HONDA CB350S MOOTTORIPYÖRÄN SÄHKÖISTÄMINEN:

MOOTTORIKIINNITYKSEN SUUNNITTELU

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2025

Oskari Ruutu

Tarkastaja: DI Alex Rosu

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Oskari Ruutu

Honda CB350S moottoripyörän sähköistäminen: moottorikiinnityksen suunnittelu

Konetekniikan kandidaatintyö

2025

50 sivua, 17 kuvaa, 8 taulukkoa ja 22 liitettä

Tarkastaja: DI Alex Rosu

Avainsanat: Moottoripyörä, sähkömoottori, moottorikiinnitys, VDI 2221

Tieliikenne sähköistyy nopeaa tahtia ja polttomoottorikäyttöisistä ajoneuvoista pyritään eroon ilmasto- ja ympäristöhuolien takia. Tästä syystä tässä kandidaatintyössä tutkitaan vanhan polttomoottorikäyttöisen moottoripyörän (Honda CB350S) muuttamista sähkökäyttöiseksi. Tämän aihepiirin sisällä työssä rajaudutaan tarkastelemaan sähkömoottorin runkokiinnitystä. Moottorikiinnitys suunnitellaan VDI 2221-suunnitteluprosessia hyödyntäen. Moottorikiinnityksen prototyyppi valmistetaan 3D-tulostamalla.

Tämän työn keskeisin tutkimusmenetelmä on VDI 2221-suunnitteluprosessi. Tämän lisäksi suunnittelussa huomioidaan DFMA- (Design for Manufacturing and Assembly) näkökulmia. Suunnitteluprosessin myötä syntyneen kiinnitysrakenteen lujuusominaisuuksia arvioidaan lujuusopin elementtimenetelmällä (FEM, Finite Element Method). Lopullinen kiinnitysrakenne syntyy elementtimenetelmän tuloksiin pohjautuvien, rakenteen optimointiin tähtäävien muutoksien myötä.

Työn keskeisin tulos on suunnittelun tuloksena syntynyt moottorikiinnitysratkaisu. Tätä ratkaisua ei keretä valmistamaan tämän työn aikana, mutta kaikki valmistukseen vaadittava dokumentaatio syntyy tämän työn tuloksena. Moottorikiinnitysratkaisu valmistetaan tämän työn julkaisun jälkeen.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Oskari Ruutu

Electrification of a Honda CB350S Motorcycle: Design of the Motor Mount

Bachelor's thesis

2025

50 pages, 17 figures, 8 tables and 22 appendices

Examiners: M.Sc. (Tech.) Alex Rosu

Keywords: Motorcycle, electric motor, motor mounting, VDI 2221

Road traffic is rapidly transitioning to electric power, and there is an effort to move away from combustion engine vehicles due to climate and environmental concerns. For this reason, this bachelor's thesis examines the conversion of an old internal combustion engine motorcycle (Honda CB350S) into an electric motorcycle. Within this broader topic, the study is limited to the design of the electric motor's frame mounting system. The motor mount is designed using the VDI 2221 design process. A prototype of the motor mounting system is produced by 3D printing.

The primary research method used in this thesis is the VDI 2221 design process. In addition, principles of Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) are incorporated in the design of the motor mount. The structural integrity of the resulting motor mount is assessed using Finite Element Method (FEM). The final design is refined through modifications aimed at structural optimization based on FEM analysis.

The primary result of this thesis is the motor mounting solution produced through the design process. Although the solution is not manufactured within the scope of this thesis, all the documentation required for production is produced. The motor mount will be manufactured after the publication of this thesis.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

E	kimmokerroin	Pa
ε	venymä	-
σ	jännitys	Pa

Lyhenteet

DFMA	Valmistus- ja kokoonpanoystävällinen suunnittelu (Design for Manufacturing and Assembly)
FEA	Elementtimenetelmään perustuva analyysi (Finite Element Analysis)
FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)
JHC	Prototyyppipaja LUT-yliopiston Lappeenrannan kampuksella (J. Hyneman Center)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto 8
1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoite 8
1.2 Tutkimusongelma ja -kysymykset 9
1.3 Tutkimusmenetelmä ja työn rajaus 10
1.4 JHC toimintaympäristönä 10
1.5 Kirjallisuuskatsaus 11
2 Metodit 13
2.1 Systemaattisen koneensuunnittelun standardi VDI 2221 13
2.1.1 Tehtävän määritys 14
2.1.2 Luonnosteluvaihe 14
2.1.3 Kehittelyvaihe 15
2.1.4 Viimeistelyvaihe 15
2.2 Systemaattinen materiaalin valintaprosessi 15
2.3 DFMA 16
2.4 Elementtimenetelmä (FEM, Finite Element Method) 17
2.5 Väliyhteenveto 19
3 Suunnitteluprosessin kulku ja tulokset 20
3.1 Tehtävän määritys 20
3.1.1 Vaatimuslista 20
3.2 Luonnostelu 22
3.2.1 Toimintorakennepuu 22
3.2.2 Ideamatriisi 23
3.2.3 Arviointimatriisi 26
3.3 Kehittely 30
3.3.1 Virtuaalimalli 30
3.3.2 Materiaalivalinta 32

3.3.3 FE-simulaatio ja lujuusoptimointi 34
3.3.4 Lopullinen 3D-virtuaalimalli 37
3.4 Viimeistely 39
3.4.1 Valmistustekniset suunnitelmat 39
3.4.2 Alustava kustannusarvio 41
3.5 3D-tulostettu prototyyppi 41
4 Tulosten pohdinta ja johtopäätökset 44
4.1 Tulosten tarkastelu 44
4.1.1 Miten työ vastaa tutkimuskysymyksiin? 44
4.2 Jatkokehityskohteet 45
4.3 Luotettavuuden arviointi 45
4.4 Tulosten yleistettävyys ja hyödynnettävyys 46
5 Yhteenveto 48
Lähteet 49

Liitteet

Liite 1. Moottorikiinnityksen kantavan rakenteen kokoonpanopiirustus

Liite 2. Etukiinnikkeen kokoonpanopiirustus

Liite 3. Etukiinnikkeen osan 1 valmistuspiirustus

Liite 4. Etukiinnikkeen osan 2 valmistuspiirustus

Liite 5. Etukiinnikkeen osan 3 valmistuspiirustus

Liite 6. Etukiinnikkeen osan 4 valmistuspiirustus

Liite 7. Etukiinnikkeen osan 5 valmistuspiirustus

Liite 8. Etukiinnikkeen osan 6 valmistuspiirustus

Liite 9. Takakiinnikkeen kokoonpanopiirustus

Liite 10. Takakiinnikkeen osan 1 valmistuspiirustus

Liite 11. Takakiinnikkeen osan 2 valmistuspiirustus

Liite 12. Takakiinnikkeen osan 3 valmistuspiirustus

Liite 13. Takakiinnikkeen osan 4 valmistuspiirustus

Liite 14. Takakiinnikkeen osan 5 valmistuspiirustus

Liite 15. Takakiinnikkeen osan 6 valmistuspiirustus

Liite 16. Takakiinnikkeen osan 7 valmistuspiirustus

Liite 17. Moottorikiinnityksen välivahvistuksien valmistuspiirustus

Liite 18. Ketjunsuojan kokoonpanopiirustus

Liite 19. Ketjunsuojan osan 1 valmistuspiirustus

Liite 20. Ketjunsuojan osan 2 valmistuspiirustus

Liite 21. Ketjunsuojan osan 3 valmistuspiirustus

Liite 22. Tärinänvaimentimien valmistuspiirustus

1 Johdanto

Kasvihuonepäästöjä pyritään aktiivisesti vähentämään ilmasto- ja ympäristöhuolien takia. Yksi osa tätä pyrkimystä on tieliikenteen sähköistyminen. Polttomoottorikäyttöisistä ajoneuvoista pyritään eroon ja tieliikenne sähköistyykin nopeaa tahtia. Liikenteen sähköistyminen on positiivinen kehityssuunta, vaikkakin sähköajoneuvoilla on omat ympäristöhaasteensa.

Tässä kandidaatintyössä pyritään muuttamaan vanha polttomoottorikäyttöinen moottoripyörä sähkökäyttöiseksi. Sähkökäyttöisiä moottoripyöriä on tällä hetkellä teollisessa tuotannossa, ja nämä ovat yleisesti kuluttajille saatavilla. Itse sähkökäyttöisen moottoripyörän suunnitteleminen ja valmistaminen ei siis ole uusi asia. Tässä tutkimuksessa haasteellista onkin toimivan kokonaisuuden toteuttaminen vanhan moottoripyörän komponenteilla, joita ei ole alun perin suunniteltu sähkökäyttöiselle moottoripyörälle.

Työn johdannossa taustoitetaan tutkimusta ja otetaan selvää työn suunnittelua ohjaavasta, tieliikennekelpoisia moottoripyöriä koskevasta lainsäädännöstä. Työn toisessa kappaleessa esitellään työssä käytettävä metodiikka. Työn tulokset esitellään kolmannessa kappaleessa. Keskeisimmät tulokset löytyvät kappaleista 3.3.4 sekä 3.5. Neljännessä kappaleessa tarkastellaan saatuja tuloksia. Tutkimuksen yhteenveto löytyy viidennestä kappaleesta.

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoite

Tämän kandidaatintutkielman teettäjä on JHC (J. Hyneman Center). Työn teettäjä aikoo muuttaa vanhan, alkuperäisesti polttomoottorikäyttöisen moottoripyörän voimalinjan sähkökäyttöiseksi. Moottoripyörä on tarkoitus saada valmistuessaan tieliikennekelpoiseksi.

Alkuperäinen moottoripyörä on Honda CB350S (Kuva 1). Työn teettäjällä on kaikki alkuperäisen moottoripyörän kokoamiseen tarvittavat komponentit. Työn teettäjällä on myös voimalinjan sähköistämiseen tarvittavat komponentit: sähkömoottori, moottorin ohjausyksikkö sekä akusto.

Kuva 1. Alkuperäinen moottoripyörä: Honda CB350S (JHC 2018).

Moottoripyörän voimalinjan sähköistäminen kokonaisuudessaan on laaja projekti, etenkin kandidaatintyön puitteissa. Tästä syystä tässä työssä rajaudutaan tarkastelemaan sähkömoottorin kiinnitystä. Tämän työn tavoite on suunnitella toimiva sähkömoottorin runkokiinnitys, jossa on otettu kaikki tutkimusongelmassa kuvatut seikat sekä rajoitteet huomioon.

1.2 Tutkimusongelma ja -kysymykset

Sähkömoottorin kiinnityksen optimaalisin tapa ei ole tiedossa. Moottori täytyy sijoittaa siten, että moottorin voimanvälitysratas on samassa linjassa takarenkaan rattaan kanssa. Näiden kahden rattaan välisen voimanvälitysketjun täytyy pystyä pyörimään vapaasti. Moottorin sijoittelussa täytyy huomioida myös muut sähköisen voimalinjan komponentit. Näiden komponenttien, ohjausyksikön sekä akuston, täytyy mahtua runkoon sähkömoottorin lisäksi. Kaikkien kolmen komponentin massa sekä painopiste täytyy myös huomioida toimivan kokonaisuuden saavuttamiseksi.

Kolme edellä mainittua voimalinjan komponenttia yhdistyvät sähköjohtimilla. Sähköjohtimen resistanssi on suoraan verrannollinen johtimen pituuteen (Seppänen, Mannila, Kervinen, Parkkila, Konttinen, Karkela &Yli-Kokko 2013, s. 131). Näin ollen komponenttien

sijoittelussa täytyy ottaa huomioon myös komponenttien välimatka, jotta pitkien johtimien aiheuttamilta tehohäviöiltä vältytään.

Moottorin kiinnitysratkaisun täytyy olla purettavissa komponenttien huoltamisen mahdollistamiseksi. Tämän lisäksi moottorin sijoittelussa täytyy huomioida käyttäjän turvallisuus. Pyörivät rattaat ja ketju täytyy suojata siten, että ne eivät aiheuta vaaraa moottoripyörän käyttäjälle. Sähkömoottorin kiinnitykselle täytyy siis löytää ratkaisu, jossa kaikki edellä mainitut näkökulmat on huomioitu. Tämän tutkimuksen keskeisimmät tutkimuskysymykset ovat:

-Miten sähkömoottori tulisi kiinnittää runkoon toimivan kokonaisuuden saavuttamiseksi?

-Miksi sähkömoottorin kiinnitys kannattaa suunnitella VDI 2221-suunnitteluprosessia hyödyntäen?

1.3 Tutkimusmenetelmä ja työn rajaus

Tämän tutkimuksen pääasiallinen tutkimusmenetelmä on VDI 2221-suunnitteluprosessi. Sähkömoottorin kiinnitys suunnitellaan tätä prosessia noudattaen. Tämän lisäksi suunnittelussa huomioidaan DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) -näkökulma. Tutkimuksen myötä syntyvän moottorin kiinnitysrakenteen lujuusominaisuuksia arvioidaan lujuusopin elementtimenetelmällä (FEM, Finite Element Method).

Sähköisen voimalinjan muiden komponenttien, akuston ja ohjausyksikön, sijainti on otettava huomioon sähkömoottorin kiinnitystä laatiessa. Akuston ja ohjausyksikön täytyy mahtua runkoon, ja näillekin täytyy jäädä kiinnitysmahdollisuus moottoripyörän runkoon. Tätä syvemmin muihin komponentteihin ja näiden kiinnitykseen ei perehdytä. Työssä ei myöskään aikataulusyistä päästä kokeilemaan ja havainnoimaan lopullista valmistettua sähkömoottorin kiinnitystä tai sähkömoottoripyörää kokonaisuudessaan.

1.4 JHC toimintaympäristönä

JHC (J. Hyneman Center) on LUT-yliopistolla sijaitseva prototyyppipaja. JHC on tarkoitettu sekä LUT-yliopiston että LAB-ammattikorkeakoulun opiskelijoiden ja opettajien käyttöön.

(LUT University 2025.) JHC on tämän työn teettäjä, eli JHC tulee valmistamaan sekä kustantamaan tässä työssä suunnitellut komponentit.

1.5 Kirjallisuuskatsaus

Moottoripyörän voimalinjan sähköistämisestä ei ole helposti löydettävissä tieteellistä tutkimusta. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että tämän kaltaiset projektit ovat luonteeltaan tapauskohtaisia ja harvinaisia. Tietoa uuden sähkömoottoripyörän suunnittelusta on varmasti olemassa, mutta tämä tieto on lähtökohtaisesti yksityisten yritysten tutkimus- ja kehitystoiminnan tuotosta, ja näin ollen kerätty tieto lukeutuu liikesalaisuuksiin. Tämän työn kirjallisuuskatsauksessa keskitytään suunnittelua ohjaaviin standardeihin ja määräyksiin.

Moottoripyörä on tarkoitus saada tieliikennekelpoiseksi. Suunnittelua ohjaa siis tieliikennekelpoisia moottoripyöriä koskevat määräykset. Polttomoottorikäyttöisen moottoripyörän saa muuttaa joko osittain tai kokonaan sähkökäyttöiseksi (Traficom 2021, s. 11). Tähän on tosin tiettyjä ehtoja. Moottoripyörä tulee esittää muutoskatsastukseen ennen tieliikennekäyttöä, mikäli tämän rakennetta tai käyttötarkoitusta on muutettu siten, että tällä muutoksella on olennainen vaikutus moottoripyörän rekisteriin merkittäviin tietoihin. (Traficom 2021, s. 2.) Tämän työn moottoripyörä täytyy siis hyväksyttää muutoskatsastuksessa ennen tieliikennekäyttöä.

Moottoripyörän runkoon saa tehdä liitoksia hitsaamalla kuormaa kantamattomille osille, kuten kateosille, kunhan hitsiliitokset eivät heikennä kuormaa kantavia osia merkittävästi. Moottoripyörän muutoskatsastuksessa tällaisista hitsiliitoksista täytyy esittää selvitys, jossa on eritelty rungon alkuperäinen- ja runkoon lisätty materiaali, käytetyt hitsausmenetelmät sekä -hitsauslisäaineet. (Traficom 2021, s. 8.) Kuormaa kantaville osille ei siis voi tehdä itse runkoliitoskohtia hitsaamalla. Näin ollen moottorikiinnitys täytyy suunnitella siten, että moottori kiinnittyy rungon alkuperäisiin kiinnityskohtiin.

Myös moottoripyörän massaan liittyy rajoitteita. Alkuperäisen moottoripyörän suurimman sallitun massan saa ylittää tietyin ehdoin, kun moottoripyörään tehdään rakennemuutoksia. Suurimman sallitun massan saa ylittää ainoastaan alkuperäisen moottoripyörän valmistajan selvityksen perusteella. Tällöin moottoripyörä täytyy muuttaa vastaamaan teknisesti kyseisellä massalla hyväksyttyä ajoneuvotyyppiä. Sähkömoottoripyörän tapauksessa

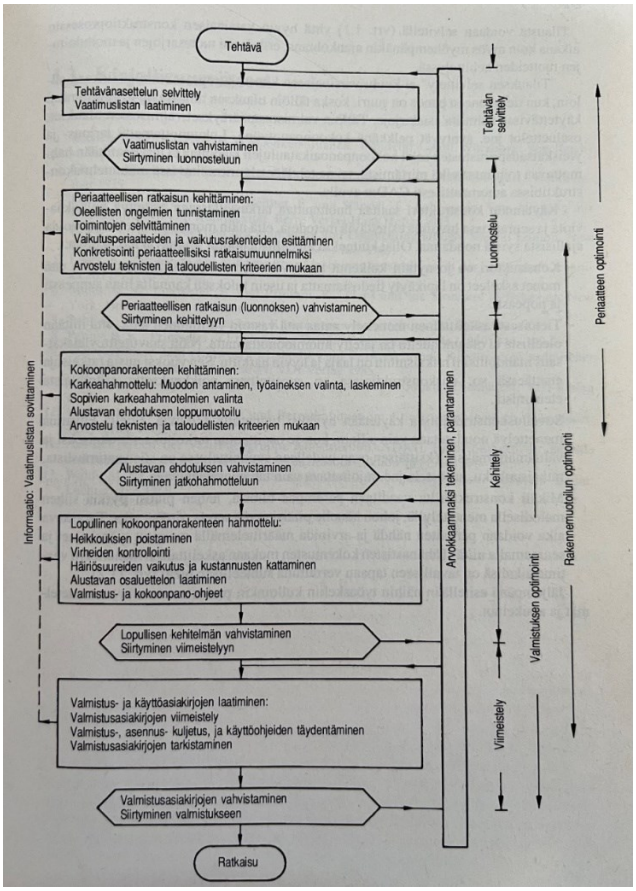
käyttövoima-akun massaa ei huomioida ajoneuvon laskennallisessa massassa. (Traficom 2021, s. 7–8.) Tässä työssä sähkömoottoripyörän massa pyritään pitämään alkuperäistä suurinta sallittua massaa pienempänä.

2 Metodit

Tässä kappaleessa käydään läpi työssä käytettävät metodit. Suunnitteluprosessi toteutetaan noudattaen VDI 2221-prosessia. Suunnittelussa huomioidaan myös DFMA-näkökulmia. Rakenteen materiaali valitaan systemaattisella materiaalin valintaprosessilla. Rakenteen lopullinen kestävyys arvioidaan elementtimenetelmällä.

2.1 Systemaattisen koneensuunnittelun standardi VDI 2221

VDI 2221 on systemaattisen koneensuunnittelun standardi. Tämä standardi helpottaa johdonmukaisen ja tehokkaan suunnitteluprosessin läpivientiä. VDI 2221-prosessin kulku on esitetty kuvassa 2. (Pahl ja Beitz 1990, s. 47–48.)



Kuva 2. VDI 2221-prosessin kulku (Pahl ja Beitz 1990, s. 51).

Kyseinen standardi pilkkoo suunnitteluprosessin kulun seitsemään perustavanlaatuiseen työvaiheeseen. Nämä seitsemän työvaihetta voidaan kategorisoida neljään yläluokkaan, jolloin päästään käsiksi VDI 2221-prosessin neljään päävaiheeseen: tehtävän määritys, luonnostelu, kehittely ja viimeistely. (Pahl ja Beitz 1990, s. 47–48.)

2.1.1 Tehtävän määritys

Tehtävän määritys on prosessin ensimmäinen vaihe. Tässä vaiheessa keskeisin tavoite on kerätä tarvittavaa tietoa suunnitteluprosessin aloittamiseksi. On tärkeää tietää, mitä suunniteltavalta ratkaisulta tarkalleen vaaditaan. Tämän työvaiheen lopputuotteena syntyykin vaatimuslista, jossa on lueteltu kaikki ratkaisulta vaaditut toiminnot ja piirteet. Vaatimuslista täytyy pitää ajan tasalla koko suunnitteluprosessin läpi. Tämä työvaihe päättyy vaatimuslistan vahvistamiseen. (Pahl ja Beitz 1990, s. 48.) Tässä kandidaatintyössä vaatimuslistan informaatio kerätään haastattelemalla kandidaatintyön teettäjää.

2.1.2 Luonnosteluvaihe

Luonnosteluvaiheessa pyritään luomaan toimiva periaatteellinen ratkaisu vaatimuslistan pohjalta. Toimivaan periaatteelliseen ratkaisuun päästään hahmottelemalla ratkaisulta vaadittavat toimintorakenteet. Kun toimintorakenteet ovat tiedossa, voidaan kehittää ratkaisuja ja osaratkaisuja, joilla saadaan nämä toimintorakenteet toteutettua. Tässä kohtaa suunnitteluprosessia luodaan ensimmäisiä 3D-malleja ratkaisusta tai tämän osista. Kehitetyt ratkaisut täytyy arvioida teknisestä- sekä taloudellisesta näkökulmasta. Tässä kohtaa suunnitteluprosessia teknisellä näkökulmalla on suurempi painoarvo. (Pahl ja Beitz 1990, s. 48–49.)

Tässä työssä toimintorakenteet hahmotellaan lohkokaaviomaisella toimintorakennepuulla. Tämän pohjalta kerätään toimintorakennepuun osatoimintoja toteuttavia ratkaisuja ideamatriisiin. Ideamatriisista luodaan useampi eri vaihtoehto kokonaisratkaisulle. Kokonaisratkaisut arvioidaan hyödyntäen arviointimatriisia.

2.1.3 Kehittelyvaihe

Kehittelyvaiheessa suunnitellaan luonnosteluvaiheen periaatteellisen ratkaisun pohjalta yksikäsitteinen ja toiminnallisesti valmis tekninen kokoonpanorakenne. Kokoonpanorakenteelta vaadittavat ominaisuudet, kuten lujuus, varmistetaan tässä kohtaa suunnitteluprosessia. Lopullisen teknisen kokoonpanorakenteen on täytettävä teknisten vaatimusten lisäksi taloudelliset vaatimukset. Kehittelyvaihe päättyy lopullisen teknisen kokoonpanorakenteen valinnan vahvistamiseen. (Pahl ja Beitz 1990, s. 49.)

Tässä työssä kehittelyvaiheessa luodaan tekninen kokoonpanorakenne 3D-virtuaalimallin avulla. Tämän rakenteen kestävyys varmistetaan FE-analyysillä.

2.1.4 Viimeistelyvaihe

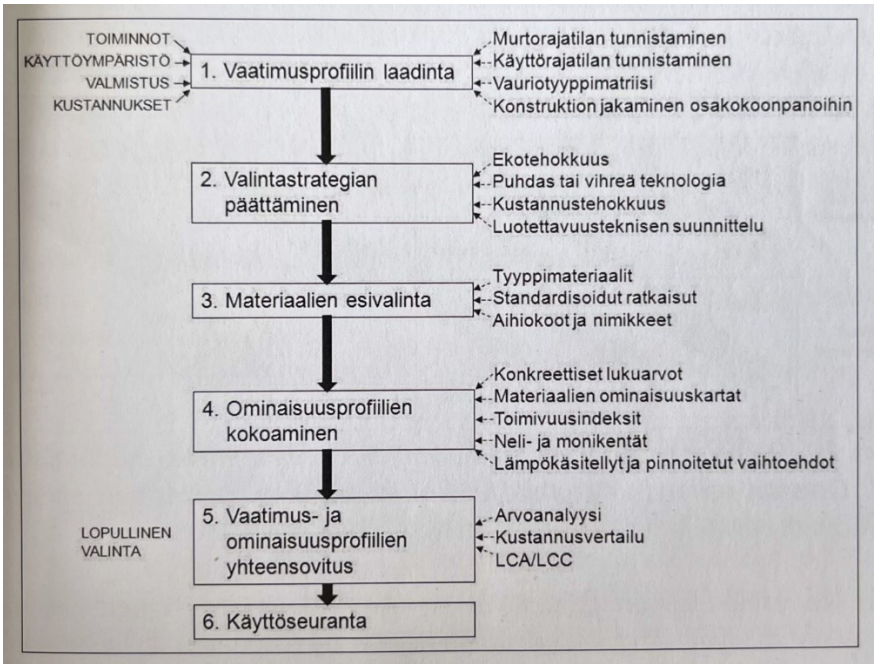
Viimeistelyvaiheessa tekninen kokoonpanorakenne saatetaan tuotantovalmiiksi. Tässä suunnitteluprosessin vaiheessa lyödään lukkoon kaikki valmistusdokumenttien laatimiseksi vaadittavat tiedot, kuten lopulliset mitat ja näitä koskevat toleranssit, valmistusmateriaalit sekä valmistusmenetelmät. Tässä vaiheessa laaditaan valmistusta koskevien asiakirjojen lisäksi myös muut vaadittavat asiakirjat, kuten tuotteen käyttöohjeet. Viimeistelyvaiheen lopputuotteena syntyy yksikäsitteinen valmistustekninen määritelmä, jonka pohjalta suunniteltava tuote voidaan valmistaa. (Pahl ja Beitz 1990, s. 50–51.)

2.2 Systemaattinen materiaalin valintaprosessi

Materiaalivalinta on merkittävä edellytys toimivan ja onnistuneen lopputuotteen saavuttamiseksi. Materiaalivalinnassa valintakriteerit riippuvat paljon suunniteltavasta rakenteesta ja tämän käyttötarkoituksesta. Valintakriteerit voidaan kuitenkin jakaa neljään yleispätevään pääryhmään: rakenteen toiminnan asettamat vaatimukset, käyttöympäristön asettamat vaatimukset, valmistuksen asettamat vaatimukset sekä kustannusvaatimukset. (Eskelinen ja Karsikas 2013a, s. 36–43.)

Tässä työssä materiaali valitaan hyödyntäen systemaattista materiaalin valintaprosessia (Kuva 3). Tämä prosessi jakaa materiaalinvalinnan kuuteen peräkkäiseen askeleeseen.

Ensimmäisessä askeleessa selvitetään materiaalilta vaadittavat seikat edellä mainittujen valintakriteerien neljän pääryhmän mukaan: toiminnot, käyttöympäristö, valmistus sekä kustannukset. (Eskelinen ja Karsikas 2013a, s. 47–48.)



Kuva 3. Systemaattinen materiaalin valintaprosessi (Eskelinen ja Karsikas 2013a, s.47).

Tässä työssä tärkein rakenteen toiminnan asettama vaatimus materiaalille on riittävä lujuus. Tämän lisäksi materiaalin tulisi olla mahdollisimman kevyt. Käyttöympäristön asettama vaatimus on korroosionkesto. Valmistusteknisiä vaatimuksia ovat materiaalin hitsattavuus sekä työstettävyys. Systemaattisen materiaalin valintaprosessin toisessa vaiheessa päätetään materiaalin valintastrategia (Kuva 3). Tässä työssä materiaalin valinnassa hyvällä teknisellä ratkaisulla on suurempi painoarvo kuin kustannustehokkuudella.

2.3 DFMA

DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) tarkoittaa valmistus- ja kokoonpanoystävällistä tuotesuunnittelua. DFMA-näkökulmilla pyritään huomioimaan valmistus- ja asennusvaiheen rajoitteet jo suunnitteluvaiheessa, jotta aikaa ja rahaa vievältä

uudelleensuunnittelulta vältytään. Tämän toteuttamiseksi suunnittelevan- ja valmistavan tahon on syytä kommunikoida keskenään läpi suunnitteluprosessin, eikä vasta tämän jälkeen. Tuote on onnistunut DFMA-näkökulmasta, mikäli tuotteen toimintavaatimus saadaan toteutettua mahdollisimman valmistusystävällistä materiaalia sekä geometriaa hyödyntäen. Tämän lisäksi kokoonpanon tulee olla mahdollisimman helposti asennettavissa. (Eskelinen ja Karsikas 2013b, s.7–9.)

DFMA:n toteuttamiseksi käytännön tasolla on useita ohjenuoria ja tapoja. Tässä työssä keskeisin DFMA:n toteutustapa on jatkuva kommunikointi valmistavan tahon, eli työn teettäjän kanssa. Suunnitteluprosessin kulku ja kehityssuunta hyväksytetään työn teettäjällä säännöllisin väliajoin, jolloin valmistustekniset seikat tulee huomioitua jo suunnitteluprosessin alkuvaiheesta lähtien.

Työssä pyritään noudattamaan suunniteltavaan rakenteeseen soveltuvia DFMA-ohjeita. Näistä keskeisimpiä ovat osien määrän minimointi kokoonpanossa, standardisoitujen komponenttien käyttö sekä liiallisten muotojen ja kiinnitysosien käytön välttäminen. Suunnitteluvaiheessa huomioidaan myös lopullisen kokoonpanon asennettavuus jättämällä asennettavien komponenttien ja kiinnikkeiden ympärille tarpeeksi tilaa työkaluille. (Eskelinen ja Karsikas 2013b, s.11.)

2.4 Elementtimenetelmä (FEM, Finite Element Method)

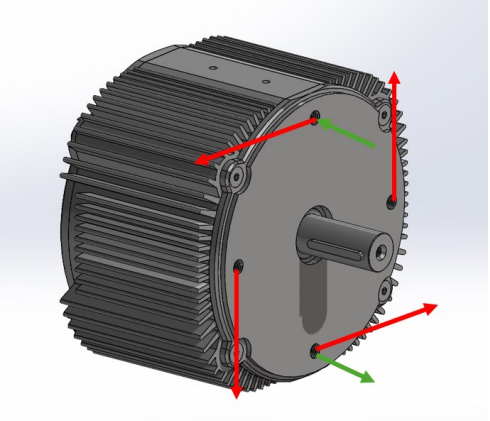
Elementtimenetelmä (FEM, Finite Element Method) on rakenteiden lujuusanalyysiin käytettävä numeerinen laskentamenetelmä. Elementtimenetelmässä tarkasteltava kappale jaetaan pieniin osa-alueisiin, eli elementteihin. Nämä elementit liittyvät toisiinsa tietyissä yksittäisissä kohdissa, joita kutsutaan solmupisteiksi. Tuntemattomat suureet saadaan selville valitsemalla elementtiä tai elementtejä kuvaava likimääräisfunktio. Funktiot valitaan siten, että funktioiden tuntemattomat kertoimet vastaavat selvitettävien suureiden arvoja elementtien solmupisteissä. Selvitettäviä suureita ovat useimmiten kappaleeseen kohdistuvien voimien ja näistä voimista aiheutuneiden siirtymien väliset suhteet. Elementtimenetelmä on numeerinen menetelmä, eli sillä ei saada absoluuttisen tarkkaa tulosta. Vastauksen tarkkuus on kuitenkin hyvin lähellä todellista tilannetta, kun kappale pilkotaan tarpeeksi pieniin elementteihin. Vastauksen tarkkuus on siis riippuvainen elementtien määrästä. (Hakala 1986, s. 13–21.)

Tässä työssä FE-analyysi (FEA, Finite Element Analysis) toteutetaan FEMAP-laskentaohjelmiston avulla. Työssä tunnetaan keskeisimmät rakennetta kuormittavat voimat, joiden pohjalta halutaan selvittää näistä aiheutuvat jännitykset. Voimien avulla saadaan selvitettyä siirtymät, ja tunnetuista siirtymistä saadaan johdettua jännitykset Hooken lakia hyödyntäen (Hakala 1986, s. 21–26). Hooken laki on esitetty alla olevassa yhtälössä (Hakala 1986, s. 24):

$$\sigma = E * \varepsilon$$

jossa σ on jännitys, E on materiaalin kimmokerroin ja ε on venymä.

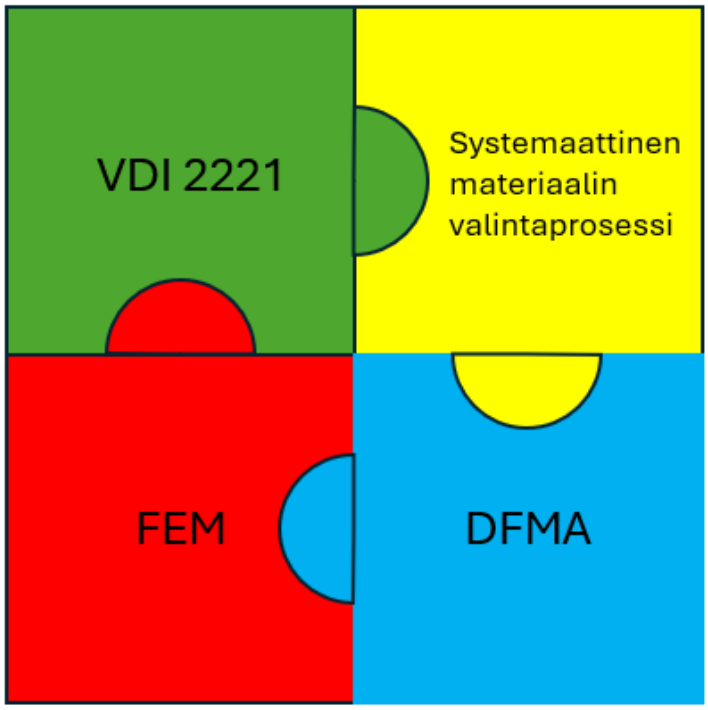
Työn keskeisimmät kuormitukset ovat sähkömoottorin huippuvääntö sekä sähkömoottorin oma paino. Sähkömoottorissa on kiinnityspulttien paikat vain moottorin toisella puolella (Kuva 4), jolloin toispuoleisesta kiinnityksestä seuraa myös sähkömoottorin omasta painosta aiheutuvaa vääntöä. Kuvassa 4 on havainnollistettu sähkömoottorin aiheuttamia kuormituksia: punaiset nuolet kuvaavat moottorin huippuvääntöä ja vihreät nuolet kuvaavat toispuoleisesta kiinnityksestä aiheutuvaa vääntöä. Kuvasta on selkeyden vuoksi jätetty moottorin oma paino pois. Tämä painovoima jakautuu tasan jokaiselle neljälle kiinnityspultille. Analyysi suoritetaan myös kolminkertaistetulla painovoimalla. Tällä pyritään simuloimaan tien epätasaisuuksista, kuten hidastetöyssyistä aiheutuvia kuormituksia.



Kuva 4. Kuormituksien havainnollistaminen: punaiset nuolet kuvaavat moottorin huippuvääntöä ja vihreät toispuoleisesta kiinnityksestä aiheutuvaa vääntöä

2.5 Väliyhteenveto

Kaikki edellä kuvatut metodit (2.1–2.4) ovat tärkeitä onnistuneen kokonaisuuden saavuttamiseksi. VDI 2221-standardin noudattaminen luo perustan järjestelmälliselle ja tehokkaalle suunnitteluprosessille. Tämän prosessin aikana täytyy ottaa systemaattinen materiaalin valintaprosessi huomioon, jotta konstruktiomateriaali tulee valittua järkevästi. Materiaalivalinta on taas oleellinen osa DFMA-näkökulmia, jotka täytyy pitää mielessä suunnitteluprosessin joka vaiheessa. FE-analyysi puolestaan integroituu osaksi suunnitteluprosessin loppupuolta. Näiden analyysien pohjalta saadaan optimoitua rakenteen materiaalinkäyttöä lujuusteknisestä näkökulmasta. Analyyseillä saadaan myös varmistettua lopullisen rakenteen kestävyys. Kaikki käytetyt metodit linkittyvät siis vahvasti toisiinsa ja muodostavat yhdessä edellytykset onnistuneen loppurakenteen saavuttamiseksi. Tätä metodien keskinäisriippuvaisuutta on havainnollistettu kuvassa 5 kuvitteellisella palapelillä.



Kuva 5. Metodit havainnollistavan palapelin avulla esitettynä

3 Suunnitteluprosessin kulku ja tulokset

Tässä kappaleessa käydään läpi suunnitteluprosessin kulku VDI 2221-standardin päävaiheiden mukaan. Suunnitteluprosessin lopuksi päädytään rakenteen lopulliseen 3D-virtuaalimalliin, jolle on luotu suuntaa antava valmistussuunnitelma.

3.1 Tehtävän määritys

Suunnitteluprosessin aluksi täytyy selvittää suunniteltavalta rakenteelta vaadittavat seikat ja toiminnot. Tämä toteutetaan VDI 2221-standardin mukaan vaatimuslistan avulla. Tässä työssä vaatimuslistan informaatio on kerätty haastattelemalla työn teettäjää. Vaatimuslista toimii koko suunnitteluprosessin ohjenuorana.

3.1.1 Vaatimuslista

Vaatimuslista on esitetty taulukossa 1. Vaatimuslistassa on määritelty rakenteelta vaadittavat toiminnot. Tämän lisäksi listassa on esitetty toivomuksia. Lopullisen rakenteen on toteutettava vähintään kaikki listassa mainitut vaatimukset sekä mahdollisimman monta toivomusta.

Taulukko 1. Vaatimuslista

Päätunnuspiirre	**Kuvaus**	Vaatimus (**V**) / Toivomus (**T**)	**Luotu (pvm)**	**Muutoksen tekijän nimi ja päivämäärä**
Geometria	Ketjulinjan oltava suorassa ja ketjun pystyttävä pyörimään vapaasti Moottorin mahduttava akun kanssa runkoon	V	14.11.2025	
Kinematiikka	Moottorin aiheuttama värähtely huomioitava	V	14.11.2025	

Taulukko 1 jatkuu. Vaatimuslista

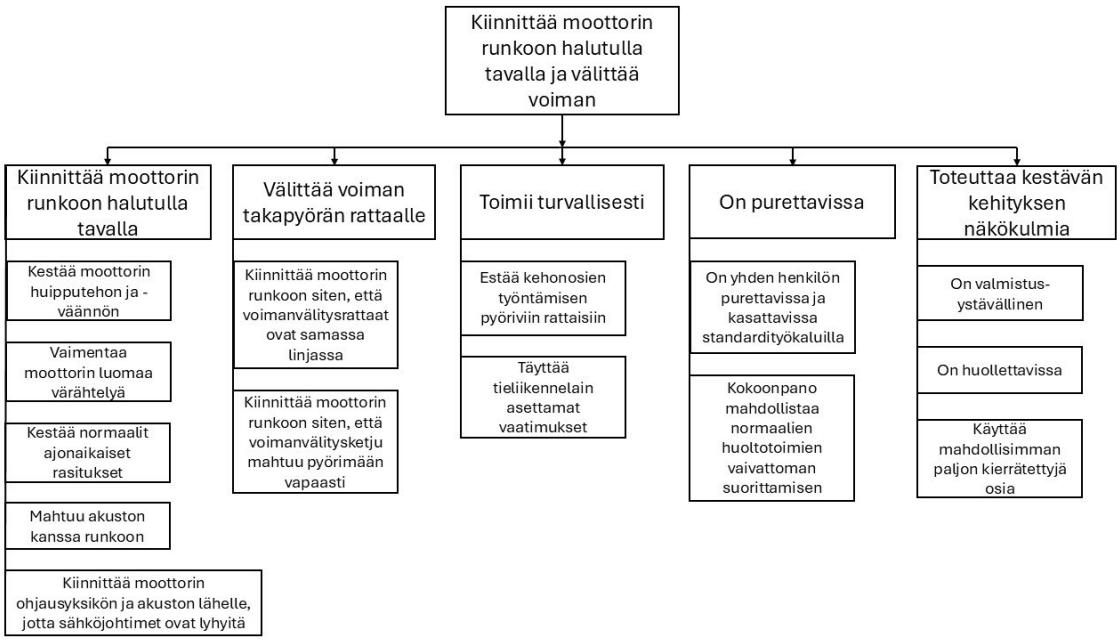
Päätunnuspiirre	Kuvaus	Vaatimus (V) / Toivomus (T)	Luotu (pvm)	Muutoksen tekijän nimi ja päivämäärä
Voimat ja kuormitukset	Kiinnikkeiden kestettävä moottorin maksimiteho ja -vääntö - Maksimiteho: 48 kW - Maksimivääntö: 135 Nm Kestettävä normaalit ajonaikaiset rasitukset, esimerkiksi töyssyt ja hidasteet	V	14.1.2025	
Materiaali	Normaalin tukkuliikkeen standardimateriaaleja, ei erikoistilattavia materiaaleja	V	14.1.2025	
Turvallisuus	Voimanvälitysketjun riittävä suojaus	V	14.1.2025	
Ergonomia	Huollettavuus ja purettavuus	V	14.1.2025	
Valmistus	Valmistettavissa LUT:n välineillä	T	14.1.2025	
Tarkastus	Suojat kohtuullisen helposti irrotettavissa tekniikan tarkistamiseksi	V	14.1.2025	
Asennus	Standardityökaluilla normaalin ammattilaisen, esimerkiksi ajoneuvoasentajan, asennettavissa	V	14.1.2025	
Kuljetus	Helposti siirrettävissä valmistuksen aikana	T	14.1.2025	
Käyttö	Tieliikennekäyttöön	V	14.1.2025	
Kunnossapito	Huollettavuus ja purettavuus	V	14.1.2025	
Kestävä kehitys	Pyritään välttämään hiilikuitua Käytetään mahdollisimman paljon kierrätetyn moottoripyörän osia	T	14.1.2025	
Kustannukset	Kohtuulliset kustannukset, enimmillään 2000 euroa	T	14.1.2025	
Lainsäädäntö, direktiivit	Noudatettava tieliikennelakia Saatava rekisteröityä	V	14.1.2025	
Määräajat	Projekti valmis 31.5.2025 mennessä	T	14.1.2025	
Oma lisäys 1	Mahdollisimman pieni massa, enimmillään moottoripyörän alkuperäinen massa	T	14.1.2025	
Oma lisäys 2	Olemassa olevat osat säilytetään mahdollisimman alkuperäisenä, ei siis muokkauksia esimerkiksi runkoon	T	14.1.2025	
Oma lisäys 3	Kaikki sähköjohtimet mahdollisimman lyhyitä	T	14.1.2025	

3.2 Luonnostelu

Luonnosteluvaiheessa kappaleen muotoa ja päämittoja aletaan hahmottelemaan vaatimuslistan pohjalta. Tämä toteutetaan visualisoimalla rakenteelta vaadittavat toiminnot toimintorakennepuun avulla. Näitä toimintoja toteuttavia osaratkaisuja listataan ideamatriisiin. Ideamatriisin osaratkaisut kasataan kokonaisratkaisuiksi, jotka arvioidaan. Luonnosteluvaiheen lopputulema on parhaaksi arvioitu periaatteellinen kokonaisratkaisu, jota lähdetään kehittämään kehittelyvaiheessa.

3.2.1 Toimintorakennepuu

Kuvassa 6 on esitetty toimintorakennepuu. Toimintorakennepuussa on visualisoitu rakenteelta vaadittavat toiminnot. Lohkokaaviomaisessa toimintorakennepuussa on yksi päätoiminto, joka on jaettu viiteen tarkempaan osatoimintoon. Osatoimintoja on edelleen tarkennettu yksikäsitteisillä vaatimuksilla, jotka on listattu osatoimintojen alle.

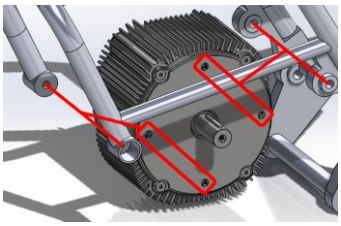
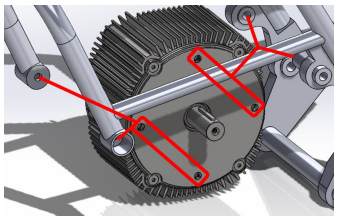
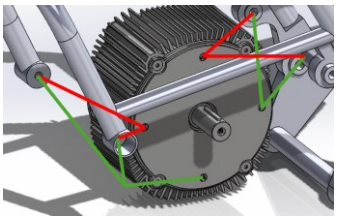


Kuva 6. Toimintorakennepuu

3.2.2 Ideamatriisi

Taulukossa 2 on esitetty ideamatriisi. Ideamatriisiin on kerätty erilaisia ratkaisuideoita toimintorakennepuun osatoimintojen toteuttamiseksi. Ideamatriisin ensimmäisessä sarakkeessa (vasemmalla) on listattu toteutettavat osatoiminnot. Kunkin osatoiminnon riville on listattu useampi toteutustapa.

Taulukko 2. Ideamatriisi

Ratkaisut / Osatoiminnot	**1**	**2**	**3**
1. Moottorin kiinnitys	Kiinnitys rungon alkuperäisiin moottorinkiinnityskohtiin kahdella T-haaralla 	Kiinnitys rungon alkuperäisiin moottorinkiinnityskohtiin kahdella Y-haaralla 	Kiinnitys rungon alkuperäisiin moottorinkiinnityskohtiin neljällä Y-haaralla 
2. Värähtelynvaimennustapa	Kuminen aluslevy (Arvo-Helat Oy 2025).	Kuminen lieriövaimennin (IKH 2025).	Muu

Taulukko 2 jatkuu. Ideamatriisi

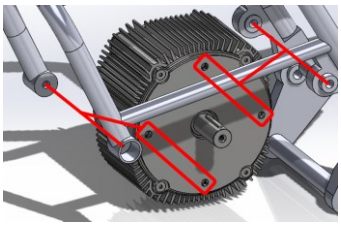
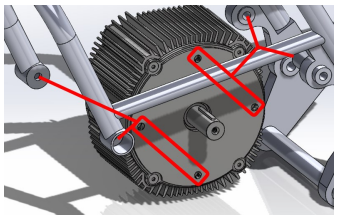
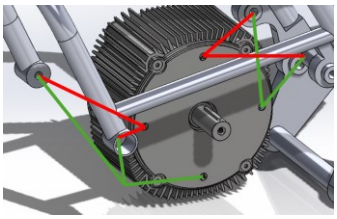
Ratkaisut / Osatoiminnot	**1**	**2**	**3**
3. Ketjun ja rattaiden suojaustapa	Alkuperäinen ketjusuoja + sähkömoottoriin kiinnittyvä moottorin voimanvälitysrattaan suoja	Alkuperäinen ketjusuoja + sähkömoottoriin kiinnikkeisiin kiinnittyvä moottorin voimanvälitysrattaan suoja	Alkuperäinen ketjusuoja + runkoon kiinnittyvä moottorin voimanvälitysrattaan suoja
4. Alustava materiaali	Ruostumaton teräs	Alumiini	Muu

Ideamatriisin pohjalta on luoto kolme mahdollista kokonaisratkaisua. Kokonaisratkaisut on listattu taulukossa 3. Tässäkin taulukossa ensimmäisessä sarakkeessa on lueteltu eri osatoiminnot. Kolmessa seuraavassa sarakkeessa on lueteltu eri kokonaisratkaisut allekkain, eli yksi sarake vastaa yhtä kokonaisratkaisua.

Taulukko 3. Kokonaisratkaisut arviointia varten

Kokonaisratkaisut	**Kokonaisratkaisu 1**	**Kokonaisratkaisu 2**	**Kokonaisratkaisu 3**
1. Moottorin kiinnitys	Kiinnitys rungon alkuperäisiin moottorinkiinnityskohtiin kahdella T-haaralla	Kiinnitys rungon alkuperäisiin moottorinkiinnityskohtiin kahdella Y-haaralla	Kiinnitys rungon alkuperäisiin moottorinkiinnityskohtiin neljällä Y-haaralla

Taulukko 3 jatkuu. Kokonaisratkaisut arviointia varten

Kokonaisratkaisut	Kokonaisratkaisu 1	Kokonaisratkaisu 2	Kokonaisratkaisu 3
1. Moottorin kiinnitys			
2. Värähtelynvaimennustapa	Kuminen aluslevy (Arvo-Helat Oy 2025).	Kuminen aluslevy (Arvo-Helat Oy 2025).	Kuminen lieriövaimennin (IKH 2025).
3. Ketjun ja rattaiden suojaustapa	Alkuperäinen ketjusuoja + sähkömoottoriin kiinnittyvä moottorin voimanvälitysrattaan suoja	Alkuperäinen ketjusuoja + sähkömoottoriin kiinnikkeisiin kiinnittyvä moottorin voimanvälitysrattaan suoja	Alkuperäinen ketjusuoja + runkoon kiinnittyvä moottorin voimanvälitysrattaan suoja
5. Alustava materiaali	Ruostumaton teräs	Alumiini	Alumiini

3.2.3 Arviointimatriisi

Kokonaisratkaisut täytyy arvioida, jotta löydetään paras vaihtoehto. Tämä arviointi suoritetaan arviointimatriisin avulla. Arviointimatriisissa arvioitava kriteeri on esitetty ensimmäisessä sarakkeessa (vasemmalla). Kullekin kriteerille on valittu painotus asteikolla 0–1 kyseisen ominaisuuden merkityksen perusteella. Kaikkien kriteerien painotuksen summan tulee olla 1. Eri vaihtoehdot, eli kokonaisratkaisut, arvioidaan kunkin kriteerin osalta asteikolla 1–5. Kun arvio kerrotaan kyseisen kriteerin painotuksella, saadaan kullekin kokonaisratkaisulle painotettu arvo kyseisen kriteerin osalta. Lopuksi kaikkien kriteerien painotetut arvot summataan keskenään, jolloin suurimman numeron omaava kokonaisratkaisu on paras.

Arviointimatriisi on jaettu kahteen osaan: tekniseen- sekä taloudelliseen arviointimatriisiin. Tekninen arviointimatriisi on esitetty taulukossa 4 ja taloudellinen arviointimatriisi taulukossa 5. Tässä työssä teknisellä osalla on huomattavasti suurempi painoarvo.

Teknisen arviointimatriisin osalta teknisellä suorituskyvyllä on selkeästi suurin merkitys, sillä tämä on moottorikiinnityksen pääasiallinen funktio. Tästä syystä teknisellä suorituskyvyllä on suurin painoarvo: 0,4. Myös purettavuus on tärkeä kriteeri. Vaatimuslistassa on määritetty, että rakenteen täytyy olla purettavissa (Taulukko 1). Näin ollen purettavuudella on toiseksi suurin painotus: 0,2. Lopullisen kokoonpanon massa ja valmistettavuus ovat huomioon otettavia aspekteja, mutta ei elintärkeitä kriteerejä. Sekä mahdollisimman pieni massa että valmistettavuus LUT:n välineillä ovat vaatimuslistassa vain toiveita, eikä vaatimuksia (Taulukko 1). Näiden molempien kriteerien painotus on näin ollen 0,15. Ympäristövaikutuksilla on pienin painoarvo: 0,1. Ympäristöasiat on tärkeä ottaa huomioon suunnittelussa, mutta nämä eivät suoranaisesti vaikuta itse kiinnitysrakenteen toimintaan (Taulukko 4).

Taulukko 4. Arviointimatriisin tekninen osa

Kriteeri	**Painotus (0–1)**	**Kokonaisratkaisu 1**		**Kokonaisratkaisu 2**		**Kokonaisratkaisu 3**		**Kommentti**
		Arvo (1–5)	**Painotettu arvo**	**Arvo (1–5)**	**Painotettu arvo**	**Arvo (1–5)**	**Painotettu arvo**	
Tekninen suorituskyky	0,4	2	0,8	4	1,6	4	1,6	**Lujuus, tärinänvaimennus ja turvallisuus**
Purettavuus	0,2	3	0,6	4	0,8	3	0,6	**Kokoamisen ja purkamisen helppous**
Massa	0,15	4	0,6	4	0,6	2	0,3	**Kokoonpanon massa (mitä pienempi, sitä parempi)**
Valmistettavuus	0,15	4	0,6	3	0,45	3	0,45	**Geometrioiden ja materiaalien vaikutus valmistettavuuteen**
Ympäristövaikutukset	0,1	4	0,4	4	0,4	4	0,4	**Elinkaariajattelu sekä materiaalien kierrätys**

Taulukko 4 jatkuu. Arviointimatriisin tekninen osa

Kriteeri	**Painotus (0–1)**	**Kokonaisratkaisu 1**		**Kokonaisratkaisu 2**		**Kokonaisratkaisu 3**		**Kommentti**
		Arvo (1–5)	**Painotettu arvo**	**Arvo (1–5)**	**Painotettu arvo**	**Arvo (1–5)**	**Painotettu arvo**	
Yhteensä	**1,0**		**3**		**3,85**		**3,35**	

Arviointimatriisin teknisestä osasta (Taulukko 4) nähdään, että vaihtoehto numero 2 on teknisien kriteerien puolesta selkeästi paras kokonaisratkaisu. Kokonaisratkaisut arvioidaan vielä taloudellisesta näkökulmasta (Taulukko 5).

Taulukko 5. Arviointimatriisin taloudellinen osa

Kriteeri	**Painotus (0–1)**	**Kokonaisratkaisu 1**		**Kokonaisratkaisu 2**		**Kokonaisratkaisu 3**		**Kommentti**
		Arvo (1–5)	**Painotettu arvo**	**Arvo (1–5)**	**Painotettu arvo**	**Arvo (1–5)**	**Painotettu arvo**	
Valmistuskustannukset	0,4	4	1,6	3	1,2	2	0,8	**Työtunnit: materiaalien työstö ja kokoonpano**

Taulukko 5 jatkuu. Arviointimatriisin taloudellinen osa

Kriteeri	**Painotus (0–1)**	**Kokonaisratkaisu 1**		**Kokonaisratkaisu 2**		**Kokonaisratkaisu 3**		**Kommentti**
		Arvo (1–5)	**Painotettu arvo**	**Arvo (1–5)**	**Painotettu arvo**	**Arvo (1–5)**	**Painotettu arvo**	
Materiaalikustannukset	0,4	4	1,6	3	1,2	2	0,8	**Materiaalin hinta ja määrä**
Ylläpitokustannukset	0,2	4	0,8	4	0,8	4	0,8	
Yhteensä	**1,0**		**4**		**3,2**		**2,4**	

Taloudellisen arviointimatriisin osalta valmistuskustannuksilla ja materiaalikustannuksilla on suurimmat painoarvot: 0,4. Nämä kaksi ovat oletettavasti suurimmat kuluerät. Ylläpitokustannukset ovat moottorin kiinnitysrakenteessa lähtökohtaisesti hyvin pieniä. Tämän takia ylläpitokustannusten painoarvo on 0,2 (Taulukko 5).

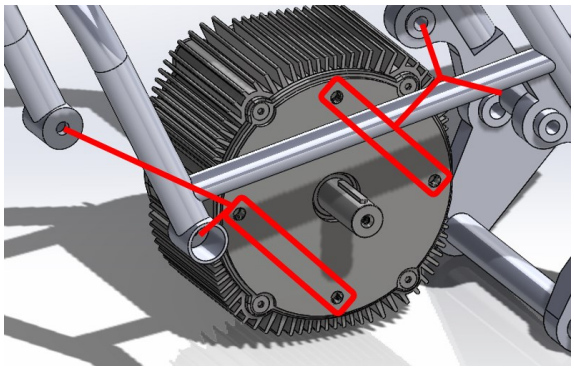
Arviointimatriisin taloudellisesta osasta (Taulukko 5) nähdään, että taloudellisesta näkökulmasta vaihtoehto 1 on paras, vaihtoehto 2 on toiseksi paras ja vaihtoehto 3 on huonoin. Vaihtoehto 2 on kuitenkin teknisestä näkökulmasta selvästi paras (Taulukko 4). Tässä työssä priorisoidaan hyvää teknistä ratkaisua, ja taloudellinen näkökulma on toissijainen arvostelukriteeri. Tästä syystä vaihtoehto 2 valitaan parhaaksi kokonaisratkaisuksi, jota lähdetään kehittämään seuraavassa vaiheessa.

3.3 Kehittely

Lähdetään kehittämään edellisen vaiheen kokonaisratkaisua 2. Kehittely aloitetaan luomalla alustava 3D-virtuaalimalli rakenteen konkretisoimiseksi. Tämän jälkeen valitaan valmistusmateriaali ja suoritetaan FE-analyysi. Virtuaalimallia pyritään optimoimaan FE-analyysin pohjalta.

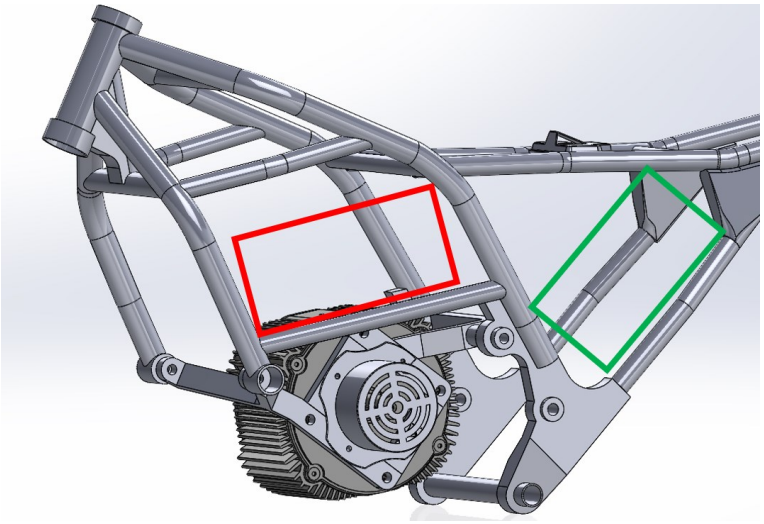
3.3.1 Virtuaalimalli

Kehitettävässä ideassa (kokonaisratkaisu 2) moottori kiinnitetään sekä etu- että takapuolelta Y-muotoisilla kiinnikkeillä (Kuva 7). Tämän kuitenkin huomataan olevan haastavaa, sillä moottorin vetoratas pyritään saamaan mahdollisimman lähelle alkuperäisen polttomoottorin vetorattaan sijaintia. Alkuperäisen moottorin vetoratas on nykyiseen kiinnitysideaan verrattuna huomattavasti taaempana. Takakiinnitystä täytyy siis muuttaa, jotta moottorin saa taaemmaksi.



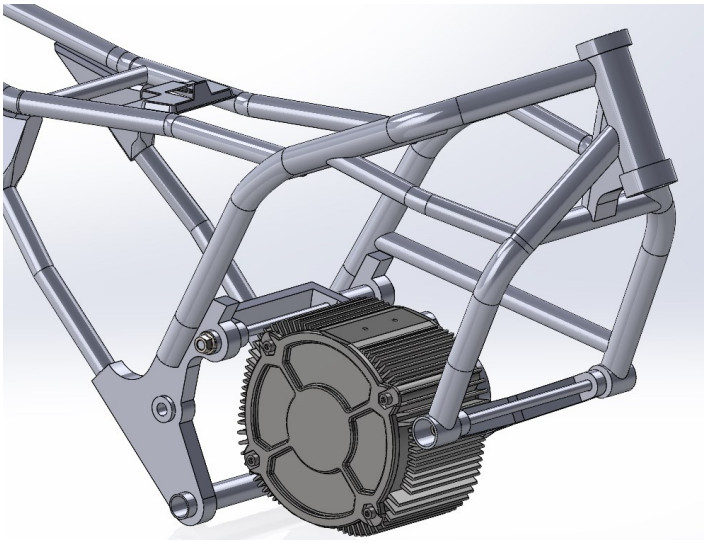
Kuva 7. Alustava idea: kiinnitys kahdella Y-haaralla

Alustavassa 3D-virtuaalimallissa on huomioitu suunnittelun rajoitteet, eli akuston ja ohjausyksikön sijainti. Akuston likimääräinen sijainti on merkitty kuvaan punaisella suorakulmiolla ja ohjausyksikön -sijainti vihreällä suorakulmiolla (Kuva 8).



Kuva 8. Alustava 3D-virtuaalimalli, johon on merkattu akuston- (punainen) ja ohjausyksikön (vihreä) sijainti

Virtuaalimallista (Kuva 8) nähdään, että etukiinnitys on alkuperäisen idean mukaisesti Y-haaran muotoinen. Takakiinnitys on suunniteltu siten, että moottori saadaan mahdollisimman taakse (Kuva 9). Työssä täytyy huomioida myös akuston kiinnitys, vaikka sitä ei suunnitellakaan tässä työssä. Moottorikiinnikkeitä ei kiinnitetä runkoon pulttikiinnityksellä, vaan kahdella läpimenevällä kiinnitysakselilla. Akusto kiinnittyy näihin samoihin akseleihin (Kuva 9).



Kuva 9. Virtuaalimalli toiselta puolelta kiinnitysakseleiden kanssa

3.3.2 Materiaalivalinta

Ideamatriisissa (Taulukko 2) on mainittu alustaviksi materiaaleiksi ruostumaton teräs sekä alumiini. Perehdytään näistä kahdesta alumiineihin ja pyritään löytämään alumiineista sopiva materiaaliratkaisu. Tämä johtuu siitä, että vaatimuslistassa (Taulukko 1) on esitetty toiveeksi mahdollisimman pieni rakenteen kokonaismassa. Alumiinit ovat kevyempiä kuin ruostumattomat teräkset.

Alumiini on kevyt metallimateriaali, jota käytetään yleisesti muun muassa ajoneuvo-, ilmailu- ja merenkulkusovelluksissa. Alumiinia käytetään näissä sovelluksissa johtuen pitkälti alumiinin hyvästä lujuus-paino-suhteesta. Alumiinilla on myös yleisesti hyvä korroosionkesto. Alumiini jakautuu materiaalina useampaan alaluokkaan riippuen alumiinimateriaalissa käytetyistä seosaineista. (Mathers 2002, s. 1–9.)

Alumiinit jakautuvat muovattaviin- ja valettaviin alumiineihin (Mathers 2002, s. 6). Tässä työssä keskitytään muovattaviin alumiineihin, koska niitä on helpommin saatavilla. Muovattavat alumiinit jakautuvat yhdeksään pääluokkaan riippuen alumiinin seosaineista. Nämä pääluokat ovat:

- 1000-sarja, Kaupallisesti puhdas alumiini
- 2000-sarja, Alumiini-kupariseokset
- 3000-sarja, Alumiini-mangaaniseokset
- 4000-sarja, Alumiini-pii-seokset
- 5000-sarja, Alumiini-magnesiumseokset
- 6000-sarja, Alumiini-magnesium-pii-seokset
- 7000-sarja, Alumiini-sinkki-magnesiumseokset
- 8000-sarja, Muut seosaineet
- 9000-sarja, Käyttämätön sarja

(Mathers 2002, s. 36–37.)

Pääluokan valinta riippuu alumiiniseokselta vaadittavista ominaisuuksista. Taulukossa 6 on listattu pääluokkien yleisiä tuotemuotoja sekä käyttökohteita.

Taulukko 6. Alumiinien pääluokkien yleiset tuotemuodot ja -käyttökohteet (mukaillen Mathers 2002, s. 7).

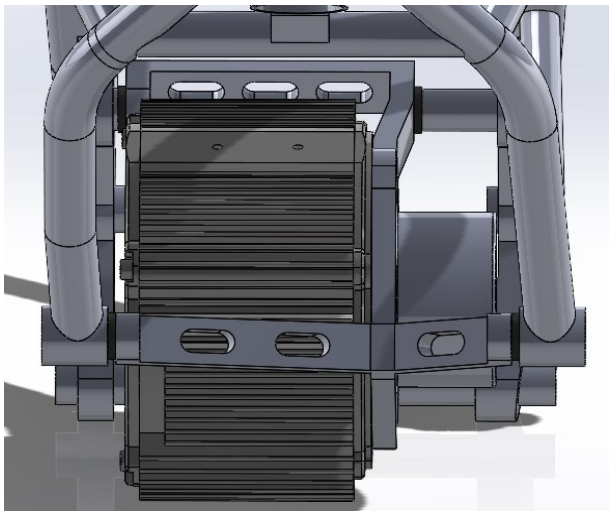
Pääluokka (Seosaine)	**Yleiset tuotemuodot**	**Yleiset käyttökohteet**
1000-sarja (Al)	Folio, valssattu levy, ekstruusio	Pakkaus ja foliot, katteet, päällysteet, heikkolujuiset korroosionkestävät säiliöt
2000-sarja (Al-Cu)	Valssatut levyt ja ohutmetallit, ekstruusio, taotut osat	Suuren rasituksen alaiset osat, ilmailun rakenteelliset osat, raskaat taotut osat, raskaiden ajoneuvojen vanteet, sylinterinkannet ja männät
3000-sarja (Al-Mn)	Valssatut levyt ja ohutmetallit, ekstruusio, taotut osat	Paketointi, katteet ja pinnoitteet, kemikaalisäiliöt, prosessi- ja elintarviketeollisuuden laitteet
4000-sarja (Al-Si)	Lanka, valssatut osat	Täytemetallit, sylinterinkannet, moottorilohkot, venttiilirungot, arkkitehtuuri
5000-sarja (Al-Mg)	Valssatut levyt ja ohutmetallit, ekstruusio, taotut osat, putket ja putkistot	Päällysteet, alusten rungot ja ylärakenteet, rakenteelliset osat, säiliöt, ajoneuvot, rautatiekalusto, arkkitehtuuri
6000-sarja (Al-Si-Mg)	Valssatut levyt ja ohutmetallit, ekstruusio, taotut osat, putket ja putkistot	Korkeaa lujuutta vaativat rakenteelliset osat, ajoneuvot, rautatiekalusto, merenkulun sovellukset, arkkitehtuuri
7000-sarja (Al-Mg-Zn)	Valssatut levyt ja ohutmetallit, ekstruusio, taotut osat	Korkeaa lujuutta vaativat rakenteelliset osat, suurikokoiset lentokoneiden taotut osat, sotilassillat, panssarilevyt, raskaiden ajoneuvojen ja rautatiekaluston ekstruusiot

Systemaattisen materiaalin valintaprosessin kolmannessa vaiheessa toteutetaan materiaalin esivalinta (Eskelinen ja Karsikas 2013a, s.47). Alumiinien pääsarjoista on helposti saatavilla, työn teettäjän osoittamassa kaupassa, 2000- sekä 6000-pääsarjoja (Alumeco Group 2025). Esivalinnan tuloksena alumiinien pääsarjaksi valikoituu 6000-sarja. Tätä sarjaa käytetään muun muassa korkeaa lujuutta vaativissa rakenteellisissa osissa, ajoneuvoissa ja merenkulun sovelluksissa (Taulukko 6). 6000-sarja soveltuu siis hyvin moottorikiinnitykseen, jolta vaaditaan korkeaa lujuutta sekä hyvää korroosionkestoa.

Kiinnityksen profiiliksi on valikoitunut standardimuotoinen 15 x 30 mm lattaprofiili. Tätä profiilia on helposti saatavilla 6000-sarjassa EN AW-6082-alumiiniseoksena. (Alumeco Group 2025.) Tällä alumiiniseoksella on hyvä korroosionkesto, korkea lujuus sekä hyvä hitsattavuus ja työstettävyys (Glocon 2025). Tämän alumiiniseoksen myötölujuus on 240 MPa, joka on hyvin todennäköisesti riittävä valitulle profiilille (Alumeco Group 2025). Tämä alumiiniseos täyttää siis kaikki mainitut valintakriteerit. Valitaan EN AW-6082-alumiiniseos valmistusmateriaaliksi.

3.3.3 FE-simulaatio ja lujuusoptimointi

Heti ensimmäisestä FE-simulaatiosta selviää, että runkoon kiinnittyvät poikittaiset varret ovat hyvin lievästi kuormitettuja. Kevennetään näitä varsia ennen tarkempia FE-simulaatioita (Kuva 10).



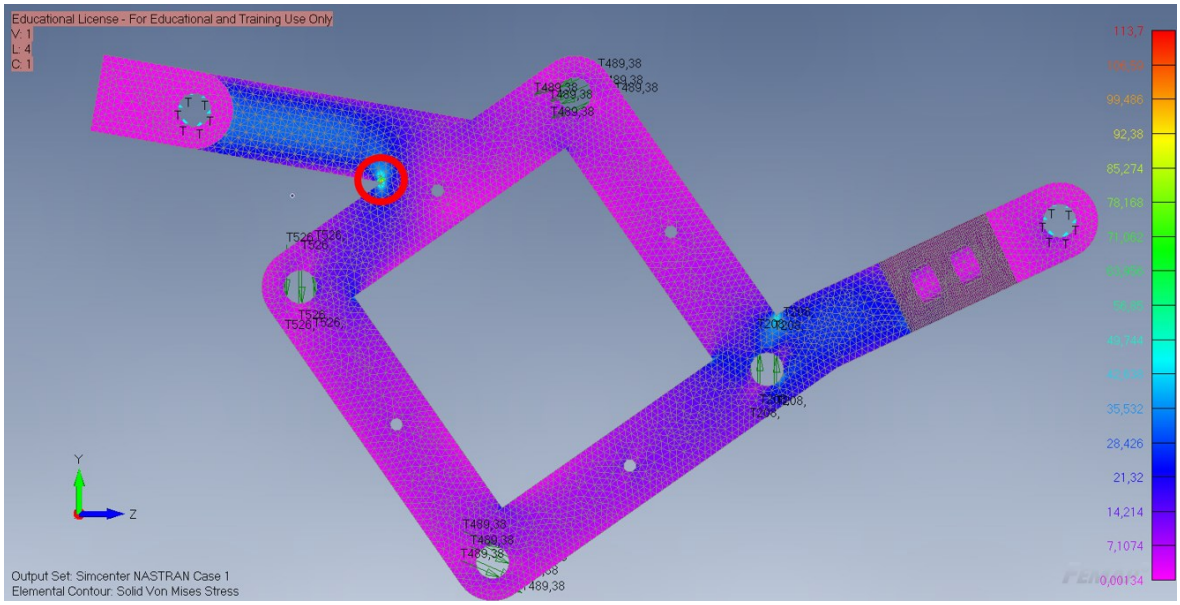
Kuva 10. Kevennetyt poikittaisvarret

FE-simulaatioista selviää, että kuormittavin tilanne ei ole moottorin maksimiväännön aikainen rasitus, vaan moottorijarrutuksen aikainen rasitus. Tämä tarkoittaa siis tilannetta, jossa vääntö on yhtä suuri kuin moottorin maksimiväännössä, mutta kuormituksen suunta on päinvastainen. Metodiikassa on mainittu, että simulaatio suoritetaan myös kolminkertaisella painovoimalla tien epätasaisuuksien simuloimiseksi. Tällöin myös moottorikiinnityksen toispuoleisuuden aiheuttama vääntö kolminkertaistuu. Tämä tilanne on simulaatioiden perusteella kaikista kuormittavin. Tämän tilanteen simulaation parametrit on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. FE-analyysin parametrit

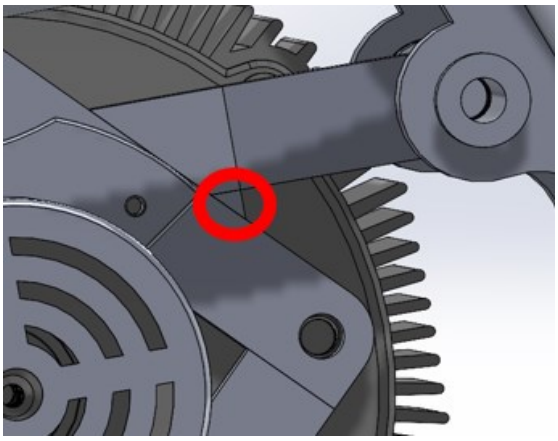
Parametrit	**Parametrien arvot**	**Tarkennus**
Materiaalin tiheys	2,7 g/m^3 (Smiths Metal 2023)	
Materiaalin kimmomoduuli	70 GPa (Smiths Metal 2023)	
Materiaalin Poissonin luku	0,33 (Beam Dimensions 2025)	
Reunaehdot	Nivelöity (Engl. Pinned) kiinnityksen runkoliitoskohdista	
Kuormitukset: Moottorin käänteinen vääntö	135 000 Nmm	≈ 367 N Jokaiseen moottorin kiinnityspultin reikään (Kuva 4)
Kuormitukset: Toispuoleisen kiinnityksen aiheuttama vääntö	51 888 Nmm	$= 282$ N Ylimpään ja alimpaan moottorin kiinnityspultin reikään (Kuva 4)
Kuormitukset: Moottorin oma paino	210 N	≈ 53 N Jokaiseen moottorin kiinnityspultin reikään

Kyseisen kuormittavimman analyysin tulokset on esitetty kuvassa 11, jossa huippujännityskohta on ympyröity.



Kuva 11. Kuormittavin FE-analyysi, jossa huippujännityksen sijainti on ympyröity

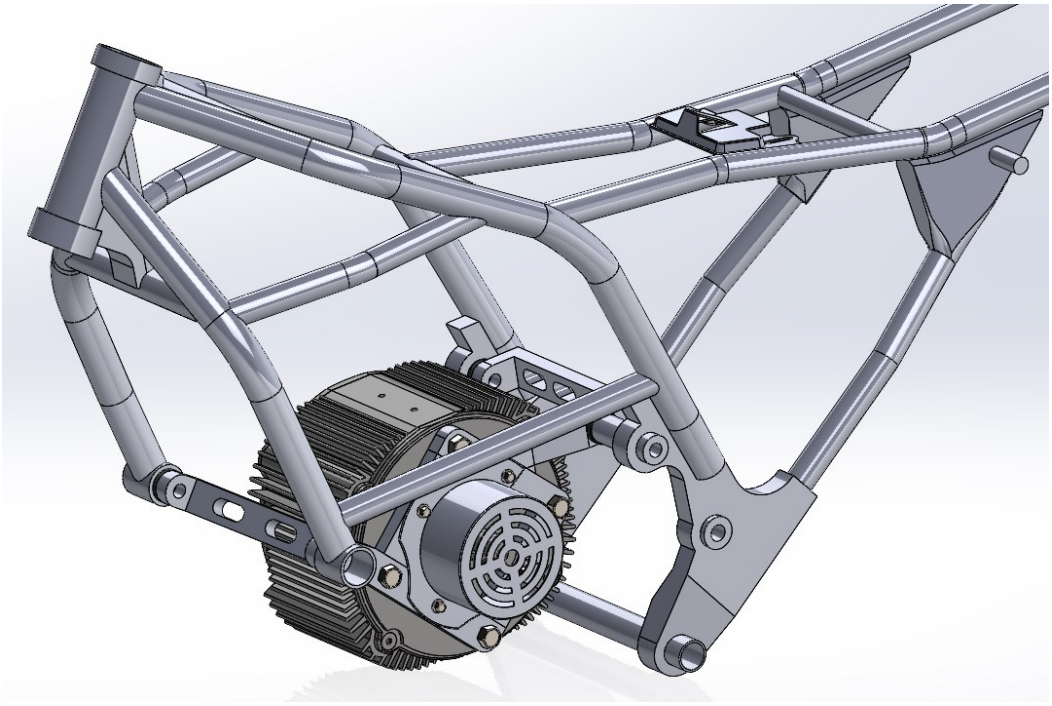
FE-analyysista nähdään, että huippujännitys on 113,7 MPa (Kuva 11). Materiaalin myötöraja on 240 MPa, eli kahden varmuuskertoimella huippujännitys saa olla korkeintaan 120 MPa. Tätä heikointa kohtaa vahvistetaan kolmion muotoisella pienellä vahvistuspalalla (Kuva 12). Tämä tiputtaa huippujännityksen 73,2 megapascaliin (MPa).



Kuva 12. Rakenteen heikoimman kohdan vahvistuspala (ympyröity)

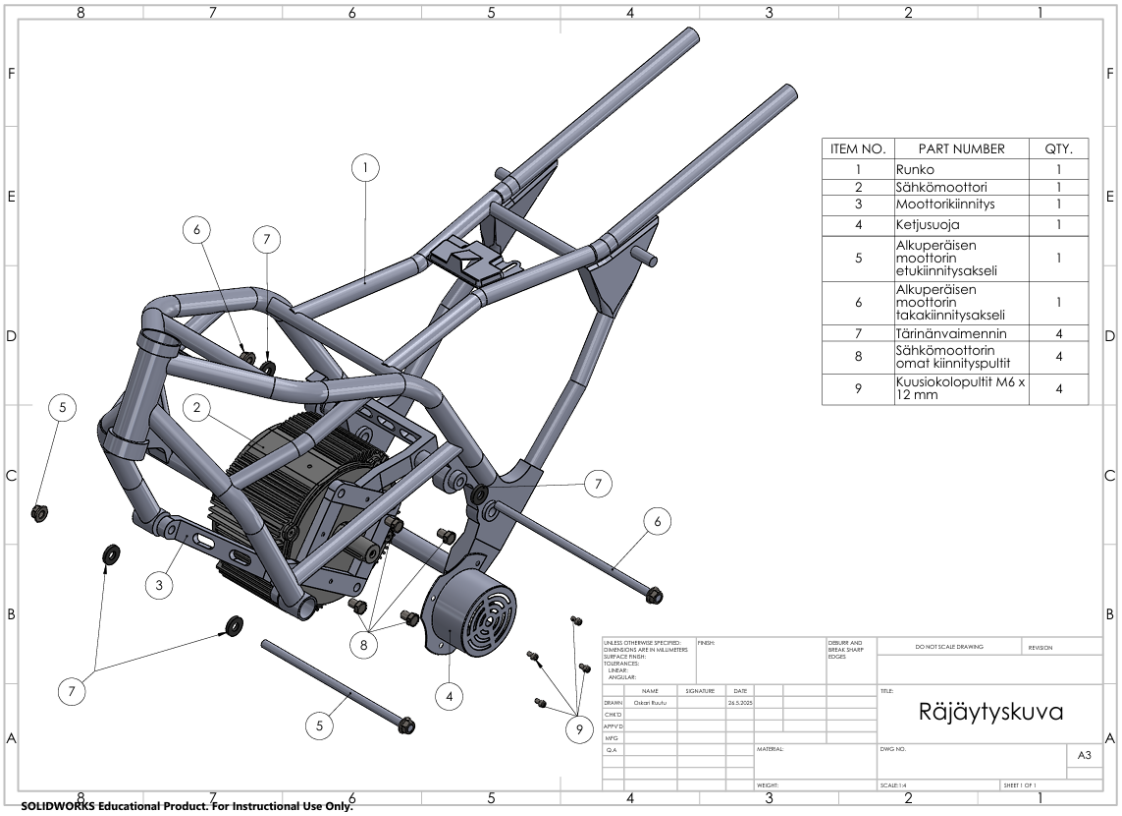
3.3.4 Lopullinen 3D-virtuaalimalli

FE-simulaatioiden perusteella saadaan lopullinen virtuaalimalli, jonka kestävyys on varmistettu kyseisillä simulaatioilla. Lopullisen virtuaalimallin huippujännitys on kuormittavimmassa tilanteessa 73,2 MPa, eli reilusti alle 120 MPa:n rajan. Lopullinen virtuaalimalli on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Lopullinen 3D-virtuaalimalli

Lopullisen 3D-virtuaalimallin räjäytyskuva sekä osaluettelo on esitetty kuvassa 14. Räjäytyskuvassa on esitetty kaikki moottorikiinnityksen kokoonpanoon kuuluvat osat. Rungon lisäksi kiinnitysakselit (Osat 5 ja 6) ovat alkuperäisen moottoripyörän osia (Kuva 14).



Kuva 14. Räjäytyskuva sekä osaluettelo

Lopullisessa virtuaalimallissa DFMA-näkökulmat on otettu huomioon usealla eri tavalla. Moottorikiinnityksen profiiliksi on valittu standardimuotoinen 15 x 30 mm suorakaideprofiili. Lisäksi geometriassa on pyritty välttämään ylimääräisiä muotoja ja kiinnitysosia. Kokoonpanossa käytetyt kiinnitysosat ovat standardimuotoisia osia. Nämä kaikki ovat tapoja toteuttaa DFMA:n periaatteita. (Eskelinen ja Karsikas 2013b, s. 9–11.)

Materiaalivalinnassa on kiinnitetty huomiota valmistusvaiheen sujuvuuteen. Valittu materiaali on työstettävyydeltään sekä hitsattavuudeltaan hyvä (Glocon 2025). Tämä helpottaa valmistusvaihetta, eli toteuttaa DFMA:n periaatteita. Lisäksi materiaalivalinnassa on varmistettu, että materiaalia on helposti saatavilla tarvittavina profiileina, eli 15 x 30 mm suorakaideprofiilina sekä 1 mm paksuisena ohutlevynä. Ketjunsuoja valmistetaan tästä ohutlevystä. (Eskelinen ja Karsikas 2013b, s. 7–11.)

Rakenteen DFMA-näkökulmat näkyvät myös asennusvaiheessa. Rakenteessa on jätetty tarpeeksi työvaraa kiinnitysosien ympärille. Tämän lisäksi koko rakenne on suunniteltu helposti purettavaksi ja kasattavaksi. Moottorikiinnityksen kokoonpano on yhden ihmisen

purettavissa ja kasattavissa. Myös ketjunsuoja on suunniteltu helposti irrotettavaksi muusta kiinnitysrakenteesta. Ketjunsuojan saa irroitettua avaamalla ketjunsuojan neljä kuusiokolopulttia (Kuva 14, Osat 9). Tämä on hyödyllistä esimerkiksi ketjuhuollon yhteydessä. (Eskelinen ja Karsikas 2013b, s. 9–11.)

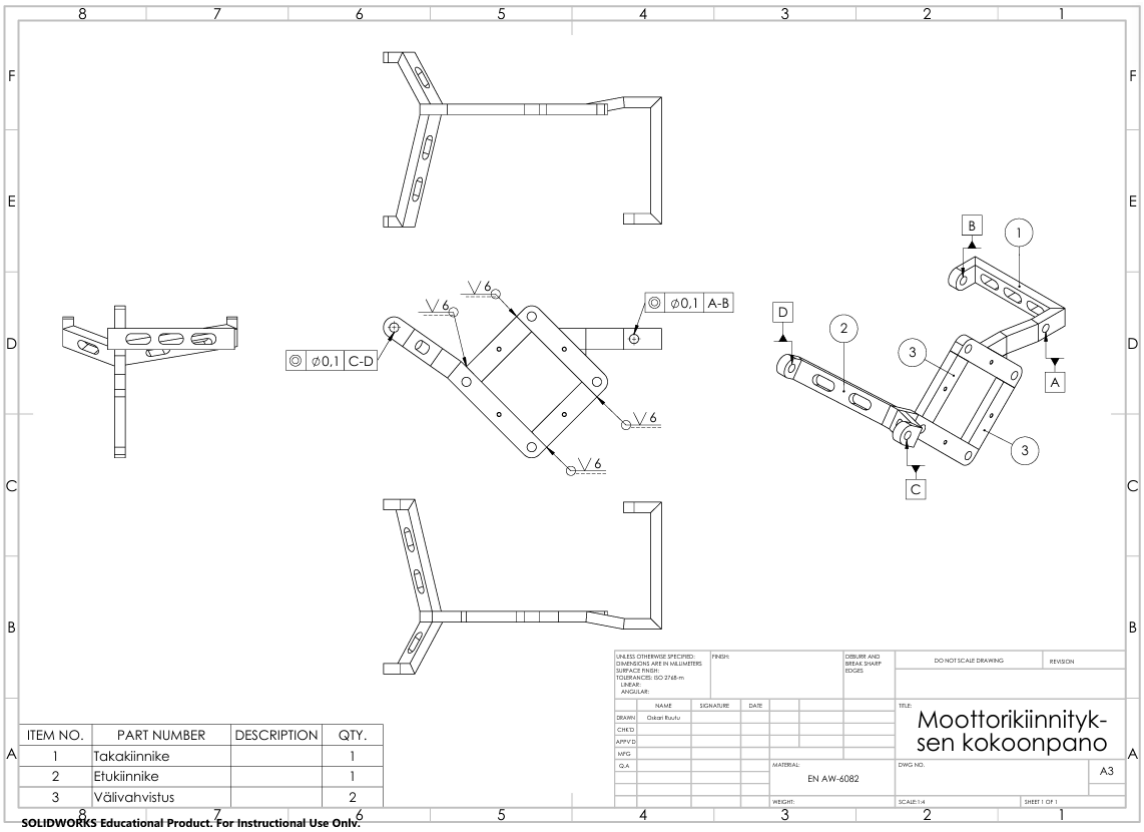
3.4 Viimeistely

Viimeistelyvaiheessa tehdään lopulliset valinnat valmistusteknisistä asioista. Tämän lisäksi tässä vaiheessa luodaan rakenteen valmistukselle alustava kustannusarvio.

3.4.1 Valmistustekniset suunnitelmat

Moottorikiinnityksen koko kantava rakenne on suunniteltu valmistettavaksi 15 x 30 mm standardimuotoisesta suorakaideprofiilista. Profiili leikataan sopivan muotoisiin osiin ja nämä osat hitsataan yhteen. Toinen vaihtoehto osien valmistukselle on koneistaminen, mutta tämä idea hylätään suuren materiaalihävikin vuoksi. Suunnittelussa on pyritty välttämään turhan tiukkoja toleransseja valmistusvaiheen sujuvoittamiseksi. Tietyissä osissa on kuitenkin jouduttu käyttämään tiukkoja mitta- ja kulmatoleransseja, jotta moottorin ja rungon kiinnityspulttien reiät osuvat kohdalleen. Standardiprofiilin käyttö sekä liian tiukkojen toleranssien käytön välttäminen ovat muutamia esimerkkejä siitä, miten DFMA-näkökulmia on huomioitu suunnitteluprosessin aikana. (Eskelinen ja Karsikas 2013b, s.7–11.)

Moottorikiinnityksen kantava rakenne koostuu yhteensä 15 osasta, jotka muodostavat kolme osakokoonpanoa: Etukiinnike, takakiinnike sekä välivahvistukset. Kuvassa 15 on esitetty moottorin kantavan rakenteen kokoonpanopiirustus, joka koostuu kolmesta edellä mainitusta osakokoonpanosta.



Kuva 15. Moottorikiinnityksen kantavan rakenteen kokoonpanopiirustus

Ketjunsuoja valmistetaan eri profiilista kuin kantava rakenne. Ketjunsuoja valmistetaan yhden millimetrin paksuisesta ohutlevystä, joka on myös standardimuotoinen profiili. Materiaali on sama kuin kiinnityksen kantavalla rakenteella. Ketjunsuoja koostuu kolmesta osasta: ketjunsuojan pohjalevy, -sylinteri sekä -kansi (Liitteet 19, 20 ja 21). Ketjunsuojan kansi ja -pohjalevy valmistetaan leikkaamalla nämä ohutlevystä. Ketjunsuojan sylinteriosa valmistetaan leikkaamalla sopivan kokoinen pala ohutlevystä ja taivuttamalla tämä sylinterimuotoon. Nämä ketjunsuojan kolme osaa hitsataan yhteen. Ketjunsuoja voitaisiin valmistaa myös koneistamalla tämä yhdestä alumiiniharkosta. Tällä tavalla saataisiin huomattavasti tarkempi lopputuote. Tässä koneistamisessa menisi tosin huomattavan paljon materiaalia hukkaan, ja näin ollen koneistaminen olisi huomattavasti kalliimpaa. Ketjunsuojassa ei ole tarvetta käyttää tiukkoja toleransseja, joten idea koneistamisesta valmistusmenetelmänä hylätään.

Sopivia tärinänvaimentimia ei löytynyt valmiina komponenttina, joten ne joudutaan valmistamaan itse. Tärinänvaimentimet laser-leikataan 5 mm paksuisesta luonnonkumimatosta. Tässäkään tapauksessa ei ole tarvetta käyttää tiukkoja toleransseja.

3.4.2 Alustava kustannusarvio

Lasketaan moottorikiinnitykselle alustava kustannusarvio (Taulukko 8). Materiaalitarvetta ja työtuntien määrää ei voi tietää tarkasti ennen valmistusta. Materiaalia ja työtunteja saattaa mennä hukkaan esimerkiksi virhekappaleiden takia. Tämän takia taulukoidut arvot ovat arvioita, eikä tarkkoja laskelmia. Taulukon omat arviot perustuvat usean internet-lähteen vertailuun.

Taulukko 8. Alustava kustannusarvio

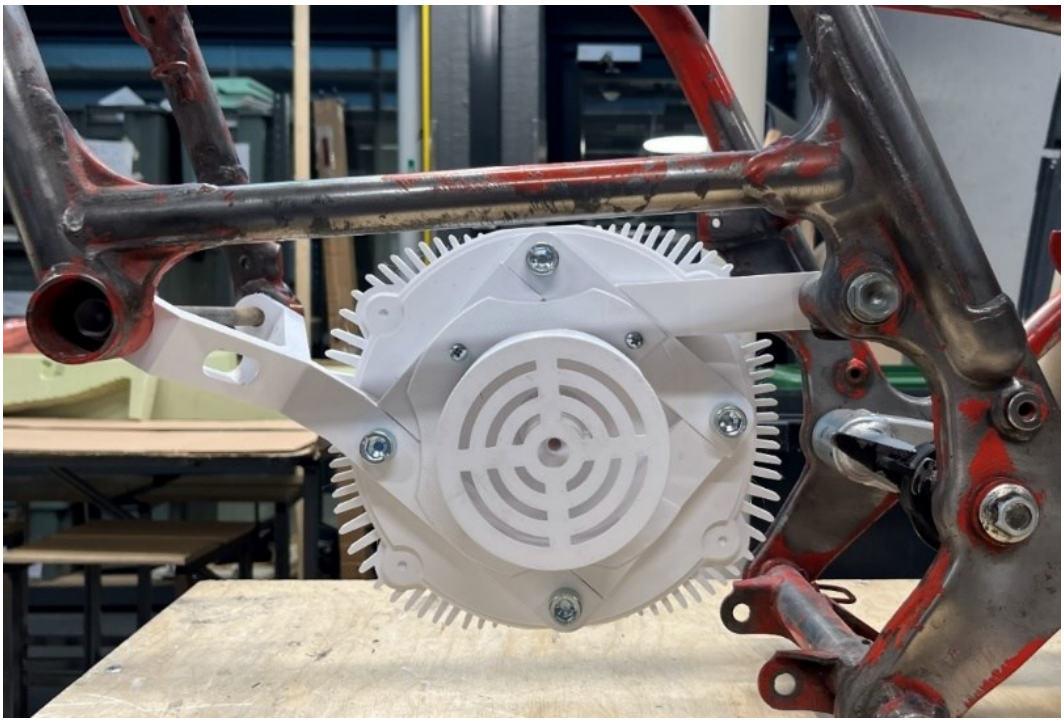
Komponentti	**Hinta**	**Lähde**
Alumiiniprofiili 15 x 30 mm	72 €	Alumeco Group 2025
Alumiinilevy 1 mm	20–40 €	JHC 2025
Luonnonkumi	20–40 €	Oma arvio
Ketjunsuojan kiinnityspultit	5 €	Puuilo 2025
Osien työstö ja asennus (10 h, 80 €/h)	800 €	Oma arvio
Yhteensä	917–957 €	

Taulukosta 8 nähdään, että alustavan kustannusarvion kokonaishinta jää reilusti alle vaatimuslistan 2000 euron kustannusrajan. Tämäkin raja on määritelty vain toiveeksi, eikä vaatimukseksi. Kustannusarviosta selviää, että osien työstö ja asennus ovat selkeästi suurin kuluerä (Taulukko 8). Tämä arvo on laskettu siten, että kaikki osien työstö jouduttaisiin teettämään jollakin ulkopuolisella taholla. JHC kuitenkin pyrkii, ja mitä todennäköisemmin onnistuu, valmistamaan osat JHC:n omien työntekijöiden voimin. Tällöin osien työstön ja asennuksen hinta laskee huomattavasti. Työ on siis kustannusten puolesta onnistunut.

3.5 3D-tulostettu prototyyppi

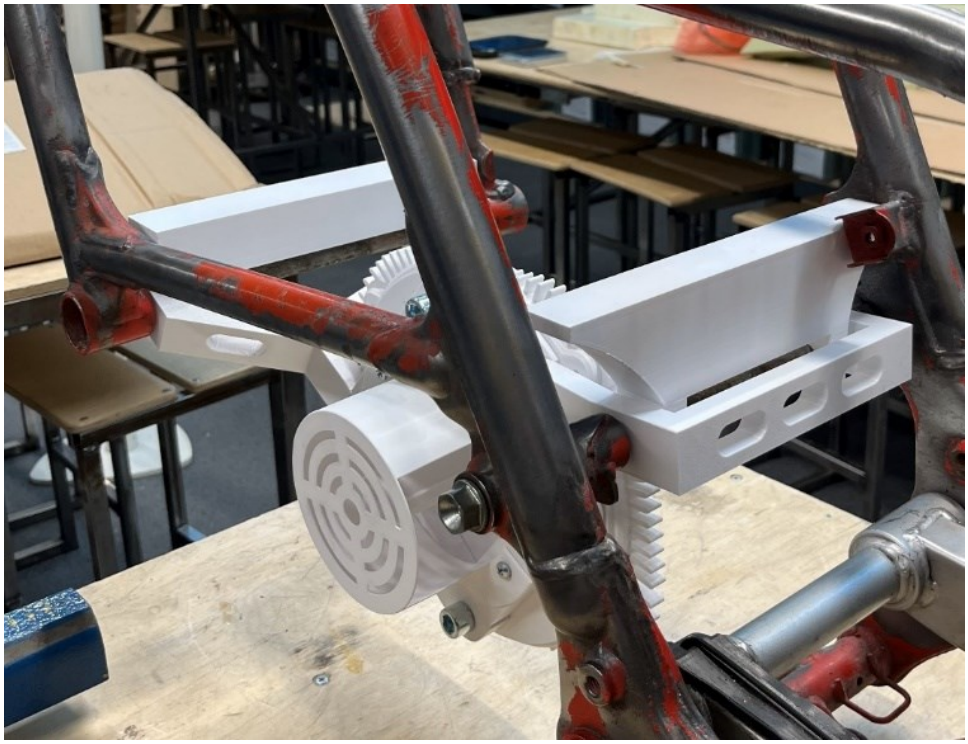
Moottorin kiinnitysrakenteesta luodaan prototyyppi 3D-tulostamalla ennen lopullisen rakenteen valmistamista. Tällä prototyypillä pyritään varmistamaan rakenteen lopullinen mitoitus ja geometria. Prototyyppistä pyritään myös etsimään mahdollisia virheitä, jotta nämä voitaisiin korjata ennen rakenteen valmistamista.

Prototyypistä puuttuu kuvassa 12 esitetty moottorikiinnityksen pieni vahvistuspala sekä kumiset tärinänvaimentimet. Tämän lisäksi koko moottoria ei ole 3D-tulostettu, vaan ainoastaan moottorin kiinnityspinta. Nämä seikat eivät kuitenkaan ole oleellisia moottorikiinnityksen geometrian ja mitoituksen oikeellisuuden kannalta Moottorikiinnityksen 3D-tulostettu prototyyppi osana moottoripyörän runkoa on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Moottorikiinnityksen 3D-tulostettu prototyyppi

Sähkömoottoripyörän akusto tulee kiinnittymään runkoon samoilla kiinnitysakseleilla kuin sähkömoottori. Kuvassa 17 on esitetty sähkömoottorin kiinnityksen lisäksi akuston alustava kiinnitysrakenne. Akusto kiinnittyy moottorikiinnikkeiden sisäpuolelle (Kuva 17). Akuston kiinnitys on kuvassa hyvin keskeneräinen, mutta akuston kiinnityskohta runkoon on tämän työn kannalta oleellinen asia.



Kuva 17. Moottorikiinnityksen prototyyppi sekä akuston alustavat kiinnikkeet

Prototyypissä ja tämän asennuksessa ei huomattu virheitä. Prototyypin perusteella voidaan siis todeta, että rakennetta ei tarvitse enää muuttaa ja rakenne voidaan valmistaa. Lopullista moottorikiinnitysrakennetta ei saada valmistettua tämän työn aikataulun puitteissa. Lopulliset havainnot ja huomiot moottorikiinnityksen mahdollisista jatkokehityskohteista saadaan vasta oikean rakenteen valmistuttua.

4 Tulosten pohdinta ja johtopäätökset

Tässä kappaleessa tarkastellaan työn tuloksia. Työn tuloksien perusteella pyritään arvioimaan työn onnistumista sekä mahdollisia jatkokehityskohteita. Tämän lisäksi tässä kappaleessa arvioidaan tuloksien luotettavuutta, yleistettävyyttä sekä hyödynnettävyyttä.

4.1 Tulosten tarkastelu

Työn suunnitteluprosessin ohjenuorana on toiminut vaatimuslista, joten työn tuloksen onnistumista on helppo arvioida vertaamalla tuloksia vaatimuslistaan. Sähkömoottorin kiinnitys toteuttaa kaikki vaatimuslistan vaatimukset. Vaatimuslistassa on vaatimuksien lisäksi myös toiveita. Näistä toiveista vain yhden toteutumista ei voida varmistaa ennen moottoripyörän lopullista kokoamista. Tämän toiveen mukaan moottoripyörän massan tulisi olla mahdollisimman pieni, eikä tämä saisi ylittää alkuperäisen moottoripyörän massaa. Tätä ei voida varmistaa, koska moottoripyörän kokonaismassa ei ole riippuvainen pelkästään sähkömoottorin kiinnityksestä. Sähkömoottorin kiinnitys on tosin pyritty suunnittelemaan mahdollisimman kevyeksi, ja kokonaismassa jää todennäköisesti alle alkuperäisen kokonaismassan. Työ on siis näillä perusteilla onnistunut.

4.1.1 Miten työ vastaa tutkimuskysymyksiin?

Työn ensimmäinen tutkimuskysymys on:

- Miten sähkömoottori tulisi kiinnittää runkoon toimivan kokonaisuuden saavuttamiseksi?

Työssä on löydetty sähkömoottorille kiinnitystapa, jolla saavutetaan toimiva kokonaisuus. Tämä kiinnitystapa on esitetty kuvassa 13 virtuaalimallin muodossa.

Työn toinen tutkimuskysymys on:

- Miksi sähkömoottorin kiinnitys kannattaa suunnitella VDI 2221-suunnitteluprosessia hyödyntäen?

Tässä työssä päästään VDI 2221-prosessin myötä haluttuun lopputulokseen. VDI 2221 antaa selkeät raamit suunnitteluprosessin kululle, mikä helpottaa sähkömoottorin kiinnityksen suunnittelua huomattavasti.

4.2 Jatkokehityskohteet

Lopullista kiinnitysrakennetta ei keritty valmistamaan tämän työn aikana. Kun tämä valmistetaan, rakennetta on syytä testata vielä tarkemmin. Rakenteen lujuus on varmistettu FE-analyysillä, mutta rakenteen käyttäytymistä vaihtelevan kuorman alaisena ei pysty täysin ennustamaan. Sähkömoottoripyörä tulisi kasata täysin valmiiksi ja testata, kuinka jämäkkä moottorikiinnitys on, kun moottorin kierroksia kiihdytetään ja lasketaan vaihtelevasti. Tämän testin aikana tulisi tarkkailla erityisesti sitä, että pääseekö kiinnitysrakenne heilumaan missään suunnassa, vai onko rakenne täysin tukeva. Rakenne ei oletettavasti pääse liikkumaan missään suunnassa, mutta tämä täytyisi vielä varmistaa kyseisellä testillä. Saman testin aikana olisi syytä tarkkailla, kuinka hyvin kumiset tärinänvaimentimet vaimentavat moottorin aiheuttamaa värähtelyä. Mikäli tärinänvaimentimet toimivat hyvin, moottoripyörän rungon ei tulisi värähdellä paljoa.

Myös rakenteen valmistusvaiheessa on vielä jatkokehitettävää. Rakenne valmistetaan leikkaamalla 15 x 30 mm standardimuotoista lattaprofiilia sopiviin paloihin, ja hitsaamalla nämä palat yhteen. Näitä osia on moottorikiinnityksen kantavassa rakenteessa yhteensä 15 kappaletta, eli rakenteessa on paljon hitsattavaa. Olisi syytä tutkia, löytyykö tämän rakenteen valmistamiseen jotakin tehokkaampaa valmistusmenetelmää. Vaihtoehtoisesti rakenteen geometriaa voitaisiin pyrkiä muokkaamaan siten, että tämän valmistamiseen ei tarvita näin montaa erillistä osaa. Rakenteen geometria on tosin pyritty pitämään mahdollisimman yksinkertaisena tässä työssä.

4.3 Luotettavuuden arviointi

Suunnittelua koskevien tutkimuksien toistettavuuden arviointi ei ole täysin yksikäsitteistä. Tutkimuksessa noudatetaan VDI 2221-suunnitteluprosessia, joka ohjaa suunnittelun kulkua. Tämä prosessi osaltaan varmistaa, ettei mitään oleellista jää huomiotta suunnitteluprosessin aikana. Mikäli tämä tutkimus toistettaisiin samaa metodiikkaa ja vaatimuslistaa käyttäen, on

epätodennäköistä, että toisessa tutkimuksessa päädyttäisiin tismalleen samanlaiseen lopputulokseen. Suunnittelu ja ideointi ovat vääjäämättä subjektiivisia toimenpiteitä, jonka takia samojen metodien noudattaminen ei takaa samanlaisia tuoteideoita. Tätä tutkimusta toistettaessa päädyttäisiin tosin väkisinkin samankaltaiseen lopputulokseen, sillä vaatimuslistan vaatimukset rajoittavat mahdollisien ratkaisujen kirjoa.

Validiteetti on tässä tutkimuksella hyvällä tasolla. Validiteetti on varmistettu pitämällä työn teettäjä ajan tasalla koko suunnitteluprosessin ajan. Työn kehitysvaihe on hyväksytetty työn teettäjällä säännöllisin väliajoin. Näin voidaan varmistua, että tutkitaan oikeaa asiaa ja tutkimus etenee oikeaan suuntaan.

Muutokset vaatimuslistaan aiheuttaisi suurimmat muutokset lopulliseen moottorikiinnitysrakenteeseen, eli vaatimuslista on herkkyyden kannalta kriittisin komponentti. Tutkimuksessa on käytetty FE-analyysiä rakenteen lujuuslaskennassa. FE-analyysi on herkkyyden näkökulmasta haasteellinen. FE-analyysin elementtien koolla ja muodolla sekä kuormitustilanteella ja reunaehdoilla on suuri vaikutus analyysin lopputulokseen. Tästä syystä FE-analyysejä on suoritettu useita kappaleita erikokoisilla elementeillä sekä erilaisilla kuormitustilanteilla. Näin voidaan varmistua FE-analyysin tuloksien paikkansapitävyydestä.

4.4 Tulosten yleistettävyys ja hyödynnettävyys

Työn tuloksista hyötyy pääasiallisesti JHC. Tuotetut moottorikiinnityksen 3D-mallit menevät tuotantoon tämän työn julkaisun jälkeen. Tämä edistää moottoripyörän sähköistysprojektia huomattavasti.

Työn tutkimuksellisena hyötynä syntyy useita uusia tutkimusaiheita. Yksi näistä on jatkokehityskohteissakin mainittu kiinnitysrakenteen käyttäytyminen dynaamisen kuormituksen alaisena. Tämän lisäksi koko sähköisen voimalinjan käyttäytymistä kokonaisuutena täytyisi tutkia, jotta moottoripyörän käyttömukavuudesta ja turvallisuudesta voidaan varmistua. Tässä työssä ei ole perehdytty muun muassa sähköjohtimien turvallisuuteen.

Tästä työstä voi myös olla yleistä hyötyä vastaavanlaisissa moottoripyörän sähköistysprojekteissa. Työn ratkaisu ei suoranaisesti ole universaali, mutta työn metodiikkaa sekä tuloksia voidaan pitää ohjenuorana vastaavanlaisissa projekteissa. Tämän työn

kirjallisuuskatsauksessa on selvitetty tieliikennekelpoisen moottoripyörän sähköistämistä koskevaa lainsäädäntöä. Nämä direktiivit ohjaavat myös muita vastaavanlaisia projekteja.

5 Yhteenveto

Tarve suunnitella moottoripyörän sähkömoottorin kiinnitys on lähtöisin JHC:n moottoripyörän sähköistysprojektista. Projekti on jaettu kahteen kandidaatintyöhön. Toisessa työssä suunnitellaan akuston kiinnitys. Yhdessä nämä työt muodostavat suunnitelmat, joiden pohjalta moottoripyörä saadaan muutettua sähkökäyttöiseksi sekä muutoskatsastettua tieliikennekelpoiseksi.

Tässä työssä on tutkittu moottorikiinnityksen suunnittelua VDI 2221-suunnitteluprosessia hyödyntäen. Työn kirjallisuuskatsauksessa perehdytään suunnittelua ohjaaviin standardeihin, eli tieliikennekelpoisia moottoripyöriä koskeviin määräyksiin. Moottorikiinnityksen suunnittelussa huomioidaan myös DFMA-näkökulmia. Alustavan moottorikiinnityksen virtuaalimallin valmistuttua tämän lujuusominaisuuksia arvioidaan FE-analyysillä. Lopullinen virtuaalimalli syntyy FE-analyysiin pohjautuvista, optimointiin tähtäävistä muutoksista.

Tämän työn aikataulun puitteissa ei ole keretty valmistamaan lopullista kiinnitysrakennetta. Rakenteesta on tosin 3D-tulostettu prototyyppi. Tämän prototyypin pohjalta voidaan todeta, että virtuaalimallissa ei ole selkeästi havaittavia mitoitusvirheitä. Työssä on siis luotu kaikki tarvittavat virtuaalimallit sekä suunnitelmat, joiden pohjalta moottorikiinnitys pystytään valmistamaan. Työssä esitetty moottorikiinnitys valmistetaan sellaisenaan työn julkaisun jälkeen.

Moottorikiinnityksen valmistuttua sähkömoottoripyörää tulee testata vielä kokonaisuutena. Moottorikiinnityksen käyttäytymistä vaihtelevan kuormituksen alaisena ei pysty täysin ennustamaan. Vaikka kiinnityksen lujuus on varmistettu, kiinnitys voi päästä esimerkiksi liikkumaan hieman, kun moottorin kierroksia kiihdytetään ja lasketaan vaihtelevasti. Oletettavasti näin ei pääse tapahtumaan, ja kiinnitys käyttäytyy jämäkästi vaihtelevankin kuorman alaisena. Tätä ei tosin voida varmistaa muuten kuin konkreettisella testillä.

Lähteet

Alumeco Group. 2025. 30 x 15 mm EN AW-6082 alumiinilattaprofiili [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 20.5.2025]. Saatavilla: https://www.alumeco.fi/alumiini/tangot/lattaprofiili/en-aw-6082/30-x-15-mm/p/10001334/10004055

Arvo-Helat Oy. 2025. Kumiprikka ruuveille [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 12.2.2025]. Saatavilla: https://www.arvo-helat.fi/kumiprikka-ruuveille-9-0-4-3-x-1-0-mm-musta-p-358.html

Beam Dimensions. 2025. 6082 Alloy Aluminium Properties [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 7.4.2025]. Saatavilla: https://beamdimensions.com/materials/Aluminium/ADM_2015_Non-Welded/6082/#T6

Eskelinen, H. & Karsikas, S. 2013a. Vihreän Teknologian Näkökulmat Konstruktiomateriaalien Valinnassa. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 364 s.

Eskelinen, H. & Karsikas, S. 2013b. DFMA-Opas - Valmistus- Ja Kokoonpanoystävällisen Tuotteen Suunnittelu. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 115 s.

Glocon. 2025. ALUMIINI AW-6082 [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 3.3.2025]. Saatavilla: https://glocon.fi/tuote/aw-6082/

Hakala, M. K. 1986. Lujuusopin Elementtimenetelmä. 3. Painos. Espoo: Otakustantamo. 490 s.

IKH. 2025. LIERIÖERISTIN 1KPL 70X40XM12 UK/UK [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 12.2.2025]. Saatavilla: https://www.ikh.fi/fi/lierioeristin-1kpl-70x40xm12-uk-uk-tt153562a

LUT University. 2025. J. Hyneman Center (JHC) [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 25.5.2025]. Saatavilla: https://elut.lut.fi/fi/opintojen-ohjaus-ja-palvelut/j-hyneman-center-jhc

Mathers, G. 2002. The Welding of Aluminium and its Alloys. Cambridge: Woodhead Publishing. 247 s.

Pahl, G. & Beitz, W. 1990. Koneensuunnitteluoppi. 2. Painos. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus. 608 s.

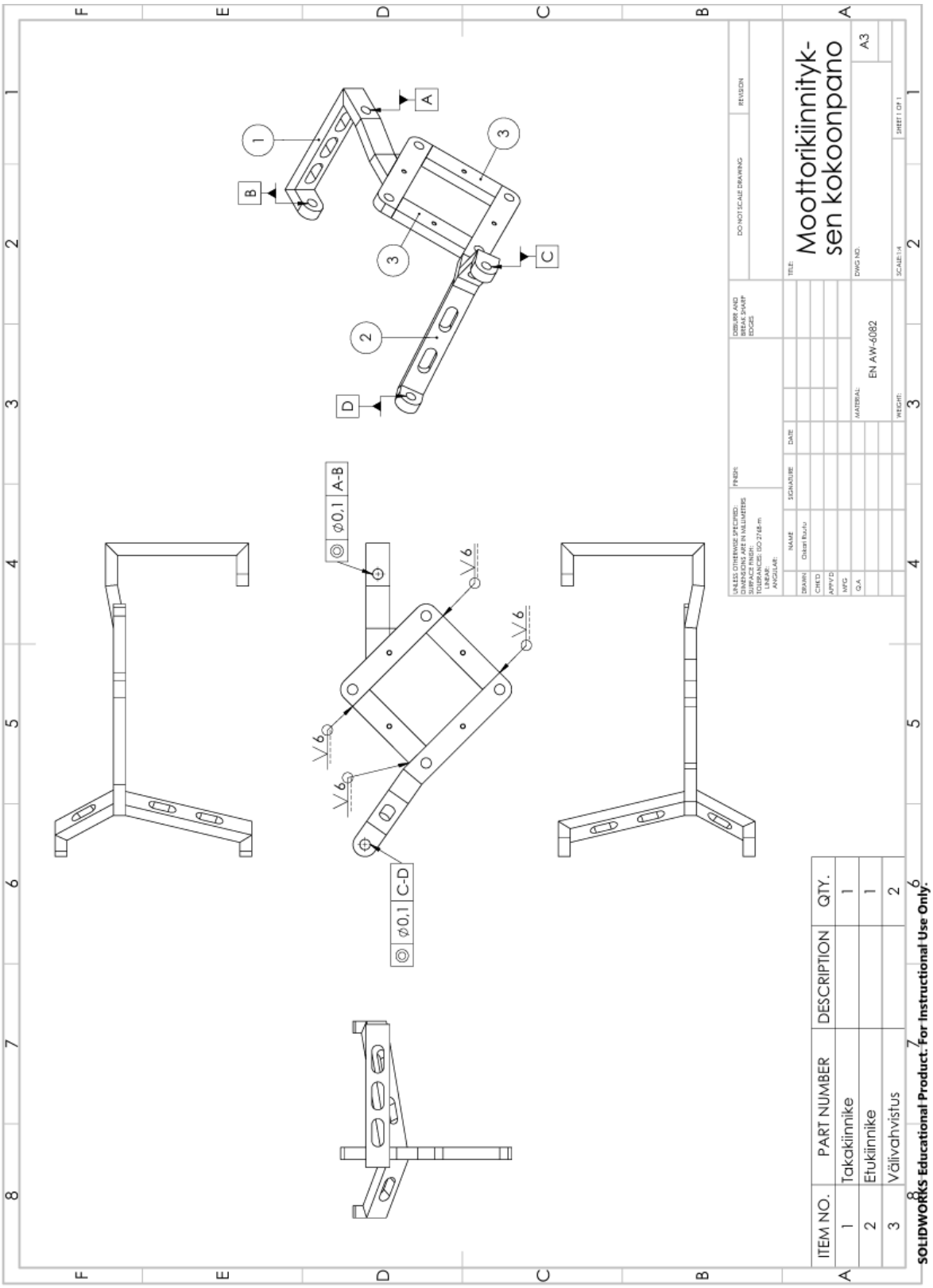
Puuilo. 2025. Kuusiokolopultti M6x12mm/30kpl sinkitty [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 20.5.2025]. Saatavilla: https://www.puuilo.fi/kuusiokolopultti-m6x12mm-30kpl-sinkitty?srsltid=AfmBOoqw6-21V7hG75-HIPQqsRtrpSjaOt0y5MGAKVof5vAFQmuCrQsM

Seppänen, R. Mannila, L. Kervinen, M. Parkkila, I. Konttinen, P. Karkela, L. & Yli-Kokko, T. 2013. MAOL Taulukot. Helsinki: Otava. 175 s.

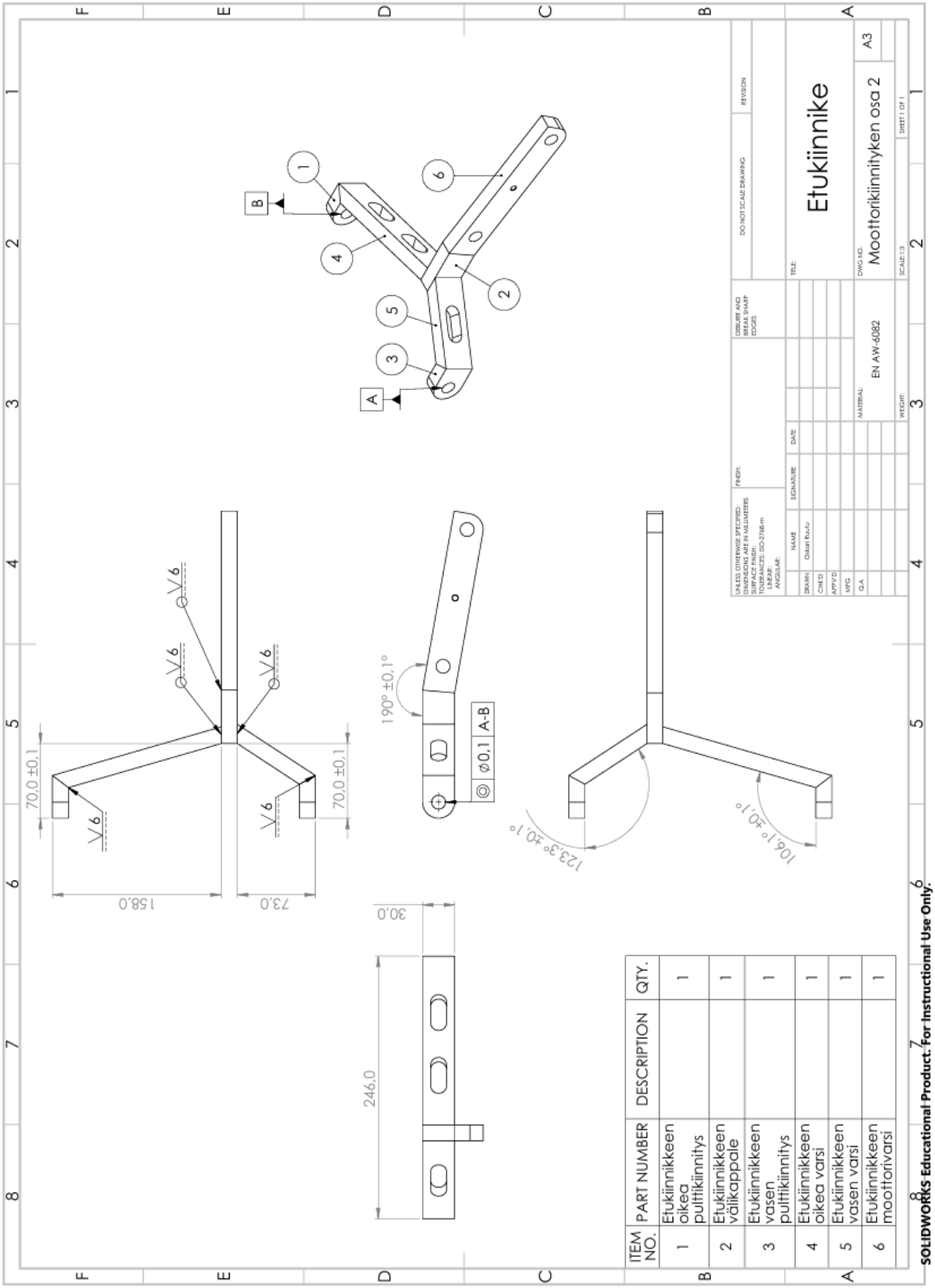
Smiths Metal. 2023. 6082 Aluminium Technical Datasheet [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 7.4.2025]. Saatavilla: https://www.smithmetal.com/pdf/aluminium/6xxx/6082.pdf

Traficom. 2021. L-luokan ajoneuvon rakenteen muuttaminen [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 20.5.2025]. Saatavilla: https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/L-luokan%20ajoneuvon%20rakenteen%20muuttaminen%20PERUSTELUMUISTIO.pdf

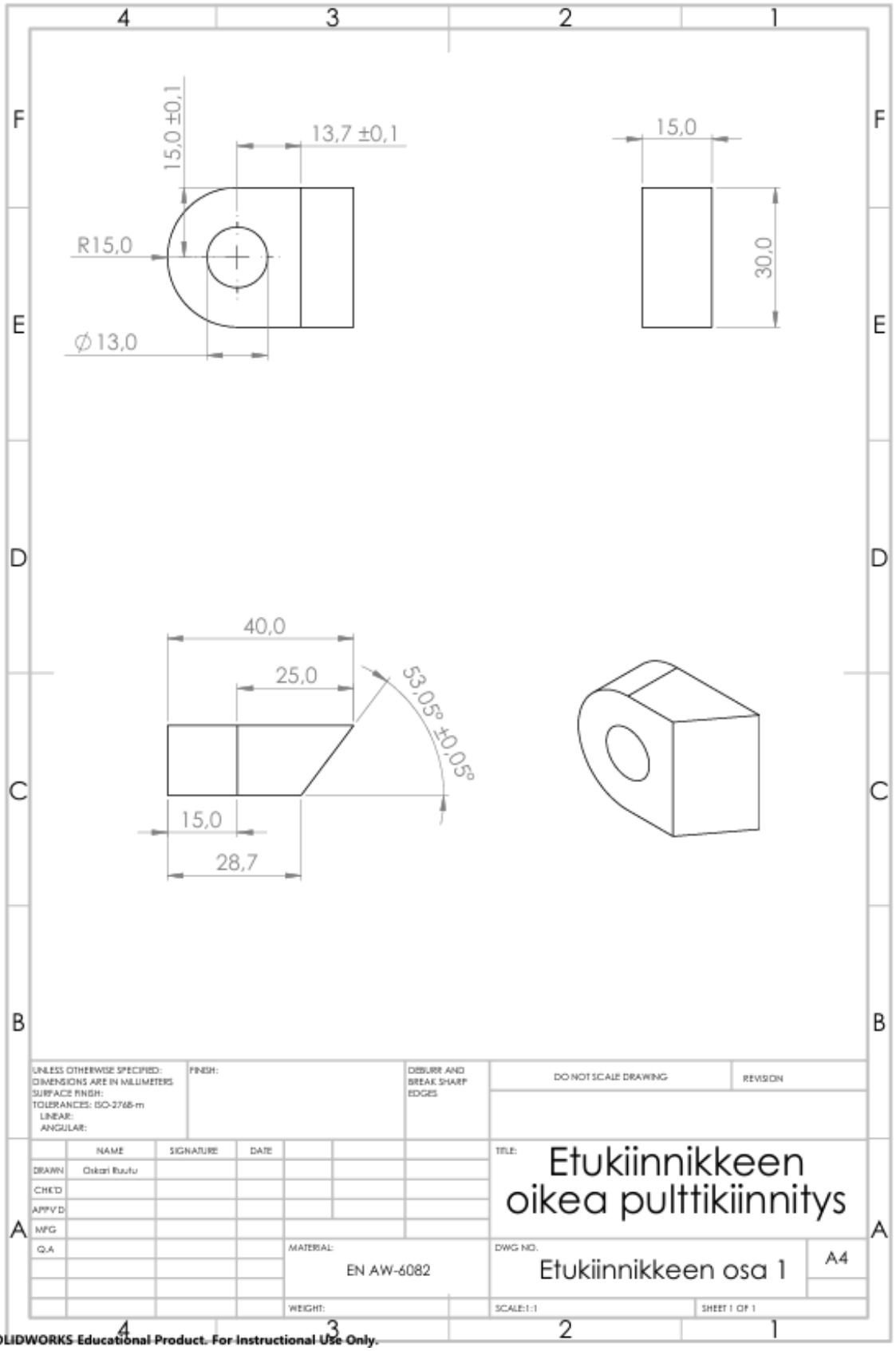
Liite 1. Moottorikiinnityksen kantavan rakenteen kokoonpanopiirustus



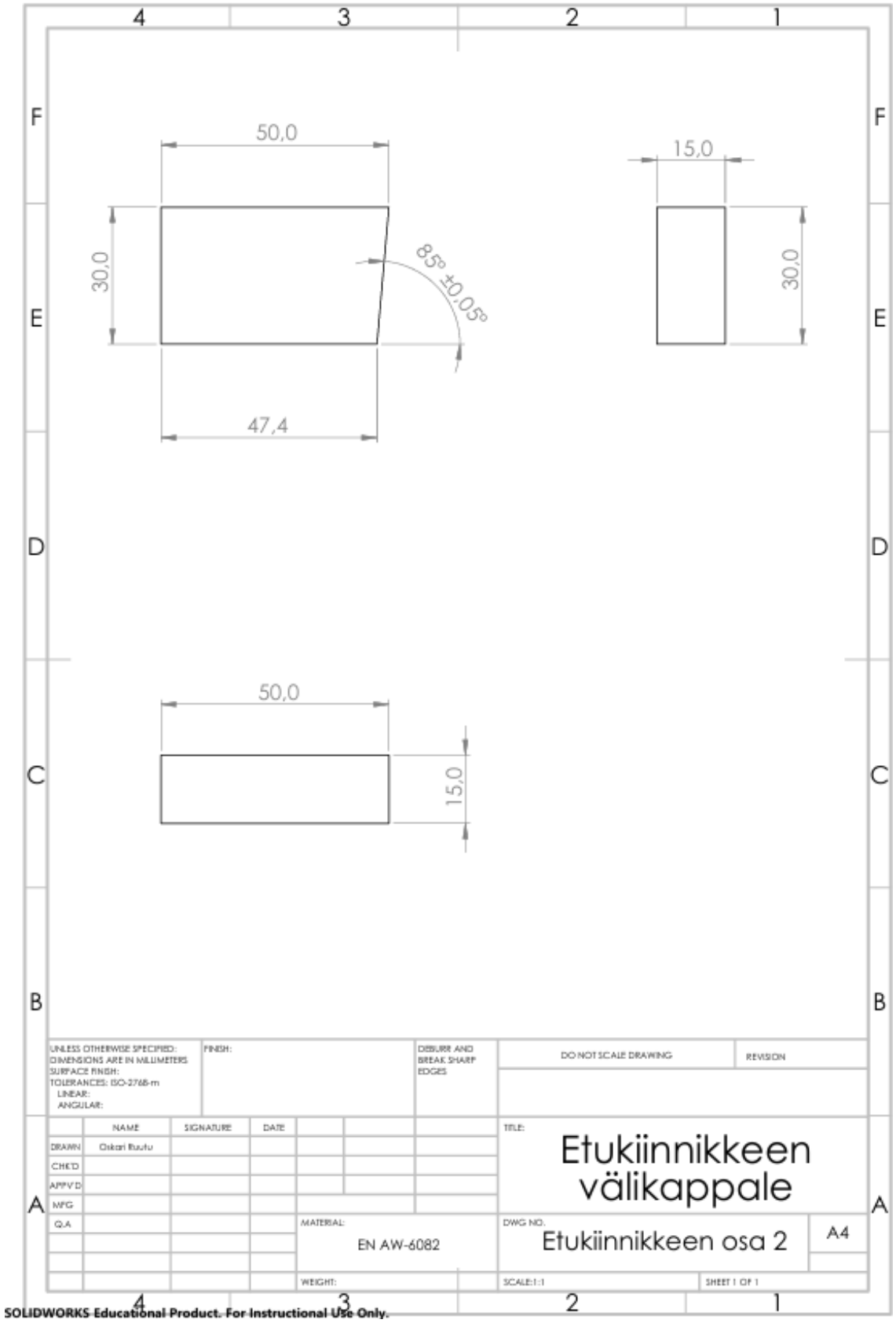
Liite 2. Etukiinnikkeen kokoonpanopiirustus



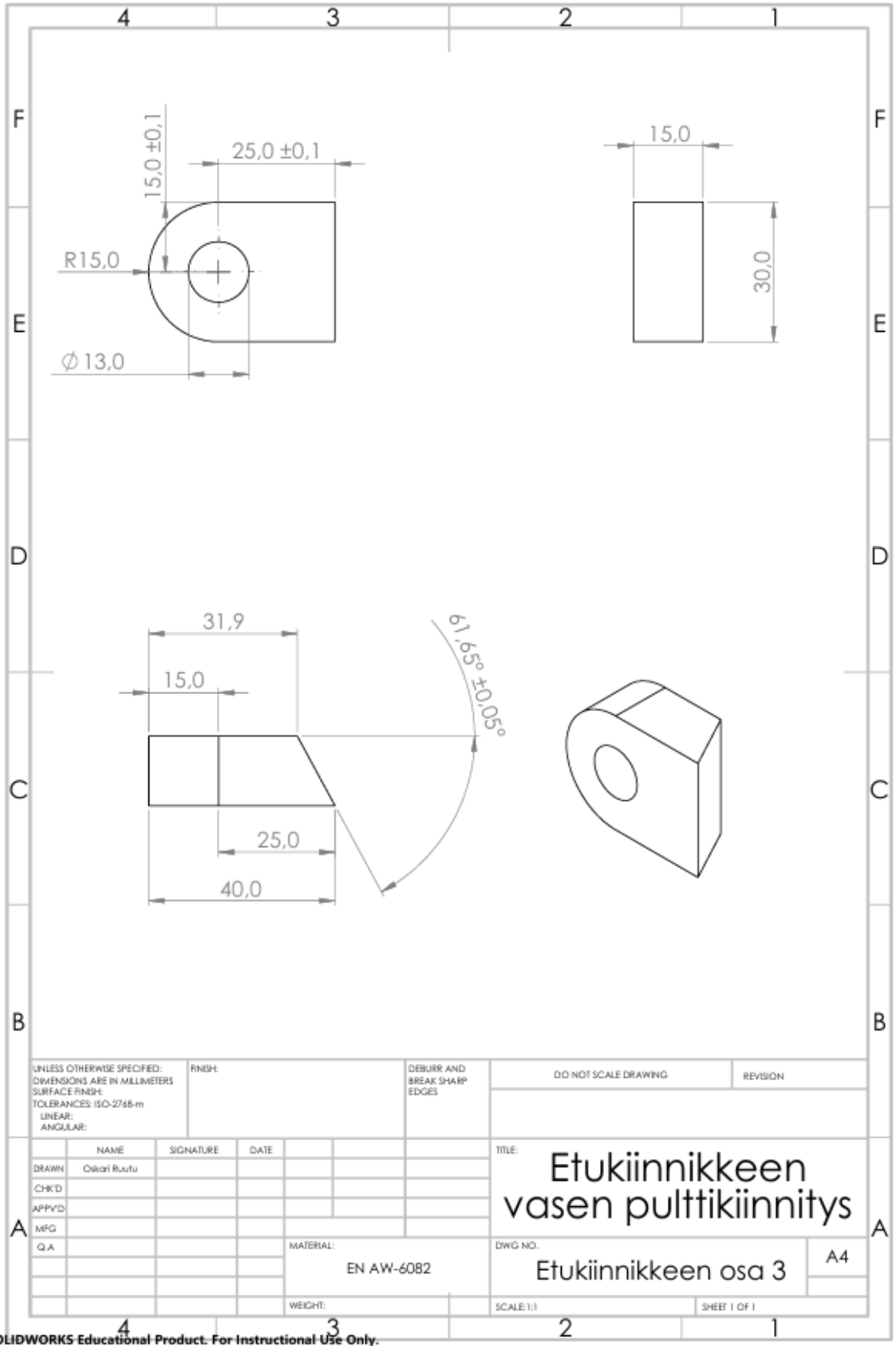
Liite 3. Etukiinnikkeen osan 1 valmistuspiirustus



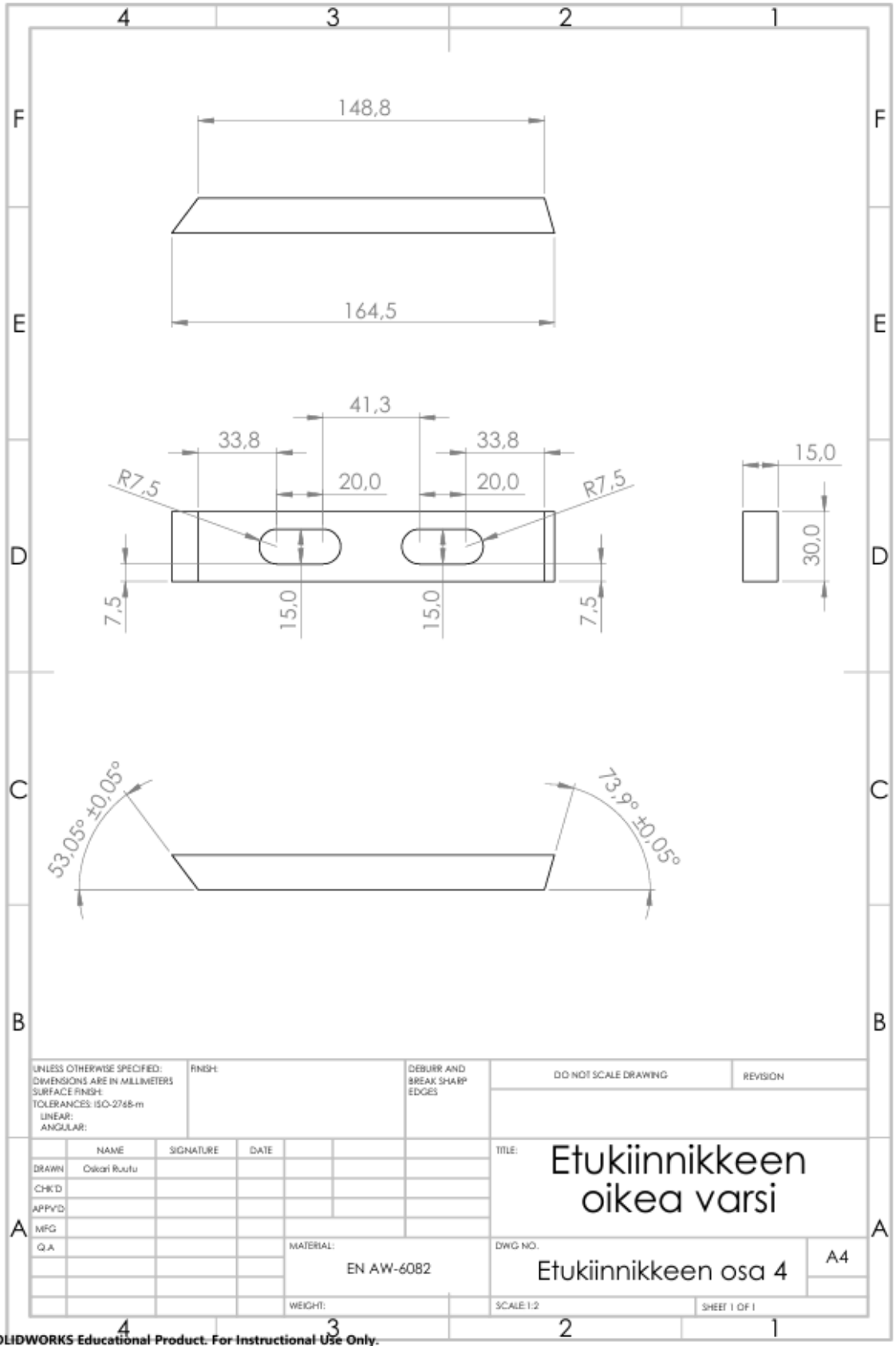
Liite 4. Etukiinnikkeen osan 2 valmistuspiirustus



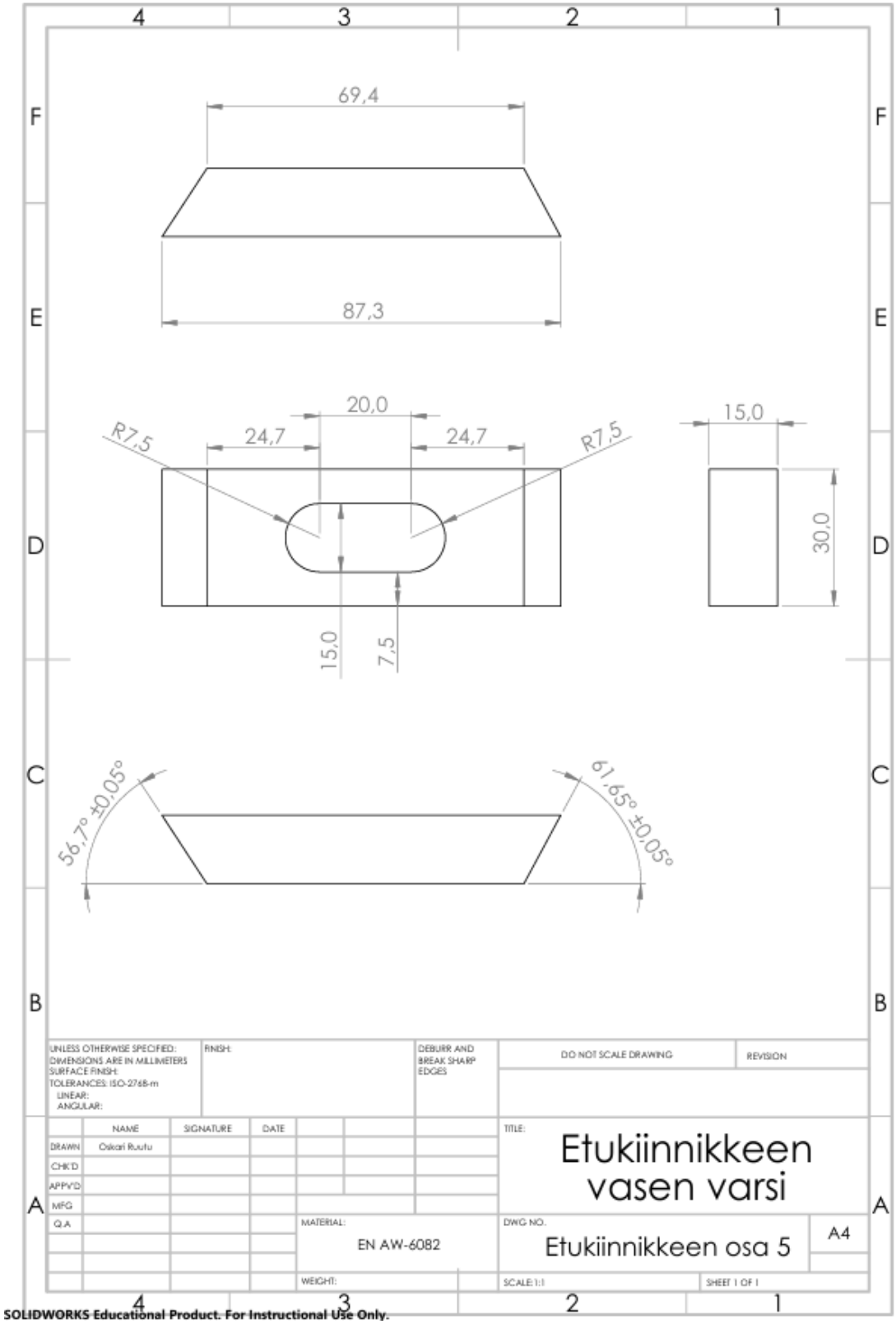
Liite 5. Etukiinnikkeen osan 3 valmistuspiirustus



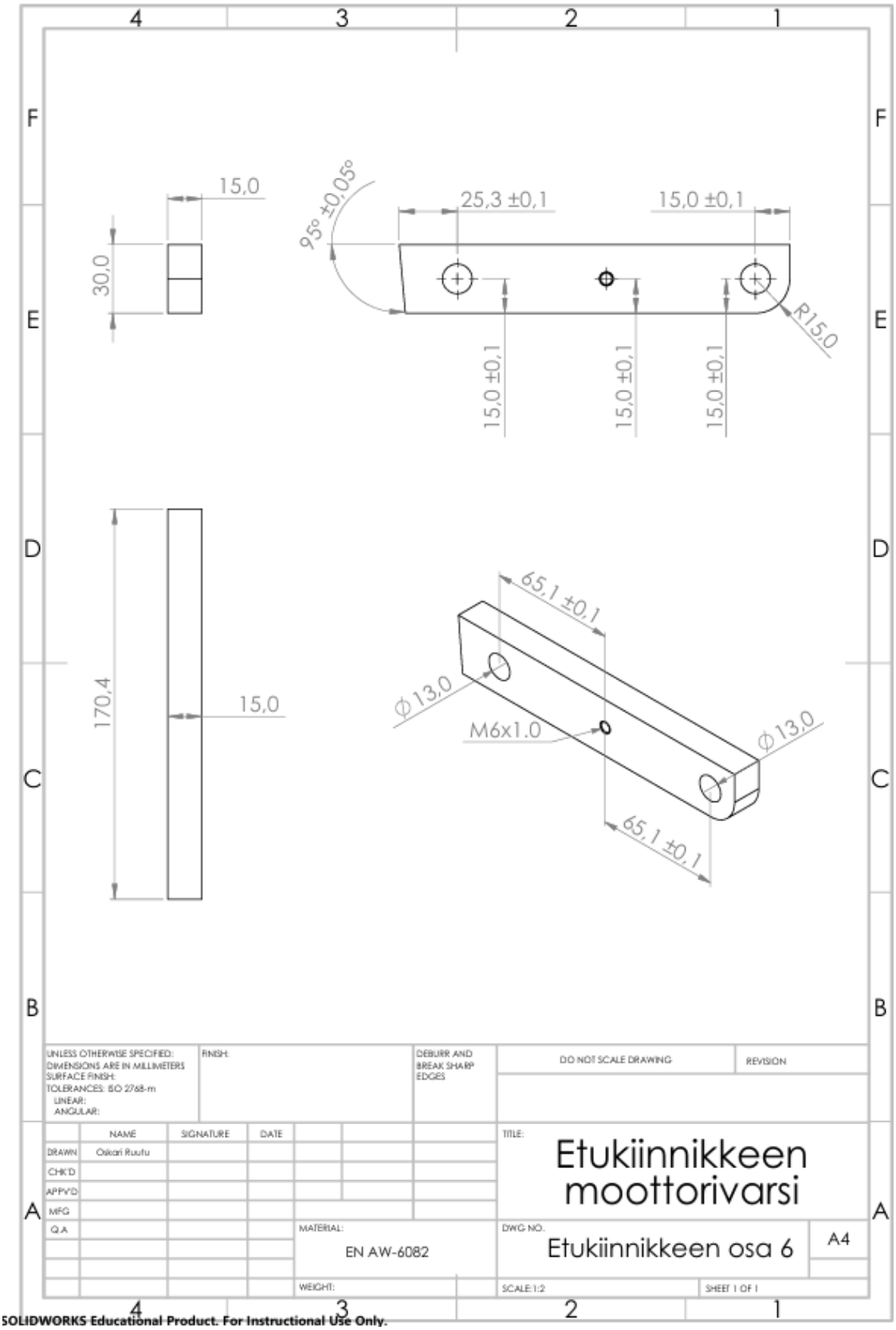
Liite 6. Etukiinnikkeen osan 4 valmistuspiirustus



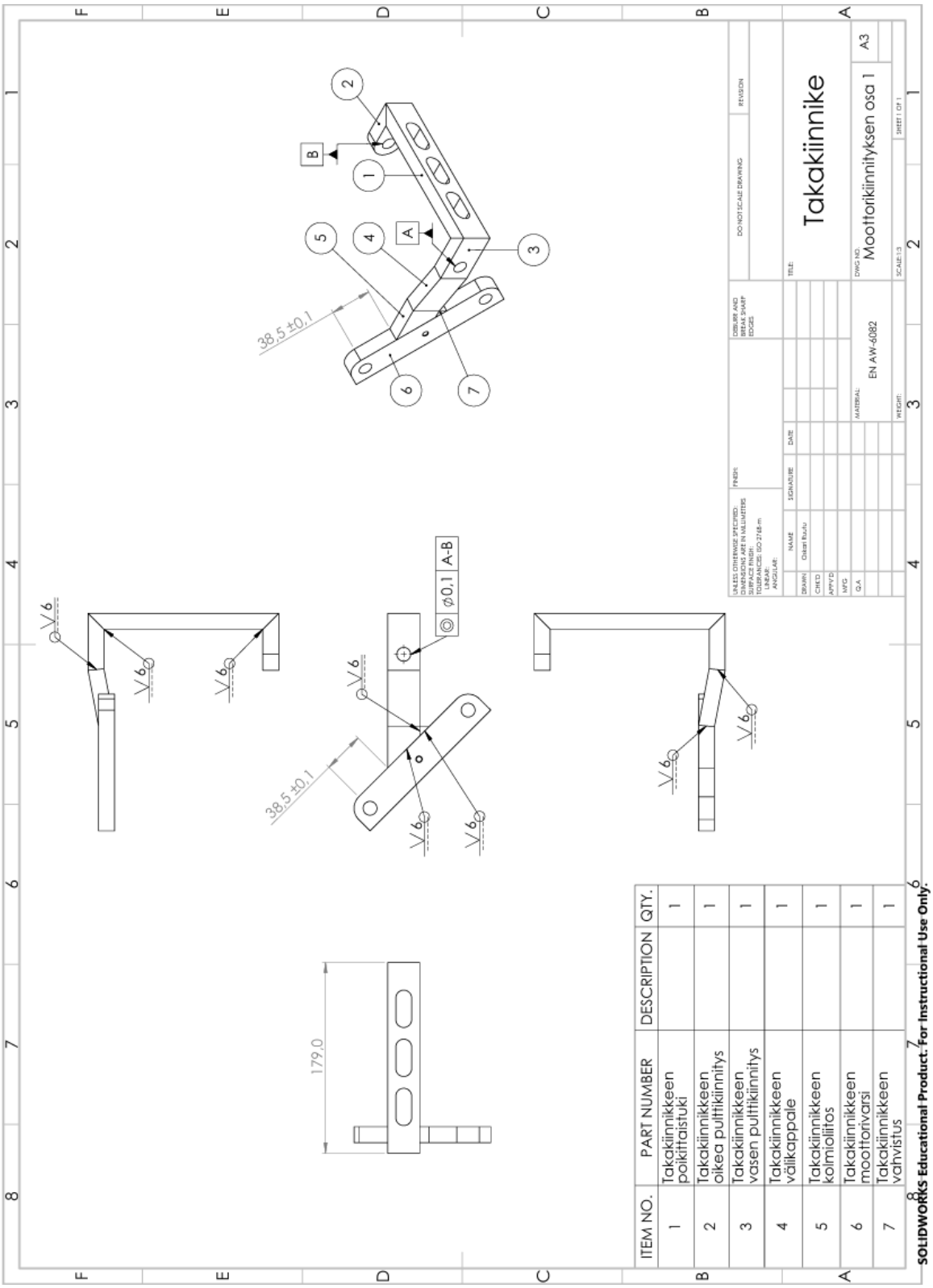
Liite 7. Etukiinnikkeen osan 5 valmistuspiirustus



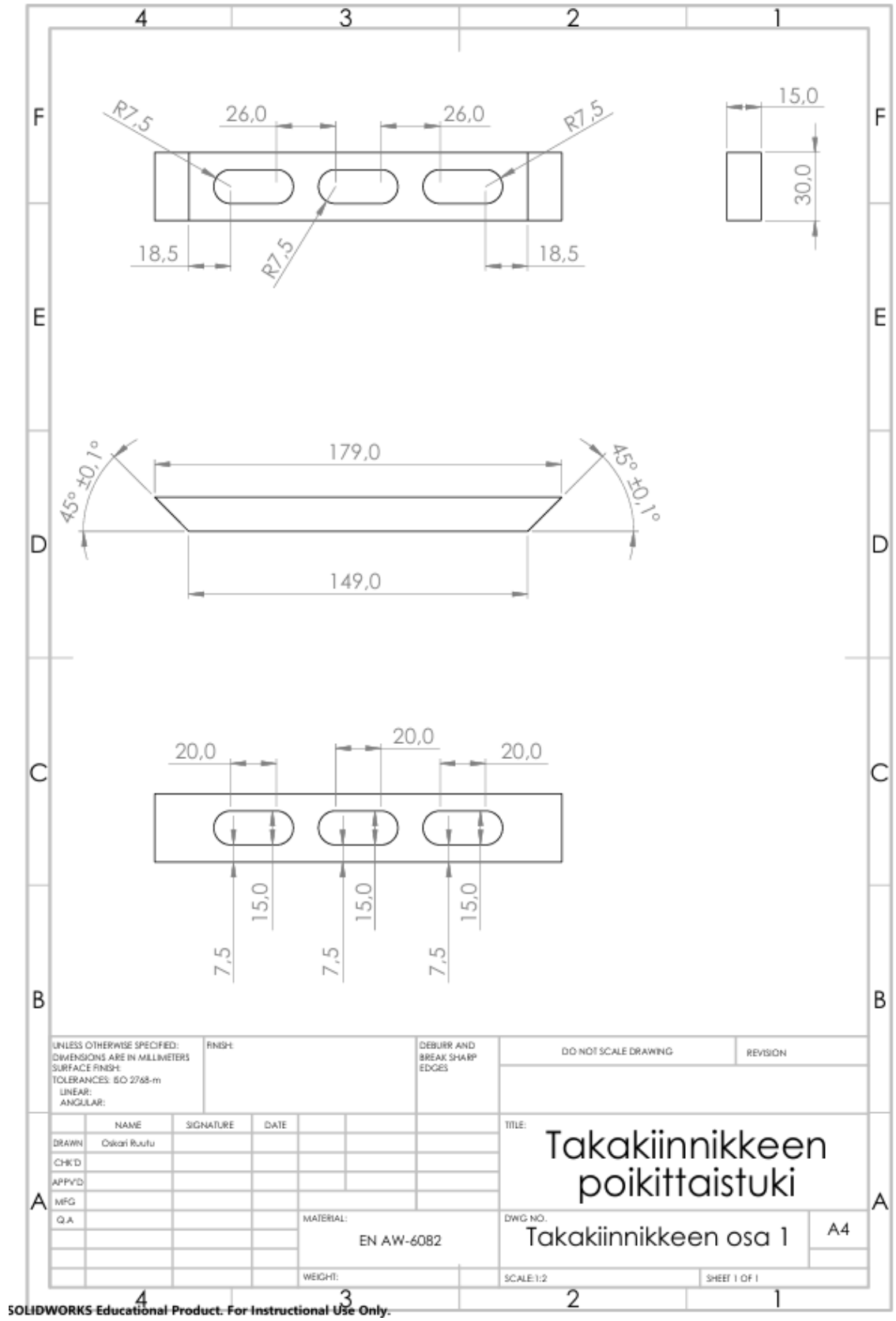
Liite 8. Etukiinnikkeen osan 6 valmistuspiirustus



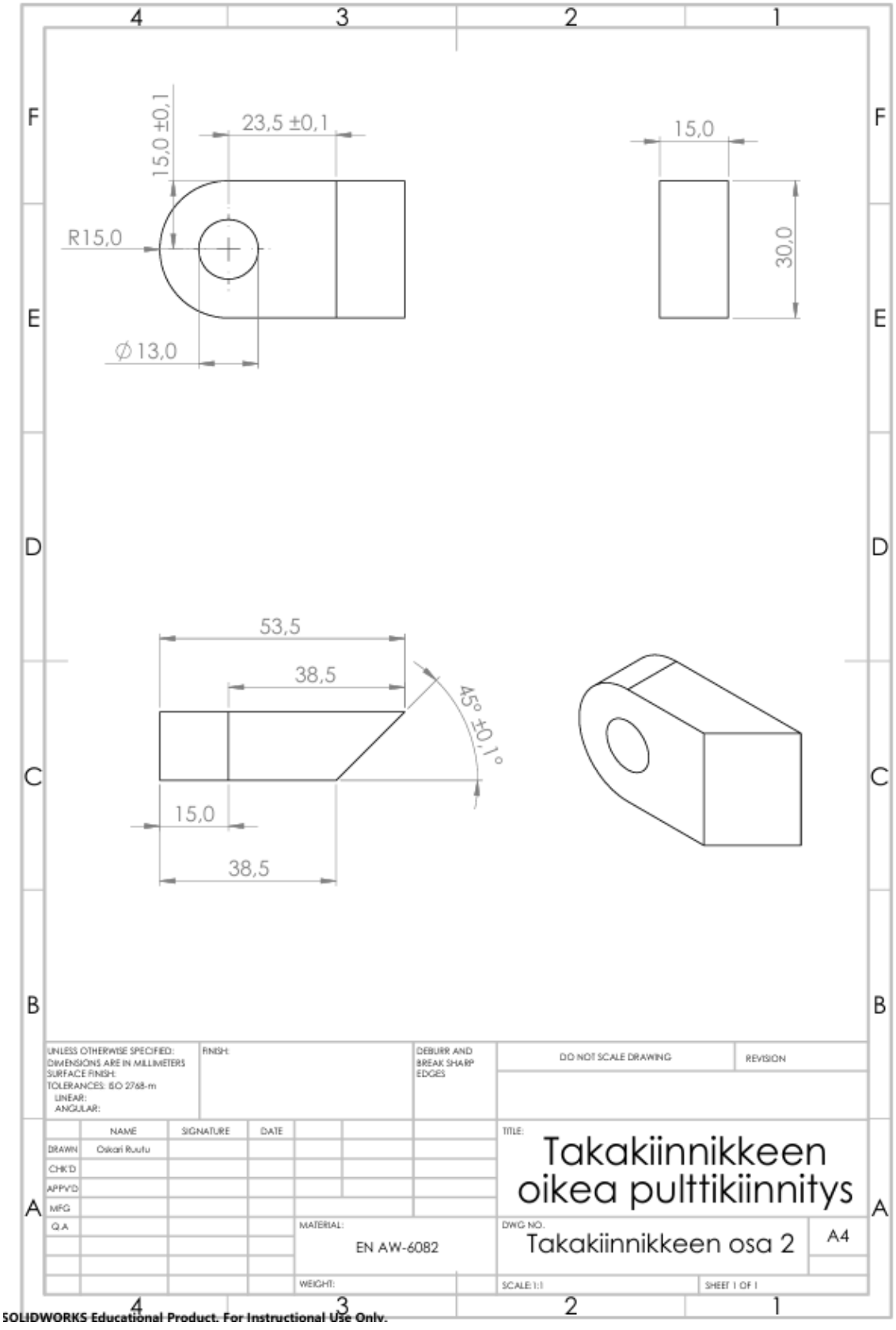
Liite 9. Takakiinnikkeen kokoonpanopiirustus



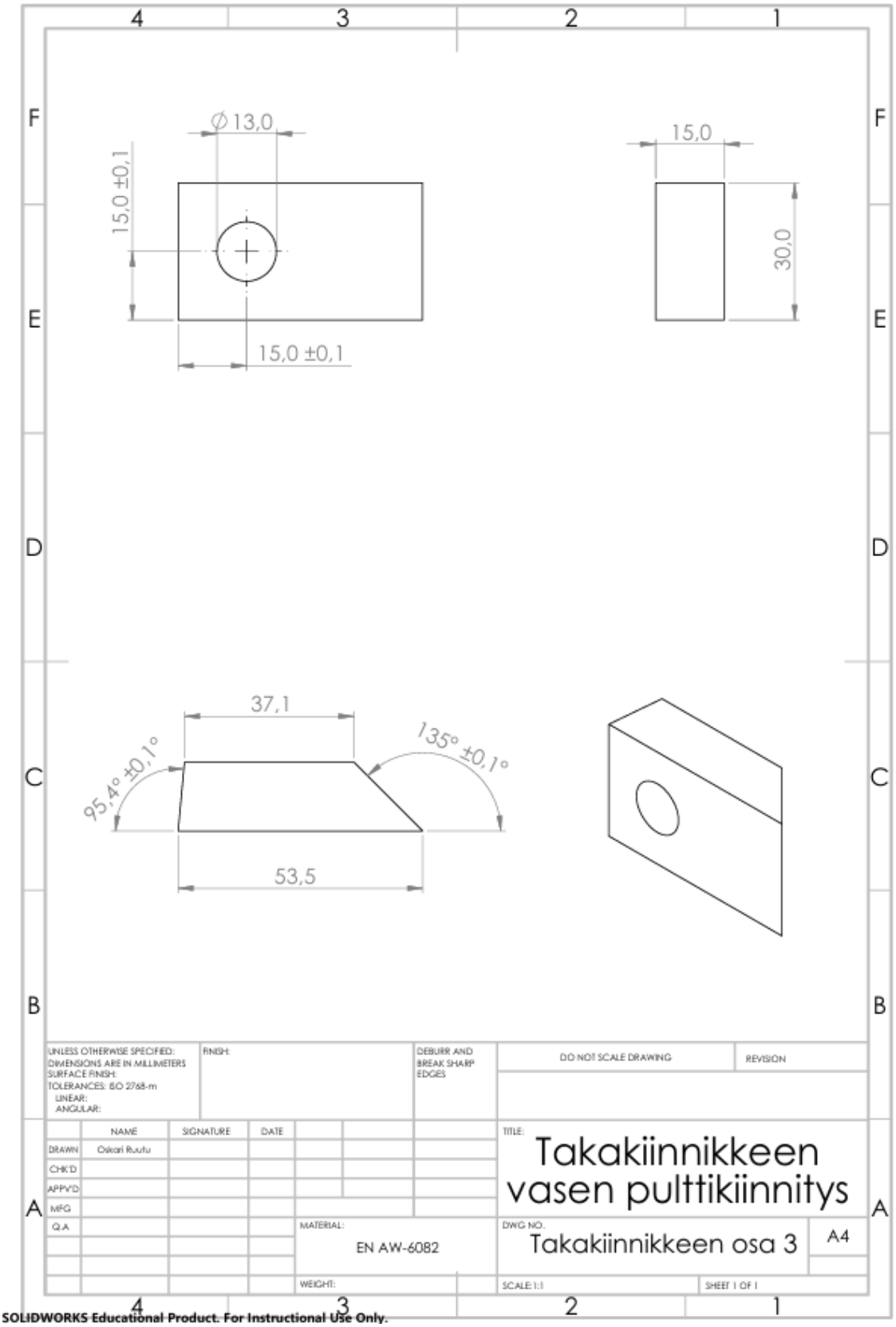
Liite 10. Takakiinnikkeen osan 1 valmistuspiirustus



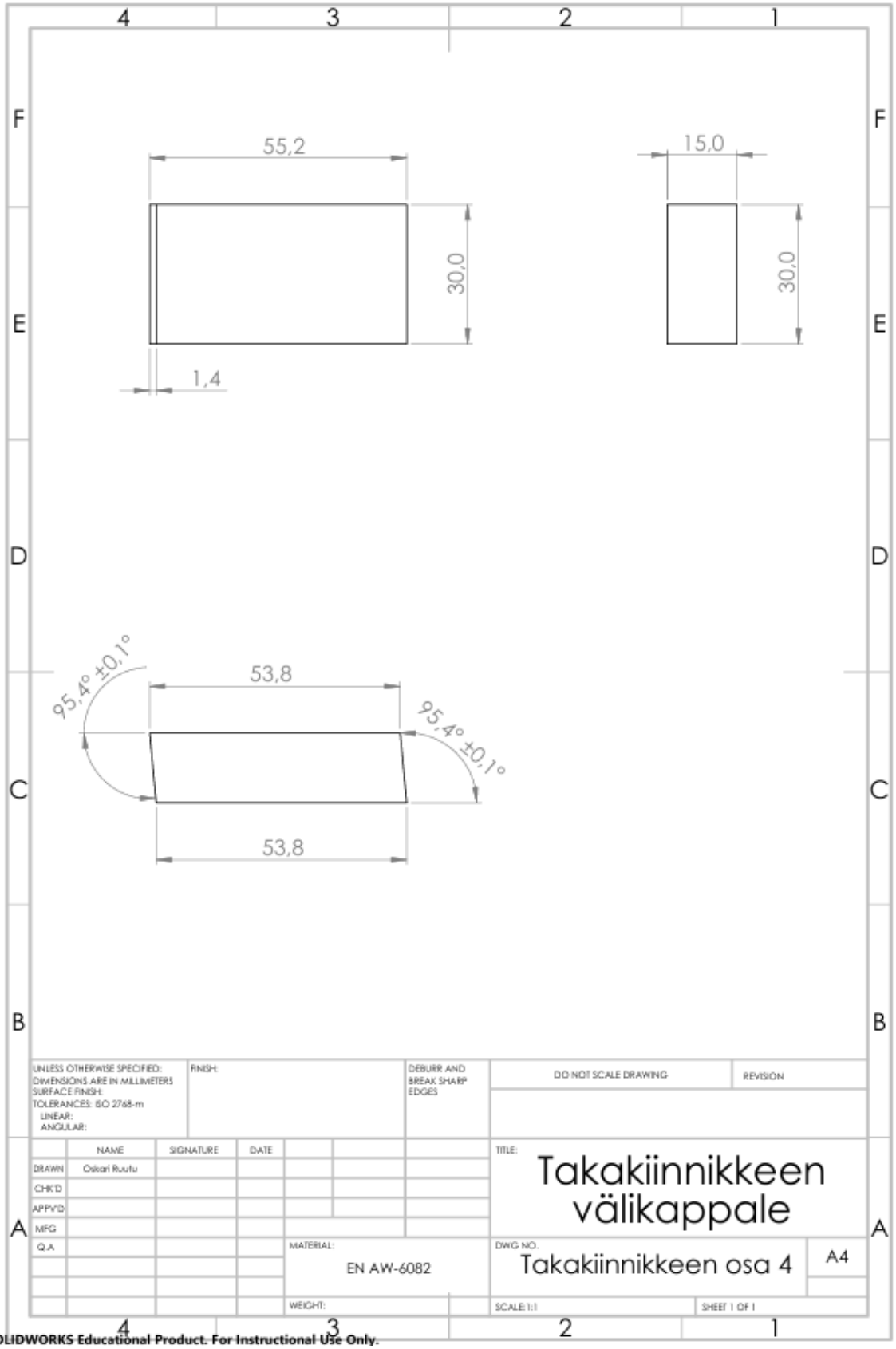
Liite 11. Takakiinnikkeen osan 2 valmistuspiirustus



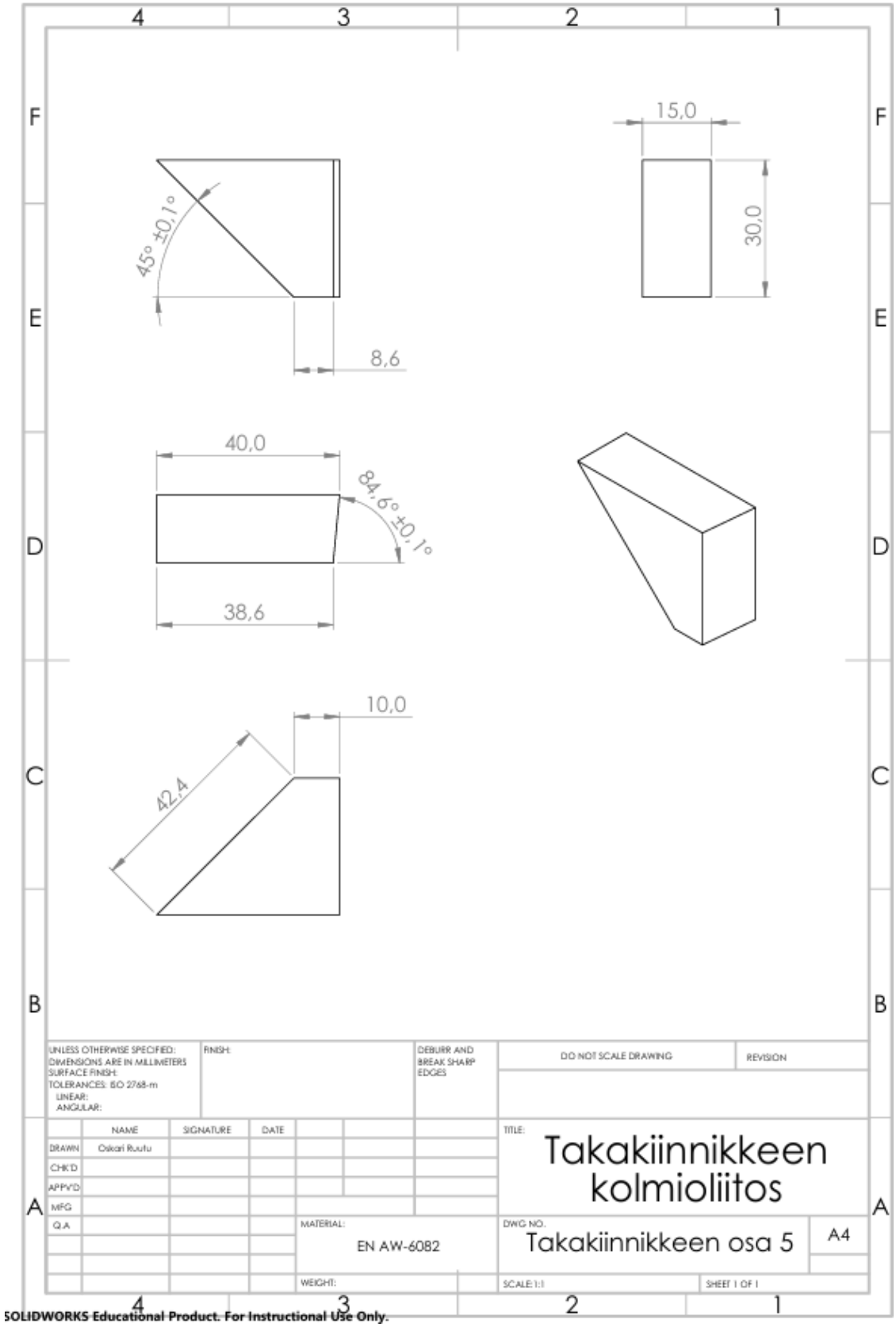
Liite 12. Takakiinnikkeen osan 3 valmistuspiirustus



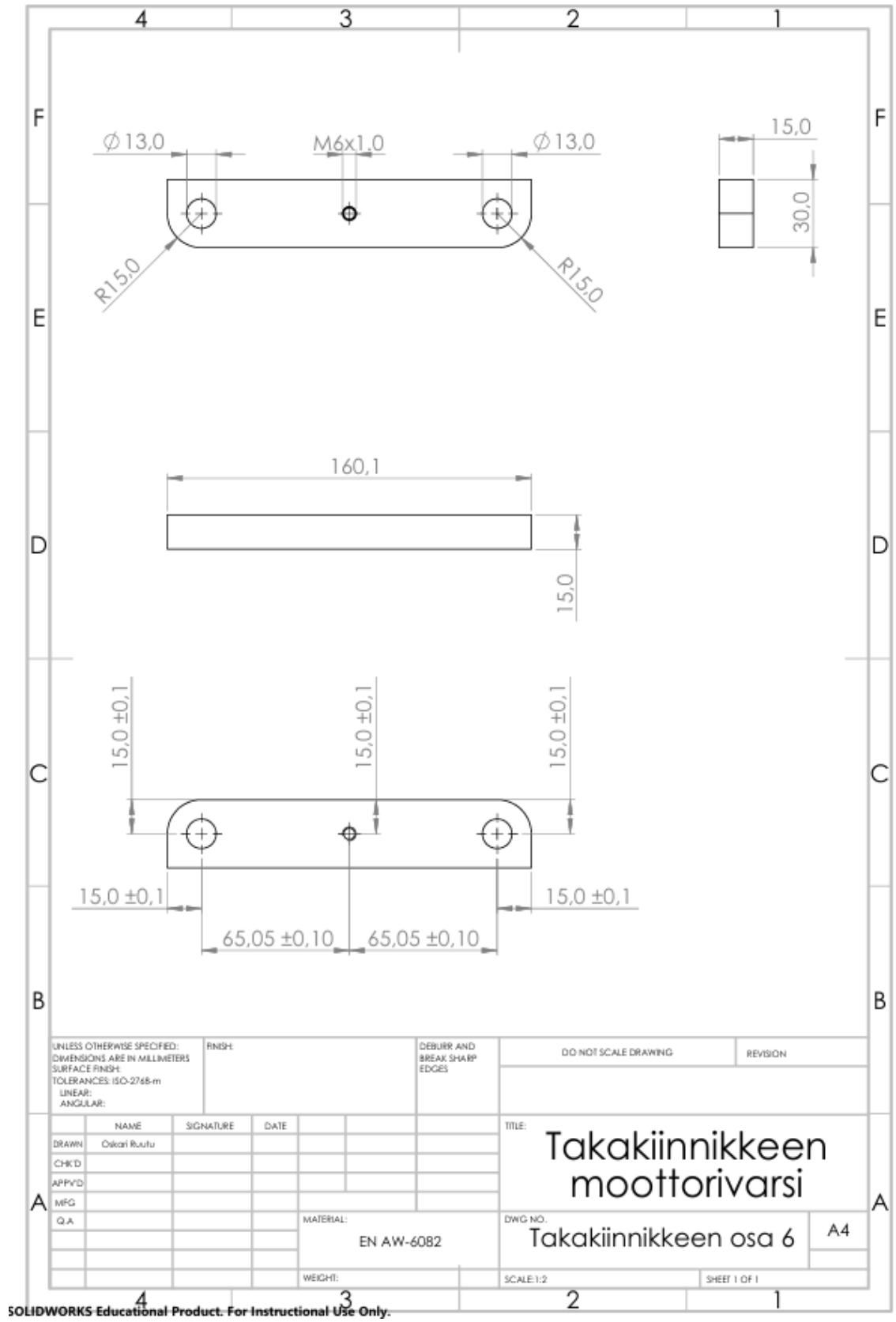
Liite 13. Takakiinnikkeen osan 4 valmistuspiirustus



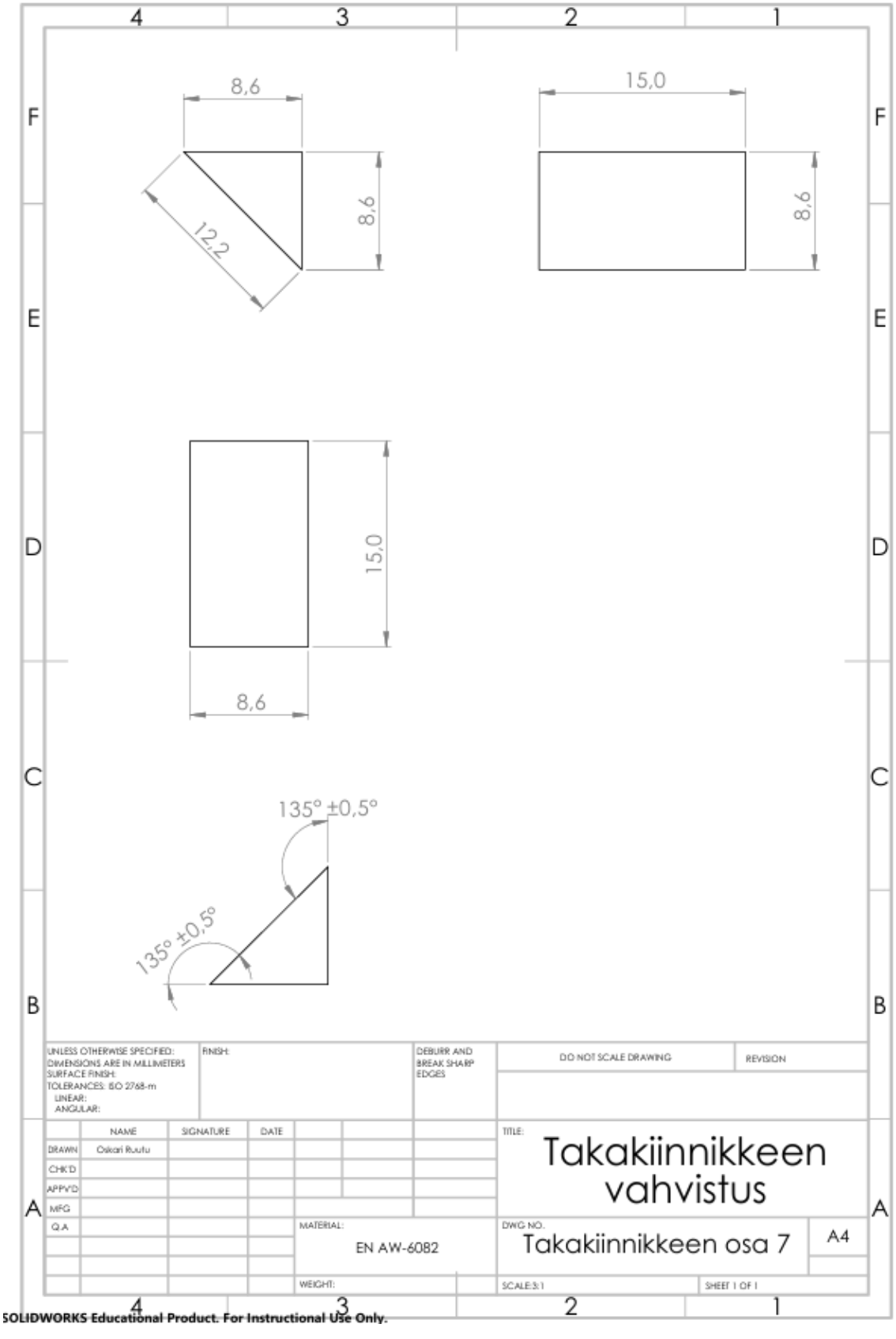
Liite 14. Takakiinnikkeen osan 5 valmistuspiirustus



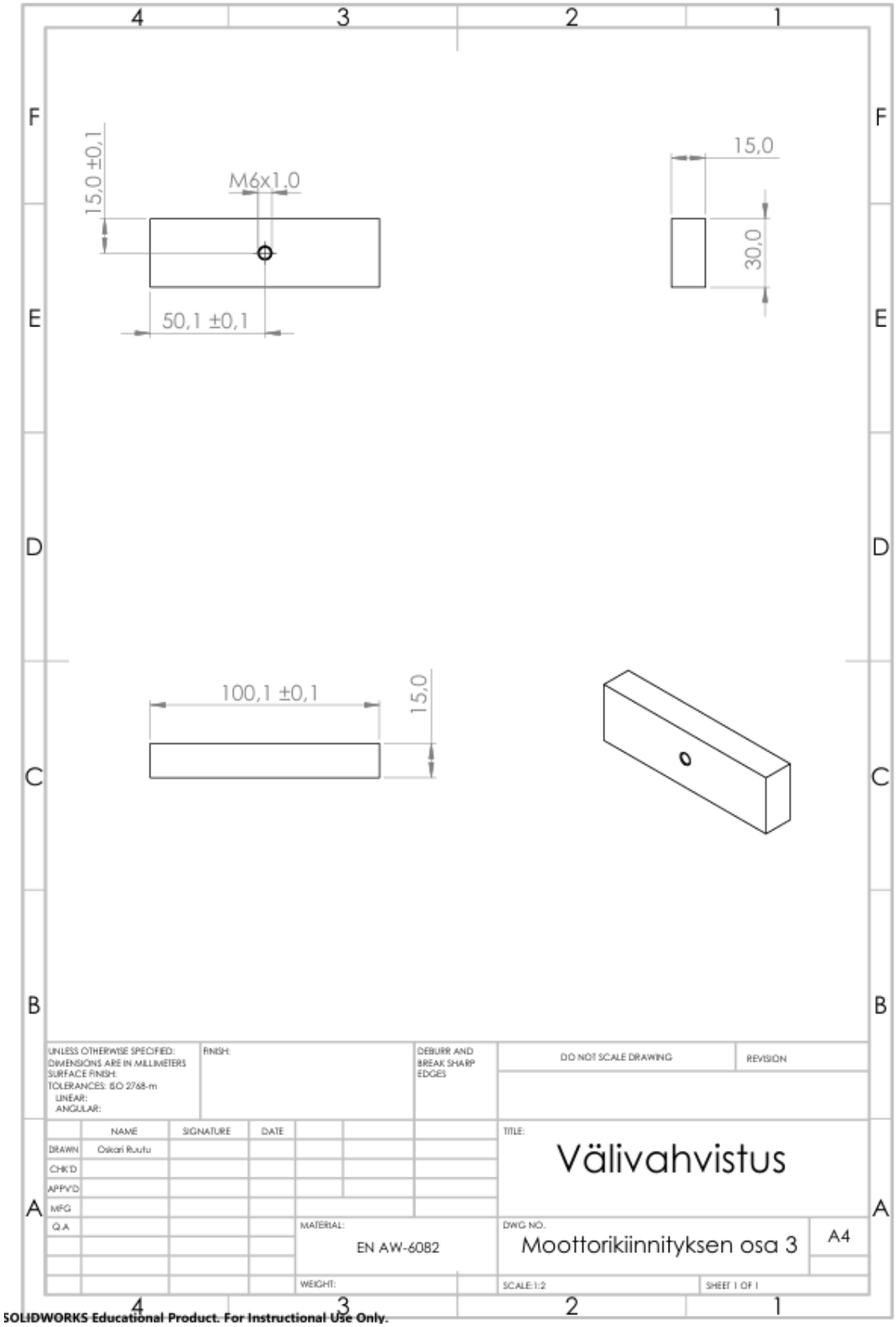
Liite 15. Takakiinnikkeen osan 6 valmistuspiirustus



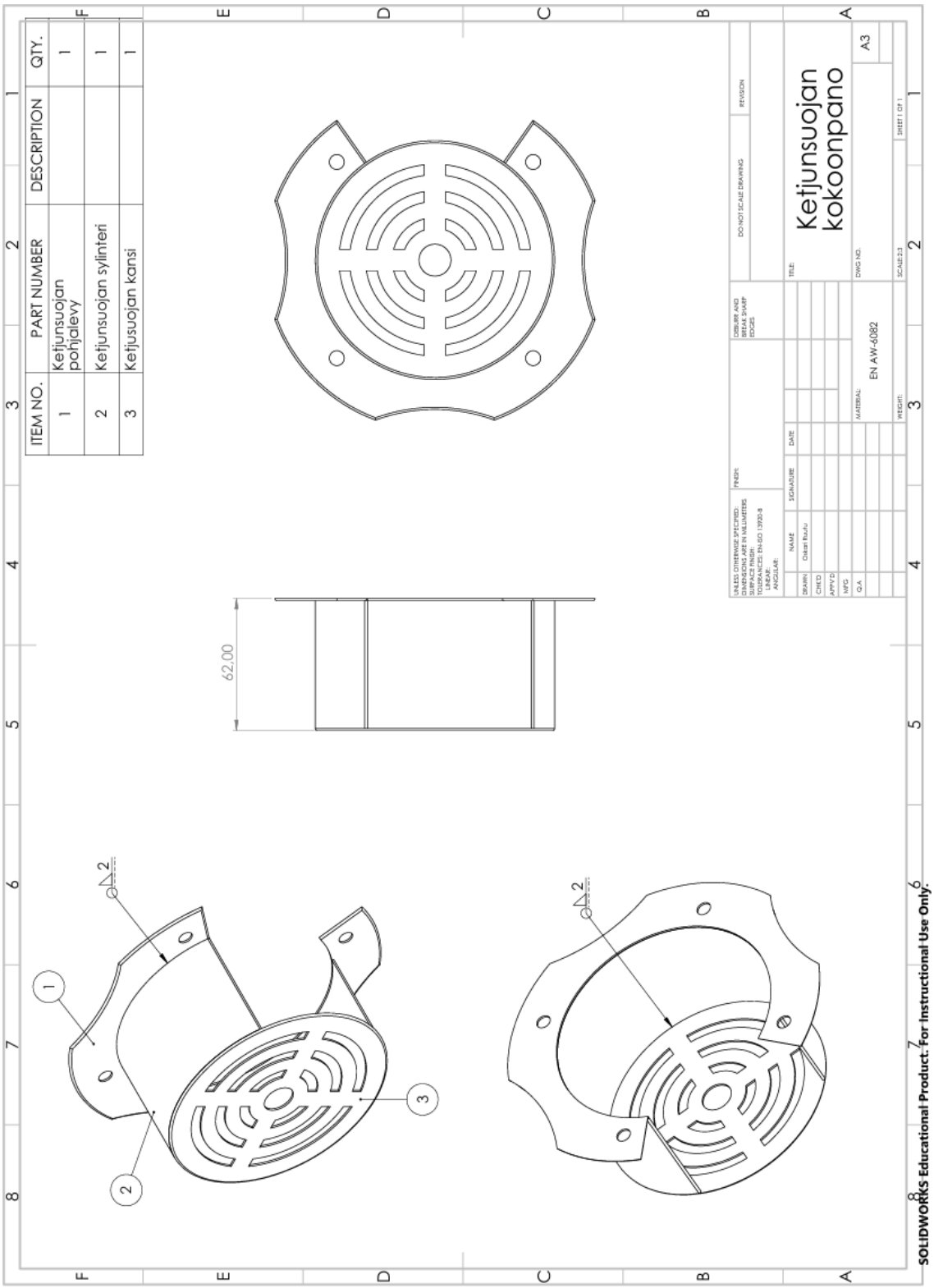
Liite 16. Takakiinnikkeen osan 7 valmistuspiirustus



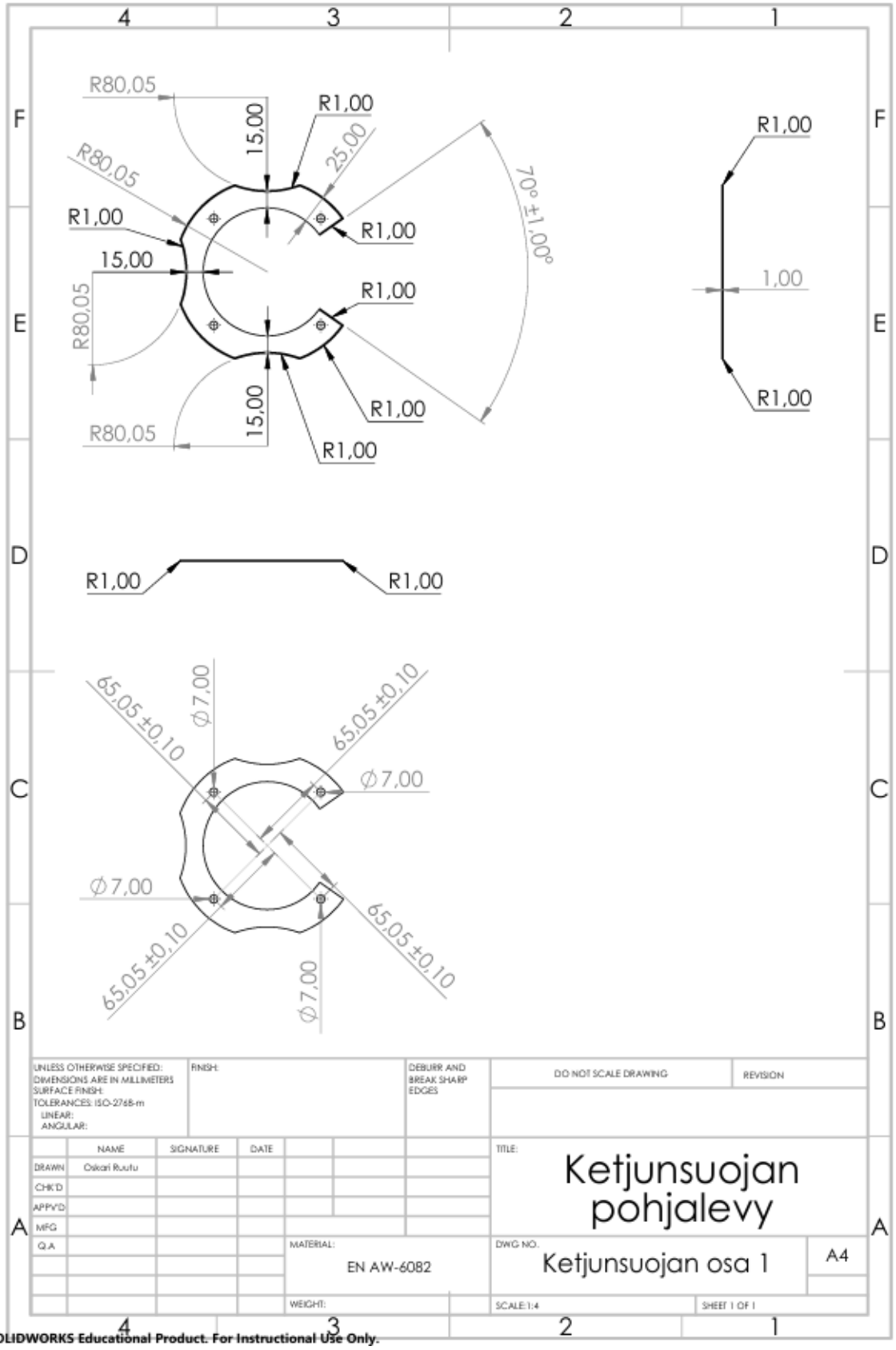
Liite 17. Moottorikiinnityksen välivahvistuksien valmistuspiirustus



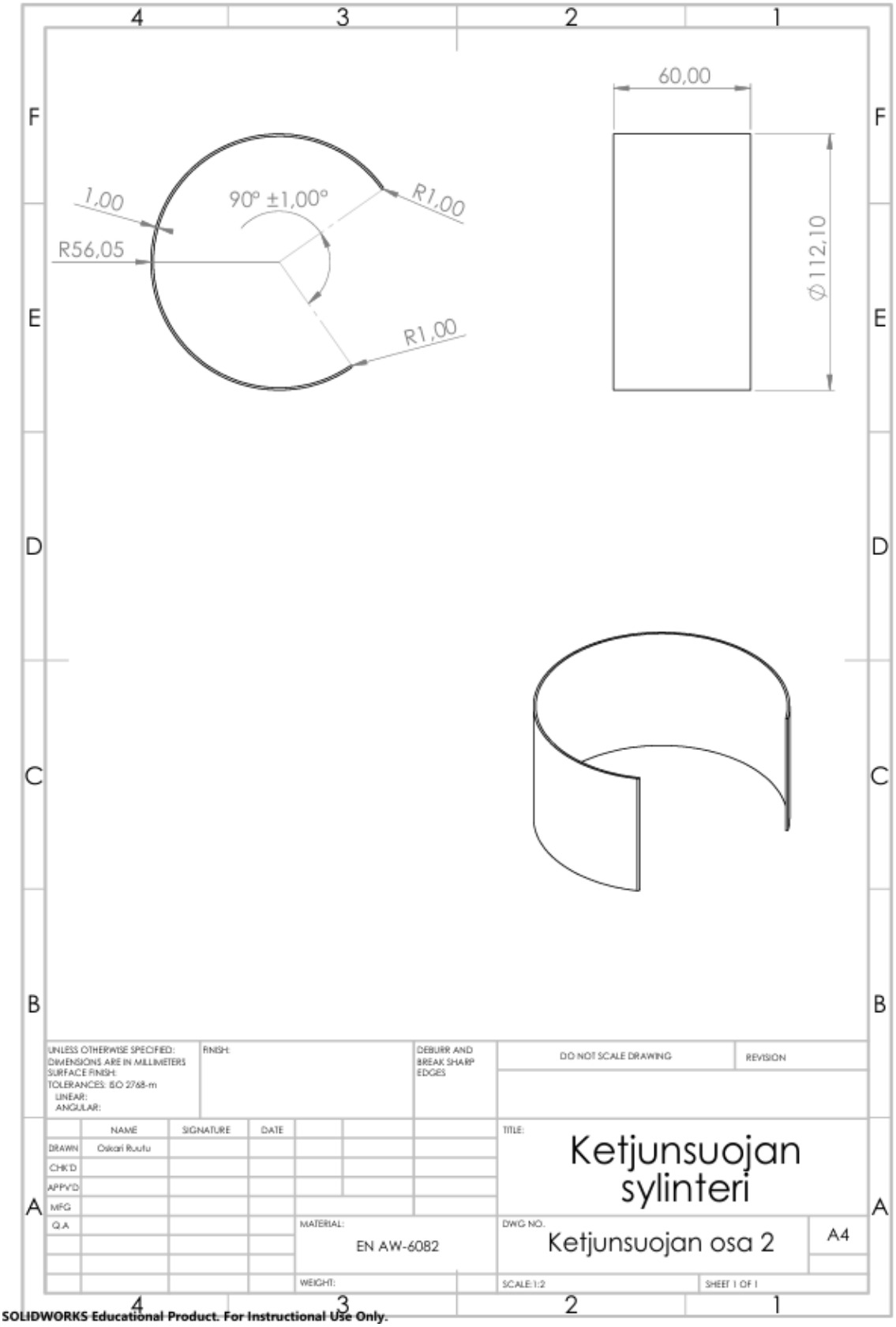
Liite 18. Ketjunsuojan kokoonpanopiirustus



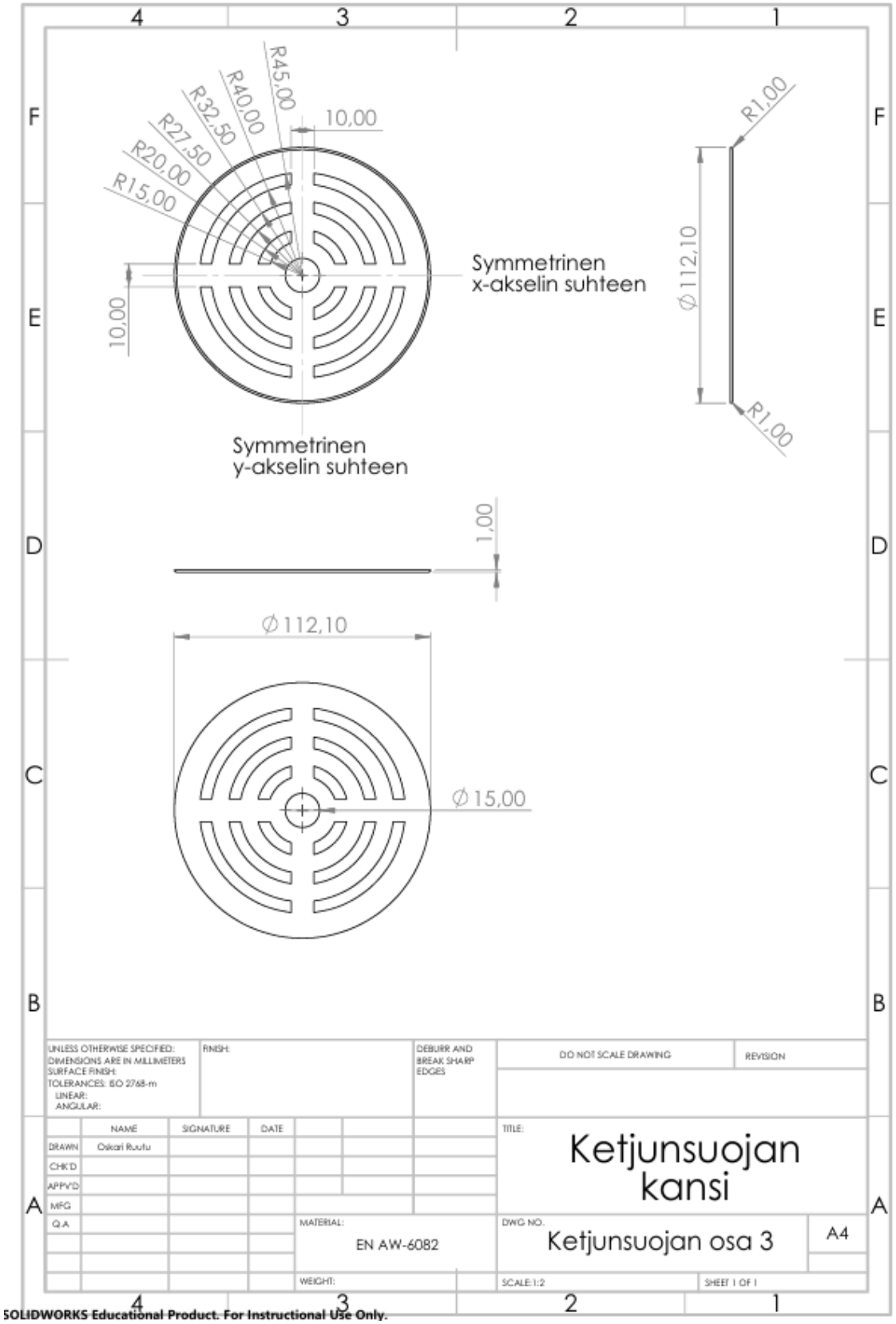
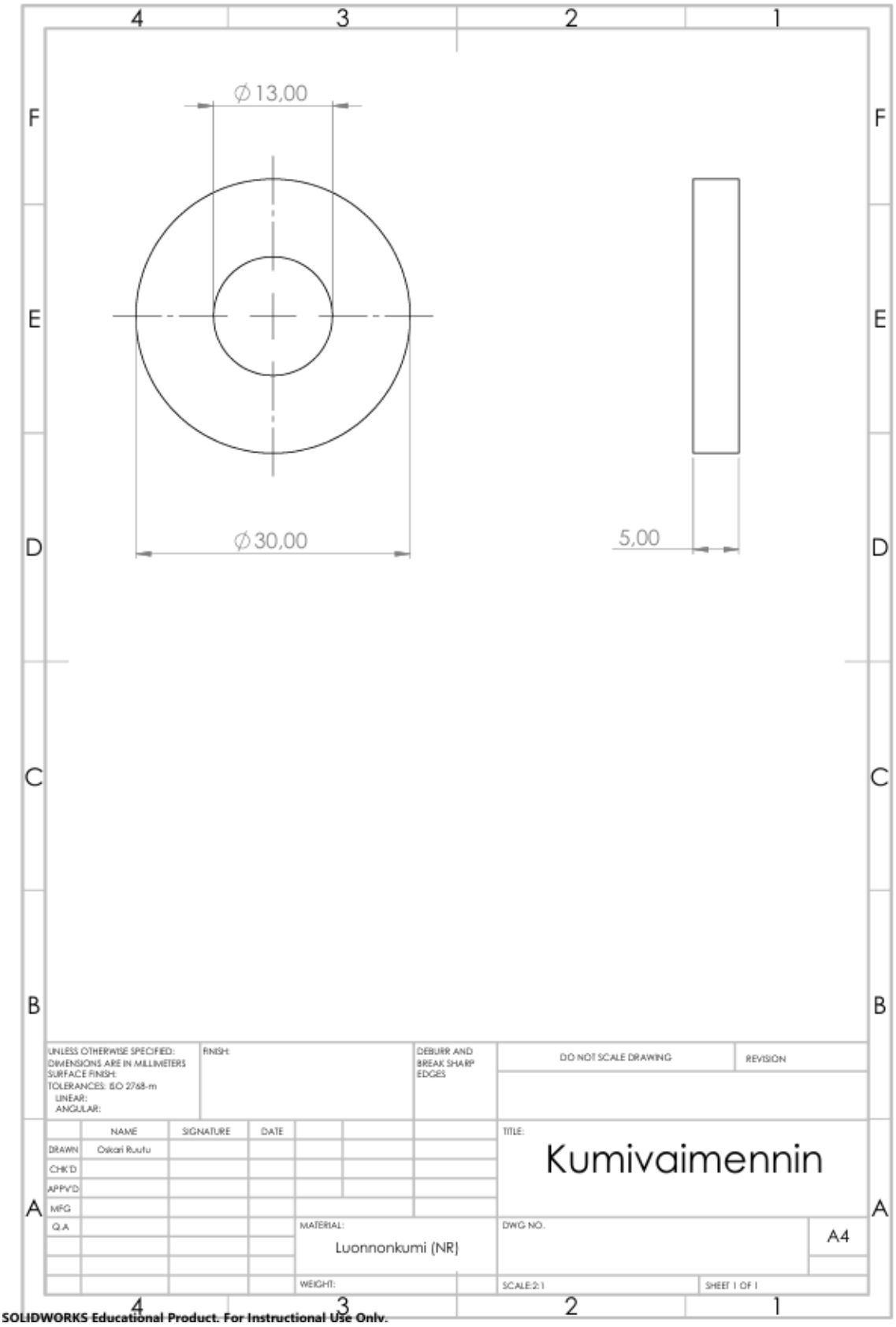
Liite 19. Ketjunsuojan osan 1 valmistuspiirustus



Liite 20. Ketjunsuojan osan 2 valmistuspiirustus



Liite 21. Ketjunsuojan osan 3 valmistuspiirustus



Liite 22. Tärinänvaimentimien valmistuspiirustus