



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mikko Henttinen

KAVITAATIOILMIÖN KUVAAMINEN  
VESISUIHKUPROPULSIOLAITTEEN  
SIIPIPINNOILLA

Tekniikka  
2016

## **ALKUSANAT**

Tämä opinnäytetyö tehtiin Vaasan ammattikorkeakouluun kone- ja tuotantotekniikan osastolle vuoden 2016 keväällä. Työn toimeksiantajana toimi Alamarin-Jet Oy.

Työn ohjaajina ovat toimineet Alamarin-Jet Oy:n puolesta tuotekehityspäällikkö Hannu Rantala ja Vaasan ammattikorkeakoulun puolesta opettaja, insinööri Marko Rantasalo.

Mikko Henttinen, Laihia, 5.5.2016

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Mikko Henttinen
Opinnäytetyön nimi	Kavitaatioilmiön kuvaaminen vesisuihkupropulsiolaitteen siipipinnoilla
Vuosi	2016
Kieli	suomi
Sivumäärä	55 + 23 liitettä
Ohjaaja	Marko Rantasalo

---

Opinnäytetyön aiheena on Alamarin-Jet Oy:lle tehtävä tuotekehitysprojekti, jossa on tarkoituksena tutkia mahdollisuutta kuvata videokameralla hidastuskuvaava kavitaatioilmiön esiintymisestä impellerin siipipinnoilla. Työn tavoitteena on suunnitella ja kehittää kuvauslaitteisto, joka voidaan helposti liittää nykyiseen vesisuihkupropulsiolaitteeseen ja kuvata kavitaatioilmiön esiintymistä eri käyttötilanteissa. Suunniteltu laitteisto soveltuu käytettäväksi AJ 245-mallin vesisuihkupropulsiolaitteessa.

Tuotekehitysprojekti aloitettiin selvittämällä Technobothnian laboratoriossa mahdolliset testausmahdollisuudet. Kuivatestausta varten suunniteltiin ja kokoonpantiin vaadittava testauselektroniikka. Näin menettelemällä pystyttiin selvittämään onko ylipäättäen mahdollista saada tietynlaista hidastuskuvaavaa pyörivästä laipasta. Tätä testausmenetelmää voidaan siten soveltaa impellerin siipipintojen videokuvaukseen kavitaatioilmiön esiintymisen todentamiseksi.

Kuivatestaamiseen tarvittavan elektroniikan valmistus ja testaaminen onnistuivat hyvin, ja sen jälkeen aloitettiin automatiikan suunnittelu ja 3D-mallin luominen. Automatiikan suunnittelu saatiin tehtyä, jonka jälkeen käytännön testaaminen suoritettiin tietokoneella simuloimalla. Kuvauslaitteistolle vaadittavan kotelon suunnittelussa päästiin lopulliseen 3D-malliin.

Tämän opinnäytetyön ansiosta Alamarin-Jet Oy pystyy valmistamaan vaadittavan kuvauslaitteiston kavitaatioilmiön kuvaamiseksi impellerin siipipinnoilla.

---

Avainsanat	kavitaatio, impelleri, kuvauslaitteisto, vesisuihkupropulsio, tutkimus ja tuotekehitys
------------	--

## ABSTRACT

Author	Mikko Henttinen
Title	Video Recording of Cavitation Phenomenon on Impeller Vane Surfaces
Year	2016
Language	Finnish
Pages	55 + 23 Appendices
Name of Supervisor	Marko Rantasalo

---

The subject of this thesis is a research and development project for a company named Alamarin-Jet Oy. The project intended to explore the possibility to describe the occurrence of cavitation phenomenon on impeller vane surfaces by slow-motion video recording. The aim was to develop apparatus which can be easily added to existing water-jet propulsion and to research the occurrence of cavitation and describe different modes of operation-conditions. The designed hardware is suitable for use in AJ 245-model waterjet propulsion unit.

The development project was started by finding out suitable testing opportunities in the Technobothnia laboratory. Testing electronics were designed and assembled for dry-testing. By proceeding in this way it was possible to determine whether it is possible to get a certain kind of slow-motion video from the rotary flange. This test method can thus be applied to the impeller vane surfaces to verify the occurrence of cavitation.

After successful preparation and testing of the necessary electronics the dry testing went well. Then started the necessary automation hardware planning and the creation of a 3D model started. Automation hardware design was completed, followed by the practical testing performed with computer simulations. Finally the 3D model for the camera casing was completed.

Thanks to this thesis Alamarin-Jet Oy is able to produce the required equipment for the video recording of cavitation phenomenon on impeller vane surfaces.

---

Keywords	Cavitation, impeller, video equipment, waterjet propulsion, research and development
----------	--

# SISÄLLYS

ALKUSANAT

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO .....	9
	1.1 Työn taustat.....	9
	1.2 Rajaukset.....	9
	1.3 Tavoitteet .....	9
2	ALAMARIN-JET OY .....	10
3	VESISUIHKUPROPULSIOLAITTEEN TOIMINTAPERIAATE .....	17
	3.1 Vesisuihkupropulsiolaitteesta yleisesti .....	18
	3.2 Vesisuihkupropulsiolaitteen ohjaus- ja hallintalaitteet .....	19
	3.3 Vesisuihkupropulsiolaitteen voimalinja.....	20
	3.4 Peruutuskauhat .....	21
4	KAVIATAATIO ILMIÖNÄ .....	23
	4.1 Kavitaatioilmiön esiintymismekanismit .....	23
	4.2 Kavitaation esiintyminen .....	26
5	KUIVATESTIN SUUNNITTELU.....	28
6	KUIVATESTIN TEKEMINEN TECHNOBOTNIASSA .....	33
	6.1 Kuivatestin valmistelu .....	33
	6.2 Kuivatestin suorittaminen .....	35
	6.3 Kuvauslaitteiden käytetyt ominaisuudet ja tiedot.....	36
	6.4 GoPro–videokameran asetukset.....	37
	6.5 GoPro–videokameran videotekniset tiedot.....	37
	6.6 Sony Xperia ZR–matkapuhelimen videokamera .....	38
7	TARVITTAVA KUVAUSLAITTEISTO.....	39
	7.1 Tarvittavat kuvauslaitteen ominaisuudet .....	39
	7.2 Vaihtoehdot kuvauslaitteiksi.....	39
8	AUTOMATIIKAN SUUNNITTELU .....	40
	8.1 Automatiikan suunnittelun lähtökohdat.....	40
	8.2 Suunniteltu automatiikka .....	40
	8.3 Valaistuksen suunnittelu .....	40

8.4	Valaistuksen komponentit.....	40
9	VIDEOKUVAUSKOTELON SUUNNITTELU .....	41
9.1	Suunnittelusta yleisesti.....	41
9.2	Kotelon suunnittelu vesitiiviiksi .....	42
9.3	Lopullisen mallin suunnittelu .....	42
9.4	Kotelon materiaalien valinta .....	42
9.5	Valittujen materiaalien tekniset tiedot .....	44
9.6	Kotelon suunnittelun toteutus .....	45
10	YHTEENVETO .....	48
	LIITTEET	

## **LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** Konseptimallit

**LIITE 2.** Lopulliset 3D-mallit kameralohkosta ja muokatusta tarkistusluukusta

**LIITE 3.** Mitoitus- ja kokoonpanopiirustukset

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b> AJ 160–vesisuihkupropulsio-laite.	11
<b>Kuva 2.</b> AJ 180–vesisuihkupropulsio-laite.	12
<b>Kuva 3.</b> AJ 185–vesisuihkupropulsio-laite.	13
<b>Kuva 4.</b> AJ 230–vesisuihkupropulsio-laite.	14
<b>Kuva 5.</b> AJ 245–vesisuihkupropulsio-laite.	15
<b>Kuva 6.</b> AJ 288–vesisuihkupropulsio-laite.	16
<b>Kuva 7.</b> Erään vesisuihkupropulsion toteutustapa. /4/	17
<b>Kuva 8.</b> Vesisuihkupropulsio-laitteen poikkileikkaus. /5/	18
<b>Kuva 9.</b> Vesisuihkupropulsio-laitteen ohjaus- ja hallintalaitteet. /5/	19
<b>Kuva 10.</b> Voimalinja. /5/	21
<b>Kuva 11.</b> Kuppikauha. /5/	22
<b>Kuva 12.</b> Torvikauha. /5/	22
<b>Kuva 13.</b> Paineaallon mekanismi kavitaatioeroosiossa. /8/	24
<b>Kuva 14.</b> Kavitaatioeroosion mikroskooppinen nestesuihkumekanismi. /8/	24
<b>Kuva 15.</b> Mikroskooppinen kavitaatiokupla, jossa nähtävissä nestesuihkuromahdus. /11/	25
<b>Kuva 16.</b> Kavitaation esiintyminen veneen potkurin siipipinnoilla. /6/	27
<b>Kuva 17.</b> Kavitaation aiheuttama eroosio impellerin siipipinnoilla. /9/	27
<b>Kuva 18.</b> Anturin sähköinen kytkentä ja johtimien tyypilliset värit. /10/	29
<b>Kuva 19.</b> Kytken-täkaavio kuivatestiin.	30



<b>Kuva 20.</b> LED–valon kytkennän testaus.	31
<b>Kuva 21.</b> Toinen kytkennän testaus tarvittavine komponentteineen.	31
<b>Kuva 22.</b> Feston valmistama testilaite. /7/	33
<b>Kuva 23.</b> Feston testilaitteen komponentit. /7/	34
<b>Kuva 24.</b> Induktiivinen anturi sekä muokattu ruuvin kanta, josta signaali luetaan.	35
<b>Kuva 25.</b> Kuivatestin suorittaminen.	36
<b>Kuva 26.</b> GoPro–videokameran videoresoluutioiden vertailutaulukko.	37
<b>Kuva 27.</b> Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.	40
<b>Kuva 28.</b> Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.	40
<b>Kuva 29.</b> Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.	40
<b>Kuva 30.</b> Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.	40
<b>Kuva 31.</b> Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.	40
<b>Kuva 32.</b> Alumiinien vertailutaulukko. /12/	44
<b>Kuva 33.</b> Suunniteltavan kotelon sijainti AJ 245–vesisuihkupropulsiolaitteessa.	46

## KÄYTETYT KÄSITTEET JA LYHENTEET

Kavitaatio	Kavitaatio on ilmiö, joka esiintyy kaikissa nesteissä, jotka alkavat kiehua paineen laskun vaikutuksesta nesteen nykyisessä lämpötilassa.
Eroosio	Eroosio on kulumista veden, tuulen, mekaanisen kulutuksen tai jonkin muun kuluttavan tekijän vaikutuksesta.
Impelleri	Impelleri on pyörivä komponentti, joka on yleensä tehty teräksestä, raudasta, pronssista, messingistä, alumiinista tai muovista. Impelleri siirtää energiaa nesteen avulla. Impelleriä pyöritetään erillisen voimanlähteen avulla.
LED	Light Emitting Diode. Puolijohdemateriaali alkaa luovuttamaan valoa, kun diodin rajapinnan kynnysjännitte ylittyy. Käytetty puolijohdemateriaali määrää valon värin.
Etuvastus	Etuvastus on vastus, jolla rajoitetaan LED-lampulle tulevaa jännitettä ja virtaa.
Kuvaustaajuus	Frames per second (fps). Kuvataajuus. Mitä korkeampi kuvataajuus on, sitä juohevammalta liike näyttää.
Wlan	Langaton ethernet-verkko
Resoluutio	Kuvaustarkkuus eli resoluutio on termi, jolla kuvankäsittelyssä ja tietotekniikassa kuvataan muun muassa bittikarttagrafiikkana esitetyn kuvan erotuskykyä (yksityiskohtien määrää) tai pikseleiden määrää.

Voltti	Voltti on SI-järjestelmästä johdettu jännitteen yksikkö. (tunnus V).
Ampeeri	Ampeeri on SI-järjestelmän mukainen yksikkö perussuureelle sähkövirralle (tunnus A).
Ohmi	Ohmi on SI-järjestelmässä resistanssin eli sähkövastuksen, reaktanssin ja impedanssin mittayksikkö (tunnus $\Omega$ ).
Hertsi	Hertsi on kansainvälisen yksikköjärjestelmän mukainen taajuuden yksikkö (tunnus Hz).
Kandela	Kandela (yksikön tunnus cd) on SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö perussuureelle valovoima, jota nimitetään myös valon intensiteetiksi ja valon voimakkuudeksi.
Watti	Watti on SI-järjestelmän tehon ja säteilyvirran yksikkö (tunnus W).
Induktiivinen anturi	Induktiivinen rajakytkin (anturi) antaa lähtösignaalin metallin ja muun sähköä johtavan materiaalin lähestyessä anturin tuntopintaa. Induktiivisen kytkimen rakenne muodostuu oskillaattorista, tunnistinpiiristä ja vahvistimesta.
Valotusaika	Valotusaika (myös suljinaika, engl. shutter speed) tarkoittaa valokuvauksessa aikaa, jonka kameran suljin on auki valotuksen aikana. Yleensä valotusaika ilmoitetaan sekunnin murto-osina, kuten $1/250$ s, joka voidaan merkitä myös 250.
STEP-tiedosto	STEP-tiedostomuoto on 3D CAD-tiedosto, jolla voidaan siirtää tietoa eri ohjelmien välillä.

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn taustat

Tämä opinnäytetyö tehtiin keväällä 2016 Alamarin-Jet Oy:lle. Kyseisessä yrityksessä on huomattu, että vesisuihkupropulsiolaitteen impellerin siipipinnoille voi kavitaation vuoksi syöpyä kulumajälkiä, joita ei pitäisi tulla normaalissa käytössä impellerin elinkaaren aikana. Kuitenkin joissakin impellerimalleissa on havaittu siipipinnoilla syöpymiä kavitaation vuoksi. Tästä johtuen yritys haluaa kuvauslaitteiston, jolla voidaan tehdä tuotekehitystä impellereihin. Laitteistolla pyritään saamaan videokuvaa impelleristä ja näin tutkimalla voidaan saada selville kavitaation ilmenemisen parametrit.

## 1.2 Rajaukset

Opinnäytetyö on rajattu kuvauslaitteiston valintaan ja vesisuihkupropulsiolaitteeseen asennettavan videokuvauskotelon 3D-suunnitteluun ja kehittämiseen AJ 245-vesisuihkupropulsiolaitteeseen. Lisäksi automatiikan ja mahdollisen tarvittavan muun mekaniikan suunnittelu kuuluu tähän opinnäytetyöhön. Tämän opinnäytetyön ulkopuolelle on rajattu mahdollisen kuvauslaitteiston rakentaminen sekä kotelon valmistus. Yritys valmistaa tarvittavan koteloinnin kuvauslaitteistolle ja vaadittavan ohjausjärjestelmän tässä opinnäytetyössä tehtyjen suunnitelmien mukaisesti vesisuihkupropulsiolaitteeseen ja hyödyntää tietoja impellerien tuotekehityksessä.

## 1.3 Tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella toimiva kotelointi videokameralle ja tarvittava valaistus sekä sen ohjaus. Laitteistolla voidaan videokuvata hidastuskuvaa impellerin siipipinnoista, jolloin voidaan selvittää, milloin ja missä olosuhteissa kavitaatiota esiintyy. Näin suunnitellun laitteiston avulla saadaan tutkittua nopeasti erilaisia impellereitä ja niiden eri vaikutuksia kavitaatioilmiöön.

## 2 ALAMARIN-JET OY

Alamarin-Jet Oy on valmistanut vesisuihkupropulsioita vuodesta 1976 Alahärmässä.

Alamarin-Jet Oy:n vesisuihkupropulsioita käyttävät useat eri viranomaistahot kuten merivartiosto, poliisi, tulli sekä puolustusvoimat. Meripelastusseurat ja muut vaativat työvenekäyttäjryhmät käyttävät myös Alamarin-Jet Oy:n tuotteita.

Siviilikäytössä Alamarin-Jet Oy:n vesisuihkupropulsioita on ollut jo pitkään monien käyttäjryhmien suosiossa. Vapaa-ajan kalastajat, mökkeilijät ja matkaveneilijät arvostavat vesisuihkupropulsioita ylivoimaisia ominaisuuksia verrattuna perämootoreihin tai perävetolaitteisiin. Näistä ominaisuuksista esimerkkejä ovat muun muassa liikkuvien osien sijainti veneen rungon sisällä suojaan, vesisuihkupropulsioita nopea ohjattavuus sekä jarruttaminen täydestä vauhdista välittömästi.

Alamarin-Jet Oy kuuluu HT LASER Oy yritysryhmään.

Alamarin-Jet Oy on jäsenenä ILAMA:ssa (International Lifesaving Appliance Manufacturers' Association) sekä venealan keskusliitto Finnboat ry:ssä. /1/

Alla olevissa kuvissa (kuvat 1-6) vesisuihkupropulsioita tuotekategoriat, joita tällä hetkellä valmistetaan Alamarin-Jet Oy:n toimesta.



**Kuva 1.** AJ 160–vesisuihkupropulsiolaite.

- AJ 160
  - Paino: 38 kg
  - Veneen paino: 100 – 700 kg
  - Kauhan ohjaus: Elektroninen
  - Asennus: Asennusosa.



**Kuva 2.** AJ 180–vesisuihkupropulsioaite.

- AJ 180
  - Paino: 48 kg
  - Veneen paino: 300 – 1700 kg
  - Kauhan ohjaus: Elektroninen
  - Asennus: Asennusosa.



**Kuva 3.** AJ 185–vesisuihkupropulsio-laite.

- AJ 185
  - Paino: 50 kg
  - Veneen paino: 300 – 1700 kg
  - Kauhan ohjaus: Elektroninen
  - Asennus: Asennusosa.





**Kuva 4.** AJ 230–vesisuihkupropulsio laite.

- AJ 230
  - Paino: 79 kg
  - Veneen paino: 1000 – 3000 kg
  - Kauhan ohjaus: Hydraulinen
  - Asennus: Asennusosa.



**Kuva 5.** AJ 245–vesisuihkupropulsioalaite.

- AJ 245
  - Paino: 95 kg
  - Veneen paino, yksittäisasennus: 3500 kg
  - Kauhan ohjaus: Hydraulinen
  - Asennus: Asennusosa.



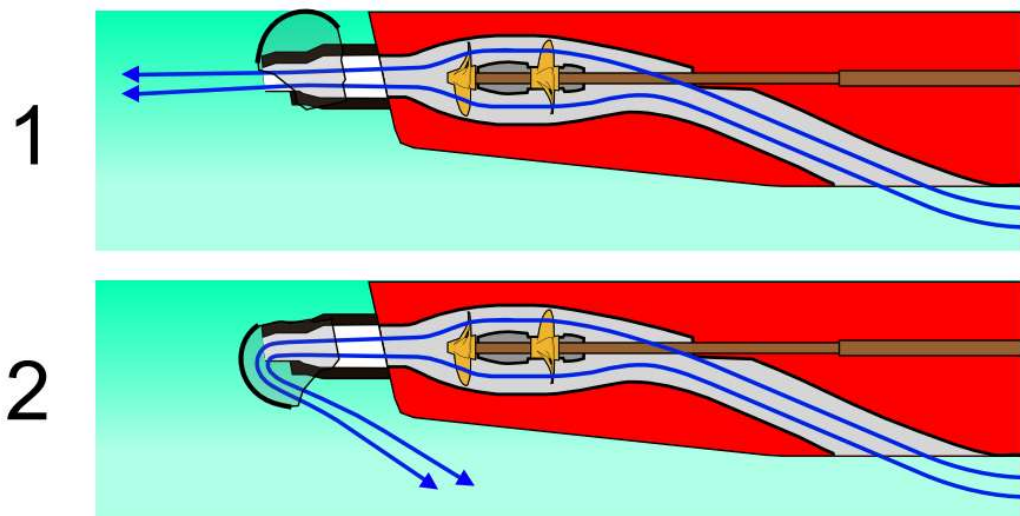
**Kuva 6.** AJ 288–vesisuihkupropulsioaite.

- AJ 288
  - Paino: 120 kg
  - Veneen paino, yksittäisasennus: 2000 – 5000 kg
  - Kauhan ohjaus: Hydraulinen
  - Asennus: Asennusosa.

### 3 VESISUIHKUPROPULSIOLAITTEEN TOIMINTAPERI- AATE

Vesisuihkupropulsio laite on vesikulkuneuvoissa käytettävä voimansiirtojärjestelmä. Siinä alus etenee vedessä suihkuyksiköstä purkautuvan vesisuihkun työntämänä. Vesisuihku saadaan aikaan joko tunneliin sijoitetulla potkurilla tai turbiinilla. Nykyään yleisemmin käytetään turbiinia, josta käytetään nimitystä impelleri. Käyttövoima voidaan ottaa erilaisista voimanlähteistä, yleensä mäntä- tai suihkumoottorista. Vesisuihkupropulsio on vanhin mekanisoitu propulsiojärjestelmä, joka patentoitiin Englannissa vuonna 1661.

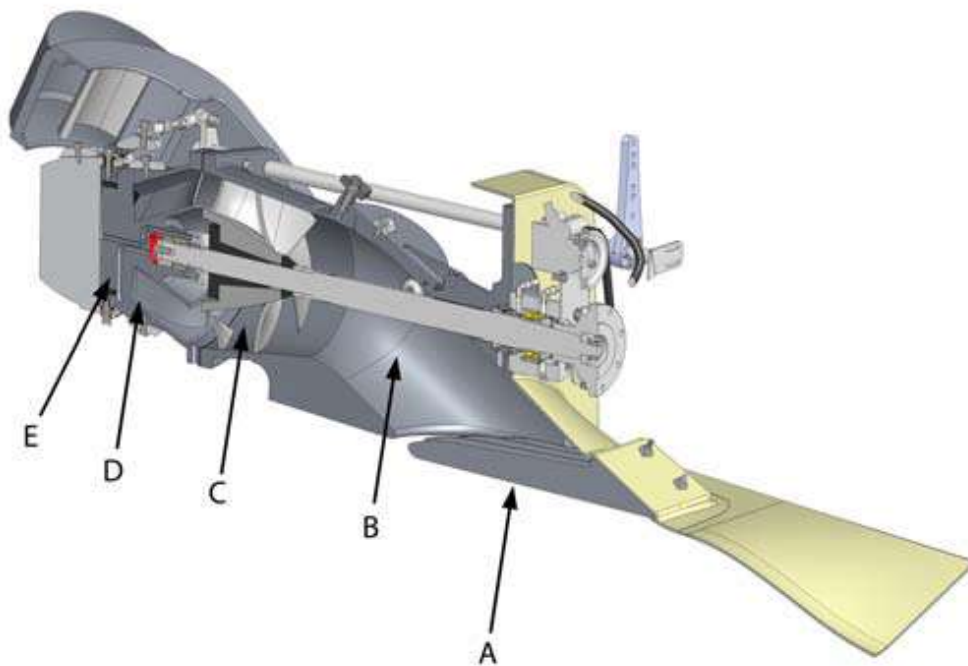
Vesisuihkupropulsio on nykyään yleisesti käytössä vesiliikenteessä, ja yleisin sovellus on lähinnä vapaa-ajan käytössä vesiskootteri. Sotilaskäytössä vesisuihkupropulsiota (kuva 7) käytetään esimerkiksi torpedoissa ja ohjusveneissä, kuten suomalaisessa Hamina-luokassa. /4/



**Kuva 7.** Erään vesisuihkupropulsio laiteen toteutus. /4/

### 3.1 Vesisuihkupropulsiolaitteesta yleisesti

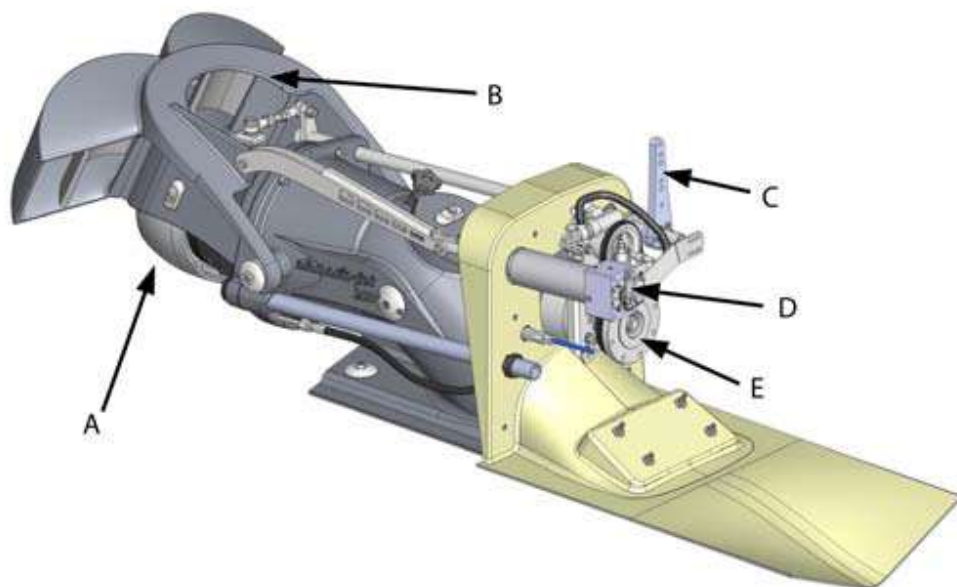
Alamarin-Jet-vesisuihkupropulsio-laite on korkealuokkainen veneen vetolaite. Siinä on yksivaiheinen aksiaalipumppu, josta käytetään nimitystä impelleri, joka tuottaa suuren tilavuusvirran ja työntön korkealla hyötysuhteella. Vesisuihkupropulsio-laite sijaitsee veneen peräosassa ja ottaa pumpattavan veden veneen pohjan alta imuaukon (kuva 8, kohta A) kautta. Imutunneli (kuva 8, kohta B) johtaa veden impellerille (kuva 8, kohta C) mahdollisimman pienin häviöin ja impelleri kasvattaa veden painetta. Paine muutetaan virtausnopeudeksi suuttimessa (kuva 8, kohta E). Suutinta ennen oleva staattori (kuva 8, kohta D) suoristaa virtauksen. Virtausnopeuden muutos synnyttää virtaussuunnassa reaktivoiman, joka työntää venettä eteenpäin. /5/



**Kuva 8.** Vesisuihkupropulsiolaitteen poikkileikkaus. /5/

### 3.2 Vesisuihkupropulsiolaitteen ohjaus- ja hallintalaitteet

Suihkun suuntaa muuttamalla venettä saadaan ohjattua haluttuun suuntaan. Tämä tapahtuu erillisten ohjaus- ja hallintalaitteiden avulla. Ohjaussuuttimella käännetään suihku keskilinjasta oikealle tai vasemmalle. Peruutuskauhalla voidaan kääntää suihku veneen keulaa kohti, jolloin työntö suuntautuu taaksepäin ja vene peruuttaa (kuva 9). Peruutuskauhan avulla voidaan jarruttaa myös täydestä vauhdista ilman pelkoa siitä että vesisuihkupropulsio-laite rikkoontuu. Peruutuskauhalla voidaan myös pitää venettä paikallaan vaikka jetin akseli pyörisikin tuottaen työntöä (keskiasento). Näiden laitteiden eri asentojen yhdistelmillä voidaan saavuttaa ylivertainen ohjailukyky. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että venettä voidaan pyörittää paikallaan pystyakselinsa ympäri ja että kahdella jetillä varustetulla veneellä voidaan liikkua sivuttain ilman keulapotkureita. /5/



**Kuva 9.** Vesisuihkupropulsiolaitteen ohjaus- ja hallintalaitteet. /5/

- **A** Ohjauslaite (ohjaussuutin)
- **B** Hallintalaite (peruutuskauha)

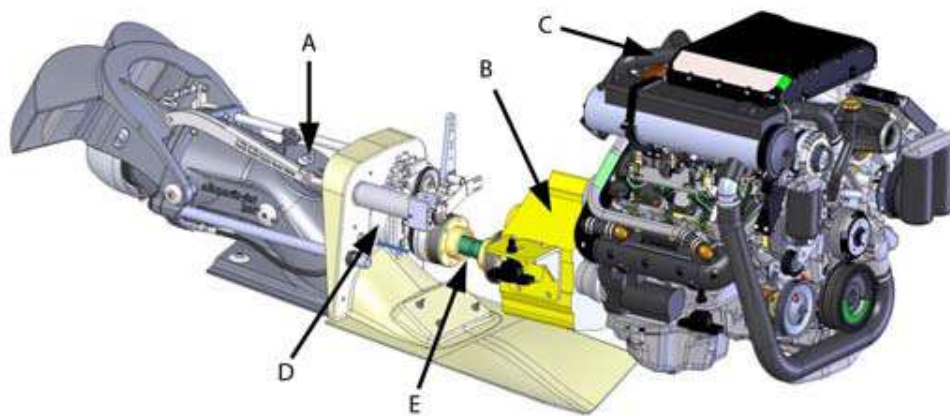
- C Ohjausvipu
- D Peruutuskauhan hallintalaite
- E Vetolaippa

### 3.3 Vesisuihkupropulsiolaitteen voimalinja

Impelleriä pyöritetään yleensä korkeakierroksisella dieselmoottorilla. Myös bensamoottorisovellukset ovat mahdollisia. Moottori kytketään väliakselilla vetolaippaan.

Erillistä painelaakerointia ei tarvita, sillä jetin etulaakerointi toimii kaksisuuntaisena painelaakerointina. Joihinkin moottoreihin tarvitaan alennusvaihte, joka sovitaa moottorin ja jetin teho- ja pyörimisnopeusalueet toisiinsa. Vaihdetta voidaan käyttää myös silloin, jos jетille halutaan todellinen vapaavaihte, jota käyttäessä jetin akseli lakkaa pyörimästä. Vaihteella voidaan myös huuhdella imutunnelia toiseen suuntaan ja puhdistaa jetti roskista tai muista virtausta haittaavista tukkeumista. Myös tarkistusluukun kautta voidaan puhdistaa jetin imutunnelia (kuva 10).

Alamarin-Jet Oy:n vesisuihkupropulsiolaitteissa on kartion muotoinen impelleripesä. Tämän ominaisuuden ansiosta impellerin halkaisijaa muuttamalla voidaan vaikuttaa tehoon, ja näin sovitaa impelleri tarkasti moottorille. /5/



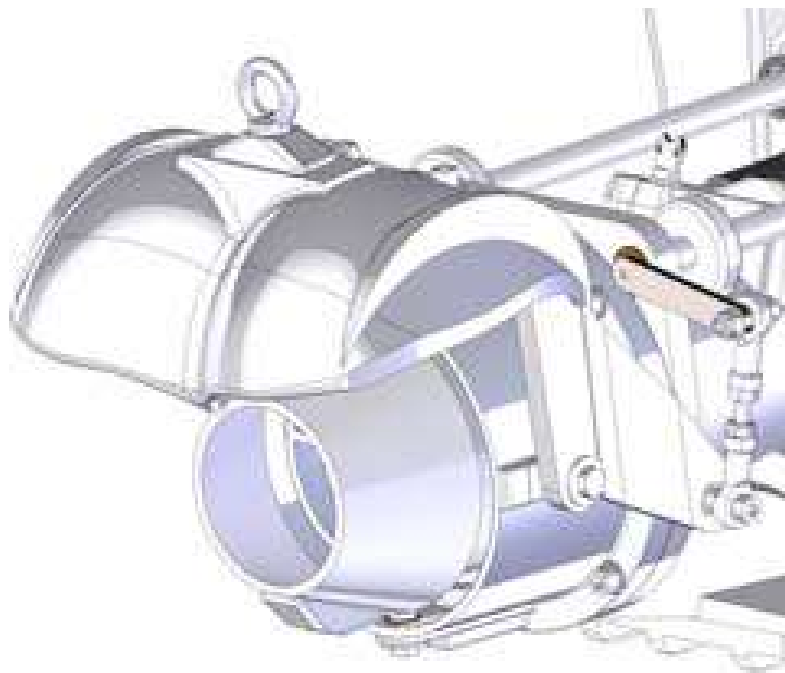
**Kuva 10.** Voimalinja. /5/

- A Tarkistusluukku
- B Merivaihte
- C Moottori
- D Painelaakerointi
- E Väliakseli

### 3.4 Peruutuskauhat

Alamarin-Jet Oy:n vesisuihkupropulsiolaitteisiin on saatavissa kuppikauha tai vaihtoehtoisesti torvikauha. Merkittävin ero kuppi- ja torvikauhan välillä on leveys. Torvikauhalla saavutetaan parempi peruutusteho. AJ 230-malliin on saatavissa vaihtoehtoina kuppi- tai torvikauha, mutta muihin malleihin jompikumpi (kuvat 11 ja 12). Peruutusasennossa kuppikauha saattaa roiskuttaa vettä ylöspäin, joten suojataso (esim. peräpeilin ulkopuolinen uimataso) jetin yläpuolella on suositeltava.





**Kuva 11.** Kuppikauha. /5/



**Kuva 12.** Torvikauha. /5/

## 4 KAVIATAATIO ILMIÖNÄ

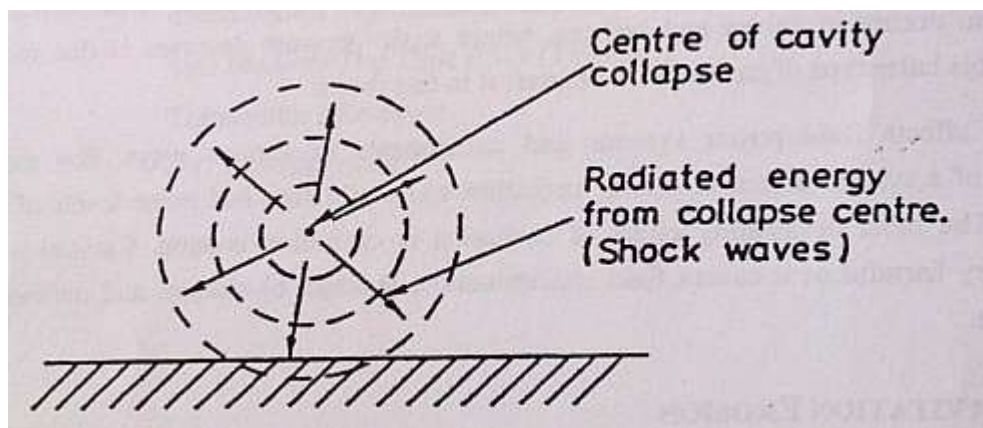
Kavitaatio on yleensä useissa tapauksissa haitallinen ja epätoivottu ilmiö neste-käyttöisissä järjestelmissä. Kavitaatioilmiön perusteellinen perusasioiden ymmärtäminen on tärkeä osa kavitaatioilmiön ehkäisyssä nestekäyttöisissä järjestelmissä.

Yksi suurimmista haitallisista vaikutuksista on materiaalin kulumisen kavitaatioilmiön seurauksena. Kun tehdään toimenpiteitä kavitaatioilmiön poistamiseksi, on tärkeää tunnistaa kavitaation olemassaolo sekä paikka josta löytyvät kavitaation alkupisteet. /8/

Kavitaatiota ilmiönä on tutkittu laajemmin 1970-luvulta lähtien (Knapp 1970), mutta olemassa olevia julkaisuja on heikosti saatavilla. Vaasan tiedekirjastossa Tritoniassa oli saatavilla yksi julkaisu, joka oli tehty hydraulisten venttiilien kavitaatiosta (Timo Koivula 2002, Cavitation in Hydraulic Valves – Aspects on the Effect of Oil Type, Erosion, and Detection Methods). Yleensä tällaiset tutkimukset on tehty eri yritysten tai eri maiden puolustusvoimien toimesta, jolloin tutkimustulokset ovat salaisia. /8/

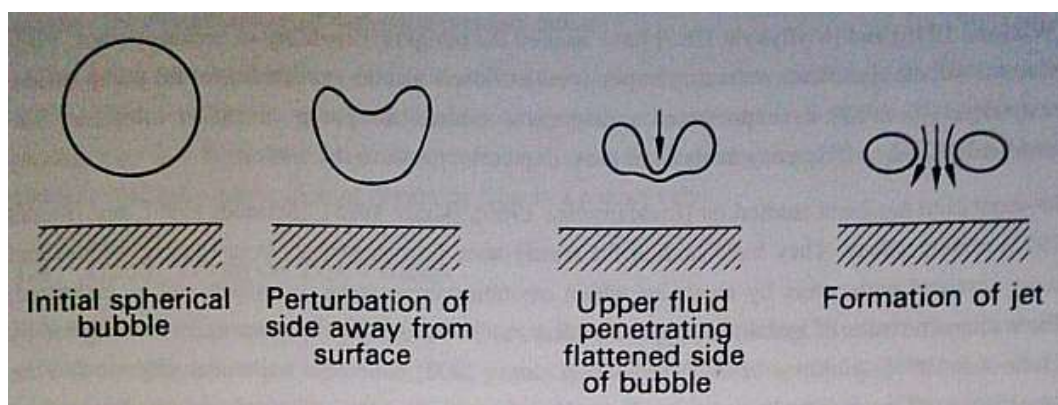
### 4.1 Kavitaatioilmiön esiintymismekanismit

Vaikka kavitaatiota on tutkittu paljon, ei vieläkään tiedetä ihan tarkasti kuinka kavitaation aiheuttaman eroosion varsinaiset mekanismit muodostuvat. Tällä hetkellä uskotaan, että on kaksi mahdollista mekanismia mitkä aiheuttavat kavitaatioeroosion materiaalissa. Yksi mekanismi on että nesteen höyrystyminen aiheuttaa komponenteissa kavitaatioeroosiota, jonka seurauksena on symmetrinen romahdaminen, joka aiheuttaa shokkiaallon ympäröivässä nesteessä eli romahtavat höyrökuplat irrottavat metallia nestettä ympäröivistä komponenteista (kuva 13). /8/



**Kuva 13.** Paineaallon mekanismi kavitaatioeroosiossa. /8/

Toisessa kavitaatiomekanismissa kavitaation höyrykupla on lähellä kiinteää kappaletta, jolloin romahtaminen on epäsymmetristä. Tämä aiheuttaa sen, että romahtaminen tapahtuu pistemäisesti kiinteää kappaletta kohti ja lopulta neste läpäisee höyrykuplan. Tällöin muodostuu mikroskooppinen nestesuihku, joka aiheuttaa pinnan kulumisen (kuva 14 ja 15). /8/



**Kuva 14.** Kavitaatioeroosion mikroskooppinen nestesuihkumekanismi. /8/



**Kuva 15.** Mikroskooppinen kavitaatiokupla, jossa nähtävissä nestesuihkuromahdus. /11/

Vaikka nämä molemmat mekanismit ovat eroosiota aiheuttavia, niin väitetään edelleen, etteivät ne kokonaan selitä tarkasteltua kavitaatioeroosioilmiötä. Shokkiaallon muotoinen kavitaatio tapahtuu liian nopeasti ja nestesuihkun höyrykuplan halkaisija on liian pieni, aiheuttaakseen koko laajuudessaan kavitaatioeroosion. Kuitenkin kun pilvi tällaisia mikroskooppisen kokoisia höyrystyneitä kuplia romahtaa (laukaisten toistensa romahtamisen), kasvattaa se romahdusefektin voimakkuutta kiinteän kappaleen pinnalle, mikä aiheuttaa itse eroosiota kappaleen pinnalla. /8/

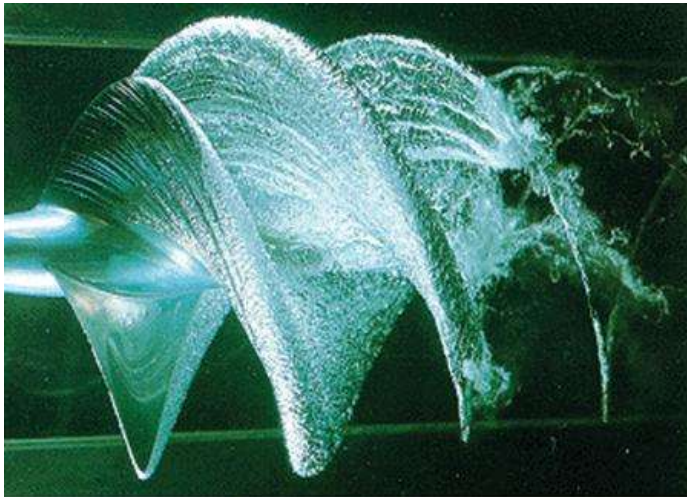
Kavitaatio riippuu myös hyvin paljon käytettävästä järjestelmästä, nesteen laadusta (vesi tai öljy), sekä muun laitteiston suunnittelusta. Tästä johtuen, jokainen tehty tutkimus on tapauskohtainen kavitaatioilmiön esiintymisestä tutkittavassa järjestelmässä, joten muuta julkaistua aineistoa ei varsinaisesti pystytä hyödyntämään tässä opinnäytetyössä. /8/

## 4.2 Kavitaation esiintyminen

Kavitaatio syntyy, kun käytössä olevan nesteen paine laskee tarpeeksi alas ja nesteen kiehumispiste laskee paineen alenemisen seurauksena. Tästä johtuen nesteen kiehumisen materiaalin pinnassa aiheuttaa mikroskooppista materiaalin kulumista. Kavitaatioilmiö vahvistuu, kun materiaalia on kulunut tarpeeksi, jolloin pinta muuttuu epätasaiseksi. Tämä johtaa suurempaan kitkapintaan ja kavitaatiota siten esiintyy helpommin.

Nesteen virtauksessa tapahtuvassa kavitaatiossa, missä kuplat liikkuvat virtauksen mukana, kavitaatioeroosio ei muodostu suoraan siihen kohtaan jossa on kavitaation muodostumisen alkupiste vaan kauempana virtauksessa (kuva 16 ja 17). Kavitaatioeroosion laajuuteen vaikuttavat monet tekijät. Kavitaation intensiteetti riippuu kiinteän materiaalin kuormasta (paineesta), joka siihen kohdistuu. Kiinteän materiaalin laatu ei aiheuta itsessään kavitaatiota, vaikkakin pinnan karkeus vaikuttaa jonkin verran kavitaation esiintymiseen.

Kun kavitaatiota esiintyy, kavitaatioeroosion muoto riippuu materiaalin ominaisuuksista, kuten kovuudesta, työstökarkenevuudesta ja jyvän koosta (kuva 17). Nesteen ominaisuudet, painehäiriöt järjestelmässä sekä virtauksien geometriset polut määrittävät kavitaation määrän. /8/



**Kuva 16.** Kavitaation esiintyminen veneen potkurin siipipinnoilla. /6/



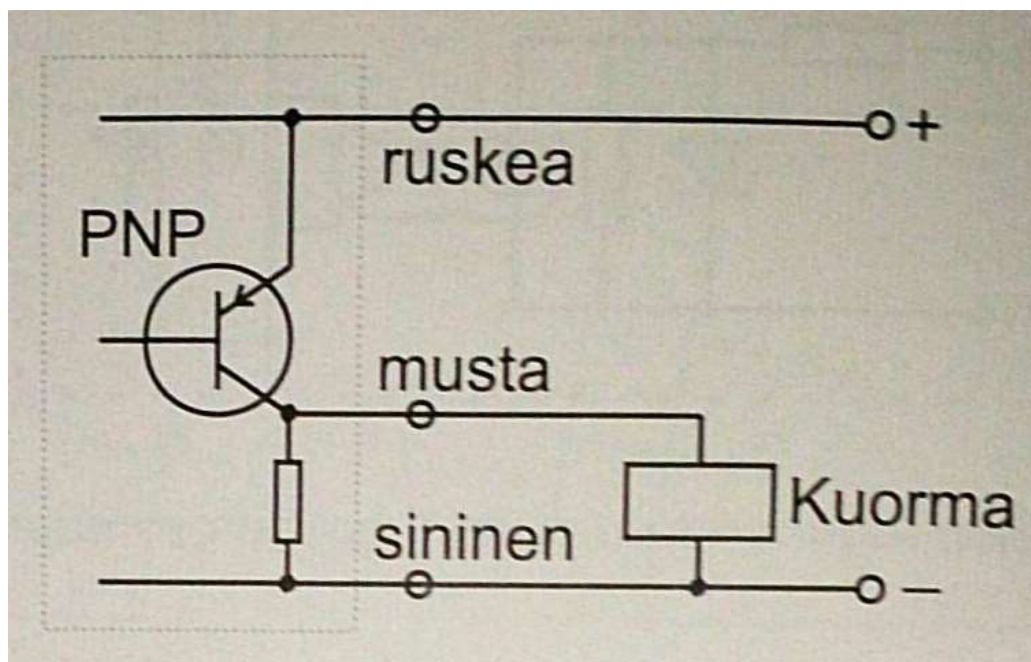
**Kuva 17.** Kavitaation aiheuttama eroosio impellerin siipipinnoilla. /9/

## 5 KUIVATESTIN SUUNNITTELU

Vesisuihkupropulsiolaitteen impellerin kuvausta päätettiin jo ensimmäisessä yritysvierailun tapaamisessa kuvata ensin niin sanotulla kuivatestillä Technobotniasa erillisellä laitteistolla. Testauslaitteistolla voitiin laboratorio-olosuhteissa suorittaa kuivatesti. Näin todettiin videolaitteiston ja valaistuksen soveltuvuus, sekä riittävän tarkan hidastuskuvan saaminen.

Ensimmäisenä suunniteltiin signaalin saaminen tarvittavalle valolle. Näin saatiin valopulssi, joka pysäytti videokuvassa laipan liikkeen. Tällöin voidaan tarkastella heijastavalla teipillä merkittyä kohtaa pyörivässä laipassa. Videokuvauslaite eli tässä tutkimuksessa GoPro Hero3+ – videokamera saatiin lainaksi Alamarin-Jet Oy:stä. Lisäksi Sony Xperia ZR–matkapuhelinta käytettiin videokuvaukseen, jolloin saatiin verrattua eri laitteiden ominaisuuksia sekä videokuvauksen vaihtoehtoja ja riittävyttä testin tekemiseen. Kuivatestausta varten tarvittavan elektronikan suunnittelussa käytettiin perinteisesti paperia ja kynää, joiden avulla suunniteltiin tarvittava kytkentä sekä tehtiin laskelmat etuvastuksen arvolle. Laskelmat varmistettiin lisäksi verkkopohjaisilla laskureilla, jotta oikean etuvastuksen todellinen arvo voitiin varmistaa. /2–3/

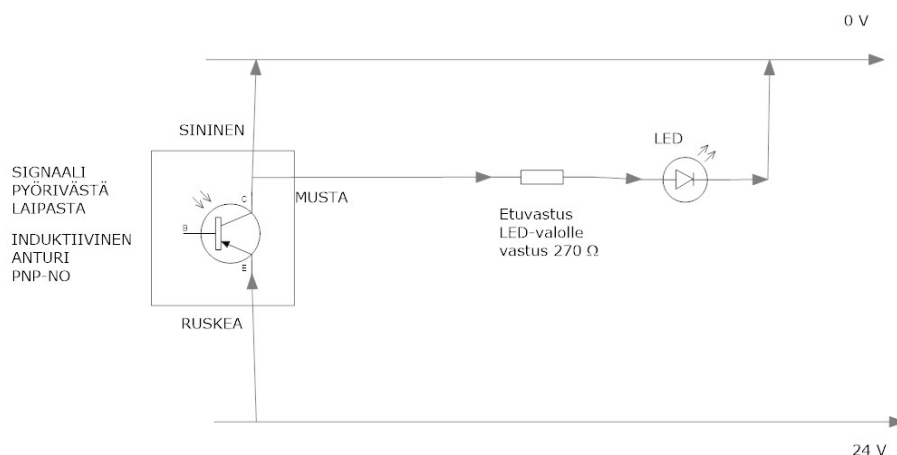
Tarvittavia komponentteja kuivatestin kytkennässä olivat LED–lamppu valaistukseen, LED–lampun heijastin, induktiivinen anturi, etuvastus LED–valolle, reikäpiirilevy, kotelo sekä virtalähde (24 V). Komponentit saatiin kuivatestiä varten Technobotniasta, lukuun ottamatta LED–lamppua ja LED–lampun heijastinta. Nämä hankittiin Osku Hirvosen avustuksella Technobotniaan Starelec Oy:stä tehtyjen laskelmien perusteella.



**Kuva 18.** Anturin sähköinen kytkentä ja johtimien tyypilliset värit. /10/

Kytkenän tarkoituksena on saada signaali induktiiviselta anturilta (kuva 18), joka antaa pulssin valolle, joka vilkkuu samassa tahdissa kuin pulssi luetaan anturilta. Näin tekemällä saadaan pyörivä liike näyttämään pysähtyneeltä. Tässä kuivates-tissä pyörivässä laipassa oleva heijastava teippi auttaa erottamaan laipan pyöräh-dyksen videokuvaalta. Sähköisten kytkentöjen piirustuksien tekemiseen käytettiin SmartDraw 2016 – ohjelmaa (kuva 19).





**Kuva 19.** Kytentäkaavio kuivatestiin.

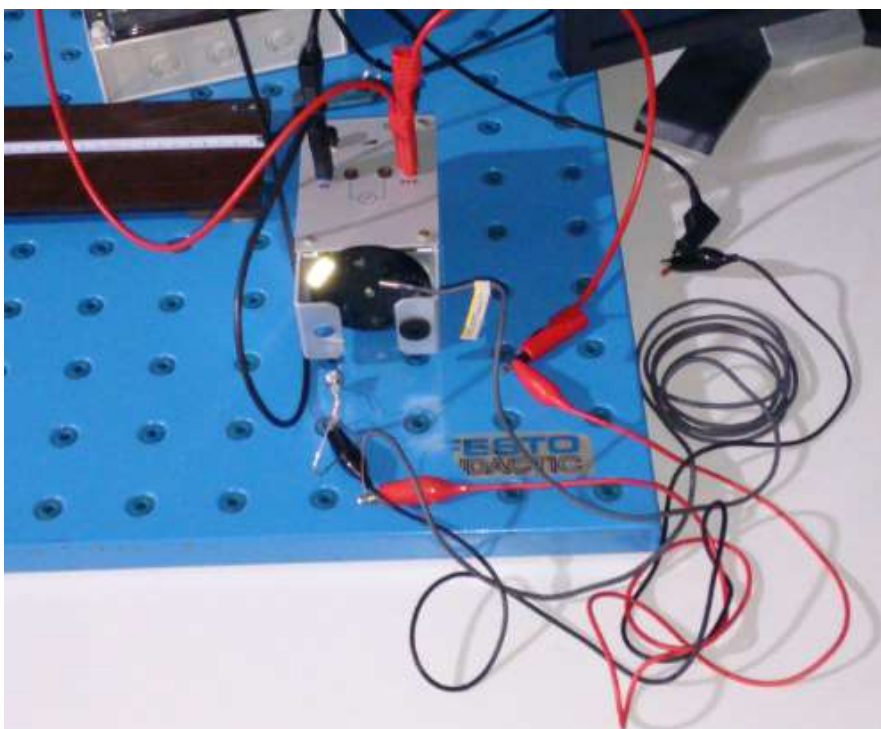
Laskelmissa piti ottaa huomioon LEDin virrankesto, joka määritti osaltaan taas etuvastuksen arvon. Myös induktiivisen anturin tehonkesto (maksimi 100mA) piti ottaa huomioon. Laskelmilla saatiin LEDin etuvastuksen arvoksi  $237,5 \Omega$  80mA virralle (LEDin suurin kestävä virta 100mA), mutta sellaista vastusta ei ole, joten valittiin seuraava suurempi, eli  $270 \Omega$  vastus. Tällä vastuksella virta tippui 60mA:iin. Näillä komponenteilla saatiin toimiva kytkentä.

Kytkenän testauksen jälkeen (kuva 20) rakennettiin kytkentä piirilevylle sekä kotelointi. Tämän ansiosta kuivatesti ja sen kuvaaminen saatiin suoritettua helpommin. Kotelointi tehtiin myös sen vuoksi, jotta laitetta voidaan käyttää opetus-tarkoituksessa tuleville insinööriopiskelijoille.



**Kuva 20.** LED-valon kytkennän testaus.

Kytkentä testattiin vielä uudestaan kun kaikki tarvittavat komponentit olivat kiinni. Kuvassa 21 nähdään kaikki kuivatestiin tarvittavat komponentit.



**Kuva 21.** Toinen kytkennän testaus tarvittavine komponentteineen.

Kytkenässä käytetyt komponentit:

– Induktiivinen anturi Omron E2E–X1B1

- Tunnistusmetodi: Induktiivinen
- Tunnistusetäisyys: 1 mm
- Ulostuleva konfiguraatio: PNP
- Toiminto: NO (normally open)
- Käyttöjännite: 12 V–24 VDC
- Maksimi kytkentäkuorma: 100mA
- Tarkkuus: 3 kHz

– Etuvastus

- Arvo: 270  $\Omega$  0,5W

– LED–lamppu

- Kirkas valodiodi (LED). Kirkas kotelo.
- Halkaisija: 5 mm
- Käyttöjännite: 3,0–4,2 VDC
- Virtakesto: 100 mA maks.
- Säteilykulma: 30°
- Valoteho: 40 000 mcd
- Väri: kylmä valkoinen

– LED–lampun heijastin

– Reikäpiirilevy johon kytkentä tehtiin

– Kotelo

– Festo rotating unit

- Käyttöjännite: 10 – 30 VDC
- Kierrosalue: 600 – 4900 kierrosta / min.

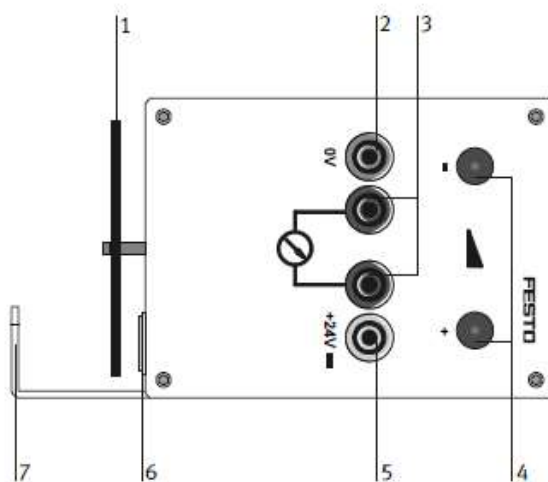
## 6 KUIVATESTIN TEKEMINEN TECHNOBOTNIASSA

### 6.1 Kuivatestin valmistelu

Kuivatestissä otettiin käyttöön laite, jolla simuloitiin pyörivää impelleriä. Kyseinen laite on Feston valmistama opetuskäyttöön tarkoitettu testilaite, jossa on pyörivä ympyrän muotoinen levy (kuvat 22 ja 23). Ympyrän muotoisessa levyssä on kahdeksan samanlaista reikää, joista voidaan mitata kierrosnopeutta reflektorin heijastumasta optisella anturilla. Kierrosnopeutta voidaan muuttaa laitteessa olevilla napeilla portaattomasti. Kierrosluku mitattiin erillisellä kierroslukumittarilla. Laite toimi 10 – 30 V jännitteellä ja testitilanteessa käytettiin 24 V jännitettä. Ympyrän muotoisesta levystä piti peittää muut reiät valoa läpäisemättömällä teipillä, jotta kierrosnopeus voitiin mitata erillisellä mittarilla.



**Kuva 22.** Feston valmistama testilaite. /7/

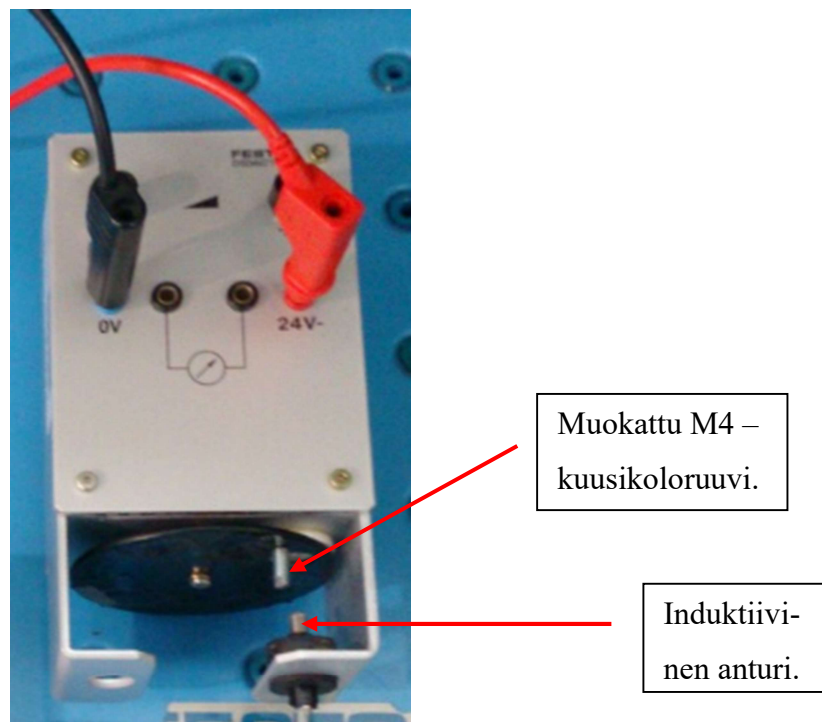


**Kuva 23.** Feston testilaitteen komponentit. /7/

Feston testilaitteen komponentit:

- 1: Reikälevy
- 2: Käyttöjännite sisääntulo 0 V
- 3: Mittauspistoke
- 4: Nopeussäätöpainikkeet
- 5: Käyttöjännite sisääntulo +24 V
- 6: Reflektori
- 7: Anturinpidike optiselle anturille.

Tätä kuivatestiä varten piti induktiiviselle anturille tehdä tappi pyörivään laippaan, josta signaali luetaan. Laippaan kiinnitettiin M4-kuusiokoloruuvi, jonka kierreesaa muokattiin anturille sopivammaksi signaalin lukemisen kannalta (kuva 24). Myös ruuvin kuusiokolokanta poistettiin. Ruuvi lukittiin laippaan Loctiten kierrelukitteella. Itse anturi kiinnitettiin laitteeseen kiertämällä teippiä anturin ympärille ja sijoittamalla se riittävän lähelle ruuvin kantaa, josta signaali saadaan luettua (<1 mm).

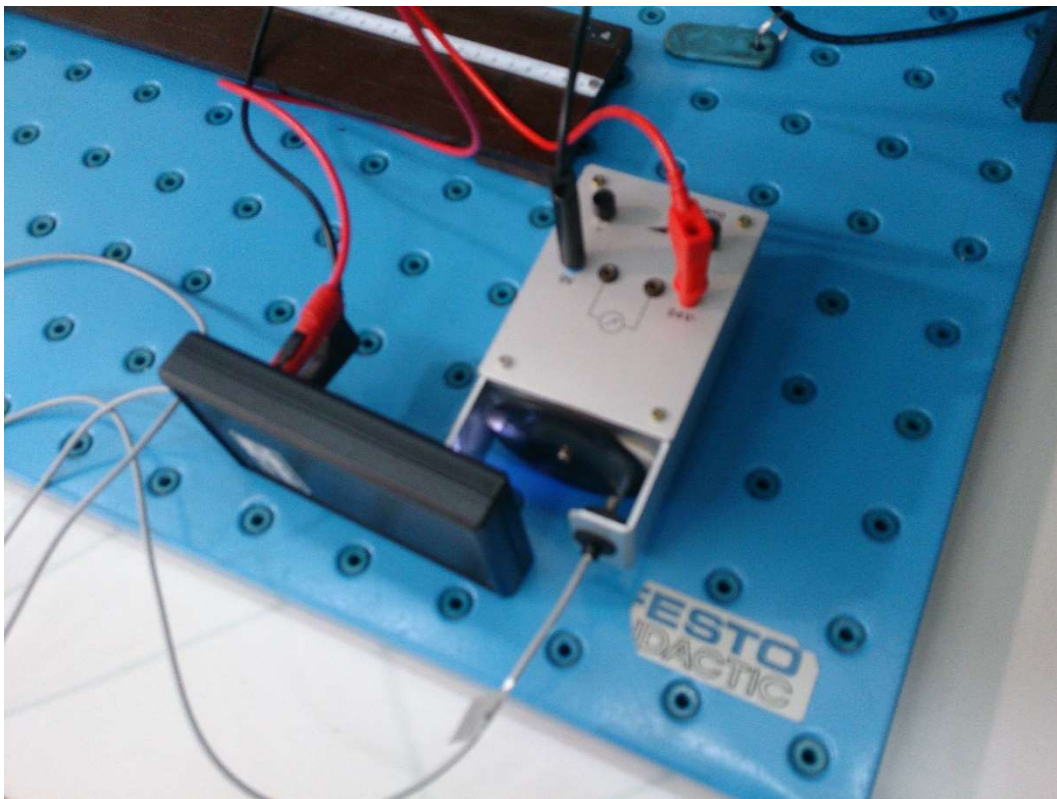


**Kuva 24.** Induktiivinen anturi sekä muokattu ruuvin kanta, josta signaali luetaan.

## 6.2 Kuivatestin suorittaminen

Kuivatestin suorittaminen (kuva 25) ei eronnut ensimmäisestä kytkentöjen testauksesta. Elektroniikka oli tässä vaiheessa rakennettu piirilevyille ja koteloitu omaan koteloon. Kuivatestin taltiointiin käytettiin GoPro–videokameraa ja vertailulaitteena Sony Xperia ZR–matkapuhelinta. Video kuvatessa huomattiin, että käytettäessä NTSC–tilan asetusta, videokuvassa nähtiin kuvan vilkkumista, johtuen tilassa olevien valojen käytettävän jännitteen taajuudesta (50 Hz). Eli videokuva oli epätahdissa valaistuksen kanssa.

Kuivatestissä käytettiin kierrosluvun mittaamiseksi erillistä kierroslukumittaria, joka oli SPM Instrumentin valmistama (Tachometer TAC–10). Tällä mittarilla mitataan valon heijastumista Feston testilaitteen heijastinpinnasta (kuva 23, kohta 6). Mitattu kierrosalue oli 300 – 3275 kierrosta minuutissa. Maksimi kierrosnopeus oli 3275 kierrosta minuutissa, jolloin LED–valo välähti. Tämä johtui anturin kytkentätaajuudesta, joka oli maksimissaan 3 kHz.



**Kuva 25.** Kuivatestin suorittaminen.

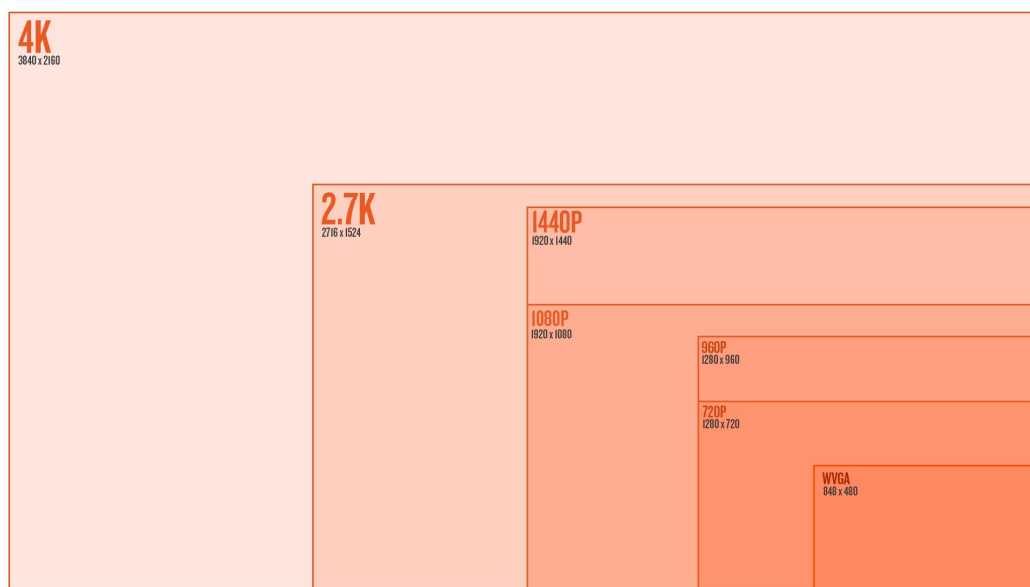
Kuivatestiä tehdessä huomattiin LED-valon olevan valoteholtaan heikko, koska testi piti tehdä hämärässä. Tarkkaa kuvaa heijastavasta teipistä oli haastavaa saada normaalissa valaistuksessa. Tämä pitää huomioida kun suunnitellaan varsinaista valaistusta koteloon. Valon pitää välähtää nopeassa tahdissa läpäisten vesimassa ja valaista impelleri tehokkaasti, jotta saadaan tarkka kuva videokameralle.

### **6.3 Kuvaslaitteiden käytetyt ominaisuudet ja tiedot**

GoPro-videokameran ja Sony Xperia ZR-videokameran videokuvausominaisuudet ovat hyvin laajat ja tässä listataan vain pääasiassa käytetyt ominaisuudet. Ominaisuudet valikoituivat kuvaamalla monella eri asetuksella ja näistä valittiin sopivat tähän testitilanteeseen käytetyt asetukset.

## 6.4 GoPro–videokameran asetukset

GoPro–videokameralla kuvattiin molemmilla perusasetuksilla (PAL 50 Hz:n ja NTSC 60 Hz:n virkistystaajuus). Näin voitiin verrata eri kuvaustiloja sekä ruudun päivitysnopeutta, jotta voitiin tehdä tarvittavat hidastusvideot kuivatestissä. Näistä kuivatestivideoista pääteltiin soveltuvat kuvaustilat käytettäväksi lopullisessa kuivatestissä (kuva 26).



**Kuva 26.** GoPro–videokameran videoresoluutioiden vertailutaulukko.

## 6.5 GoPro–videokameran videotekniset tiedot

Alla olevasta listasta nähdään GoPro–videokameran mahdolliset kuvausresoluutiotilat, joita kamera tukee NTSC – tai PAL–tilassa. Ruudun päivitysnopeus riippuu käytettävästä tilasta. NTSC–tilassa ruudun päivitysnopeus on GoPro–videokamerassa 30, 60 tai 120 ja PAL–tilassa 24, 50 tai 100 kuvaa sekunnissa.

- H.264 - 3840 x 2160 - 15 fps
- H.264 - 4096 x 2160 - 12 fps
- H.264 - 2716 x 1524 - 30 fps
- H.264 - 2716 x 1440 - 24 fps



- H.264 - 1920 x 1080 - 60 fps
- H.264 - 1920 x 1080 - 48 fps
- H.264 - 1920 x 1080 - 30 fps
- H.264 - 1920 x 1080 - 24 fps
- H.264 - 1920 x 1440 - 48 fps
- H.264 - 1920 x 1080 - 30 fps
- H.264 - 1920 x 1080 - 24 fps
- H.264 - 1280 x 960 - 100 fps/120 fps
- H.264 - 1280 x 960 - 48 fps
- H.264 - 1280 x 720 - 100 fps/120 fps
- H.264 - 1280 x 720 - 50 fps/60 fps
- H.264 - 848 x 480 - 240 fps.

Näistä käytettiin kuivatestin kuvaamisessa seuraavia kuvaustiloja:

- H.264 - 1920 x 1080 - 60 fps (NTSC)
- H.264 - 1280 x 720 - 100 fps (PAL).

## **6.6 Sony Xperia ZR–matkapuhelimen videokamera**

Sonyn videokameran asetuksista käytettiin parasta mahdollista tarkkuustilaa, joka oli valmiiksi asetettu kohdalleen. Videokameran asetuksia ei muutettu eikä testattu muita kuvaustiloja, koska tämä laite toimi vain vertailuna tässä testaustilanteessa GoPro–videokameraan.

Käytetty videotarkkuus:

- 1080p videotarkkuus - 30 fps

## 7 TARVITTAVA KUVAUSLAITTEISTO

Tarvittavan kuvauslaitteiston valintaa mietittäessä piti rajata ominaisuudet, joita tarvittiin kuvauksen onnistumiseksi. Lisäksi valittiin halutut kuvaustarkkuudet ja kuvausnopeudet. Kuvauslaitteiston valinta tässä tutkimuksessa kohdistui normaaleihin kuluttajille suunnattuihin kuvauslaitteisiin, joita voi hankkia verkkokaupoista tai elektroniikkamyymälöistä.

### 7.1 Tarvittavat kuvauslaitteen ominaisuudet

- Kuvaustarkkuus
  - vähintään 720p, mielellään FullHD eli 1920 x 1080
- Kuvausnopeus (fps)
  - vähintään 60 fps, mieluiten kuitenkin 120 fps tai enemmän
- Laitteen vesitiiviys
- Tarkennusetäisyys (minimi)
  - Laitteen sijainti on impellerin siipipintaan noin 165 – 185 mm
- Kauko-ohjaus (wlan tai oma ohjain)
- Laitteen koko
  - Kuvauslaitteen pitää mahtua suunniteltuun koteloon
  - Maksimikoko määräytyy suunnittelun kotelon mukaan.

### 7.2 Vaihtoehdot kuvauslaitteiksi

Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.

## **8 AUTOMATIIKAN SUUNNITTELU**

### **8.1 Automatiikan suunnittelun lähtökohdat**

Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.

### **8.2 Suunniteltu automatiikka**

Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.

**Kuva 27.** Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.

**Kuva 28.** Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.

**Kuva 29.** Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.

### **8.3 Valaistuksen suunnittelu**

Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.

**Kuva 30.** Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.

**Kuva 31.** Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.

### **8.4 Valaistuksen komponentit**

Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.

## 9 VIDEOKUVAUSKOTELON SUUNNITTELU

### 9.1 Suunnittelusta yleisesti

Kuvaamiseen tarvittava kotelo suunniteltiin Alamarin-Jet Oy:n AJ 245 vesisuihkupropulsiolaitteeseen sopivaksi. Muihin vesisuihkupropulsiolaitteisiin kyseistä suunniteltua koteloa ei voi suoraan käyttää, koska muissa malleissa käytetään erilaisia ratkaisuja tarkistusluukun toteutukseen.

Kotelon suunnittelussa tehtiin aluksi muutama konseptimalli, joista saatiin käsitys siitä, kuinka kamera ja tarvittavat valot voidaan sijoittaa koteloon, joka sijaitsee vesisuihkupropulsiolaitteen sisällä. Kotelon suunnittelussa vaatimuksina pidettiin helppoa valmistusta, helppokäyttöisyyttä sekä osin vesitiiviyttä.

Suunnittelun edetessä huomattiin, että mahdollinen kotelo voitaisiin sijoittaa tarkistusluukun tilalle. Toinen vaihtoehto oli muokata jo olemassa olevaa tarkistusluukua siten, että siihen saadaan lisättyä sopiva kotelo, johon liitetään tarvittavat ilmatiiviit luukut. Lisäksi vaatimuksena oli saada kameraan ja mahdolliseen muihin elektroniikkaan pääsy helpoksi.

Kotelon suunnittelussa mietittiin myös tarvittavan kotelon sisäpuolista kokoa, sekä kotelon tarvetta olla vedenpitävä, jonka ansiosta voidaan käyttää laajempaa skaalaa eri kuvauslaitteissa. Tällöin myös mahdollinen muu elektroniikka, joka tulee kotelon sisään, ei tarvitse itsessään olla suojattu vedeltä. Myös kameralle sekä valoille piti suunnitella asennuspaikat, jotka saadaan suunniteltua koteloon.

Kotelo suunniteltaessa tehtiin muutamia erilaisia konseptimallinnuksia prototyypeistä (LIITE 1). Myös kameran sekä valojen erilaisia sijainteja kotelossa mietittiin jo tässä vaiheessa. Muutamaa konseptimallinnusta lähdettiin jatkokehittämään ja niiden pohjalta päädyttiin tekemään kotelo jo valmiina olevaan tarkistusluukkuun. Tarkistusluukun 3D-mallia muokattiin niin, että koteloon saatiin mahtumaan kamera ja valot sekä mahdollinen muu elektroniikka. Suunnitteluvaiheessa huomattiin, että mahdollisesti käytettävälle Siemensin logiikalle ei löydy riittävä-

ti tilaa suunnitellun kotelon sisällä. Tämän takia mahdollinen käytettävä ohjaus-elektroniikka päätettiin suunnitella kotelon ulkopuolelle.

## **9.2 Kotelon suunnittelu vesitiiviiksi**

Kotelon avonaisen etuseinän vesitiivistämiseksi päätettiin laittaa suora 4 mm metallilevy esimerkiksi teräksestä, joka hitsataan kiinni koteloon ja saadaan näin kotelon takaosasta vesitiivis. Hitsattu levy maalataan samalla värillä kuin muu tarkistusluukun materiaali.

Suunnitellun kotelon kameralle ja valoille tulevien reikien kohdalle laitetaan 3 mm kirkkaasta polykarbonaattilevystä suojat, jotka kiinnitetään vedenkestävällä liimalla koteloon kiinni. Näin saadaan kotelosta vesitiivis, mutta näkyvyys impellerille säilyy. Myös kotelon yläpuoliselle kiinnityspinnalle tehtyyn reikään laitetaan 6 mm polykarbonaattilevystä tehty luukku, joka kiinnitetään koteloon kahdella M6x10 – kuusiokoloruuvilla. Koteloon on lisäksi tehty ura 3 mm pyöreälle tiivisteelle kotelon yläpintaan, mikä tekee luukusta ilma- ja vesitiiviin.

## **9.3 Lopullisen mallin suunnittelu**

Tämä osa työstä katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin.

## **9.4 Kotelon materiaalien valinta**

Materiaalin valinnassa ei tehty vertailuja eri materiaalien kesken, vaan päädyttiin käyttämään olemassa olevaa tietotaitoa eri materiaaleista ja niiden ominaisuuksista. Tämän ansiosta materiaalien valinnat ovat selkeitä ja jo aikaisemman kokemuksen mukaan hyväksi havaittuja.

Asennus- ja elektroniikan käyttöluukun materiaaliksi valittiin 6 mm polykarbonaattilevy, jota on helppo työstää, mutta joka on kuitenkin iskunkestävää. Kameran ja valojen aukkojen kohdalle valittiin samaa polykarbonaattilevyä, mutta ohuempaa, eli 3 mm levyä. Liimaukseen voidaan käyttää esimerkiksi Sikaflex-liimaa, joka kestää merivettä.

Tiivistemateriaalina päätettiin käyttää samaa tasotiivistemateriaalia kuin käytössä olevassa tarkistusluukun tiivisteessä. Luukun kannen alapuolelle, josta päästään kameralohkoon käsiksi ylhäältäpäin, (irrottamatta koko tarkistusluukku vesisuihkupropulsiolaitteesta) asennetaan tasotiiviste, joka leikataan sopivaan muotoon tasotiivistemateriaalista.

Suunnitellussa kotelossa kameralohkon valmistamiseen päätettiin käyttää materiaalina alumiinia. Korroosionkesto on tarpeellinen tässä tapauksessa, koska kotelo tullaan käyttämään välittömässä kosketuksessa veden kanssa. Alumiinia on saatavilla erilaisia seoksia, joilla on erilaisia ominaisuuksia. Alumiinit voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään, ei-lämpökäsiteltävät ja lämpökäsiteltävät alumiinit. Ei-lämpökäsiteltävät alumiinit saavat pääasiassa ominaisuutensa seosaineiden ja valssauksen kautta. Tyypillisiä seosaineita ovat mangaani ja magnesium. Ei-lämpökäsiteltäviä laatuja ovat 1000, 3000 ja 5000-sarjan alumiinit.

Kameralohkon alumiiniksi valitaan taulukosta vertailemalla sopiva materiaali. Lohkon valmistamiseen voidaan käyttää esimerkiksi EN WA 5754-alumiinilaatua, jonka tärkeimpiä ominaisuuksia ovat meriveden kestävyys ja hitsattavuus. Kuvassa 32 nähdään yleisimpiä seoksia ja niiden tyypillisiä ominaisuuksia. Näitä alumiineja on saatavissa eri muodoissa. /12/

EN AW	AA	WERKSTOFF	DIN	SS	MPa	MPa	HB	Käyttökohteet
1050A	1050A	3.0255	Al99,5	4007	20	65	20	Hyvä korroosiokesto, hyvä muovattavuus
1070A	1070A	3.0275	Al99,7	4005	15	60	18	Hyvä korroosiokesto, hyvä muovattavuus
1200	1200	3.0205	Al99,0	4010	25	75	23	Syvävetoon,lämmönvaihtimet
2007	2007	3.1645	AlCuMgPb	4335	220	340	90	Automaattisorvauslaatu
2014	2014	3.1255	AlCuSiMn	4338	440	360	120	Suuri lujuus, lentokoneiteollisuus
2017A	2017	3.1325	AlCuMg1		260	380	110	Pakkausteollisuus, hyvä lujuus
2024	2024	3.1355	AlCuMg2		330	460	120	Suuri lujuus ja sitkeys, lentokoneiteollisuus
3003	3003	3.0517	AlMnCu		35	95	28	Hyvä korroosiokesto, hyvä muovattavuus
3103	3103	3.0515	AlMn1	4054	35	90	27	Autokorilaatu
5005	5005	3.3315	AlMg1	4106	110	145	47	Anodisointilaatu
5052	5052	3.3523	AlMg2,5	4120	65	170	47	Hyvä korroosiokesto
5083	5083	3.3547	AlMg4,5Mn	4140	125	275	75	Hyvä korroosiokesto, merivesilaatu
5754	5754	3.3535	AlMg3	4125	80	200	50	Merivesilaatu,hyvä hitsattavuus
6012	6012	3.0615	AlMgSiPb		200	275	80	Automaattisorvauslaatu
6061	6061	3.3211	AlMg1SiCu		240	290	90	Hyvä hitsattavuus, suuri lujuus
6063	6063	3.3206	AlMgSi0,5	4104	160	215	70	Yleisin profiililaatu, sopii anodisointiin
6082	6082	3.2315	AlMgSi1	4212	255	315	95	Yleisin koneenrakennusseos,anodisoitava
6262	6262		AlMg1SiPb		240	290	85	Automaattisorvauslaatu,anodisoitava
7010	7010	3.4394			485	545	150	Suuri lujuus, lentokoneiteollisuus
7020	7020	3.4335	AlZn4,5Mg1	4425	275	350	105	Suuri lujuus, hitsattava
7050	7050	3.4144			485	545	150	Lentokoneiteollisuus, muotINVALMISTUS
7075	7075	3.4365	AlZnMgCu1,5		505	570	150	Muottiteollisuus,työvälineet, lentokoneet
7475	7475	3.4384			420	500	140	Lentokoneiteollisuus

**Kuva 32.** Alumiinien vertailutaulukko. /12/

## 9.5 Valittujen materiaalien tekniset tiedot

- Alumiini taulukosta
  - EN AW 5754
  - Merivesilaatu
  - Hitsattavuus
- Tasotiiviste luukun kanteen
  - Käytetään samaa tiivistemateriaalia kuin tarkistusluukun kannessa
- LED-valojen sähköeristys ja vesitiivistys polyuretaanihartsilla /13-14/
  - Kirkas epoksi XP 3585/6 (vaihtoehto 1)
  - Masterbond LED401 (vaihtoehto 2)
  - Voidaan käyttää myös muuta vedenkestävää elektroniikkahartsia
- Polykarbonaattilevy 3 mm
  - lasinkirkas
  - erinomainen iskunlujuus (käytännössä särkymätön)

- puolta kevyempi kuin lasi
- ei pirstaloidu
- laaja käyttölämpötila-alue (-100... +120°C)
- vaikeasti syttyvä
- kylmätaivutettava
- helppo työstää, ei erikoisteriä
- Polykarbonaattilevy 6 mm
  - lasinkirkas
  - erinomainen iskunlujuus (käytännössä särkymätön)
  - puolta kevyempi kuin lasi
  - ei pirstaloidu
  - laaja käyttölämpötila-alue (-100... +120°C)
  - vaikeasti syttyvä
  - kylmätaivutettava
  - helppo työstää, ei erikoisteriä
- Liima
  - Sikaflex 292i 300ml valkoinen Marine
  - valumaton rakenneliima dynaamisen rasituksen kohteisiin veneissä ja laivoissa. Pysyvästi elastinen, erittäin hyvä tartunta, hyvä lujuus ja sitkeys. Kestää hyvin mekaanista rasitusta ja vaimentaa värinöitä. Meriveden- ja kosteuden kestävä. Ei sisällä liuotainaineita eikä VOC-päästöjä.

## 9.6 Kotelon suunnittelun toteutus

Kotelon suunnittelussa käytettiin Siemensin NX 8.0 – ja Autodesk Inventor Professional 2015 3D-mallinnusohjelmistoja. Tiedostot muutettiin STEP-muotoon. Näin menettelemällä voitiin tarkastella tehtyjä 3D-malleja Alamarin-Jet Oy:n käyttämällä 3D-ohjelmistolla. Kotelon suunnittelu aloitettiin valmiin vesisuihkupropulsiolaitteen 3D-mallin pohjalta, jota voitiin käyttää mitoituksen apuna kotelon suunnittelussa (kuva 33). Tätä 3D-mallia tarkasteltiin jo opinnäytetyön aloituspalaverissa ja mietittiin mahdollisia vaihtoehtoja kotelon toteuttamiseksi.



Suunnittelun alkuvaiheessa päätettiin tehdä muutama konseptimallinnus ja niiden pohjalta tehtiin jatkosuunnitelma projektin etenemisestä.



**Kuva 33.** Suunniteltavan kotelon sijainti AJ 245–vesisuihkupropulsiolaitteessa.

Projektin alussa suunnitelluista konseptimalleista karsittiin pois tarkistusluukun tilalle suunnitellut 3D–mallit ja päädyttiin tekemään tarvittavat muutokset jo olemassa olevaan tarkistusluukun 3D–malliin. Näin toimimalla voitiin pitää veden virtaus lähellä oikeaa käyttötilannetta, jossa veden virtaamiseen ei ole esteitä vesisuihkupropulsiolaitteessa.

Suunnittelun lopullisen kameralohkokotelon (LIITE 2) suunnittelu oli suoraviivaisempaa, koska vesitiivistys oli tarpeellista vain LED–valojen osalta. Kameralohkon suunnittelussa päädyttiin käyttämään mahdollisimman paljon suoria pintoja, jolloin mitoitus sekä valmistettavuus ovat huomattavasti helpompia toteuttaa käytännössä kuin konseptimallissa.

Kameran aukon kohdalle päätettiin käyttää samaa suojamateriaalia (3 mm polykarbonaattilevyä) kuin konseptimallissakin. Myös tarkistusluukun yläosaan suunniteltuun luukkuun käytetään 6 mm polykarbonaattilevyä. Kotelo on suunniteltu

siten, että kamera on suojassa veden virtausvoimalta kotelon ja kameralohkon sisällä.

LED-valojen asennus voidaan tehdä valmiiseen koteloon, jonka mitat ovat 25 mm x 82 mm x 10 mm (pituus x leveys x korkeus) tai vaihtoehtoisesti voidaan 3D-tulostaa vastaavan kokoinen kotelo. LED-valojen koteloon voidaan sijoittaa myös muuta elektroniikkaa valojen lisäksi, kuten esimerkiksi tarvittava etuvastus piirilevyineen. LED-valojen reikien kohdalle suunniteltiin käytettäväksi 3 mm polykarbonaattilevystä tehtyjä suojia.

## 10 YHTEENVETO

Kavitaatioilmiötä tarkasteltiin aluksi teoreettisesti ja joitakin tutkimuslähteitä pystyttiin käyttämään hyödyksi kavitaatioilmiön teorian selvittämiseksi. Kuivates-tausta varten suunniteltiin ja kokoonpantiin vaadittava testauselektroniikka. Näin menettelemällä pystyttiin selvittämään onko ylipäättään mahdollista saada tietyn-laista hidastuskuvaa pyörivästä laipasta. Tätä testausmenetelmää voidaan siten soveltaa impellerin siipipintojen videokuvaukseen kavitaatioilmiön esiintymisen todentamiseksi.

Kuivatesti suoritettiin onnistuneesti Technobotniassa 14.3.2016 ja vielä tarkistet-tiin Alamarin-Jet Oy:ssä tekemällä kuivatesti uudestaan 21.4.2016. Testin tulok-sena saatiin pysähtyneeltä vaikuttavaa videokuvaa tietyssä paikassa pyörivässä laipassa, josta voitiin tarkastella heijastavaa teippiä valon valaisemalla alueella.

Opinnäytetyössä tehty suunnitteluprosessi lähti liikkeelle konseptimallien suunnit-telusta ja päättyi lopulliseen kotelon 3D-malliin. Suunnitellun lopullisen kotelon kehittämisessä onnistuttiin yhteistyössä Alamarin-Jet Oy:n kanssa. Opinnäytetyön tuloksena saatiin tehtyä tarvittavat 3D-mallit ja mitoituspiirustukset (LIITE 3) kameranlohkon valmistamiseen sekä tarkistusluukun muokkaamiseen.

Suunnittelun edetessä päädyttiin kahteen eri ratkaisuun automaation toteutta-miseksi. Opinnäytetyössä esitetyt LED-valojen ohjaukseen suunnitellut automa-tiikan mallit ovat toimivia, edullisia sekä helposti toteutettavissa. LED-valojen ohjaamiseen tarvittavan automatiikan osalta voidaan käyttää myös muita vaihto-ehjoja tässä opinnäytetyössä esiteltyjen mallien lisäksi.

Tämän opinnäytetyön lopputuloksena saatiin toteutettavissa olevat suunnitelmat Alamarin-Jet Oy:n tuotekehitysprojektiin.

## LÄHDELUETTELO

/1/ Alamarin-Jet Oy 2016. Yritys [online]. [Viitattu 5.3.2016 ]. Www-muodossa: <URL: <http://alamarinjet.com/index.php/fi/yritys>>.

/2/ Jämsä, Lauri. 5.8.2010. LEDin etuvastus ja sen mitoitus. [online]. [Viitattu 10.3.2016]. Www-muodossa: <URL: [www.ruuvipenkki.fi/2010/08/05/ledin-etuvastus-ja-sen-mitoitus](http://www.ruuvipenkki.fi/2010/08/05/ledin-etuvastus-ja-sen-mitoitus)>.

/3/ el-Brix Oy 2007. Ledien sarjaankytkentä. [online]. [Viitattu 10.3.2016] Www-muodossa: <URL: <https://www.el-brix.fi/info/Kytkenka.php> >.

/4/ Wikipedia 2016. Vesisuihkupropulsio. [online]. [Viitattu 20.3.2016] Www-muodossa: <URL: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Vesisuihkupropulsio>>.

/5/ Alamarin-Jet Oy 2016. Ohjekirjat. [online]. [Viitattu 4.4.2016] Www-muodossa: <URL: [http://alamarinjet.com/images/filebank/suunnittelijan\\_manuaali\\_ver.1.3\\_low.pdf](http://alamarinjet.com/images/filebank/suunnittelijan_manuaali_ver.1.3_low.pdf)> .

/6/ AMC Research 2016. Cavitation Research Laboratory. [online]. [Viitattu 20.3.2016] Www-muodossa: <URL: <https://www.amcsearch.com.au/facilities/ship-hydrodynamics/cavitation-research-laboratory/>>.

/7/ Festo 2016. Rotary unit 167097. [online]. [Viitattu 4.4.2016] Www-muodossa: <URL: <http://www.festo-didactic.com/int-en/services/printed-media/data-sheets/sensor-technology/rotary-unit-167097.htm?fbid=aW50LmVuLjU1Ny4xNy4zMj4xMDk1LjUzODg>>.

/8/ Koivula, Timo., Cavitation in Hydraulic Valves – Aspects on the Effect of Oil Type, Erosion, and Detection Methods. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 2002.

/9/ Boattest.com 2009. Does Your Prop Have Secret Cavitation? [online]. [Viitattu 12.4.2016] Www-muodossa: <URL: [https://www.boattest.com/view-news/3643\\_does-your-prop-have-secret-cavitation](https://www.boattest.com/view-news/3643_does-your-prop-have-secret-cavitation)>.

/10/ Keinänen, T., Kärkkäinen, P., Lähetkangas, M. & Sumujärvi, M., Automaatiojärjestelmien logiikat ja ohjaustekniikat., 2010 WSOYpro Oy, Helsinki

/11/ Wildcat propellers 2016. Gallery 3. [online]. [Viitattu 19.4.2016] Www-muodossa: <URL: [http://www.wildcatprops.com/gallery3/2\\_lg.jpg](http://www.wildcatprops.com/gallery3/2_lg.jpg)>.

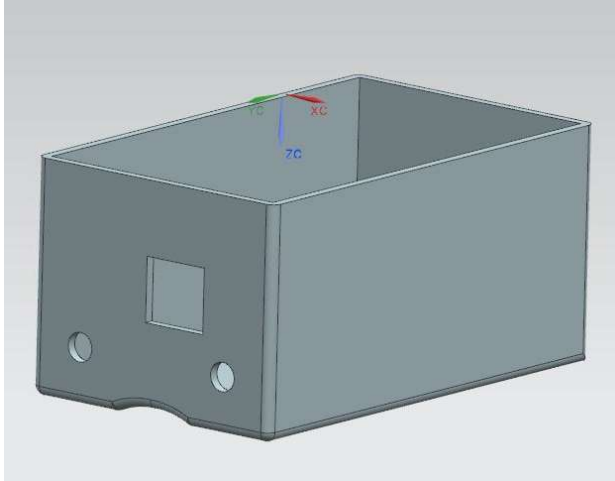
/12/ ThyssenKrupp Aerospace Finland Oy 2016. Alumiinit. [online]. [Viitattu 24.4.2016] Www-muodossa: <URL: <http://www.thyssenkrupp.fi/alumiinit/alumiinit/alumiinit>>.

/13/ Jacomp Oy 2016. Elektroniikkavaluhartsit – polyuretaani, epoksi. [online]. [Viitattu 24.4.2016] Www-muodossa: <URL: <http://www.jacomp.fi/tuotteet/elektroniikkavaluhartsit/>>.

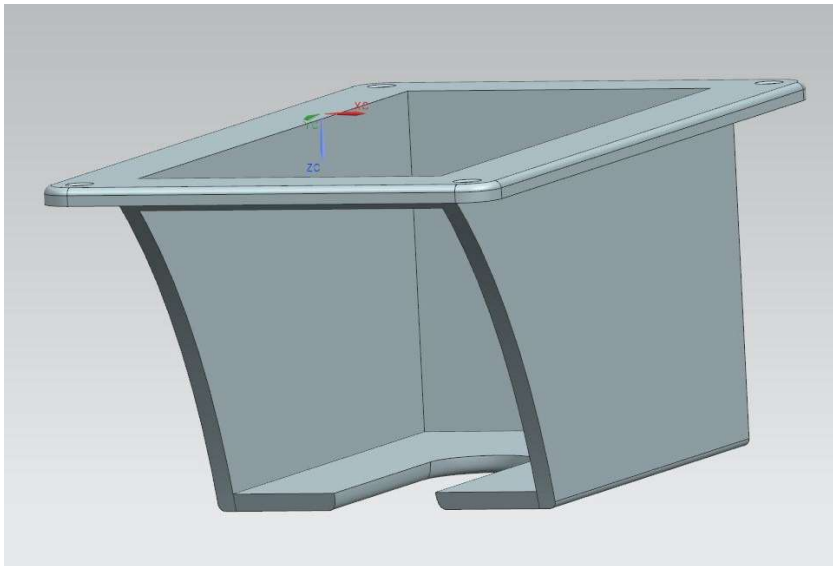
/14/ MasterBond Inc. 2016. LED401 Product Information. [online]. [Viitattu 24.4.2016] Www-muodossa: <URL: <http://www.masterbond.com/tds/led401/>>.

## LIITE 1

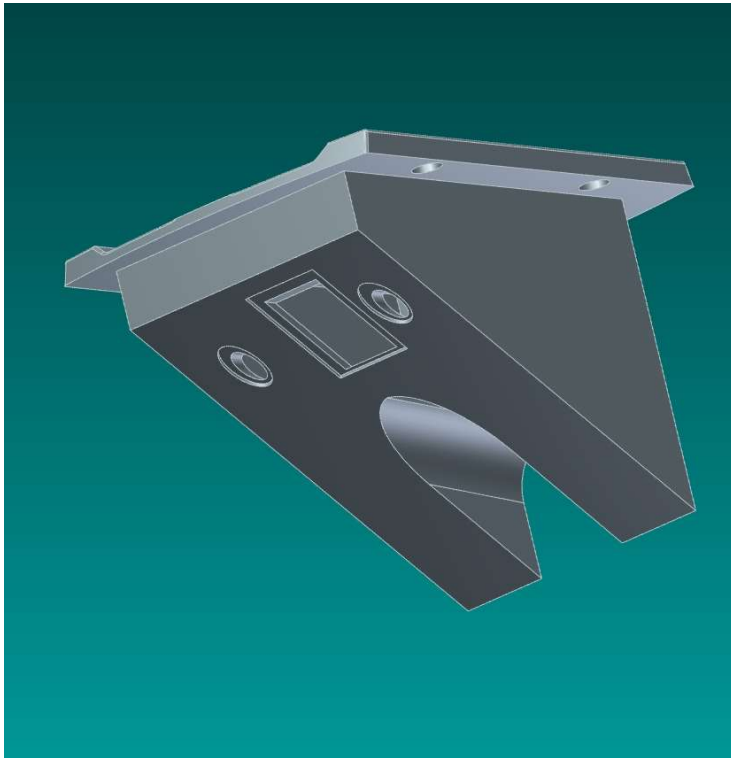
### Konseptimallit



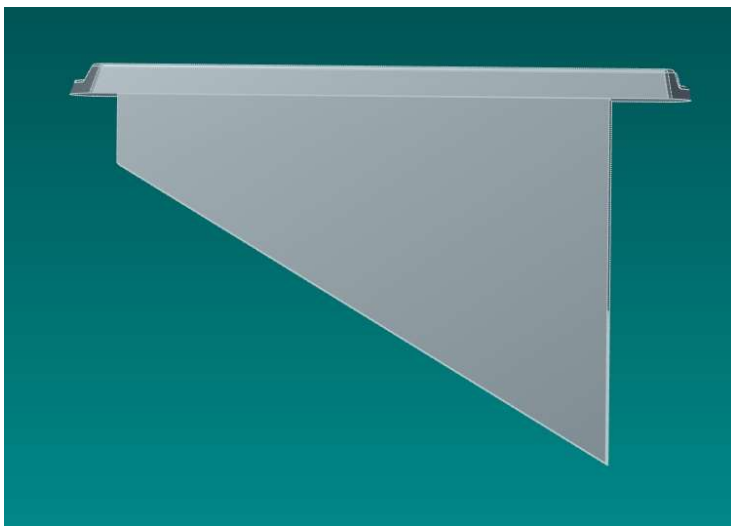
**Kuva 34.** Ensimmäinen hahmotelma kameran ja valojen asettelusta omaan koteloon.



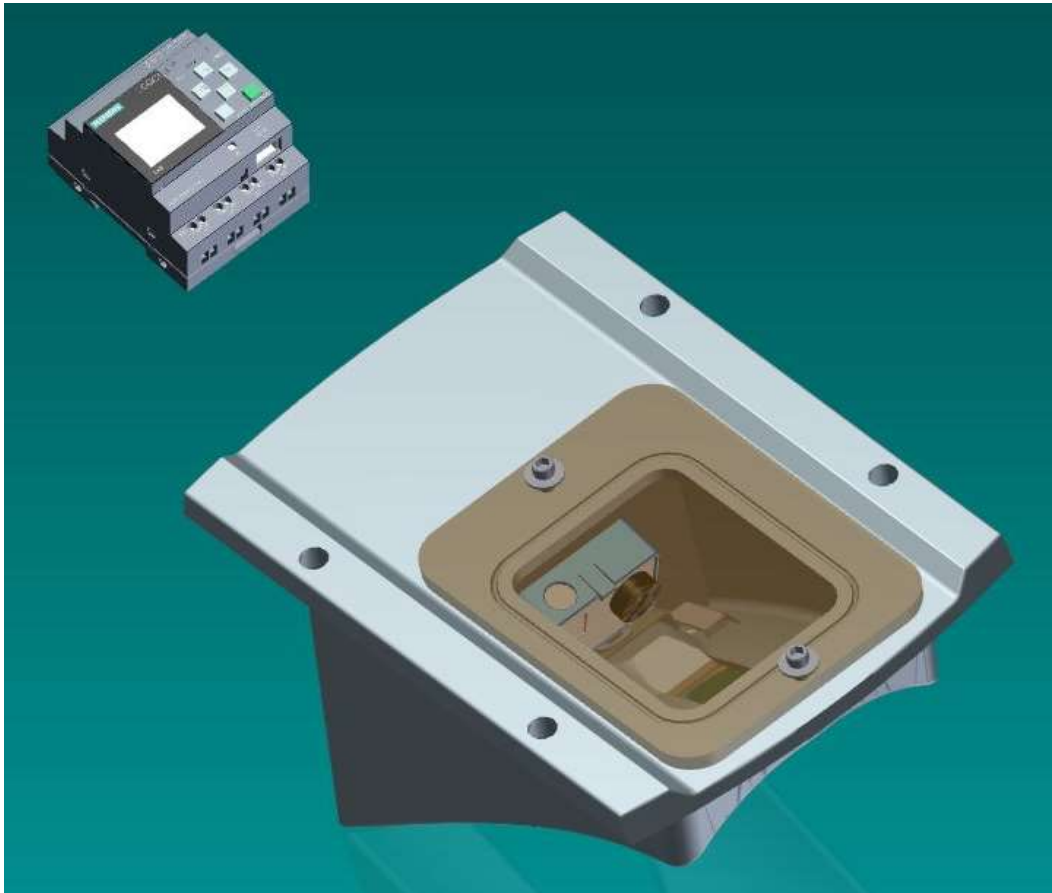
**Kuva 35.** Toinen hahmotelma, jossa kotelon takaseinä kokonaan auki impellerille päin.



**Kuva 36.** Suorasta levystä tehty konseptimalli.



**Kuva 37.** Sama suorasta levystä tehty konseptimalli sivulta kuvattuna.



**Kuva 38.** Tarkistusluukun koteloon suunniteltu konseptimalli ylhäältä.

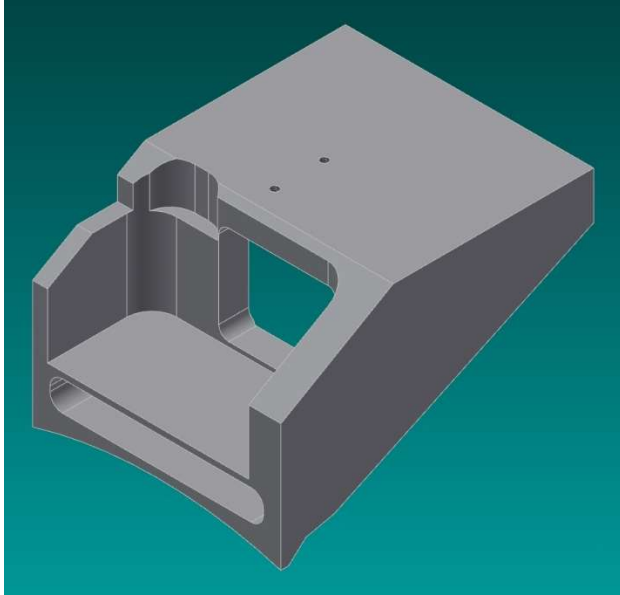




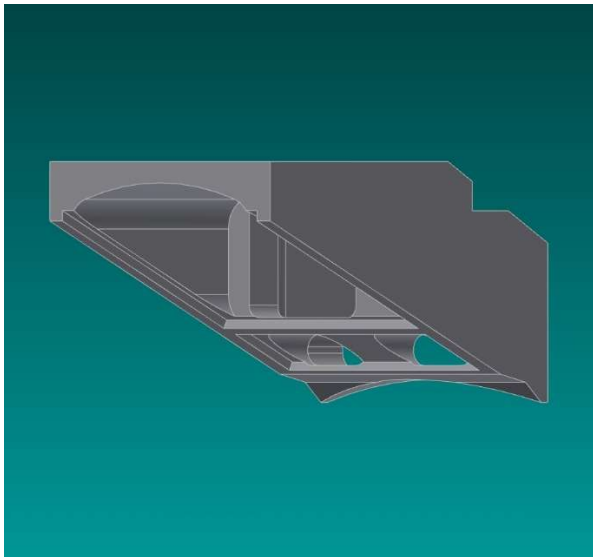
**Kuva 39.** Tarkistusluukun koteloon suunniteltu konseptimalli impellerin suunnasta kuvattuna.

LIITE 2

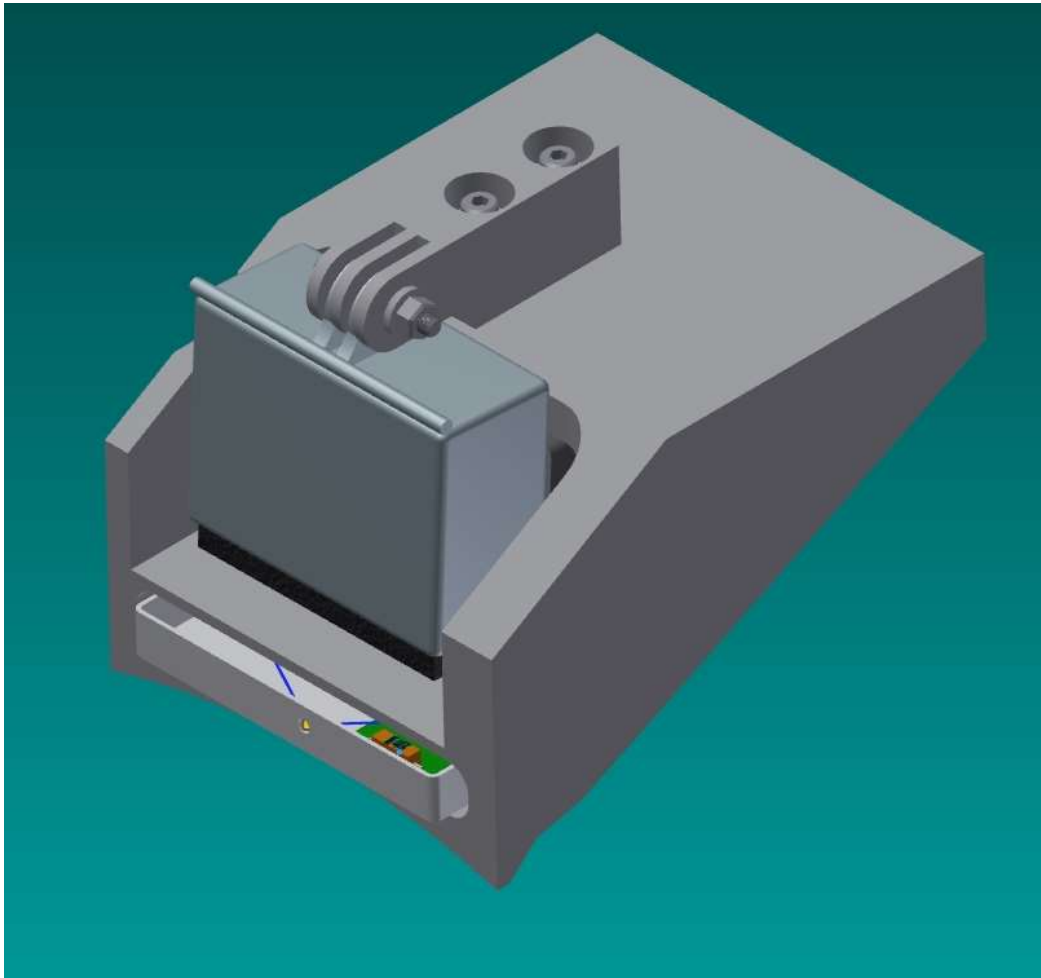
**Lopulliset 3D-mallit kameralohkosta ja muokatusta tarkistusluukusta**



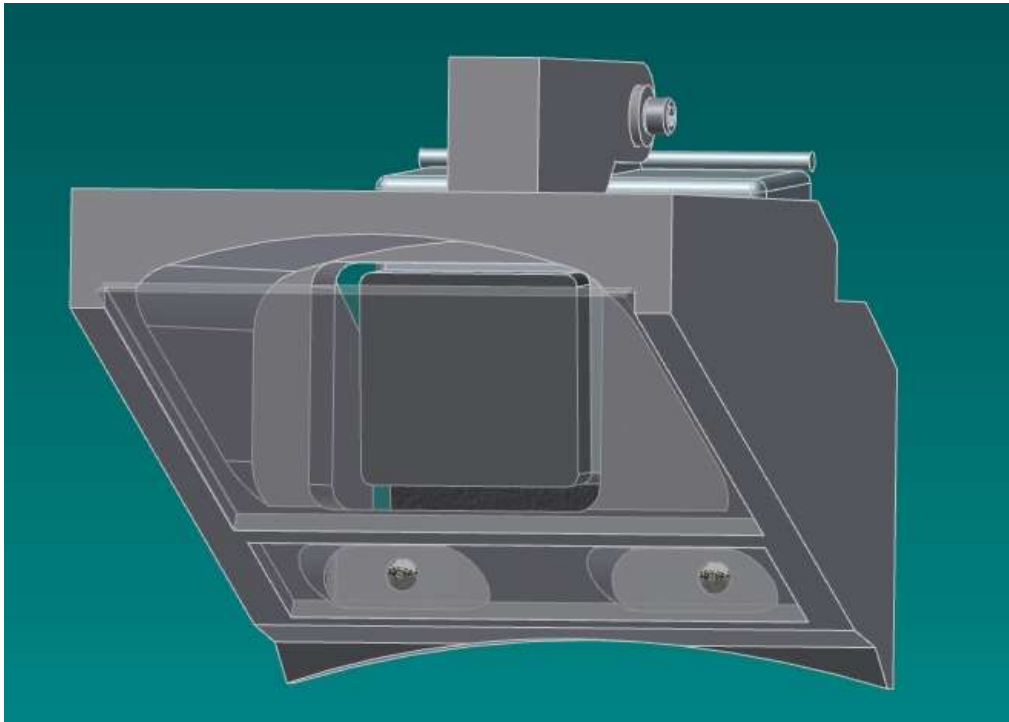
**Kuva 40.** Suunniteltu lopullinen kameralohko.



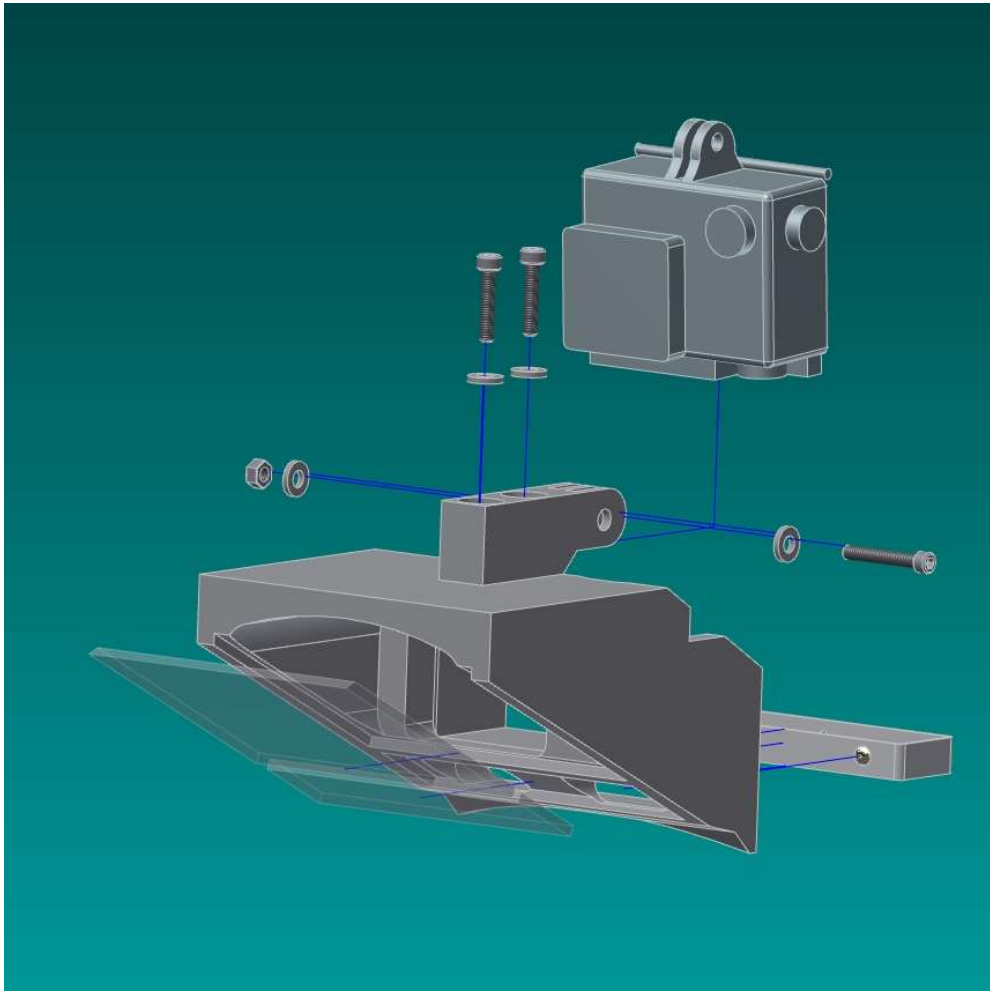
**Kuva 41.** Suunniteltu lopullinen kameralohko.



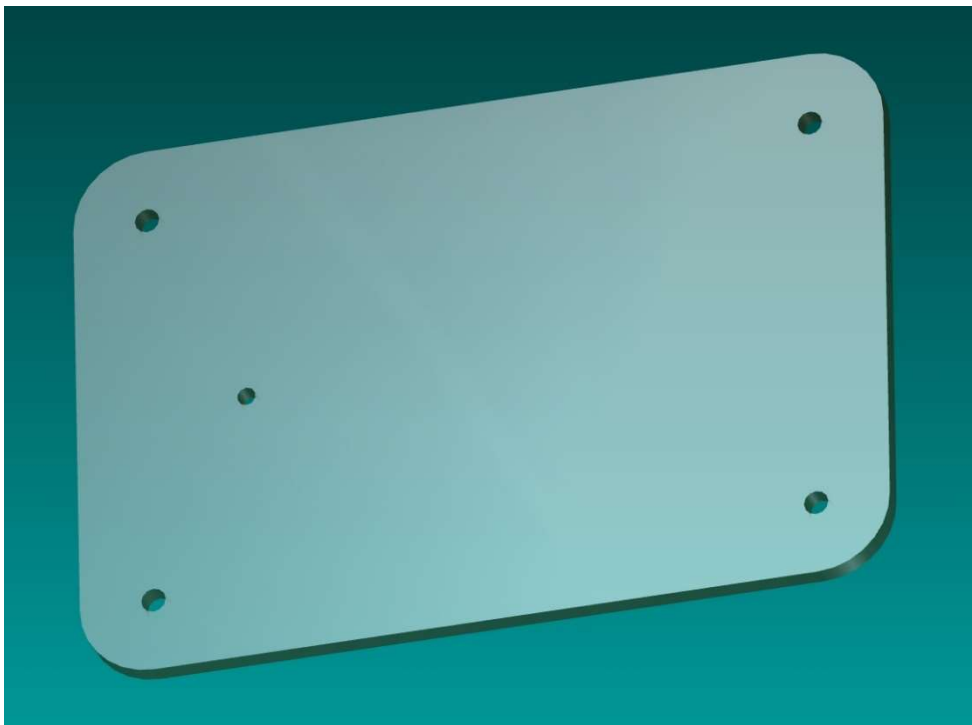
**Kuva 42.** Kokoonpantu kameralohko komponentteineen.



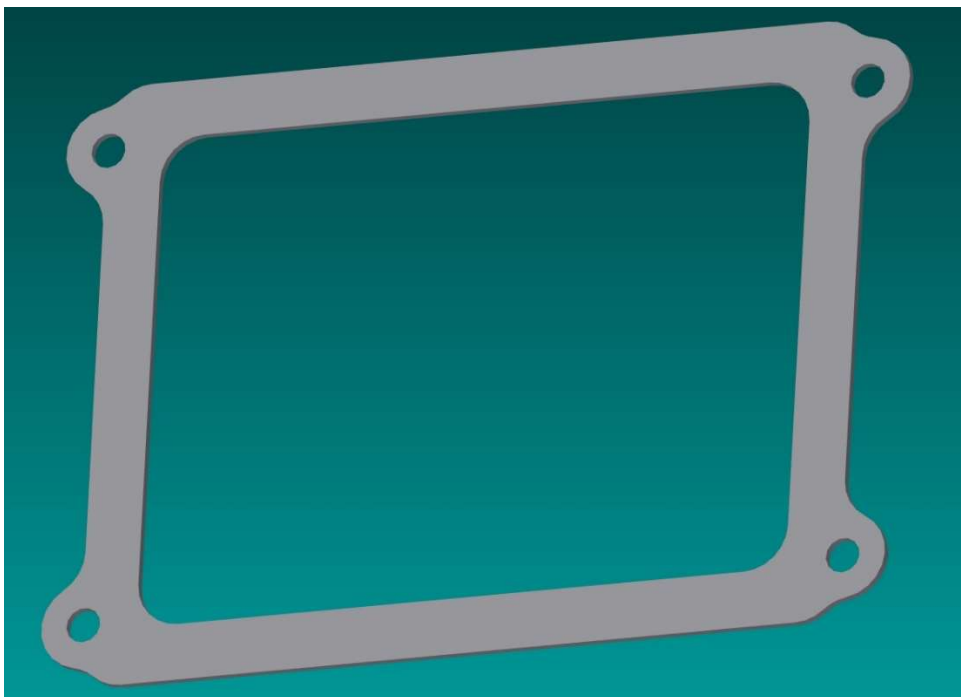
**Kuva 43.** Kokoonpantu kameralohko komponentteineen.



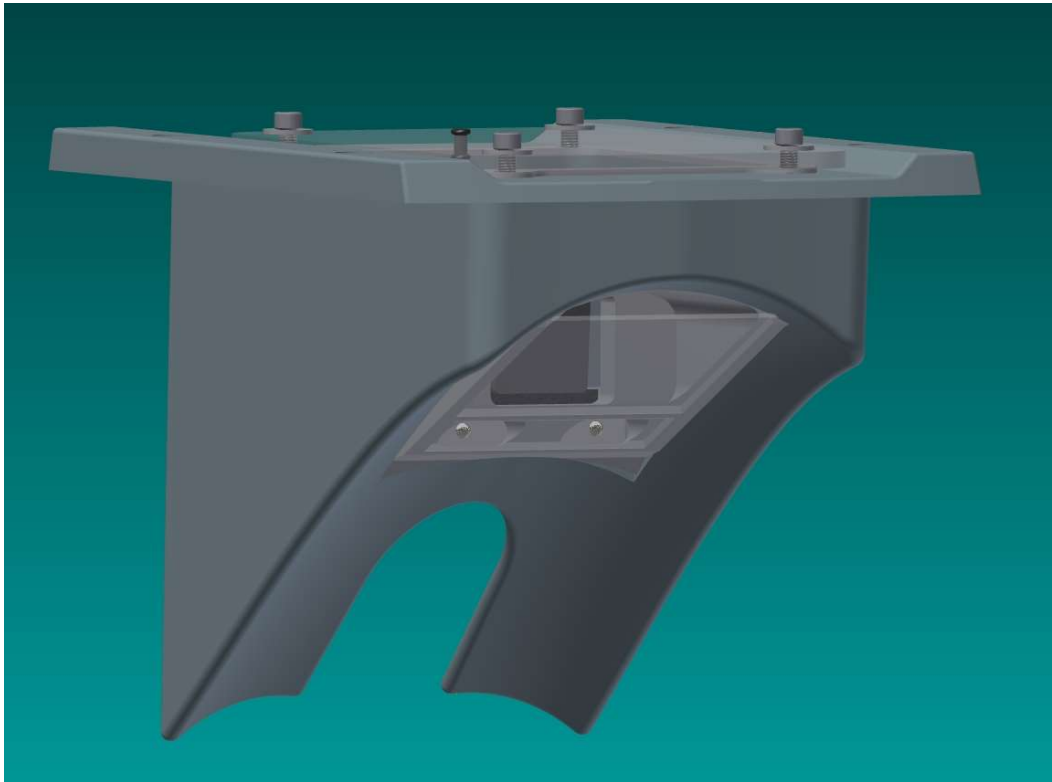
**Kuva 44.** Räjätyskuva kameralohkon kokoonpanosta.



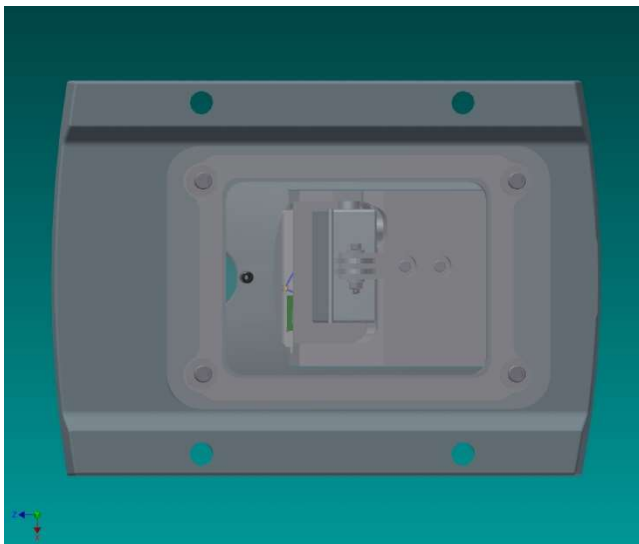
**Kuva 45.** Tarkistusluukun yläpuolisen aukon suoja.



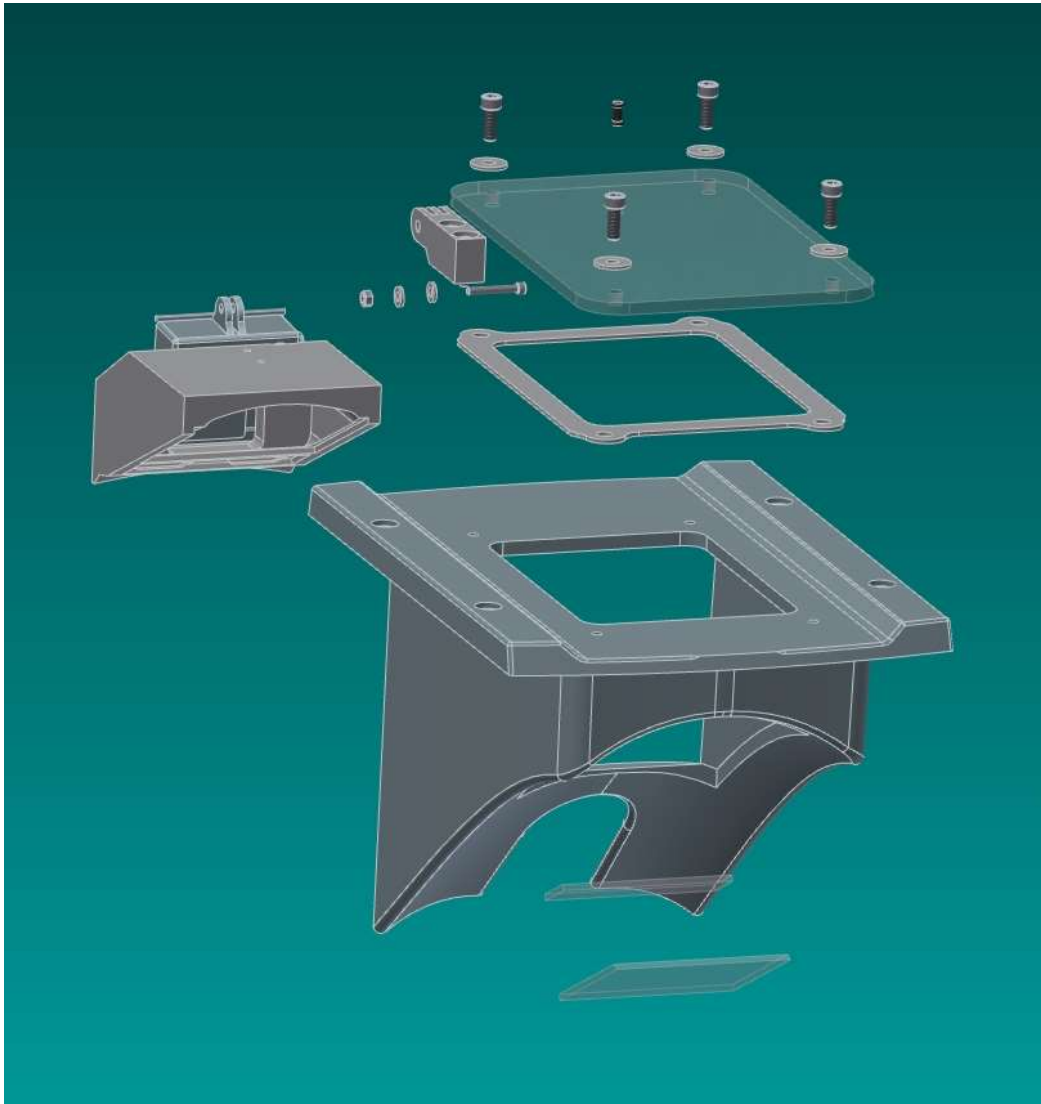
**Kuva 46.** Tiiviste tarkistusluukun yläpuoliseen aukkoon.



**Kuva 47.** Tarkistusluukku, jossa kameralohko asennettu suojiin.

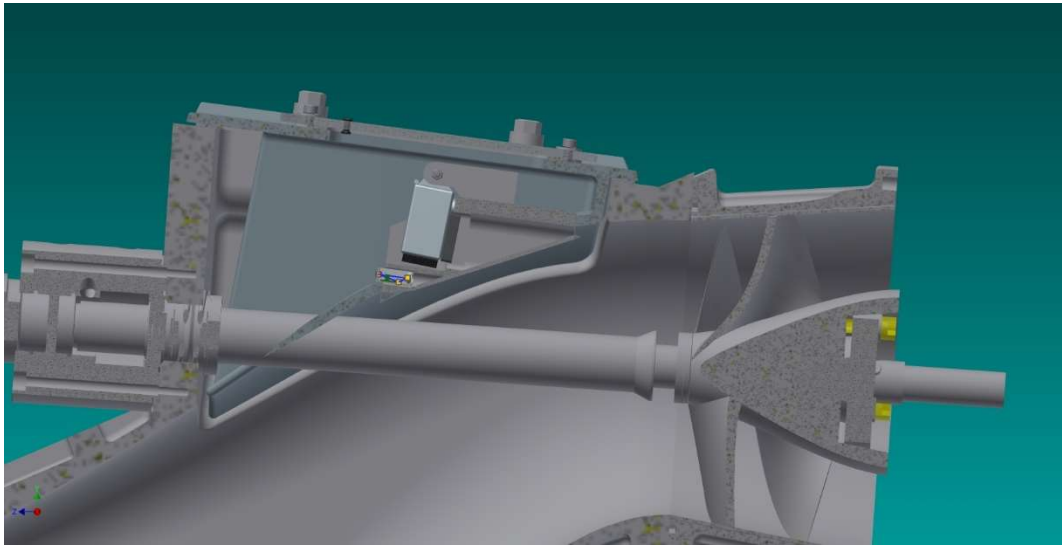


**Kuva 48.** Tarkistusluukku, jossa kameralohko asennettu suojiin.

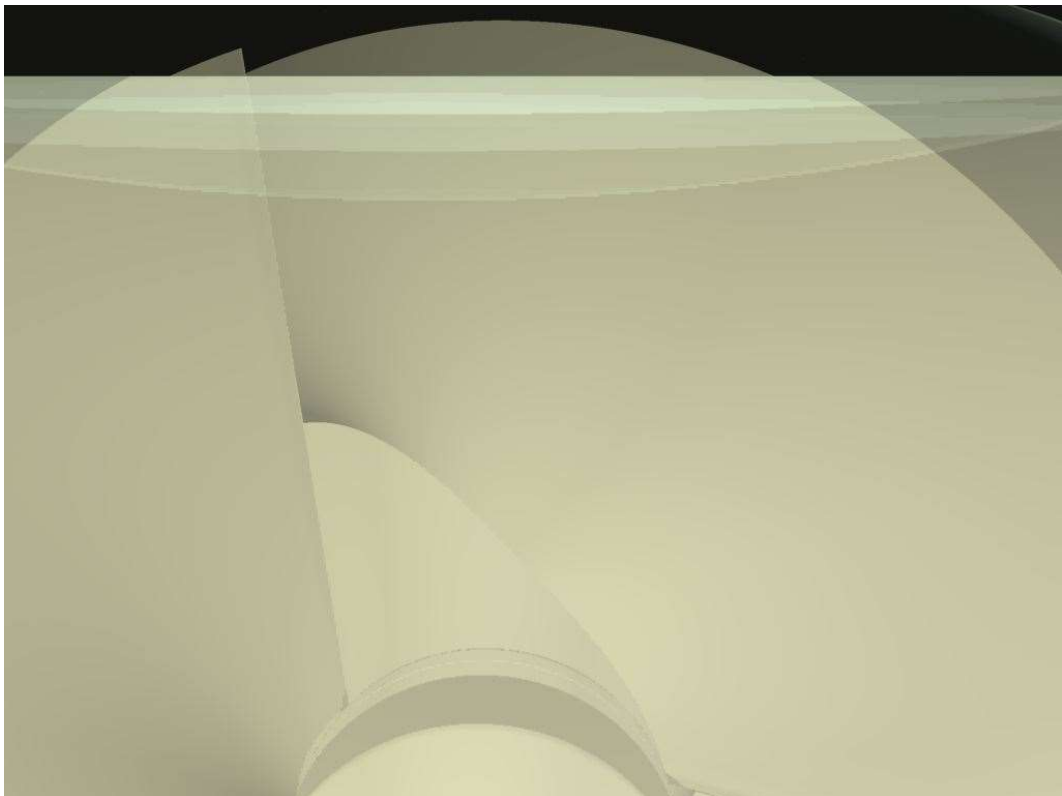


**Kuva 49.** Loppukokoonpanon räjäytyskuva.





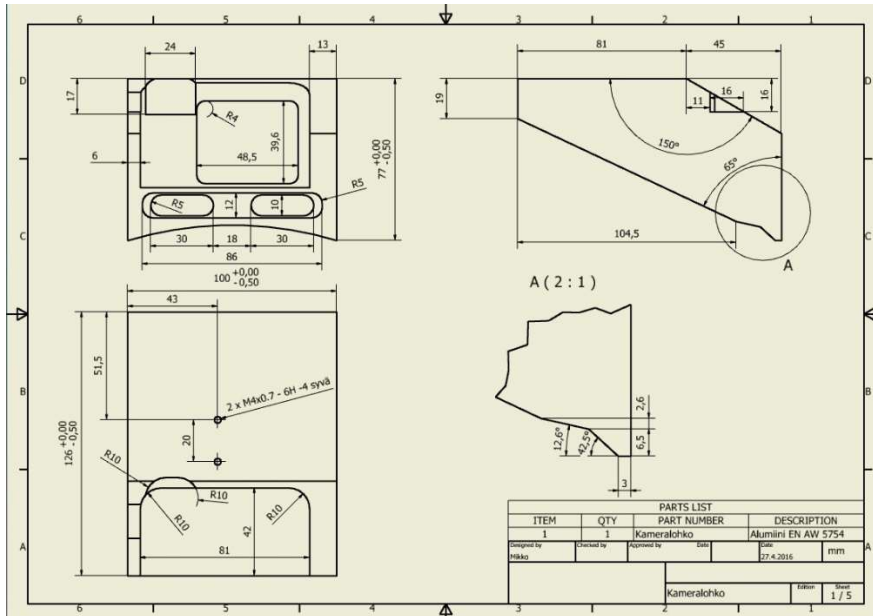
**Kuva 50.** Poikkileikkauskuva, josta nähdään kameran sijoittelu valmiissa kotelossa.



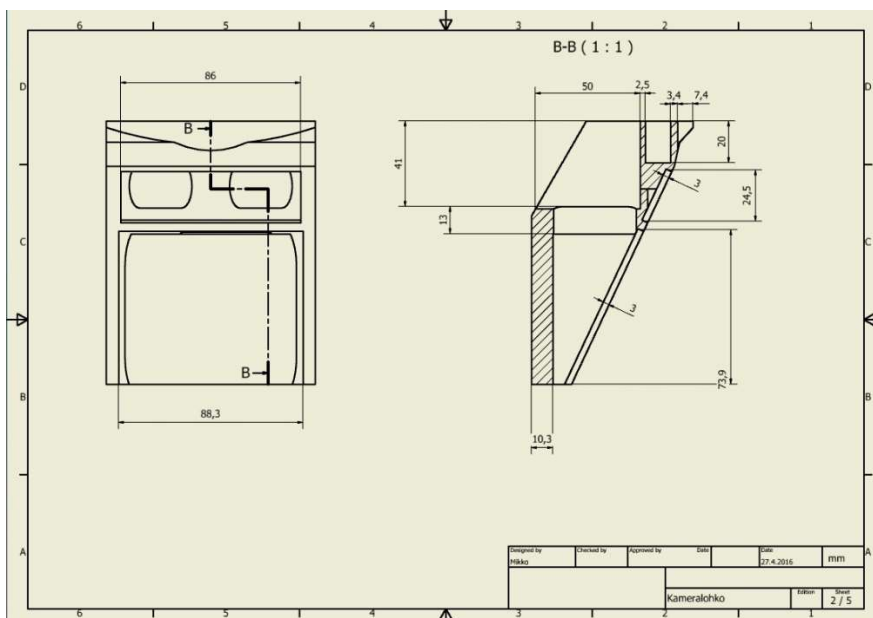
**Kuva 51.** GoPro – videokameran kuvakulma impellerille.

LIITE 3

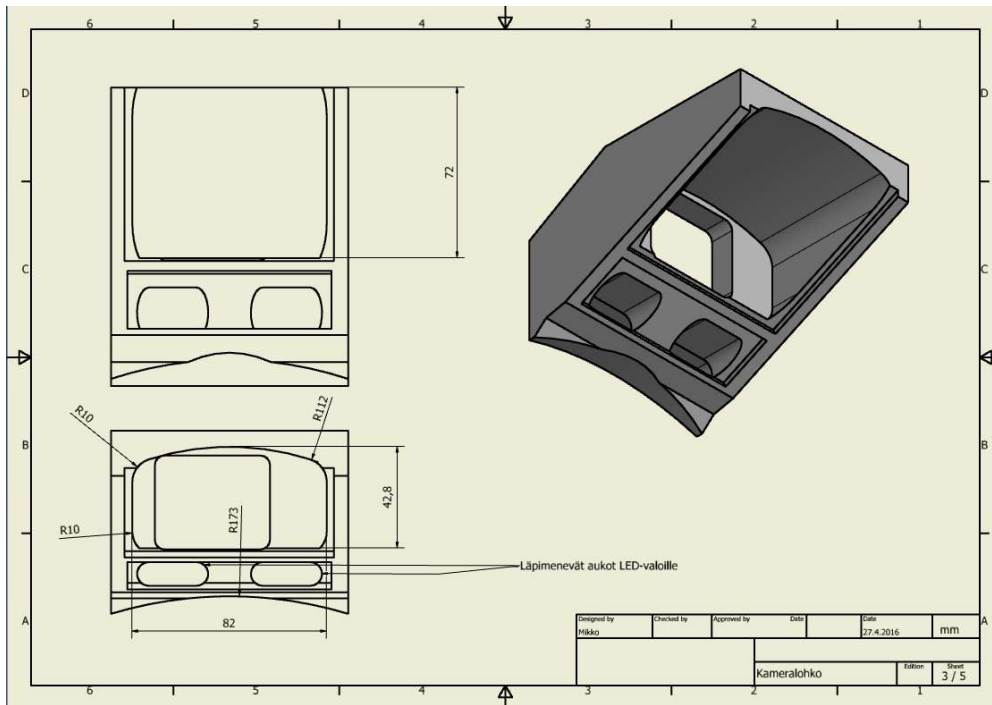
Mitoitus- ja kokoonpanopiirustukset



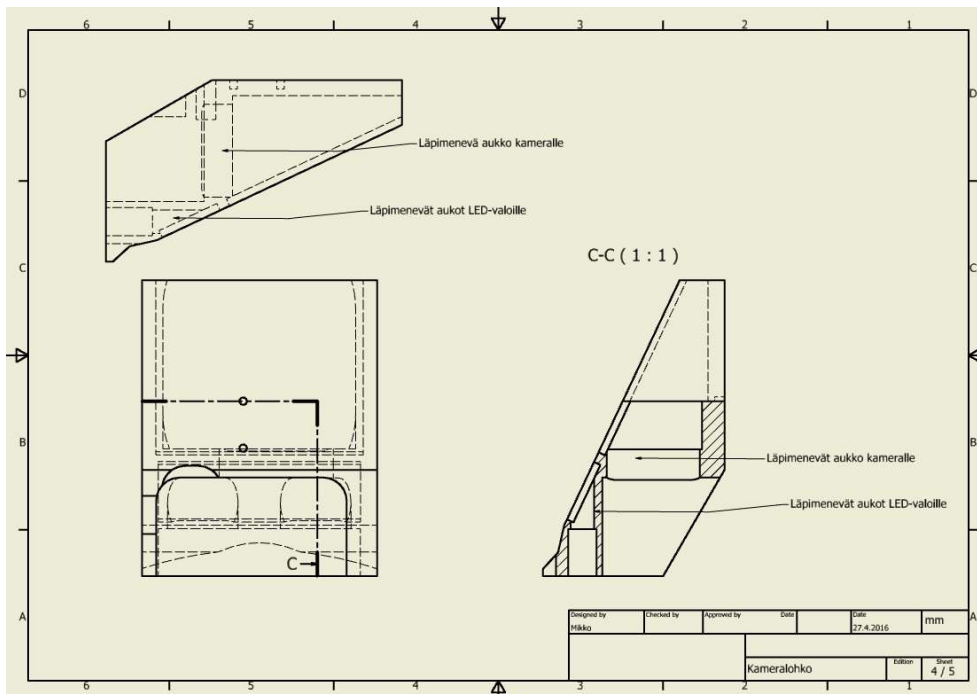
Kuva 52. Kameralohkon piirustus.



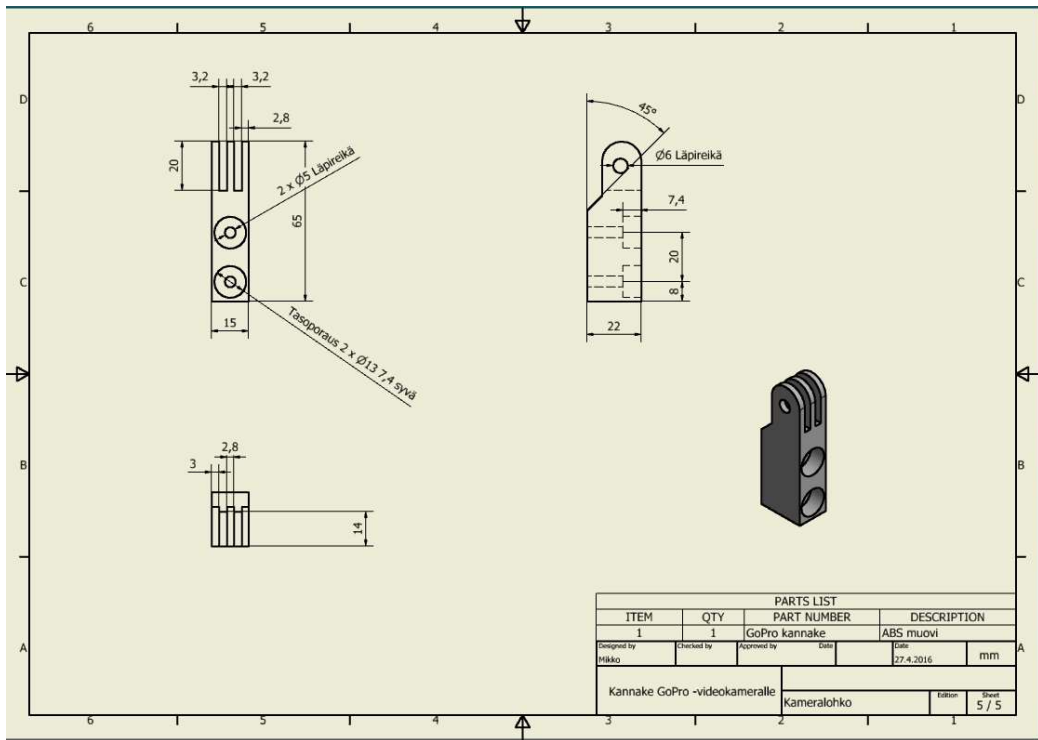
Kuva 53. Kameralohkon piirustus.



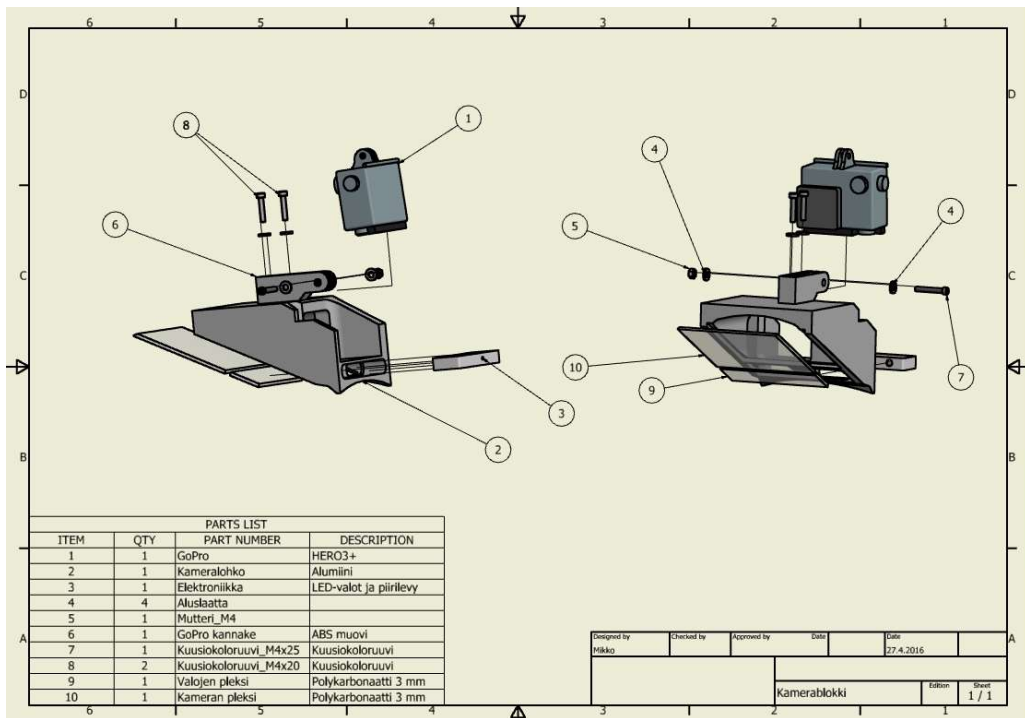
**Kuva 54.** Kameralohkon piirustus.



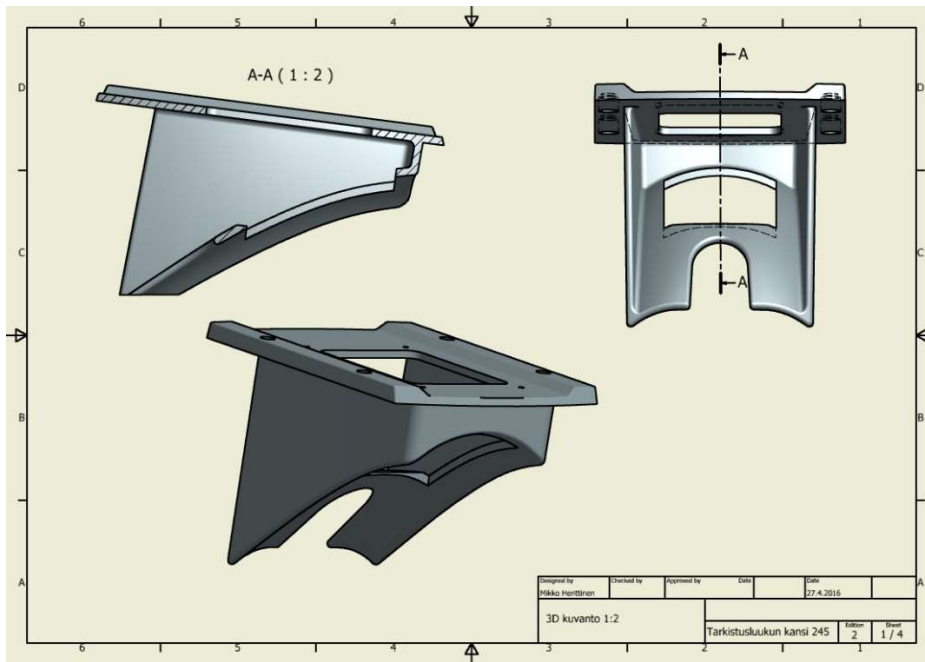
**Kuva 55.** Kameralohkon piirustus.



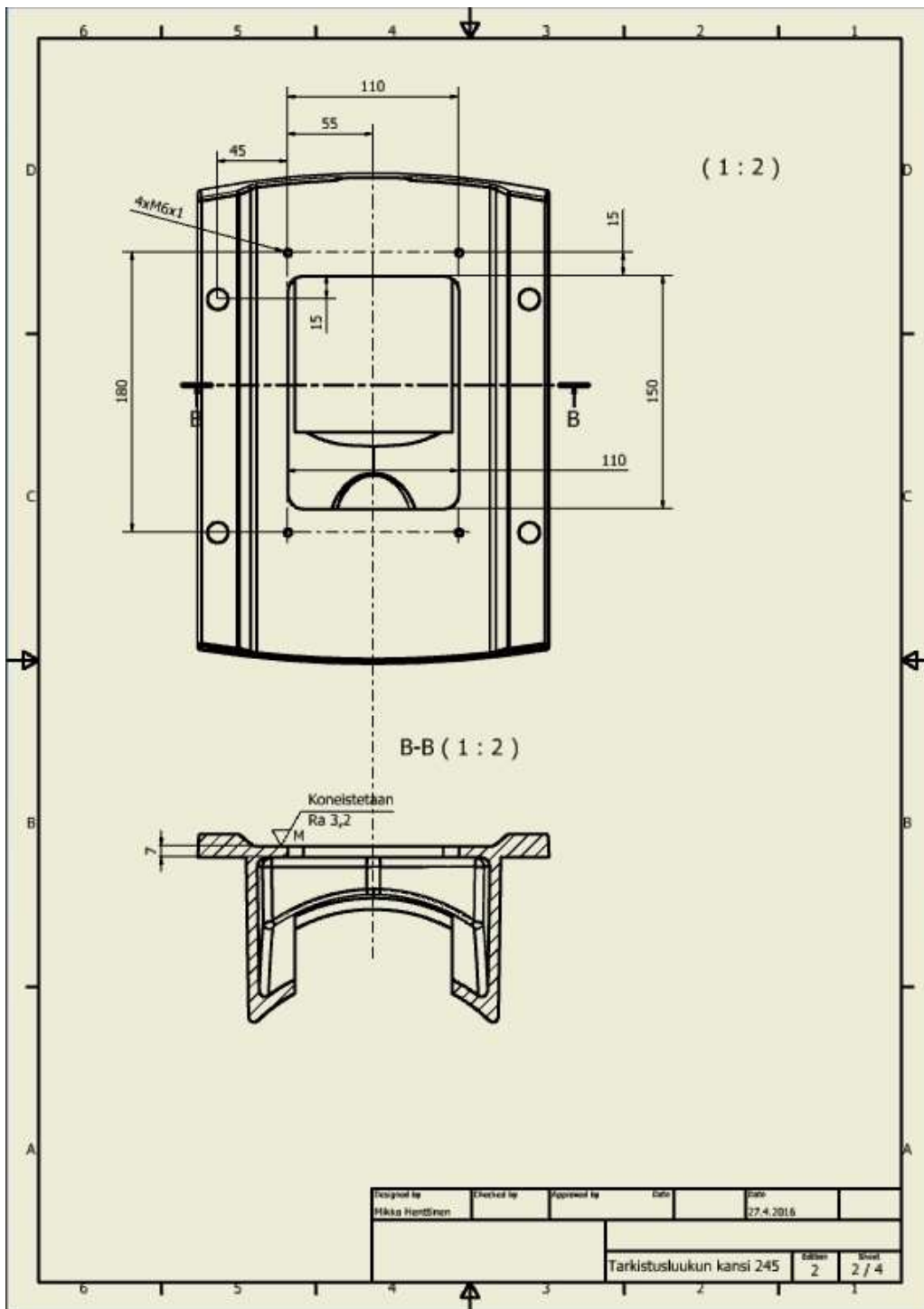
Kuva 56. GoPro – videokameran kannakkeen piirustus kameralohkoon.



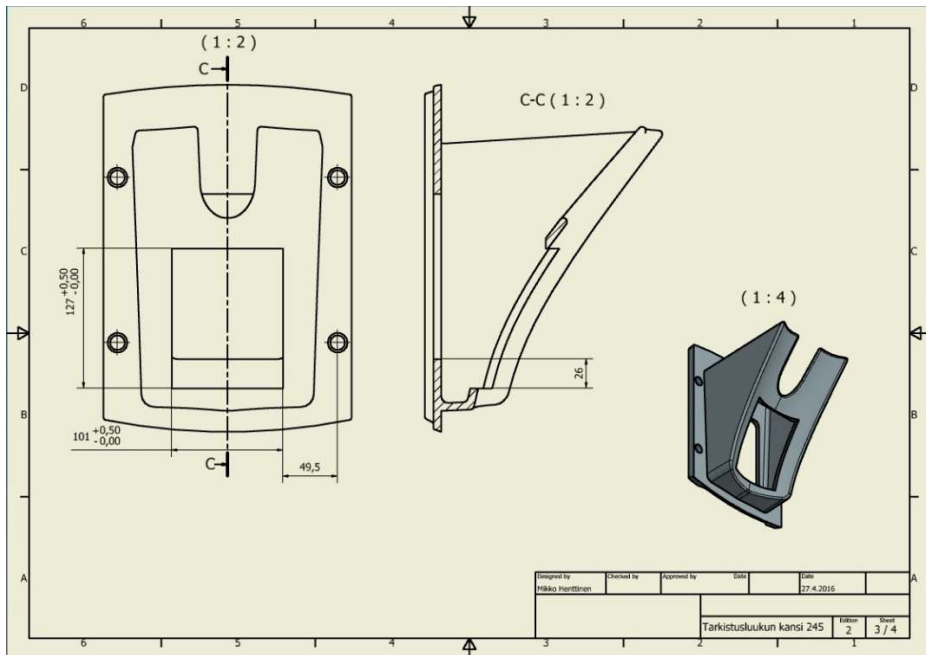
Kuva 57. Kameralohkon kokoonpanopiirustus.



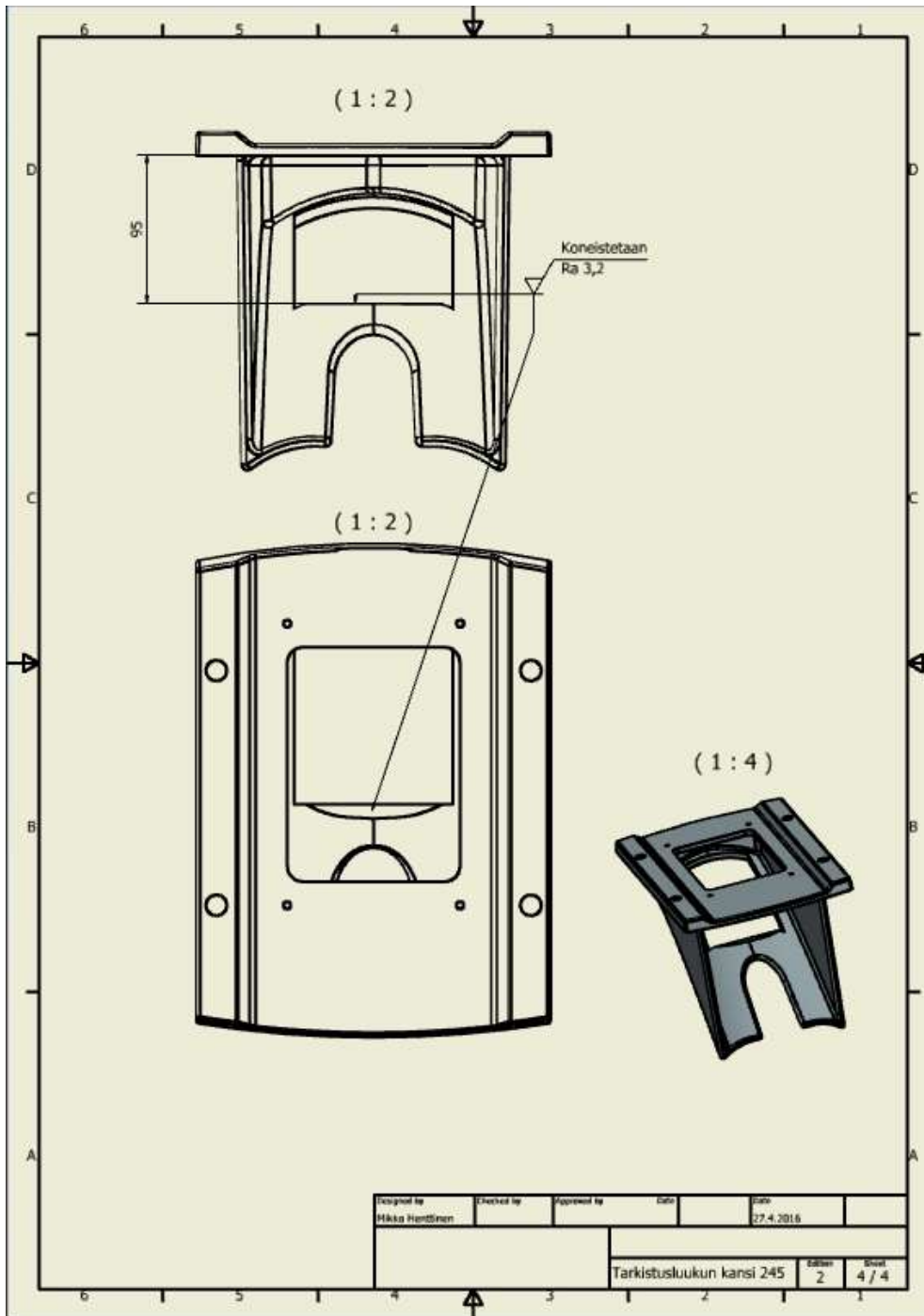
**Kuva 58.** Tarkistusluukun piirustus.



Kuva 59. Tarkistusluukun piirustus.

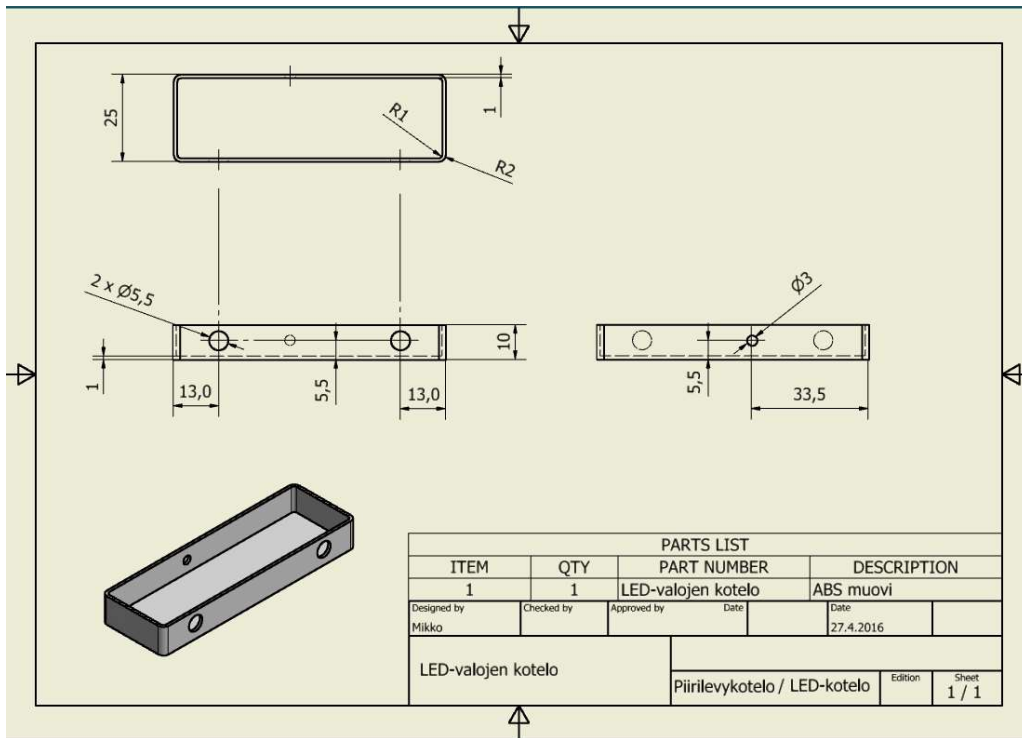


**Kuva 60.** Tarkistusluukun piirustus.

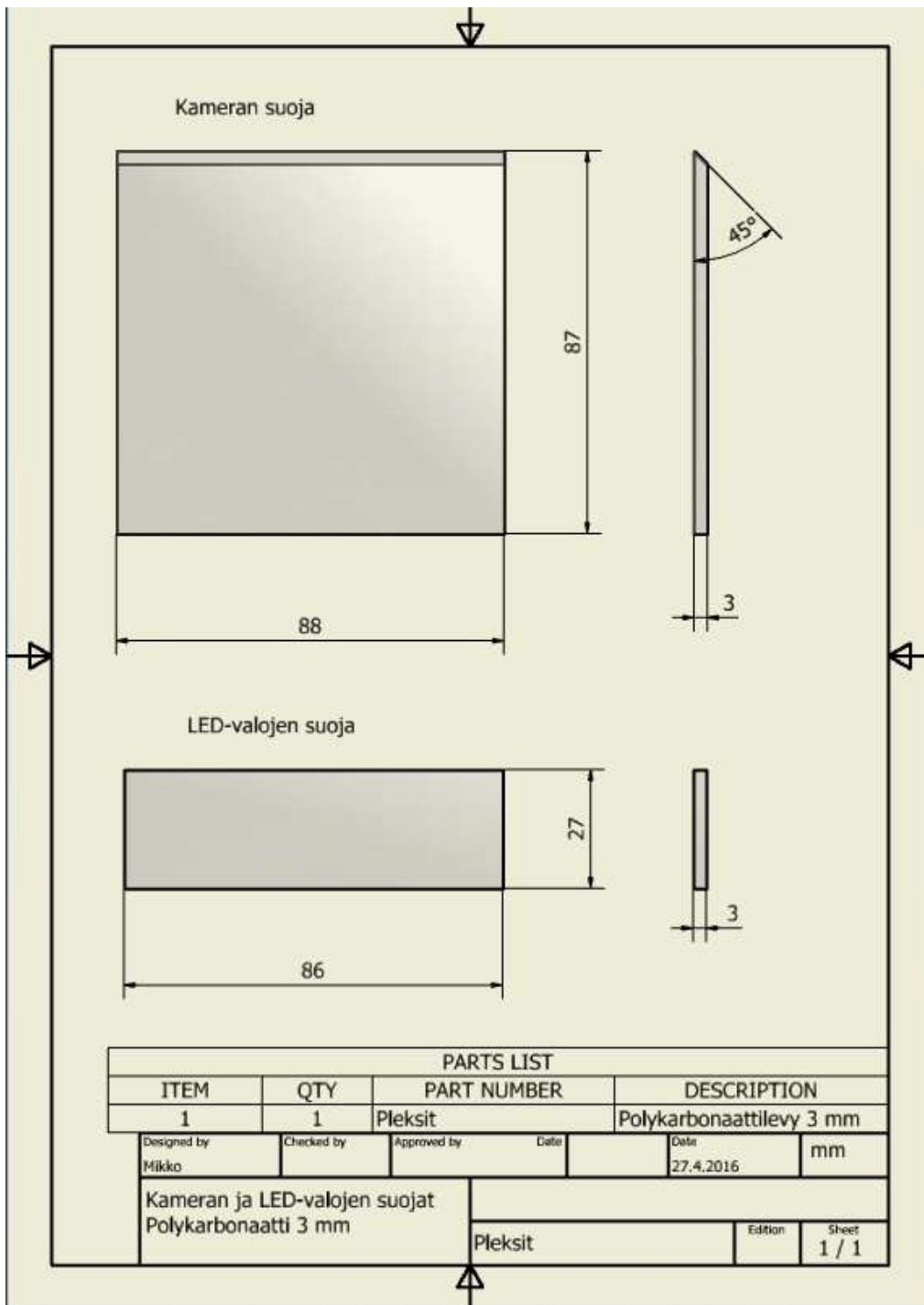


**Kuva 61.** Tarkistusluukun piirustus.

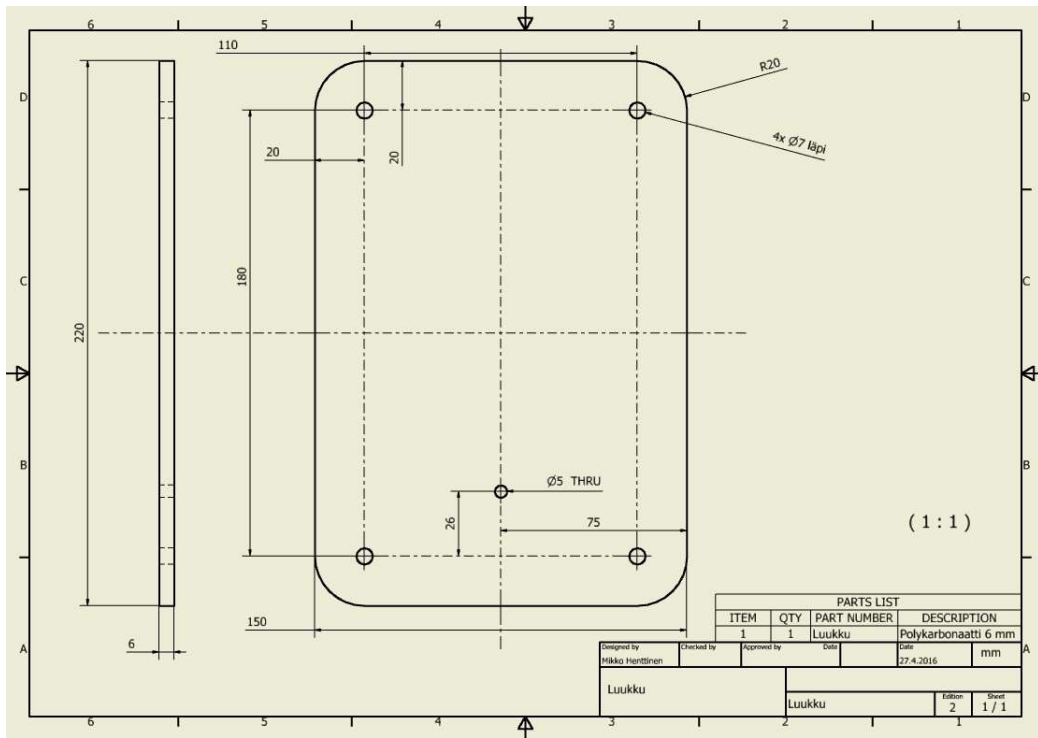




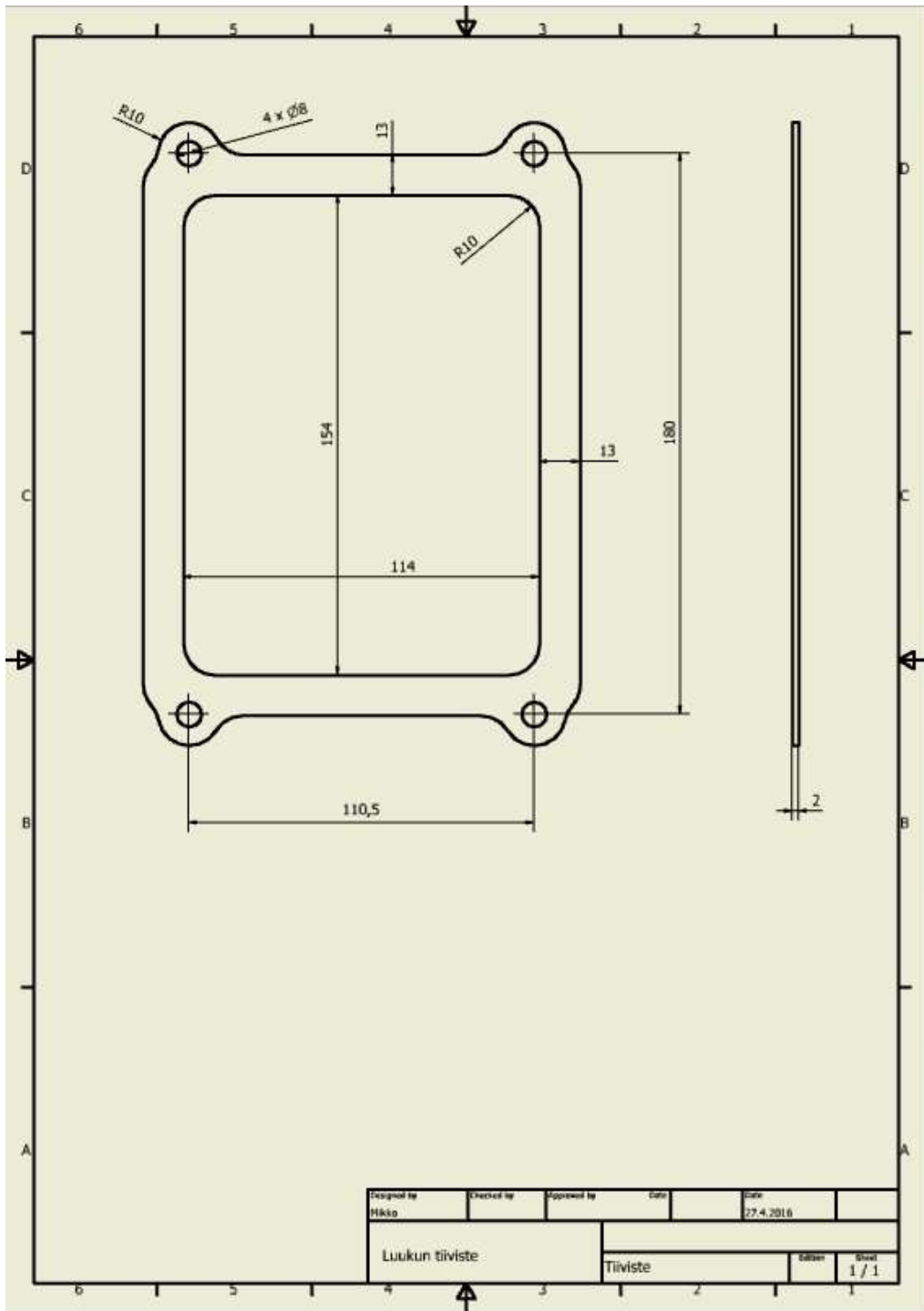
**Kuva 62.** LED-valojen ja piirilevyn kotelo.



**Kuva 63.** Suojat kameralle ja LED-valoille.



**Kuva 64.** Yläpuolisen luukun piirustus.



**Kuva 65.** Yläpuolisen luukun tiiviste.