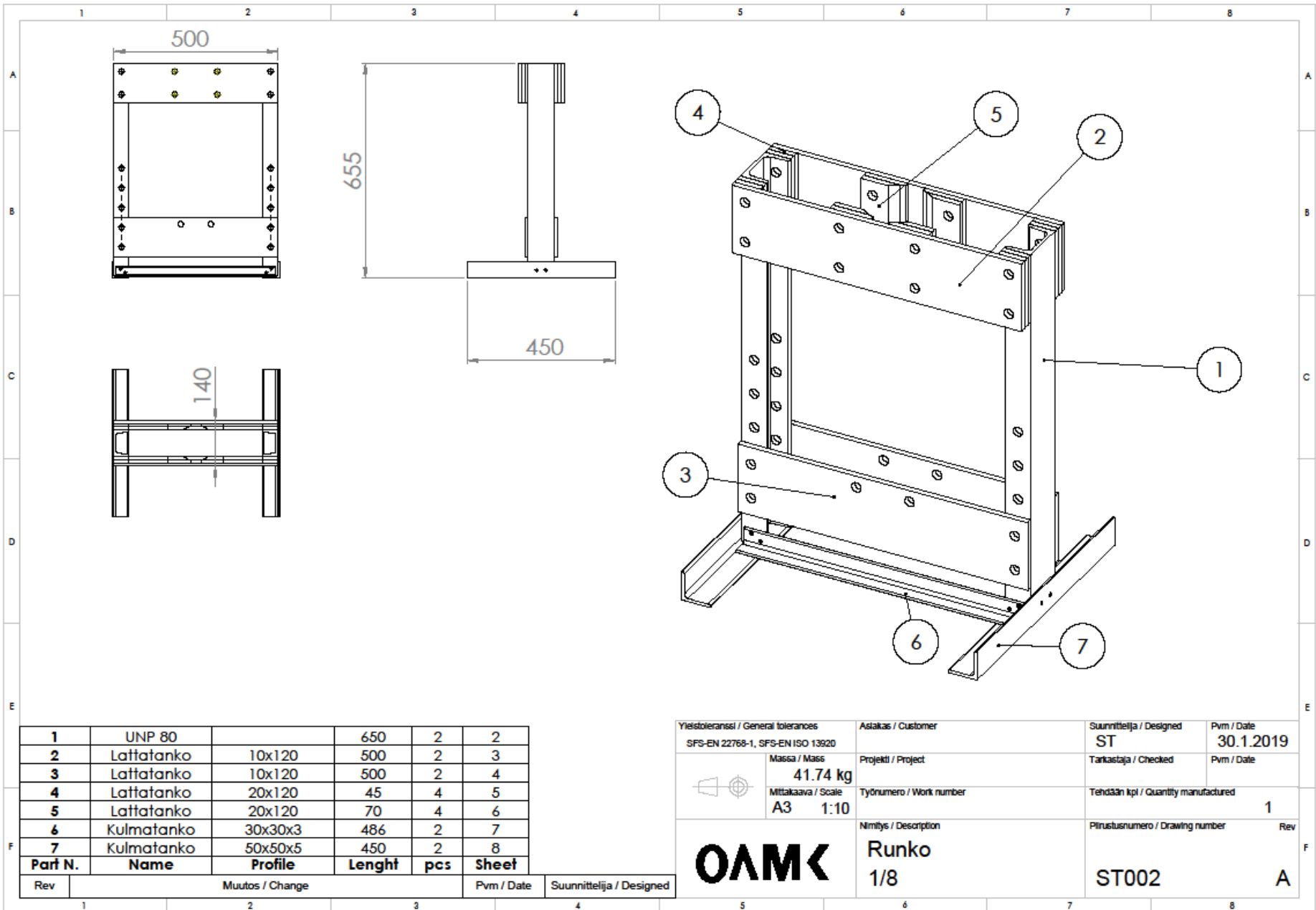


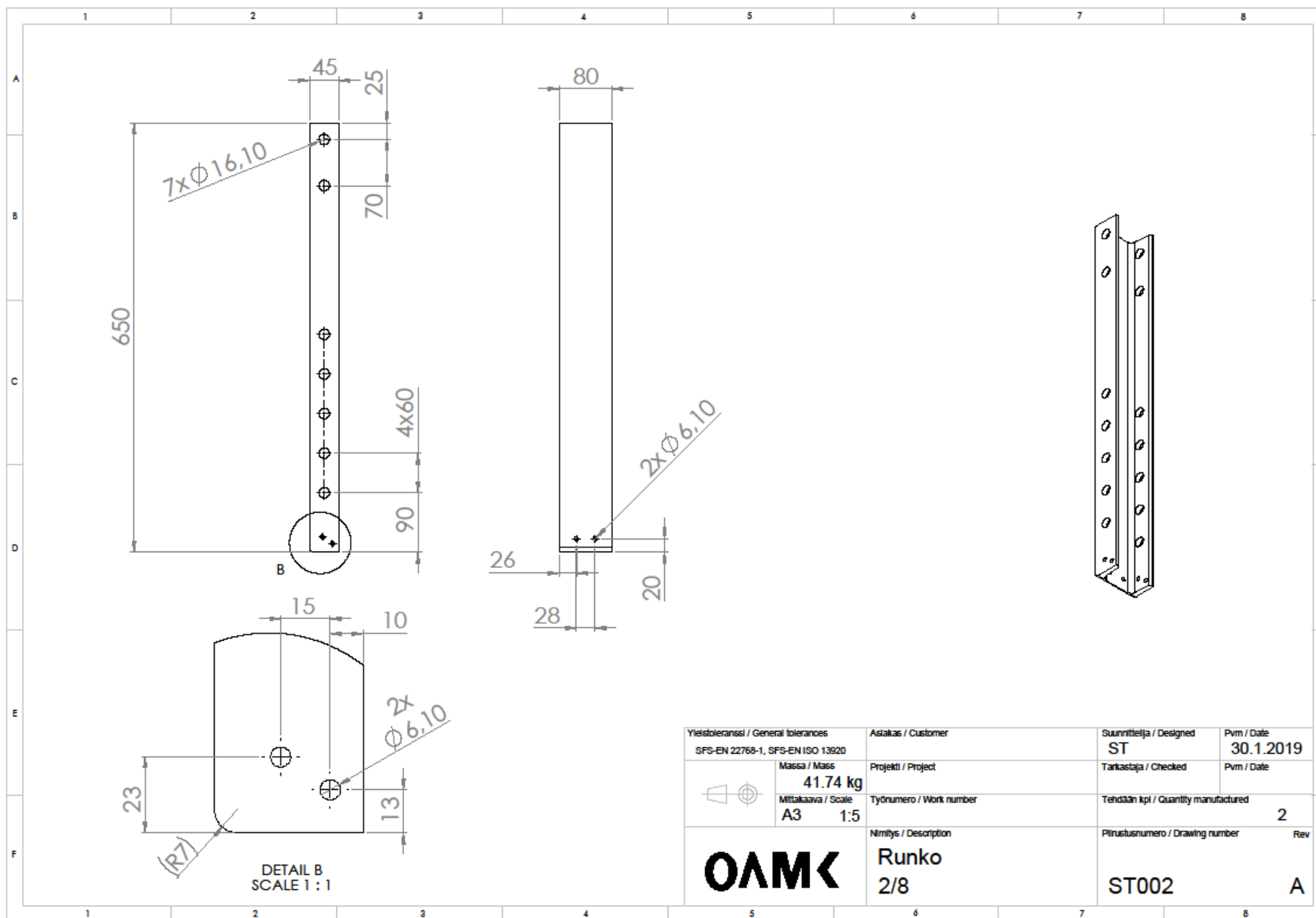
Yleistoleranssi / General tolerances SFS-EN 22768-1, SFS-EN ISO 13920		Asiakas / Customer		Suunnittelija / Designed ST	Pvm / Date 26.2.2023
Massa / Mass 70.3 kg		Projekti / Project		Tarkastaja / Checked	Pvm / Date
Mittakaava / Scale A3 1:20		Työnumero / Work number		Tehdään kpl / Quantity manufactured 1	
		Nimitys / Description Vetopenkki 2/4		Piirustusnumero / Drawing number ST001	
				Rev A	

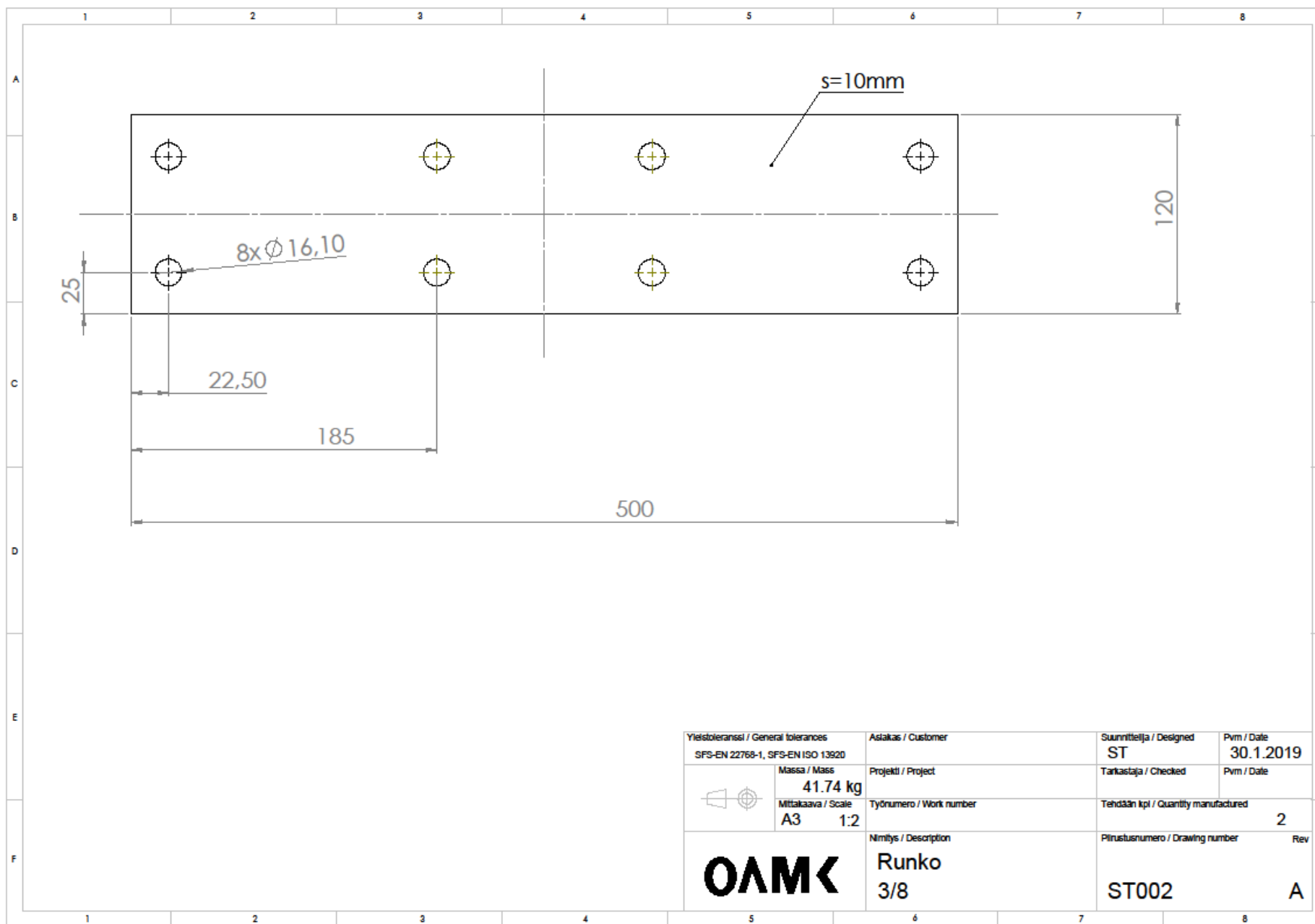
Rev	Muutos / Change	Pvm / Date	Suunnittelija / Designed
1			




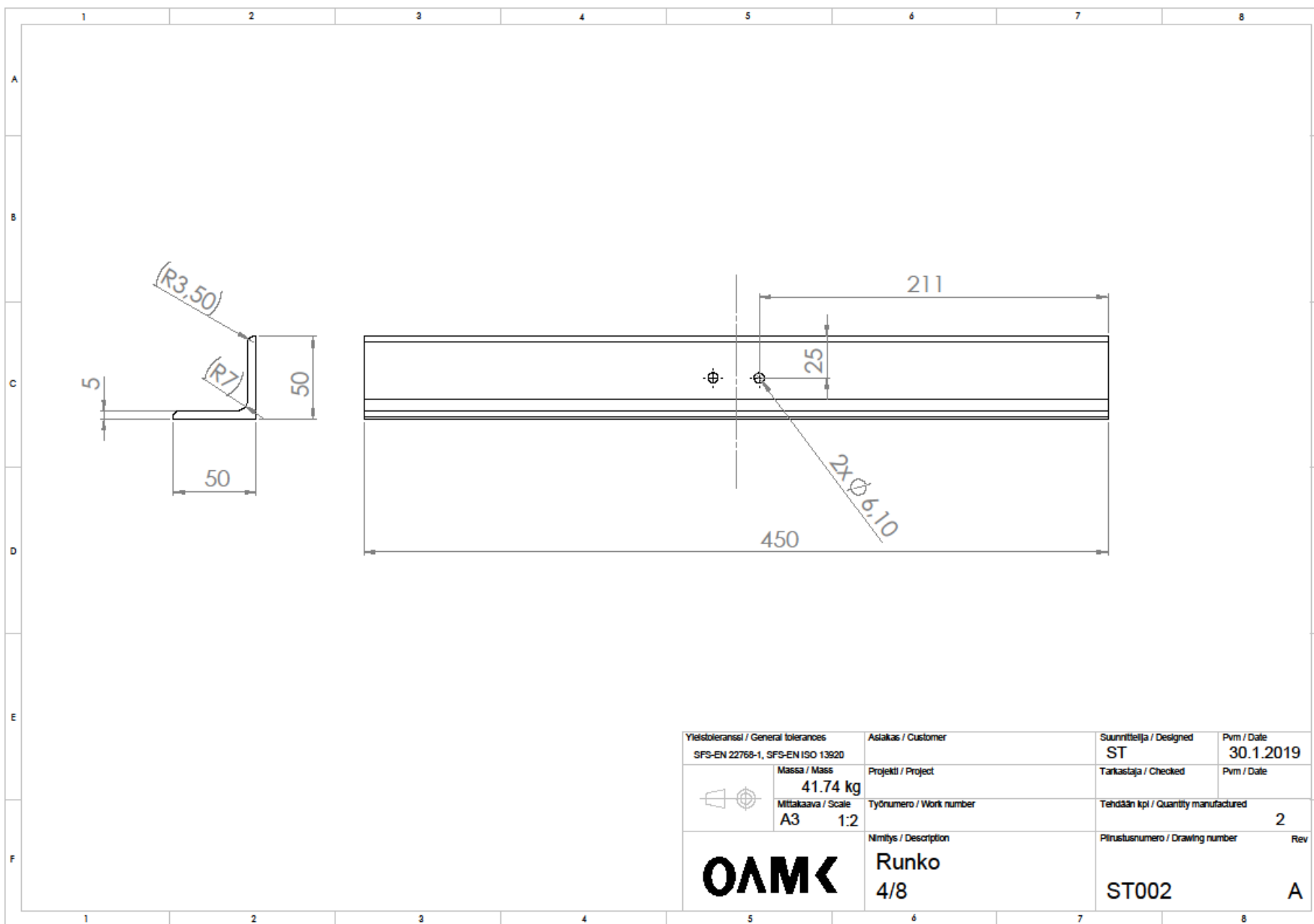





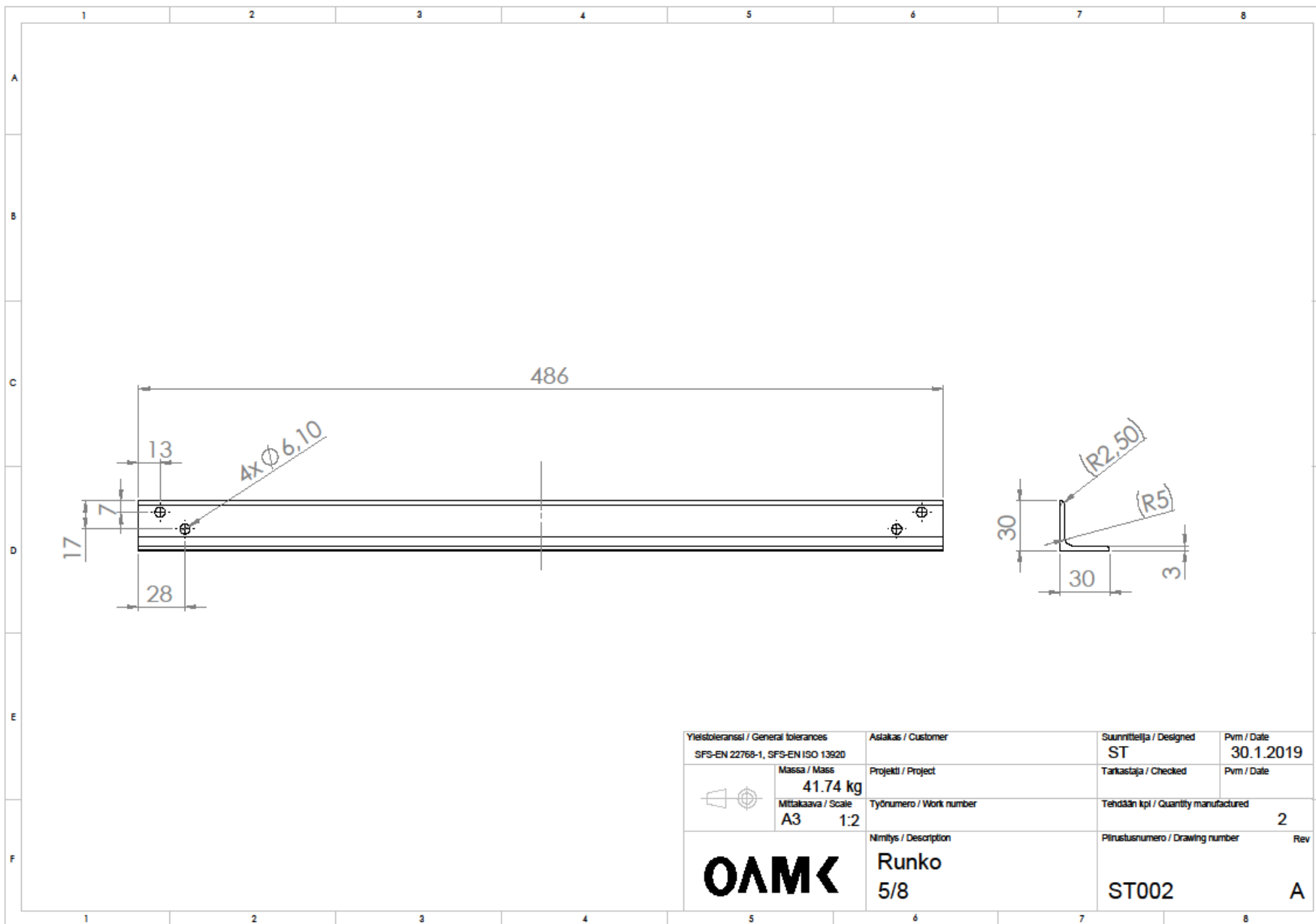


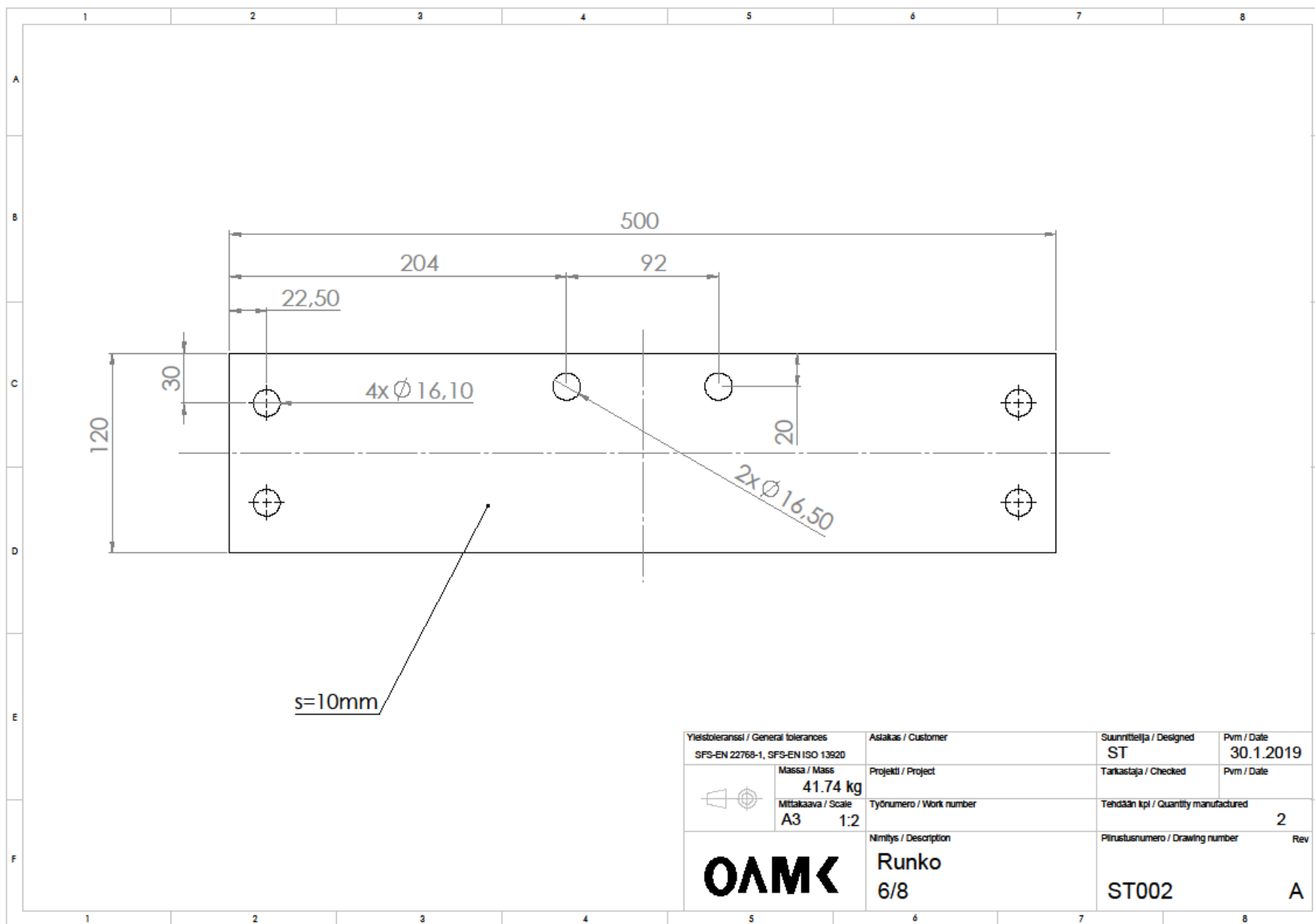


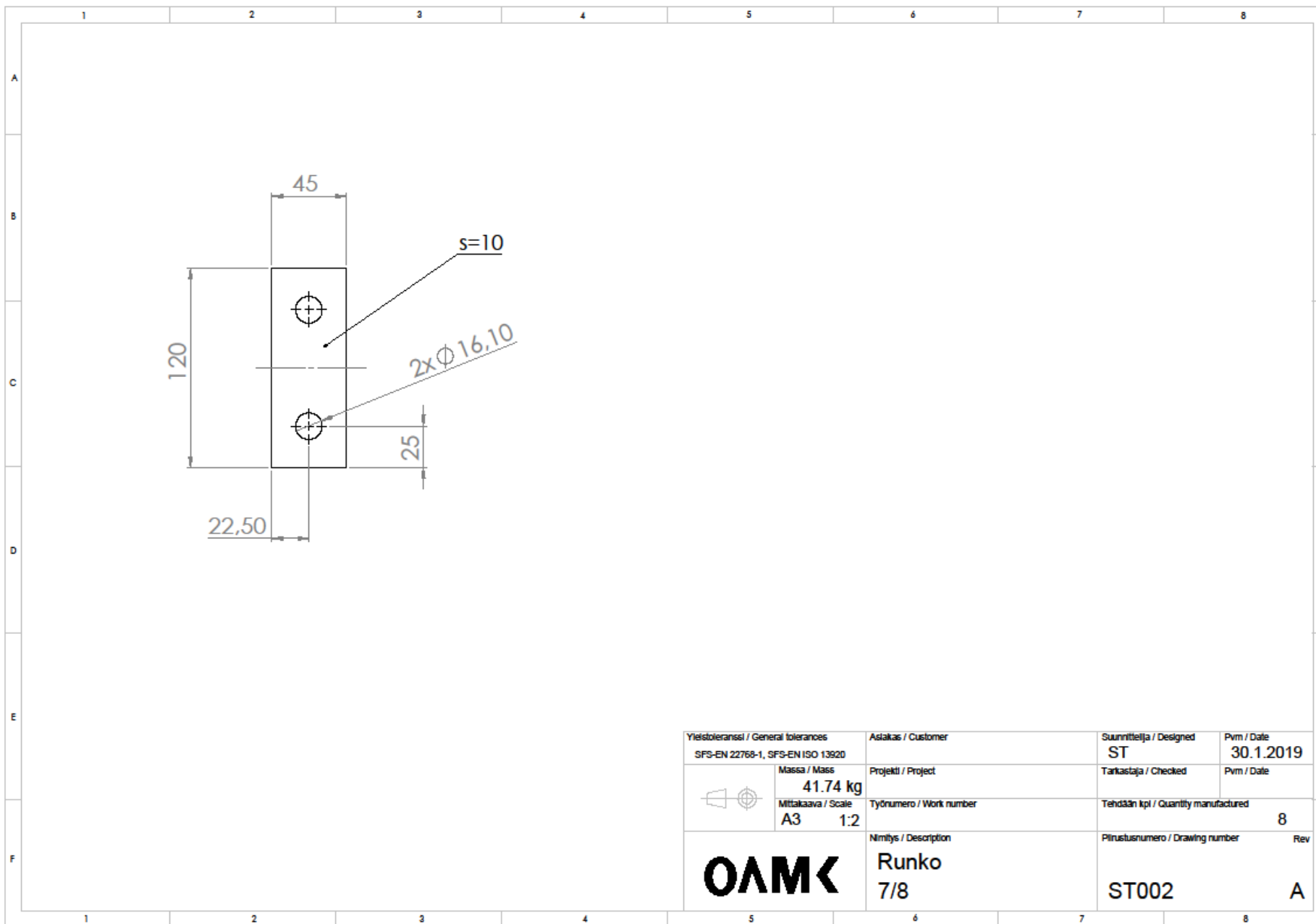
Yleistoleranssi / General tolerances SFS-EN 22768-1, SFS-EN ISO 13920		Asiakas / Customer		Suunnittelija / Designed ST	Pvm / Date 30.1.2019
Massa / Mass 41.74 kg		Projekti / Project		Tarkastaja / Checked	Pvm / Date
Mittakaava / Scale A3 1:2		Työnumero / Work number		Tehdään kpl / Quantity manufactured 2	
		Nimitys / Description Runko 3/8		Piirustusnumero / Drawing number ST002	Rev A

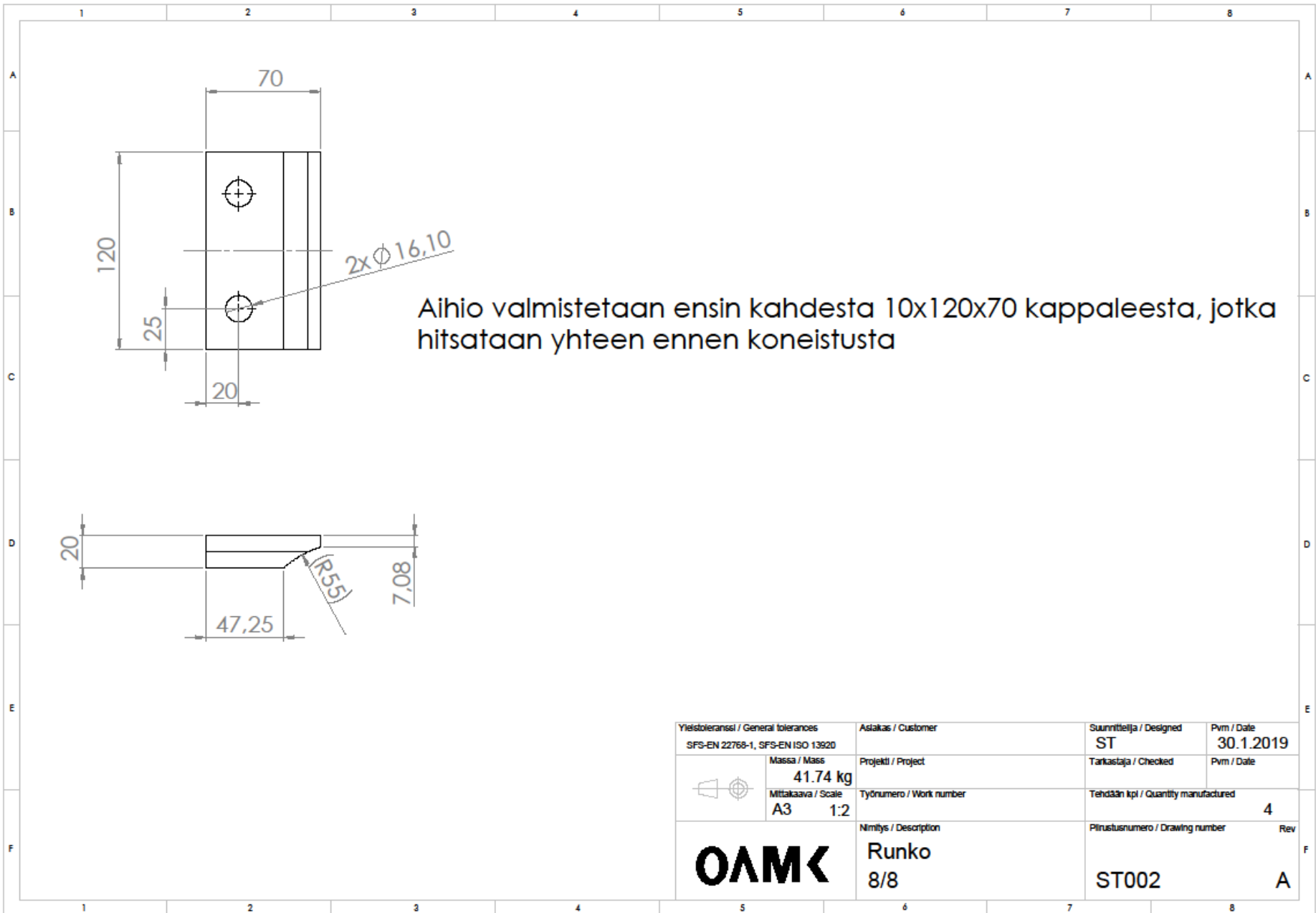


Yleistoleranssi / General tolerances SFS-EN 22768-1, SFS-EN ISO 13920		Asiakas / Customer		Suunnittelija / Designed ST	Pvm / Date 30.1.2019
Massa / Mass 41.74 kg		Projekti / Project		Tarkastaja / Checked	Pvm / Date
Mittakaava / Scale A3 1:2		Työnumero / Work number		Tehdään kpl / Quantity manufactured 2	
		Nimitys / Description Runko 4/8		Pitustusnumero / Drawing number ST002	Rev A

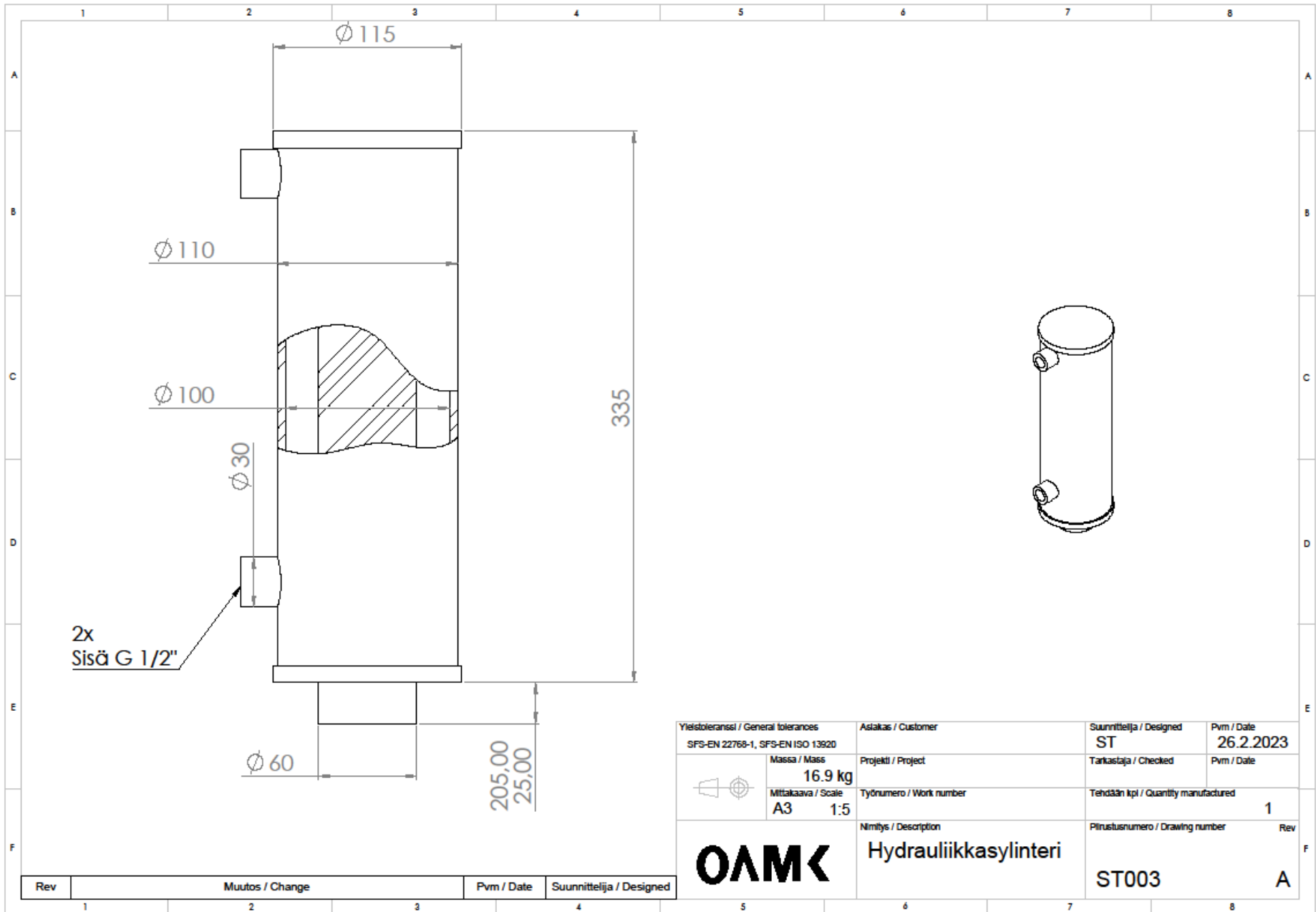


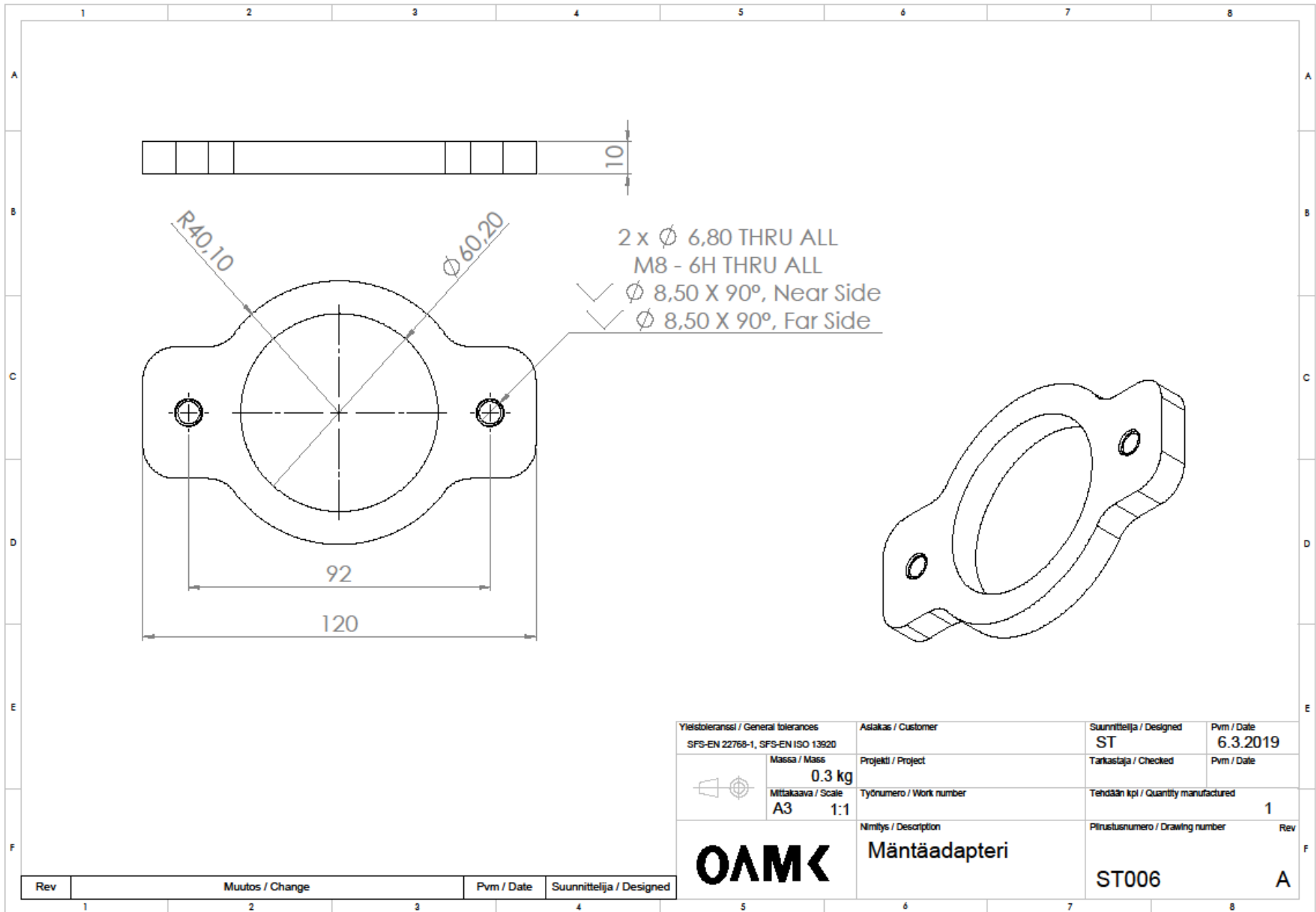


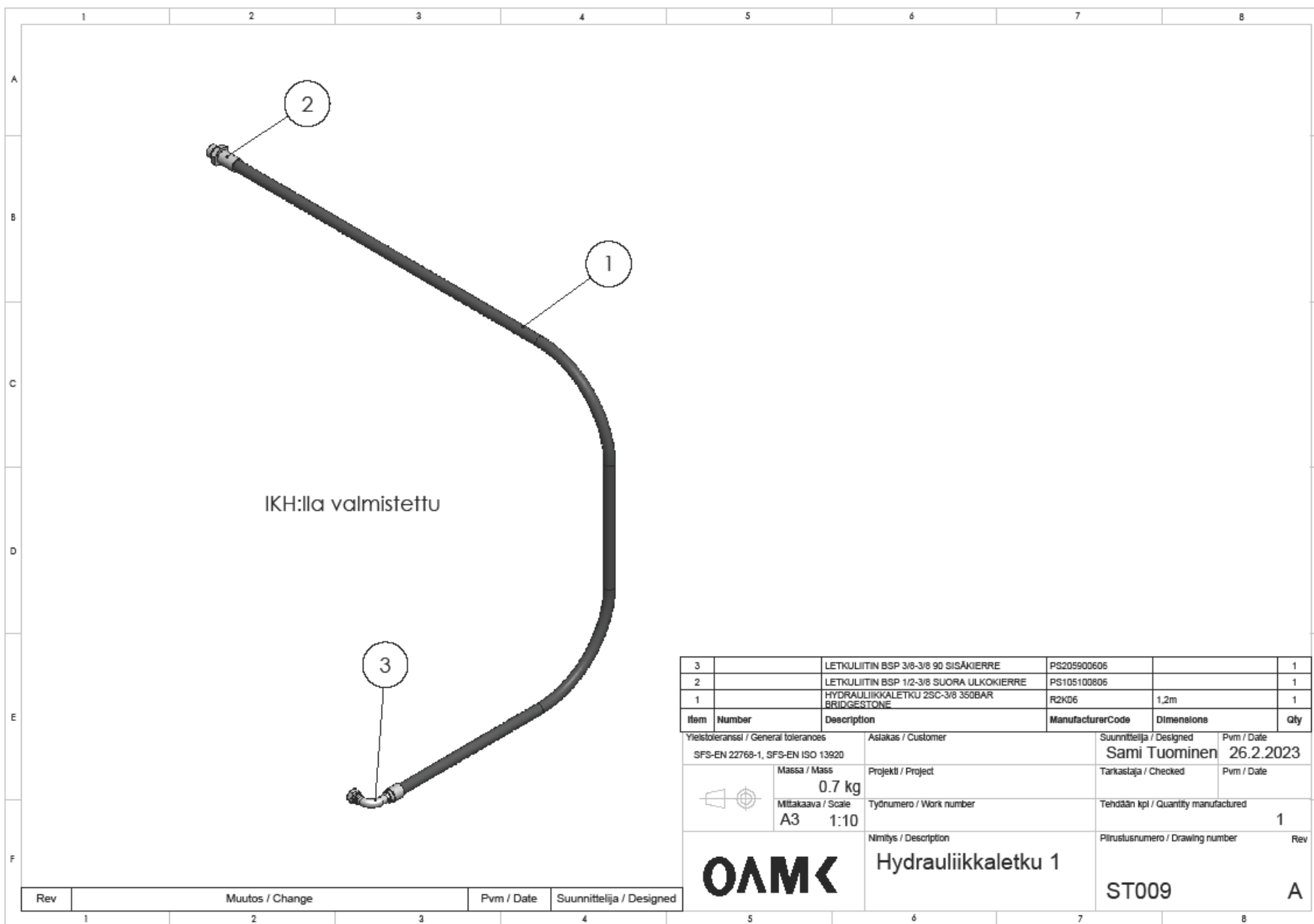


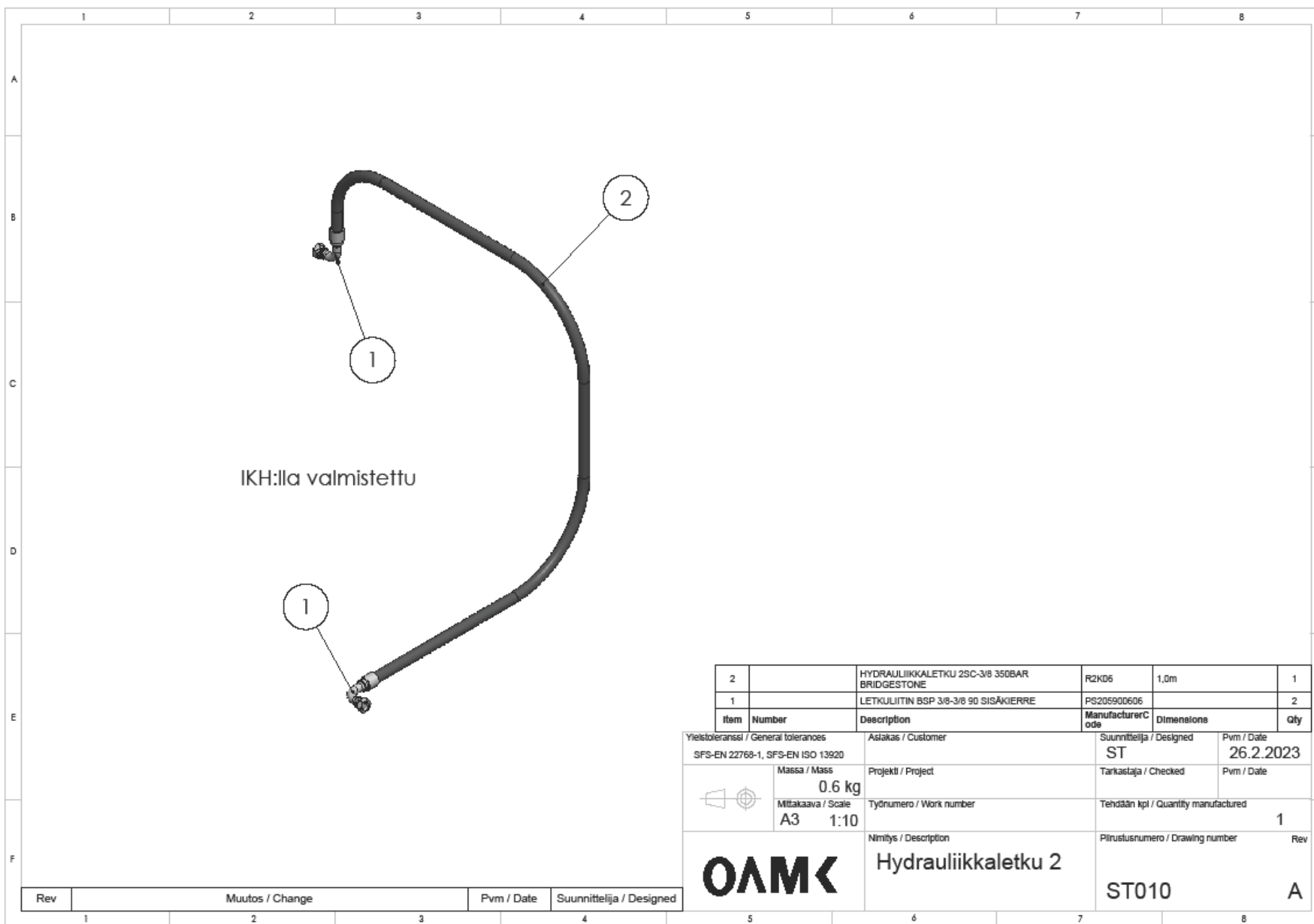


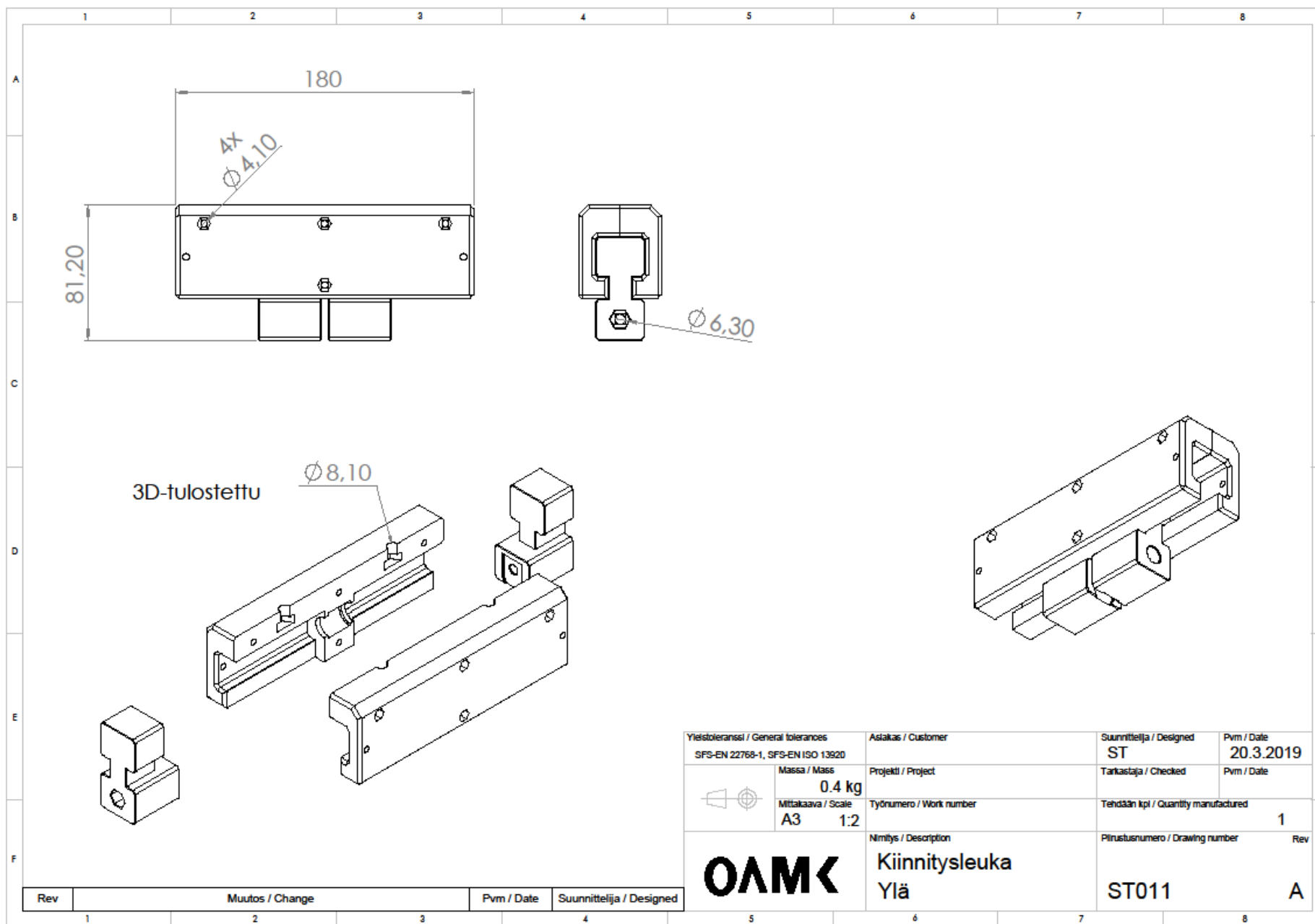
Yleistoleranssi / General tolerances SFS-EN 22768-1, SFS-EN ISO 13920		Asiakas / Customer		Suunnittelija / Designed ST	Pvm / Date 30.1.2019
	Massa / Mass 41.74 kg	Projekti / Project		Tarkastaja / Checked	Pvm / Date
	Mittakaava / Scale A3 1:2	Työnumero / Work number		Tehdään kpl / Quantity manufactured 4	
		Nimitys / Description Runko 8/8		Piirustusnumero / Drawing number ST002	Rev A

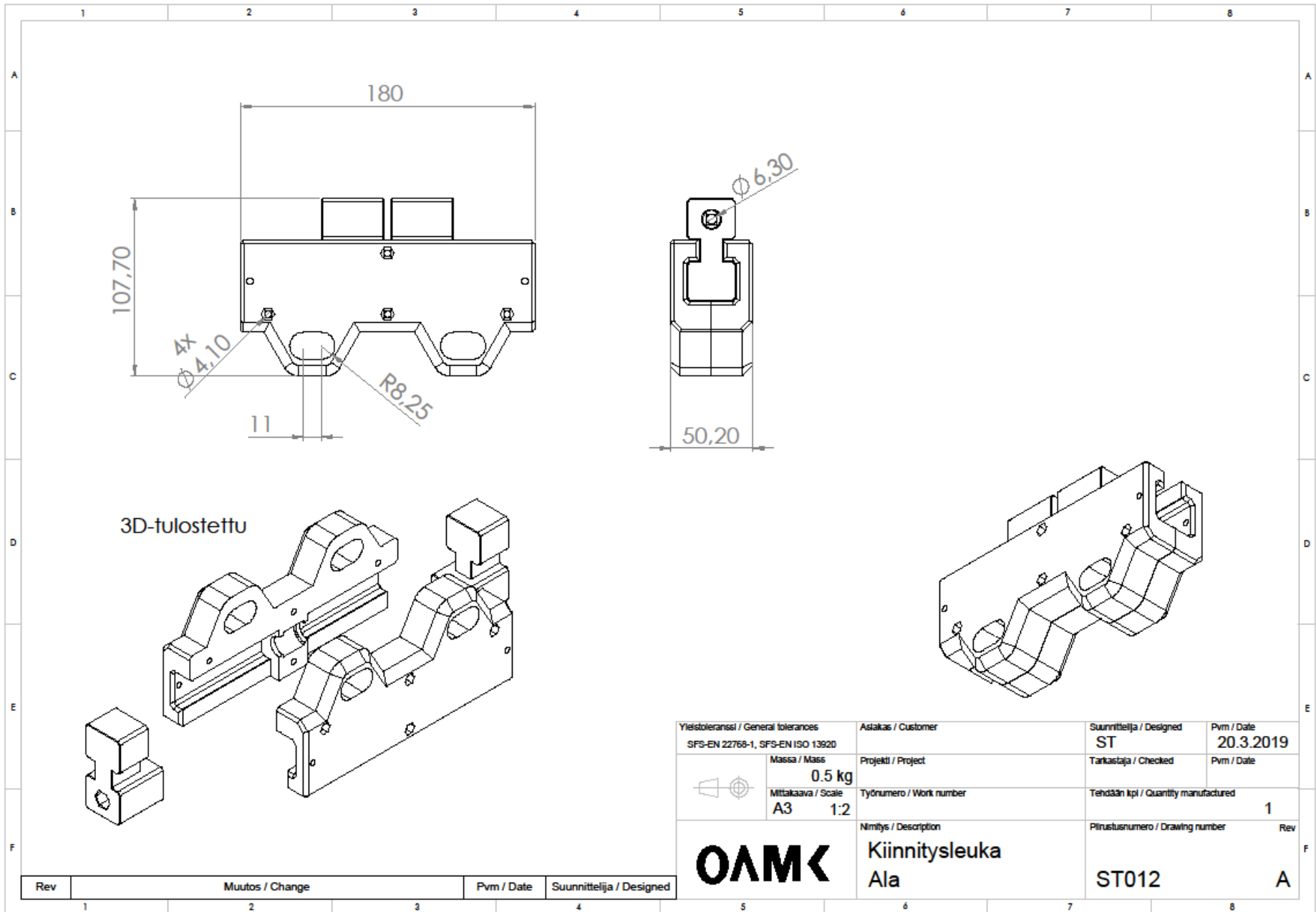












Version: 1.1
Last update: 16-02-2022

**PRUSA
POLYMERS**
by JOSEF PRUSA

Technical datasheet

Prusament PLA by Prusa Polymers



Identification

Trade Name	Prusament PLA/PLA (Blend)
Chemical Name	Polylactic Acid
Usage	FDM/FFF 3D printing
Diameter	1.75 ± 0.02 mm (± 0.03 mm for PLA Blend)
Manufacturer	Prusa Polymers a.s., Prague, Czech Republic

Recommended print settings

Nozzle Temperature [°C]	210 ± 10
Heatbed Temperature [°C]	40–60
Print Speed [mm/s]	up to 200
Cooling Fan Speed [%]	100
Bed Type	smooth PEI sheet; powder coated sheet; satin sheet
Additional Info	The brim is not necessary in general.

Typical material properties

	Typical Value	Method
MFR [g/10 min](1)	9-11	ISO 1133
MVR [cm ³ /10 min](1)	8-10	ISO 1133
Density [g/cm ³]	1.24	ISO 1183
Moisture Absorption in 24 hours [%](2)	0.13	Prusa Polymers
Moisture Absorption in 7 days [%](2)	0.19	Prusa Polymers
Heat Deflection Temperature (0.45 MPa) [°C]	55	ISO 75
Heat Deflection Temperature (1.80 MPa) [°C]	55	ISO 75
Tensile Yield Strength for Filament [MPa]	57 ± 1	ISO 527
Hardness - Shore D	81	Prusa Polymers
Interlayer Adhesion [MPa]	17 ± 3	Prusa Polymers

(1) 2.16 kg; 210 °C

(2) 24 °C; humidity 22 %

Mechanical properties of 3D printed testing specimens(3)

Property\Print Direction	Horizontal	Vertical xz	Method
Tensile Yield Strength [MPa]	51 ± 3	59 ± 2	ISO 527-1
Tensile Modulus [GPa]	2.3 ± 0.1	2.4 ± 0.1	ISO 527-1
Elongation at Yield Point [%]	2.9 ± 0.3	3.2 ± 1.0	ISO 527-1
Flexural Strength [MPa]	83 ± 6	99 ± 1	ISO 178
Flexural Modulus [GPa]	3.1 ± 0.1	3.2 ± 0.1	ISO 178
Deflection at Flexural Strength [mm]	7.4 ± 0.2	8.3 ± 0.2	ISO 178
Impact Strength Charpy [kJ/m ²](4)	13 ± 1	14 ± 1	ISO 179-1
Impact Strength Charpy Notched [kJ/m ²]	not applicable	not applicable	ISO 179-1

Version: 1.1
Last update: 16-02-2022

PRUSA
POLYMERS
by JOSEF PRUSA

Technical datasheet

Prusament PETG by Prusa Polymers



Identification

Trade Name	Prusament PETG
Chemical Name	Polyethylene Terephthalate Glycol Copolymer
Usage	FDM/FFF 3D printing
Diameter	1.75 ± 0.02 mm
Manufacturer	Prusa Polymers a.s., Prague, Czech Republic

Recommended print settings

Nozzle Temperature [°C]	250 ± 10
Heatbed Temperature [°C]	80 ± 10
Print Speed [mm/s]	up to 200
Cooling Fan Speed [%]	50
Bed Type	satin sheet; powder coated sheet; smooth PEI sheet*
Additional Info	The brim is not necessary in general.

*) with a glue stick



Typical material properties

	Typical Value	Method
MFR [g/10 min]	not applicable	ISO 1133
MVR [cm ³ /10 min]	not applicable	ISO 1133
Density [g/cm ³]	1.27	ISO 1183
Moisture Absorption in 24 hours [%](1)	0.07	Prusa Polymers
Moisture Absorption in 7 days [%](1)	0.10	Prusa Polymers
Heat Deflection Temperature (0.45 MPa) [°C]	68	ISO 75
Heat Deflection Temperature (1.80 MPa) [°C]	68	ISO 75
Tensile Yield Strength for Filament [MPa]	46 ± 1	ISO 527
Hardness - Shore D	74	Prusa Polymers
Interlayer Adhesion [MPa]	18 ± 4	Prusa Polymers

(1) 24 °C; humidity 22 %

Mechanical properties of 3D printed testing specimens(2)

Property\Print Direction	Horizontal	Vertical xz	Method
Tensile Yield Strength [MPa]	47 ± 2	50 ± 1	ISO 527-1
Tensile Modulus [GPa]	1.5 ± 0.1	1.6 ± 0.1	ISO 527-1
Elongation at Yield Point [%]	5.1 ± 0.1	5.1 ± 0.1	ISO 527-1
Flexural Strength [MPa]	66 ± 2	70 ± 1	ISO 178
Flexural Modulus [GPa]	1.7 ± 0.1	1.6 ± 0.1	ISO 178
Deflection at Flexural Strength [mm]	9.0 ± 0.1	9.3 ± 0.2	ISO 178
Impact Strength Charpy [kJ/m ²](3)	no break	no break	ISO 179-1
Impact Strength Charpy Notched [kJ/m ²](4)	6 ± 1	3 ± 1	ISO 179-1

Version: 1.1
Last update: 16-02-2022

PRUSA
POLYMERS
by JOSEF PRUSA

Technical datasheet

Prusament ASA by Prusa Polymers



Identification

Trade Name	Prusament ASA
Chemical Name	Acrylonitrile Styrene Acrylate
Usage	FDM/FFF 3D printing
Diameter	1.75 ± 0.03 mm
Manufacturer	Prusa Polymers a.s., Prague, Czech Republic

Recommended print settings

Nozzle Temperature [°C]	260 ± 10
Heatbed Temperature [°C]	110 ± 5
Print Speed [mm/s]	up to 200
Cooling Fan Speed [%]	30 (0-50*)
Bed Type	satın sheet; smooth PEI sheet; powder coated sheet**
Additional Info	Skirt height sets up to the height of printed parts. A 3 mm brim (or taller) can improve the adhesion of edges and corners of larger objects to the print sheet.

* Depends on geometry of printed objects. To improve overhangs and bridges, set 30 % or higher cooling in PrusaSlicer. For larger prints without bridges, cooling turned off may bring better results.

** with a glue stick

Typical material properties

	Typical Value	Method
MFR [g/10 min](1)	20-24	ISO 1133
MVR [cm ³ /10 min](1)	19-23	ISO 1133
Density [g/cm ³]	1.07	ISO 1183
Moisture Absorption in 24 hours [%](2)	0.16	Prusa Polymers
Moisture Absorption in 7 days [%](2)	0.17	Prusa Polymers
Heat Deflection Temperature (0.45 MPa) [°C]	93	ISO 75
Heat Deflection Temperature (1.80 MPa) [°C]	86	ISO 75
Tensile Yield Strength for Filament [MPa]	40 ± 1	ISO 527
Hardness - Shore D	78	Prusa Polymers
Interlayer Adhesion [MPa]	11 ± 1	Prusa Polymers

(1) 10 kg; 220 °C

(2) 24 °C; humidity 22 %

Mechanical properties of 3D printed testing specimens(3)

Property\Print Direction	Horizontal	Vertical xz	Method
Tensile Yield Strength [MPa]	42 ± 1	45 ± 2	ISO 527-1
Tensile Modulus [GPa]	1.6 ± 0.1	1.7 ± 0.1	ISO 527-1
Elongation at Yield Point [%]	3.4 ± 0.2	3.8 ± 0.2	ISO 527-1
Flexural Strength [MPa]	64 ± 1	69 ± 1	ISO 178
Flexural Modulus [GPa]	2.0 ± 0.1	1.9 ± 0.1	ISO 178
Deflection at Flexural Strength [mm]	9.0 ± 0.1	9.0 ± 1.0	ISO 178
Impact Strength Charpy [kJ/m ²](4)	25 ± 3	38 ± 11	ISO 179-1
Impact Strength Charpy Notched [kJ/m ²](5)	12 ± 1	15 ± 3	ISO 179-1

