

**Planeettojen kaasukehien tutkimuslaitepaketin
järjestelmäsuunnittelu**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Riihimäki, Kone- ja tuotantotekniikka

Kevät, 2017

Matias Meskanen

Konetekniikan insinööri
Riihimäen yksikkö

Tekijä	Matias Meskanen	Vuosi 2017
Työn nimi	Planeettojen kaasukehien tutkimuslaitepakettin järjestelmäsuunnittelu	
Työn ohjaaja/t	Jussi Horelli HAMK, Maria Genzer ja Olli Törmänen IL	

Avaruustutkimusluotainohjelmat sisältävät niin kutsuttuja tutkimuslaitepaketteja, joihin kuuluu useita, kulloiseenkin tutkimuskohteeseen tarvittavia laitteita. Ilmatieteen laitos on osallistunut missioihin muun muassa kehittämällä kaasukehien tutkimiseen käytettäviä laitteita. Tämän työn aiheena oli tutkimuslaitepaketti, jota käytetään planeettojen kaasukehien tutkimiseen. Tehtävänä oli järjestelmä- ja mekaniikkasuunnittelua.

Laitepaketti sisältäisi Ilmatieteen laitoksen ja muiden kansainvälisten instituutioiden tutkimuslaitteita. Malli sisältäisi muun muassa maston, kotelon ja kaapelit. Planeettatutkimuksessa kiinnostus on viime vuosina kohdistunut Mars-planeettaan, joten laitepaketti kehitettiin alustavasti Marsin kaasukehän tutkimiseen. Huomioon otettiin rajoittavia tekijöitä kuten paine, lämpö, säteily sekä laukaisun ja laskeutumisen aikaiset rasitukset. Vaikka jokaisella tutkimuskohteella on omat vaatimuksensa, tutkimuslaitteisto pysyisi pääpiireittäin samankaltaisena. Laitepakettia on tarkoitus käyttää myös Maan ilmakehän tutkimiseen, joten siihen on voitava tehdä pieniä muutoksia, joilla siitä saadaan uuteen ympäristöön soveltuva.

Tämä insinöörityö on tehty osana tutkimusryhmän toimintaa. Työn kohteena oli mekaniikan ja järjestelmätason suunnittelu. Suunnittelussa selvitettiin mittalaitteiden rajapinnat, tehobudjetti ja kotelointi. Työn toimeksiantaja oli Ilmatieteen laitos.

Työssä onnistuttiin suunnittelemaan malli, joka täyttää ennalta määritellyt vaatimukset sekä löytämään käyttökelpoiset ratkaisut mahdolliselle laitepaketille. Rakennetta hahmoteltiin tietokoneavusteisella suunnittelulla ja käytettiin 3D-tulostusta fyysisten mallien tekemiseen kokoonpanotestausta varten.

Avainsanat Mars, kaasukehä, mittalaite, avaruustekniikka, kotelointi

Sivut 45 sivua, joista liitteitä 3 sivua

Mechanical Engineering
Riihimäki campus

Author	Matias Meskanen	Year 2017
Subject	System engineering of instrument package for planetary atmospheric study	
Supervisors	Jussi Horelli HAMK, Maria Genzer ja Olli Törmänen IL	

Space research missions have often included so-called research instrument packages consisting of a number of devices needed for each particular research mission. The Finnish Meteorological Institute has participated in missions, inter alia, by developing instrumentation for atmospheric research. The purpose of the thesis work was to design a conceptual model of an instrument package for the research of planetary atmospheres.

The package would consist of research equipment developed by the Finnish Meteorological Institute and by other, international institutions. The model would include the mast, the housing and the cables. In the field of planetary research, the focus has been in Mars in the past few years, and therefore the package was originally developed to investigate the atmosphere of the planet Mars. Limiting factors such as pressure, heat, radiation, and strains during launch and landing were taken into account. Although each mission has its own requirements, the main part of research equipment would be the same. The instrument package is also to be used for the study of the Earth's atmosphere, and therefore, it must be possible to make minor changes to adapt it to the new research environment.

This thesis has been done as part of the research team's work. The subject of the project was the mechanical and system-level design and the analyze of instrument interfaces, power budget and housing. The thesis work was commissioned by the Finnish Meteorological Institute.

The work succeeded in designing a model that meets the predefined requirements and useful solutions were found for a potential package. The conceptual model was outlined with computer-aided design and 3D printing was used to make physical models for trial assembly.

Keywords Mars, atmosphere, instrument, space, interface, mechanical engineering

Pages 45 pages including appendices 3 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	KÄYTTÖYMPÄRISTÖN VAATIMUKSET.....	3
2.1	Paine.....	3
2.2	Lämpötila.....	4
2.3	Painottomuus.....	4
2.4	Säteily.....	4
2.5	Tärinä.....	5
2.6	Avaruusromu ja Marsin pölyhiukkaset.....	5
3	MITTAUSLAITTEISTON TOIMINTA.....	6
3.1	Paineenmittauslaite.....	6
3.2	Kosteudenmittauslaite.....	7
3.3	Hyperspektrinen kamera.....	8
3.4	Tuulenmittauslaite.....	8
3.5	Lämpötilanmittauslaite.....	8
3.6	Kiihtyvyydenmittauslaite.....	9
3.7	Auringon säteilyvoimakkuuden mittauslaite.....	9
4	LÄMPÖTILA-ANTURI.....	10
4.1	Teoreettinen toimintatapa.....	10
4.2	Standardoidut lämpöparityypit.....	12
4.3	Stabiilius.....	13
4.4	Vikatilat.....	14
4.5	Konseptuaalisen lämmönmittauslaitteen rakenne.....	15
5	MITTAUSLAITTEIDEN KOMMUNIKOINTI JA TEHONKULUTUS.....	17
5.1	Rajapinta.....	17
5.2	Tehonkulutus.....	18
5.3	Kaapelijohdinten ja liitinpinnien mitoitus.....	19
6	MITTALAITEPAKETIN MEKAANINEN RAKENNE.....	21
6.1	Masto.....	21
6.2	Maston kiinnitys ja nivel.....	25
6.3	Kaapelit.....	27
6.4	Lattakaapelityypin määrittäminen.....	28
6.5	Kaapelien liittimet ja kiinnikkeet.....	31
6.6	Moottorit.....	32
6.7	Laakerit.....	32
6.8	Ohjainpiirin kotelo.....	32
6.9	Laitteiston massat ja tilavuudet.....	34
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	37

LÄHTEET	39
---------------	----

Liitteet

Liite 1	Mittalaitteiden signaalitaulukot
---------	----------------------------------

KÄSITELUETTELO

MCU

Microcontroller unit on ohjelmoitava mikropiiri.

FMI

Finnish Meteorological Institute on Ilmatieteen laitoksen englanninkielinen vastine. Ilmatieteen laitos on Suomen liikenne- ja viestintäministeriön alaisuudessa toimiva laitos, joka tuottaa sääpalveluita sekä toimii tutkimuslaitoksena.

ECSS

European Cooperation for Space Standardization on organisaatio, joka pyrkii standardoimaan avaruustekniikan eurooppalaiseen muotoon.

FFC

Flexible Flat Cable on lattakaapeli. Se on yleiskäsite kaikille eri tyyppin litteille taipuisille johdoille.

VTT

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy on moniteknologinen soveltavaa tutkimusta tekevä tutkimuskeskus. (Aiemmin: Valtion Teknillinen Tutkimuslaitos).

NASA

National Aeronautics and Space Administration on Yhdysvaltain liittohallituksen alainen ilmailu- ja avaruushallintovirasto.

JPL

Jet Propulsion Laboratory on NASA:n hallinnoima avaruustekniikkakeskus.

ESA

European Space Agency on Euroopassa toimiva avaruusjärjestö.

AWG

American Wire Gauge on standardoitu johdinpaksuusjärjestelmä pyöreille, kiinteille, raudattomille sähköä johtaville johdoille.

INTA

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial on Espanjan kansallinen ilmailu- ja avaruustekniikan laitos.

MER

Mars Exploration Rover viittaa kahteen Mars-laskeutujaan, jotka ovat NASA:n operoimia. Nämä ovat Spirit ja Opportunity.

MSL

Mars Science Laboratory on NASA:n operoima Mars-mönkijä.

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on mittalaitepaketti, jota käytetään planeettojen kaasukehien tutkimiseen. Tehtävänä on laitepaketin järjestelmäsuunnittelu ja alustava mekaniikkasuunnittelu. Mekaniikkasuunnittelussa on tarkoitus löytää järkevä rakenteellinen toteutustapa, huomioimatta laskennallista rakennemitoitusta. Järjestelmäsuunnittelussa keskityttiin selvittämään mittalaitteiden rajapinnat, tehon kulutus, johdotus ja kotelointi.

Työssä tarkastellaan pääasiassa Marsin olosuhteita, koska laitepaketti on suunniteltu lähtökohtaisesti Mars-laskeutujaan. Mars-tutkimuksessa käytettyjen laskeutujien tutkimuslaitteita kehitetään yhteistyönä. Marsin kaasukehää halutaan tutkia, koska se on Aurinkokunnassa lähin vertailukohde maapallolle. Sen avulla voidaan toteuttaa vertailevaa planeetta-tutkimusta, joka auttaa ymmärtämään paremmin Maan säätä ja ilmastoa. Marsin vuorokausi on vain noin 40 minuuttia Maan vuorokautta pidempi ja sen pyörimisakselin kulma ratatasoon nähden on lähes sama kuin maapallolla. Sillä on myös vuodenaajat, vaikkakin erilaiset.

Marsin kaasukehän mallintaminen on helpompaa kuin Maan ilmakehän, sillä Marsissa ei ole mallintamista vaikeuttavia meriä ja kasvillisuutta. Lisäksi Marsin kaasukehä on yksinkertaisempi. Kaasukehän perusdynamiikka on kuitenkin samankaltainen ja Marsin avulla kehitettyä ja opittua kaasukehän mallia voidaan hyödyntää maapallolla.

Ympäri maailmaa eri instituutiot kilpailevat keskenään saadakseen omat tutkimuslaitteensa osaksi julkaistua luotainohjelmaa. Näitä tutkimuslaitteita käytetään yhdistettynä pakettina, jonka kehityksestä vastaa kokenut instituutio. Ilmatieteen laitos on usein toimittanut laitteita osaksi tällaista tutkimuslaitepakettia. Aiemmat Ilmatieteen laitoksen avaruustutkimukseen valmistamat laitteet ovat olleet kosteus- ja painemittalaitteita ja tietokoneyksiköitä.

Ilmatieteen laitos laajentaa tietämystään ja osaamistaan kehittämällä kaasukehän tutkimuslaitteepaketin. Tällä tavalla se pyrkii olemaan näkyvämmiin mukana avaruusluotainohjelmissa ja kasvattamaan valmiuksiaan toteuttaa yhä vaativampia projekteja. Koska laitos keskittyy kaasukehän tutkimiseen, sen mittalaitepaketti sisältää pääosin kaasukehän tutkimiseen tarkoitettuja mittalaitteita. Uutena ominaisuutena on kevyt kamera-laite, joka kykenee kuvaamaan useammalla valon spektrillä, tällaista ei ole ennen toimitettu osana mittalaitepakettia.

Mitä painavampia laitteita halutaan kuljettaa avaruuteen, sitä enemmän tarvitaan polttoainetta ja myös isompi raketti. Mutta isomman raketin massan ja suuremman polttoainemäärän kuljettamiseen tarvitaan lisää

polttoainetta ja sen myötä isompi raketti. Polttoaineen tarve on eksponentiaalinen. Massan aiheuttamat kustannukset voivat kasvaa hyvinkin suuriksi ja siitä syystä jokaisen rakenteen massa on pidettävä mahdollisimman pienenä.

Työssä onnistuttiin selvittämään laitteiden rajapinnat ja tehovaatimukset, joiden tietojen avulla voidaan valmistaa toimiva prototyyppi. Mittalaitte-paketin rakenne on onnistuttu toteuttamaan edullisesti ja se täyttää vaatimukset. Rakennetta hahmoteltiin tietokoneavusteisella suunnittelulla ja käytettiin 3D-tulostusta fyysisten mallien tekemiseen kokoonpanotes-tausta varten.

2 KÄYTTÖYMPÄRISTÖN VAATIMUKSET

Käyttöympäristön vaatimukset ovat yleisiä ja suuntaa-antavia ohjeistuksia rakenteen suunnittelulle. Tyypillisesti avaruuteen lähetettävälle laitteelle annetaan avaruusohjelmakohtaiset tiukat vaatimukset, jotka laitteen on läpäistävä. Ne voivat vaikuttaa suunnitteluun tai tarkistusmetodeihin, joilla laite hyväksytään käytettäväksi. Joka tapauksessa monet tärkeät asiat, kuten tyhjiön, lämpötilan, painottomuuden, säteilyn, värinän ja partikkelien asettamat vaatimukset, ovat yleisiä valtaosassa avaruusmissioita. (Binet, Freire, Eesbeek, Daly, Drolshagen, Henriksen, Thirkettle, Poinas, Eiden, 2006)

2.1 Paine

Tyhjiö rajoittaa käytettävien materiaalien määrää huomattavasti. Monet ei-metalliset materiaalit, kuten muovit, kaasuuntuvat herkästi tyhjiössä. Kaasuuntuminen voi olla haitaksi itse sille laitteelle, jonka materiaali kaasuuntuu tai muille laitteille. Herkästi kaasuuntuvia materiaaleja voidaan pitää avaruuskäytössä kiellettyinä. Kaasuuntuvassa materiaalissa muutoksia voi tulla muun muassa mekaniikkaan, mittoihin ja sähköisiin ominaisuuksiin. Kaasuuntunut materiaali ei katoa mihinkään vaan se jää laitteiden ympäristöön, mikä voi häiritä muiden laitteiden toimintaa avaruusaluksessa. Se voi esimerkiksi saastuttaa kameralaitteet tarttumalla linssihin aiheuttaen optisia virheitä kuvassa.

Tyhjiö voi aiheuttaa metallien kylmähitsautumisen, kun ominaisuuksiltaan kahden samankaltaisen metallin sileät tasot ovat vastakkain. Ilmakehässä vallitsevissa olosuhteissa pintoja tavallisesti peittävät fyysisesti tai kemiallisesti absorboituneet kerrokset. Nämä kerrokset eristävät eri osien pinnat toisistaan. Tyhjiössä nämä suojakerrokset eivät uusiudu kulumisen jälkeen ja paljastuneet metallipinnat ovat alttiimpia kylmähitsautumiselle. (ESA STM-279. 2009.)

Vaikka Marsissa on kaasukehä, sen tiheys on kuitenkin vain noin yksi sadasosa Maan ilmakehään verrattuna. Simulaatioon perustuen Marsin paineen on laskettu vaihtelevan sijainnista, korkeudesta ja vuodenajasta riippuen noin 260 ja 1240 Pascalin välillä (Haberle 2001, 5-7). Tämän lisäksi laitteet altistuvat täysin vakuuolle kuljetuksen aikana raketin sisällä, koska lastiruuma ei ole paineistettu vaan paine pääsee karkaamaan lastiruumasta ulos virtauskanavien kautta.

2.2 Lämpötila

Koska avaruudessa ei ole lämpöä johtavaa ainetta, siellä ei ole konvektion mahdollisuutta. Tyhjiössä lämpö voi siirtyä vain johtamalla mekaanisia liitäntöjä pitkin tai säteilemällä pinnalta toiselle tai avaruuteen. Lämpöä siirtyy siis sekä avaruusaluksen sisä- että ulkopuolella.

Aluksen ulkopuolella auringonpuoleinen pinta voi lämmetä suhteellisen kuumaksi, noin 120 Celsiusasteen lämpötilaan, kun taas vastakkaisen puolen pinnat, eli kohti syväavaruutta olevat pinnat jäähtyvät todella kylmiksi, noin -270 Celsiusasteen lämpötilaan. Todellisuudessa pinnat eivät altistuisi näin voimakkaille ääriämpötiloille. Sisältä johtuva lämpö tasa-aa lämpötilaeroa ja alus voi pyöriä akselinsa ympäri siten, että pinta on vuorotellen kohti aurinkoa ja syväavaruutta.

Riippuen sijainnista ja vuodenajasta, Marsin pintalämpötila voi olla noin -130°C ja +30°C välillä ja paikallisesti lämpötila voi vaihdella jopa yli 100°C (Haberle n.d. 1746).

Suhteessa standardoituun lämpötilaan (STP) erittäin matalat lämpötilat rajoittavat jopa metallisten materiaalien käyttöä. Perinteiset rakenneteräokset ovat hauraita kovissa pakkasissa ja tästä syystä ne eivät sovellu käytettäväksi avaruuslaitteissa. Muoveille on tyypillistä lasittua matalissa lämpötiloissa.

Laitteen voidaan olettaa kestävän Maan olosuhteet, mikäli se kestää Marsin olosuhteet. Laitetta ei ole tarkoitus käyttää kuumissa olosuhteissa. Ennen käyttöä laitteet kuitenkin kuumennetaan 110 °C:ssa tai 125 °C:ssa mikrobien vähentämiseksi, tämä on osa planeettasuojelua. Siksi laskeutumisessa käytettävien laitteistojen täytyy kestää vähintään 110 °C:een lämpötila.

2.3 Painottomuus

Marsin painovoima on noin 38 % Maan painovoimasta (Haberle n.d. 1746). Marsin heikompi painovoima aiheuttaa pienempiä staattisia rasituksia rakenteelle, mikä sallisi massan vähentämisen mitoittamalla rakenne käyttöympäristöönsä, mutta sellaisen rakenteen kokoonpano ja testaaminen Maassa on vaikeaa tai jopa mahdotonta.

2.4 Säteily

Säteily vaikuttaa haitallisesti elektroniikan komponentteihin aiheuttaen niiden suorituskyvyn alenemista ja niiden hajoamista. Riippuen komponenttien valmistustavasta, rakenteesta ja materiaaleista, niistä voidaan saada säteilykestävämpiä. Säteilyn vaikutuksia komponenttitasolla ovat muun muassa mikrovastukset, -kapasitanssit, kynnysjännitteen muutos,

oikosulut ja rakenteellinen vaurio. (Fortescue, Stark & Swinerd 2009, 40–44.)

Lukuun ottamatta Marsin erityisen pölyisiä kausia, sen kaasukehä on puoliläpäisevä auringon säteilylle. Kuitenkin kaasukehä suojaa laitteita säteilyltä enemmän verrattuna Maan kiertorataan. Maan kiertoradalla olevien laitteiden käyttöikä saattaa olla Marsissa moninkertainen. (Haberle n.d. 1746)

2.5 Tärinä

Kantoraketin laukaisun aikaiset rasitukset laitteille ovat ankaria. Pahimmat rasitukset esiintyvät lennon ensimmäisten sekuntien aikana. Kaikki rakenteet altistuvat voimakkaalle tärinälle. Voimakkuus riippuu laukaisualustan ominaisuuksista. Avaruuteen lähetettävien rakenteiden suunnittelussa mitoituksen lähtökohtana ovat pääosin laukaisusta aiheutuvat kuormitukset.

Toinen rasitusten lähde laitteistolle on laskeutuminen planeetoille, mutta tavallisesti siitä aiheutuvat rasitukset ovat pienemmät kuin laukaisussa. Mikäli laite kestää laukaisun, sen voidaan yleisesti olettaa kestävän laskeutumisen. Alustavaan mitoitukseen on valittu Sojuz-kantoraketti, sillä se on luotettavin ja eniten käytetty raketti koko maailmassa (ESA, Delta Mission, 2004). Tärinävaatimukset löytyvät Sojuz-kantoraketin käsikirjasta sivulta 53 eteenpäin (Arianespace, Soyuz user manual 2012).

2.6 Avaruusromu ja Marsin pölyhiukkaset

Maan kiertoradalla kulkeva avaruusromu ei niinkään ole vaaraksi lastiruomassa Marsiin kuljetettavalle laitteistolle. Avaruusromun määrä ei ole merkittävä ohikulkumatalla, ja lisäksi raketin lastiruoman seinät antavat suojaa kuljetettavalle laitteistolle.

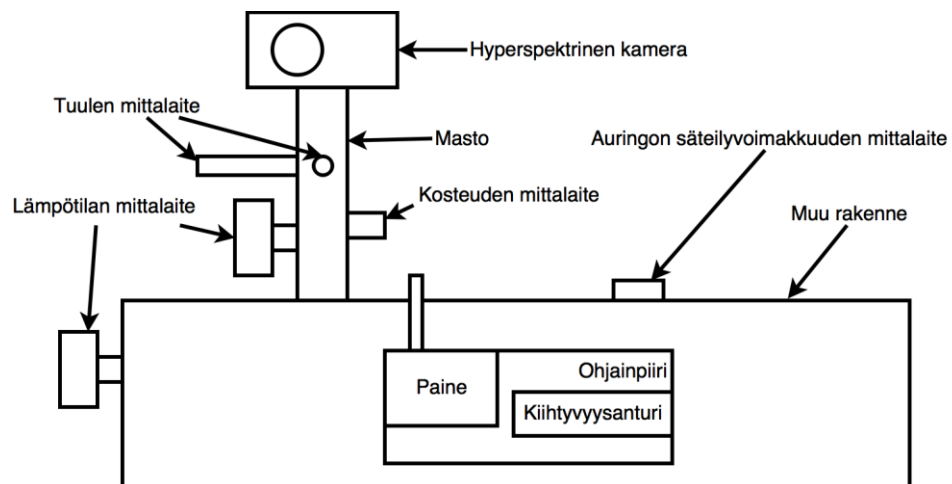
Marsin pinta on pölyinen kivierämaa. Marsin ollessa lähinnä aurinkoa kiertoradallaan, matalammilla leveysasteilla auringon lämmitys aiheuttaa tuulia, jotka nostavat pinnalta kaasukehään hienojakoista pölyä. Tämä pöly aiheuttaa ongelmia liikkuvien mekaanisten rakenteiden suunnittelussa, koska hiekka on hyvin hienojakoista ja tunkeutuu pienimmistäkin raoista laakereihin aiheuttaen kitkaa ja tukkien laitteiston liikkeen. Lisäksi pöly on haitallista elektroniikkalaitteistolle.

3 MITTAUSLAITTEISTON TOIMINTA

Mittalaitepakettissa käytetään ilmatieteellisiä tutkimuslaitteita kaasukehän tutkimiseen. Kuvassa 1 on havainnollistettu mittalaitepakettin kokonaisuus. Alla olevia laitteita on ehdotettu liitettäväksi osaksi mittalaitepakettia. Mittalaitteivalikoima saattaa vaihdella tai jotain siitä voi jäädä pois. Tarkoitus on valmistaa modulaarinen ja helposti muokattavissa oleva paketti.

Mittalaitepaketteja on yleensä ohjattu avaruuslaitetekniikan tasoisella tietokoneella. Ilmatieteen laitoksen mittalaitepakettia on tarkoitus ohjata mikrokontrolleriin perustuvalla ohjainpiirillä. Tämän toteutustavan etuna on ohjainpiirin yksinkertaisuus, edullisuus ja mahdollisesti energiatehokkuus. Ohjainpiiri sijoitetaan laskeutujan lämpöeristettyyn tilaan.

Kaikki laitteet pyritään sijoittamaan lämpöeristettyyn tilaan, jossa ne ovat suojassa ympäristöltä. Ulkotilaan sijoitetaan ainoastaan sellaiset laitteet, jotka on pakko sijoittaa sinne, kuten tuulenmittauslaitteet. Kaiken mittauslaitteen elektroniikka ei tarvitse sijaita anturin läheisyydessä. Laitteen mittauksia tekevä elektroniikka voidaan jakaa siten, että ulkona on anturia tulkitseva elektroniikka, joka lähettää signaaleja ja lämpöeristetyssä tilassa on elektroniikka, joka tulkitsee signaaleja.

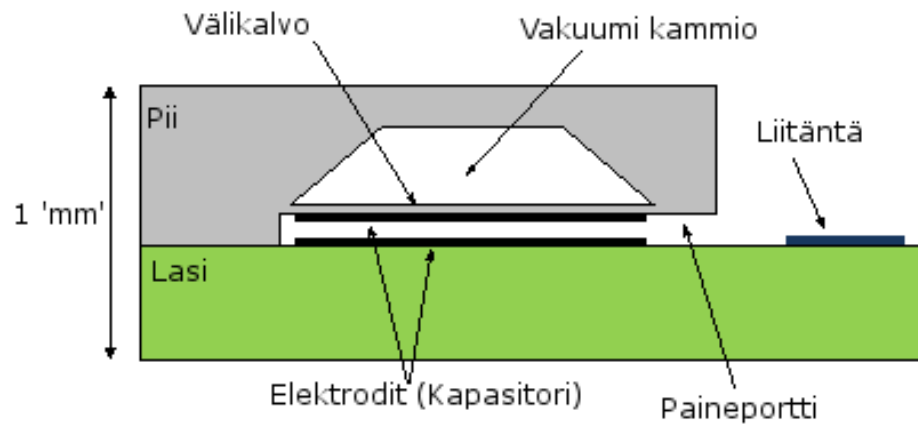


Kuva 1. Mittalaitepakettin kokonaisuus

3.1 Paineenmittauslaite

Ilmatieteen laitoksen paineenmittauslaitteessa on pii-pohjainen paineanturi, joka on havainnollistettu kuvassa 2. Paineen mittaus perustuu kapasitiiviseen mittaukseen. Piirakenteen sisällä on tyhjiö ja yksi seinämistä on

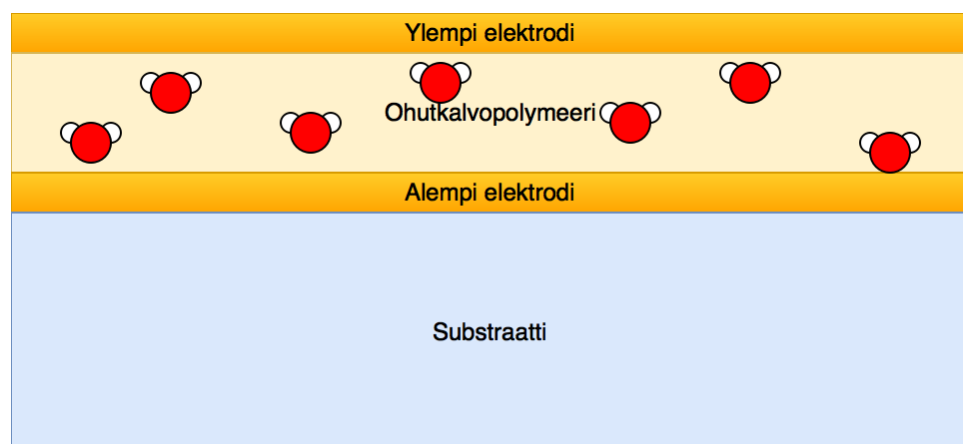
ohut, joka joustaa paineen vaihdella. Ohuen seinämän ja lasipohjan pintoihin on asetettu elektrodiparit, joiden etäisyyttä toisistaan mitataan kapasitiivisella mittauksella.



Kuva 2. Vaisalan Barocap-paineanturi (Haukka H. n.d.). Kuvaa on muokattu.

3.2 Kosteudenmittauslaite

Ilmatieteen laitoksen kosteudenmittauslaite perustuu kapasitiiviseen mittaukseen. Anturin rakenne on havainnollistettu kuvassa 3. Elektrodien välissä on ohutkalvopolymeeri, joka absorboi tai vapauttaa vettä suhteellisen ilmankosteuden muuttuessa. Tämä vaikuttaa ohutkalvopolymeerin sähköneristykseen, joka vaikuttaa elektrodien väliseen kapasitiivisuuteen. Kapasitanssi muuttuu suhteessa ilmankosteuteen ja kapasitanssista voidaan laskea suhteellinen ilmankosteus. (Vaisala 2012.)



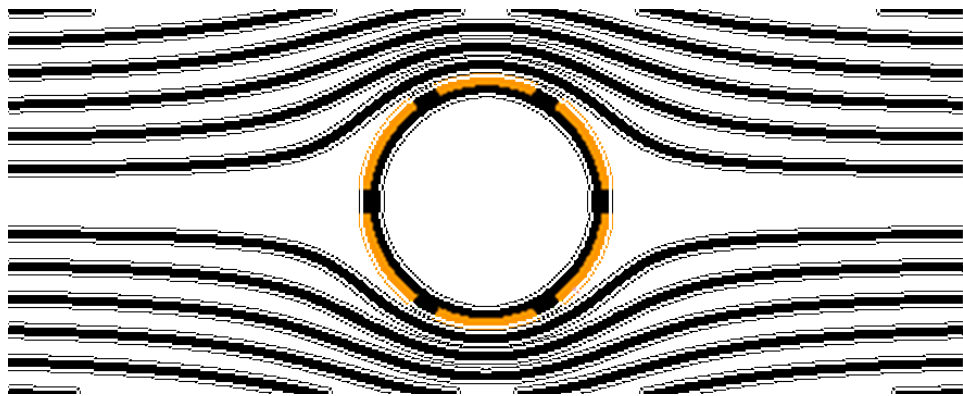
Kuva 3. Vaisalan HUMICAP

3.3 Hyperspektrinen kamera

Hyperspektrinen tarkoittaa kameran kykyä kuvata useammalla aallonpituudella. VTT on valmistanut pienikokoisen hyperspektrisen kameran, jota on käytetty muun muassa nanosatelliitissa.

3.4 Tuulenmittauslaite

Tuulen mittauslaite on kuumakalvoon perustuva anturi. Anturin kalvon pintaa lämmitetään ja mitataan sen jäähtymisen nopeutta. Tällä menetelmällä voidaan mitata tuulen suunta ja nopeus kaksiulotteisesti. Mikäli käytetään kahta anturia toisiinsa nähden ristiin, voidaan laskea tuulen kolmiulotteinen suunta ja nopeus. Kuvassa 4 on havainnollistettu kuudella kuumakalvolla varustettua tuulianturia kaksiulotteisessa virtauskuvassa.



Kuva 4. 2D-kuva tuulianturista kaasuvirtauksessa

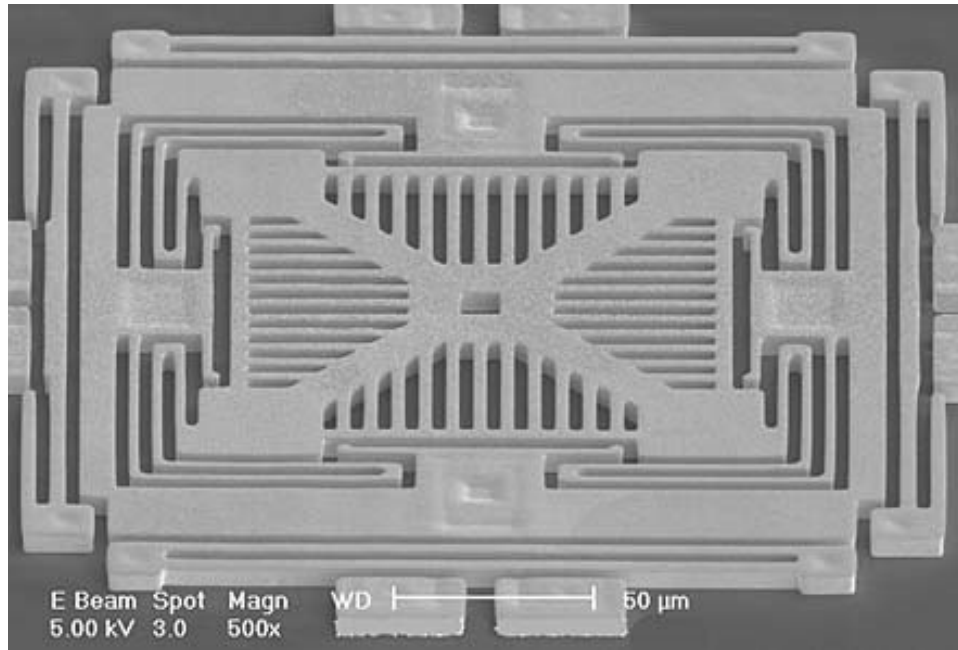
3.5 Lämpötilanmittauslaite

Lämpöä voidaan mitata elektronisesti lämpösähköparin tai vastuksen avulla. Käytettäväksi on valittu lämpösähköpariin perustuva lämmönmittauslaite. Lämpösähköpari tuottaa jännitteen lämmön siirtyessä lämpösähköparin rakenteessa mitattavan kohteen ja mittauselektroniiikan välillä. Jännitteen suhde lämmönsiirtymiseen saadaan selville käytännön testeillä. Jotta lämmönsiirtymisellä voidaan laskea lämpötila, tarvitaan vertailulämpötila. Tämä vertailulämpötila mitataan mittauselektroniiikan tilasta vastukseen perustuvalla mittaustavalla.

Lämpötilan mittauslaite on tarkoitus suunnitella ja toteuttaa Ilmatieteen laitoksen omana projektina. Tästä syystä lämpöparin teoriasta, toiminnasta ja konseptuaalisesta mallista on kattavampi kuvaus luvussa neljä.

3.6 Kiihtyvyydenmittauslaite

Murata Electronics-kiihtyvyyssanturi perustuu työstettyyn pihin. Tätä rakennetta on havainnollistettu satunnaisella samaan periaatteeseen perustuvalla MEMS-kiihtyvyyssanturilla kuvassa 5. Piin rakenne on tehty siten, että keskellä on liikkuva massakappale, joka pääsee liikkumaan jousenomaisten tukien varassa. Liikkeen nopeuden kiihtyessä, massallinen kappale jää jälkeen ja tietyt välit rakenteessa pienenevät. Näiden välien välissä on kapasitiivinen mittausta.



Kuva 5. MEMS-kiihtyvyyssanturi elektronimikroskooppikuvassa (Imgur n.d.)

3.7 Auringon säteilyvoimakkuuden mittauslaite

Auringon säteilyvoimakkuutta mittaava laite (*Solar Irradiance Sensor, SIS*) on Espanjan kansallisen ilmailu- ja avaruustekniikan laitoksen eli INTA:n valmistama. Nimensä mukaan laite mittaa maanpinnalle pääsevän auringonsäteilyn voimakkuutta. Säteilyvoimakkuutta voidaan mitata useammalla eri aallonpituudella anturista riippuen. Yksikkönä on wattia neliometriä kohden.

4 LÄMPÖTILA-ANTURI

Lämpötilamittalaite on tarkoitus suunnitella ja toteuttaa laitoksen sisäisenä hankkeena. Lämpöä voidaan mitata elektronisesti lämpösähköparin tai vastuksen avulla. Aiemmissa Mars-avaruusohjelmissa on käytetty vastukseen perustuvaa lämpötilamittausta. Marsissa sen käyttäytyminen on ollut toisenlaista kuin on oletettu ja vastuksen käyttö lämmönmittauksessa on todettu huonommaksi vaihtoehdoksi kuin lämpösähköparin käyttö. Vastukseen perustuva lämmönmittaus on usein mitannut laitteen omaa lämpötilaa, joka saattaa erota useilla celsiusasteilla kaasun lämpötilasta. Laitteen oma lämpötila johtuu sähköjohtimia pitkin mitattavan vastuksen luo.

Lämpöparissa lämmön johtuminen ei ole haitaksi, sillä se ilmaisee lämpötilaerot kaasukehän ja laitteen oman lämpötilan välillä. Laitteen oma lämpötila voidaan mitata vastukseen perustuvalla mittausmenetelmällä. Tästä syystä kehitettävä lämpötilamittalaite perustuu lämpösähköpariin. Lämpösähköpareja voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Valitun toteutustavan on sovittava Marsin olosuhteisiin. Valinnan helpottamiseksi on huomioitu sellaisia asioita kuin materiaalit, käyttölämpötilat ja signaalin vakaus.

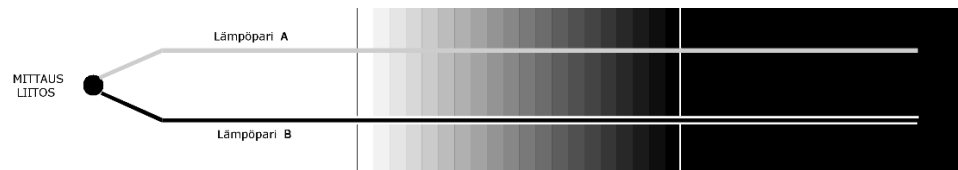
4.1 Teoreettinen toimintatapa

Lämpösähköpari sisältää kahta erityyppistä metallia, jotka on yhdistetty päistään toisiinsa mittausliitokseksi. Tämä niin kutsuttu termoelementin mittausliitoskohta ei itsessään mittaa lämpötilaa. Sen tarkoitus on yhdistää kaksi johtoa toisiinsa varmistamalla, ettei elektronista potentiaaliero voi syntyä johtimiin siinä kohdassa. Liitos on aloituspiste, jonka avulla lämpösähköinen jännite voidaan luoda. Lämpösähkövaikutus ulottuu koko lämpöparin johtimien matkalle. Sitä ohjaa lämpötilaerot, jotka aiheuttavat lämmönjohtumisen johtimia pitkin.

Jännite luodaan mittausliitoksesta eteenpäin, eikä itse mittausliitoksen kohdassa. Siitä johtuen koko piirissä tämän mittausliitoksen jälkeen lämpöparijohdinten pitää olla toisistaan sähköisesti eristettyjä ja pysyä eristettyinä kaikissa toimintaolosuhteissa, jotta hyödyllistä ulostulosignaalia voidaan saada.

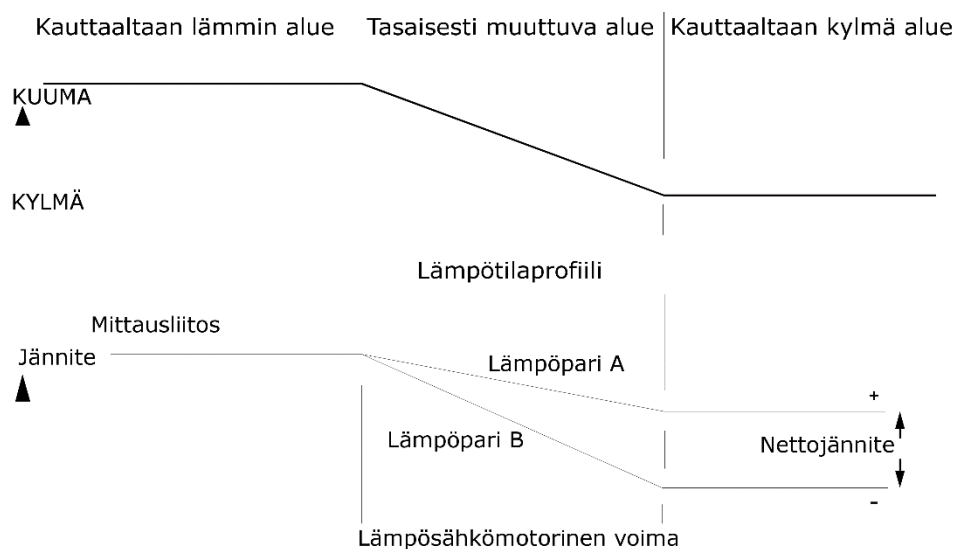
Kuvassa 6 havainnollistetaan lämpöparin toimintaa hypoteettisessa ja ihanteellisessa tilassa. Vasemmalla on tila, jossa lämpötila mitataan eli mittausliitos. Sen tilan lämpötila on tasainen ja kuuma. Oikealla on tila, jossa johtojen jännite-eroa mitataan eli vertailupiste. Mittauslaitteen

elektroniikka sijaitsee tässä tilassa. Sen tilan lämpötila on tasaisesti kylmä. Keskellä niiden välillä on tila, jossa lämpötilan oletetaan muuttuvan lineaarisesti koko matkalla, kuumasta kylmään.



Kuva 6. Lämpöparin toiminta hypoteettisessa ja ideaalisessa tilassa (Park n.d.)

Jännitteen potentiaali muuttuu missä tahansa johtimessa paikallisen lämpötilan mukaan. Mutta mikään lämpötilaero ei voi luoda potentiaaliero kahden johtimen välille, jos johtimet ovat lämpösähköiseltä ominaisuudeltaan samankaltaisia. Siitä syystä lämpöpareissa suunnitellusti käytetään toisistaan eroavia johtimia, jotka reagoivat eri tavalla ulkoiseen ärsykkeeseen, tässä tapauksessa lämpötilamuutokseen. Silloin aleneva lämpötila aiheuttaa vähentyvän jännitepotentiaalimolemmissa lämpöparielementeissä, mutta vähenemisen voimakkuus ei ole sama eri johdoissa, johtuen erilaisesta koostumuksesta. Pieni nettoero jännitteessä tuottaa lämpöparin ulostulosignaalin, joka on havainnollistettu kuvassa 7.



Kuva 7. Lämpötilan ja jännitteen suhde eri metallien välillä hypoteettisessa esimerkissä (Park n.d.)

Lisäksi mittausliitos takaa, ettei johtimien välille tule potentiaaliero mittauskohdassa lämpötilan muuttuessa. Silloin ainoastaan mittauspisteen ja vertailupisteen välinen lämpötilamuutos vaikuttaa jännitteen kasvuun. Lämpötilan pitää muuttua tai jännitepotentiaalia ei voi muodostua, siksi kummassakaan päädyssä olevassa tasaisessa lämpötilassa ei muodostu ylimääräistä jännite-eroa. Oikein valituissa lämpöpareissa tämä nettojännite voi olla riippuvainen ja toistettavissa oleva funktio johtimissa lämpötilaeron välillä.

Jännitteen muodostuminen ei yksinään riitä, se ainoastaan kertoo lämpötilaeron. Tämän vuoksi vertailupisteen lämpötila pitää tietää, jotta mitauspisteen lämpötila voidaan laskea. Vertailupiste on suojatussa tilassa.

4.2 Standardoidut lämpöparityypit

Lämpöpariin satunnaisesti valitut erilaiset metallit saattavat tuottaa jännitteen, mutta sen käyttäytyminen voi olla odottamatonta ja siksi hyödytön. Tästä syystä yleisimmistä lämpöpareista on luotu standardi. Valikoidun lämpöparien käyttäytyminen tunnetaan vuosien kehitystyön perusteella. Niiden oletettu käyttäytyminen on uudelleen toistettavissa ja ne ovat siten hyödyllisiä. Lisäksi materiaalit ovat yleisesti saatavilla. Standardissa lämpöpareille on annettu kirjaintunnus ja niiden ominaisuudet on listattu. Listattuja ominaisuuksia ovat muun muassa hyödylliset käyttölämpötilat, jännitteiden vakaus ja yhteensopivuus erilaisiin käyttöympäristöihin.

Suunniteltaessa lämpöpareja mittaushetkeisiin, on parempi valita standardin mukaiset tunnetut lämpöparit kuin satunnaisesti valitut lämpöparit, joiden käyttäytymistä ei vielä tunneta hyvin. Yleisin perustelu valinnalle on käyttökohteen lämpötila-alue. Muita valintakriteereitä ovat esimerkiksi soveltuvuus kohteeseen ja odotettu toiminta-aika.

Lämpösähköparin materiaaleja valmistetaan, testataan ja myydään kahta toleranssiluokkaa, jotka ovat standardi- ja erikoisluokka. Taulukossa 1 on listaus sallituista variaatioista.

Taulukko 1. Esikalibrointitoleranssit lämpöpareille

	Seos	Lämpötila (°C)	Standardiluokan rajat ±	Erikoisluokan rajat ±
T	Kupari (+)	-200 - 0	1°C tai 1,5%	0,5°C tai
	Konstantaani (-)	0 - 350	1°C tai 0,75%	0,8%* 0,5°C tai 0,4%
J	Rauta (+)	0 - 750	2,2°C tai 0,75%	1,1°C tai 0,4%
	Konstantaani (-)			
E	Chromel** (+)	-200 - 0	1,7°C tai 1%	1°C tai 0,5%*
	Konstantaani (-)	0 - 900	1,7°C tai 0,5%	1°C tai 0,4%
K	Chromel** (+)	-200 - 0	2,2°C tai 2%	n.a.
	Alumel** (-)	0 - 1250	2,2°C tai 0,75%	1,1°C tai 0,4%

N	Nicrosil (+) Nisil (-)	0 - 1250	2,2°C tai 0,75%	1,1°C tai 0,4%
R	Pt/13%Rh (+) Pt (-)	0 - 1450	1,5°C tai 0,25%	0,6°C tai 0,1%
S	Pt/10%Rh (+) Pt (-)	0 - 1450	1,5°C tai 0,25%	0,6°C tai 0,1%
B	Pt/30%Rh (+) Pt/6%Rh (-)	0 - 1700	0,5%	0,25%

* Lämpöparin johto on normaalisti toimitettu vastaamaan toleransseja yli 0°C lämpötiloissa. Hyllytavarana saatavat johdot eivät välttämättä asetu pakkaslukemien puolella annettuihin toleransseihin ilman erityistä valintaa ja testausta.

** Hoskins tavaramerkki. (Park n.d.)

Monet toleranssit taulukossa on annettu lämpötila-asteina tai prosentteina. Toleranssi on, näistä kahdesta vaihtoehdosta isompilukuinen, joko kiinteä lämpötila-aste tai prosentuaalinen osuus mitattavasta lämpötilasta. Lämpöparin ominaisuuksiin kuuluu se, että paljon kalibrointitestejä voidaan tehdä valitun erän johdolle ja testien tulokset koskevat kaikkia antureita, jotka on tehty samasta erästä. Tällä tavalla saadaan tarkemmin selville toleranssien vaihtelevuus ilman, että tehdään kallista testausta isolle määrälle yksittäisiä lämpöpärejä.

Koko lämpöparin tyyppi riippuu lämpötiloista ja käyttötilanteesta. Valinnasta huolimatta yleensä on tarpeellista suojata lämpöpari niiltä vaativilta olosuhteilta, joissa lämmönmittausta tehdään.

4.3 Stabiilius

Lämpöparit ajautuvat väistämättä pois kalibroinnista, mutta kuinka paljon ja kuinka nopeasti. Lämpöparin suorituskyky riippuu kriittisesti fyysisten ja kemiallisten ominaisuuksien absoluuttisesta yhtenäisyydestä koko piirin pituudella. Kun lämpöparien materiaalit on valmistettu, on tärkeää varmistaa homogeenisyys. Käytössä eri osat piirissä kokevat erilaisia tiloja, kuten lämpö, kemiallinen altistuminen, jne. ja siitä syystä osat muuttuvat fyysisesti toisistaan erilaisiksi.

Jännite, johtuen lämpötilaeroista, on hyvin herkkä johdon kemiallisille ja metallurgisille muutoksille. Muutokset ovat usein pieniä sopivalla aikavä-

lillä, mutta haitallisessa ympäristössä syntyy mahdollisesti suurempia muutoksia lyhyelläkin aikavälillä.

Jotta lämpöparista saadaan pitkäikäinen ja luotettava, laitetta pyritään käyttämään sen maksimilämpötilassa puhtaassa ympäristössä. Kotelointi kuten vaihat, suojausputket ja lämpökaivot suojaavat lämpöparia ympäröivien olosuhteiden vaikutuksilta.

4.4 Vikatilat

Suojausputket, kalvot ja jopa lämpökaivot voivat vioittua korroosion tai mekaanisen vaurion vuoksi, aiheuttaen virheellisiä lukemia ja lyhyemmän käyttöikäodotuksen. Hyvälaatuisen jalometallisen lämpöparin johtimessa on vähän epäpuhtauksia. Siitä johtuen se on hyvin altis saastumiselle, joka voi vaikuttaa sen lämpösähkö-ominaisuuksiin. Platina on erittäin herkkä vapaalle piille, jonka kanssa se voi yhdistyä luoden eutektisen seoksen, joka sulaa normaalissa tai alle normaalissa käyttölämpötilassa. Hyvin puhastat eristeet ja suojausputket, sekä huolellinen puhtauden ja käsittelyn huomiointi ovat välttämättömiä arvometallisille kokoonpanoille.

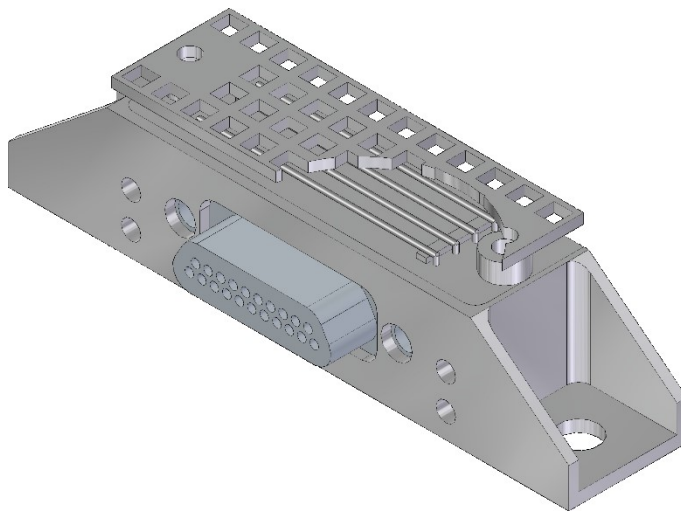
Yleisesti saatavilla olevat lämpöparit ovat standardien luokitusten mukaisia ja toleranssit noudattavat julkistettuja taulukoita tai käyriä. Lämpöparien laboratoriokalibrointi olettaa hyvää samankaltaisuutta tai homogeenisyyttä testattavalta lämpöparilta. Uudet materiaalit vastaavat tätä olettamusta, mutta käytetyt eivät välttämättä. Tästä johtuen ei yleensä ole mahdollista uudelleenkalibroida lämpöpareja. Tämä on totta varsinkin perusmetallityyppien kohdalla sen jälkeen, kun niitä on käytetty korkeissa lämpötiloissa.

Lämpöpareja on saatavilla monina erilaisina variaatioina, konstruktiona ja asetuksina. On mahdollista ja käytännöllistä yhdistää ne erityisellä tavalla, kun mitataan joko lämpötilaeroja tai keskilämpötilaa useasta kohdasta. On jopa mahdollista ryhmittää nämä laitteet toisiinsa, millä lisätään elektronisen signaalin voimakkuutta pienistä lämpötilaeroista. Valtaosa lämpöparien käytöstä on luotettavaa ja suoraa lämpötilan mittausta monissa eri käyttötarkoituksissa.

Lämpöparit ovat toiminnaltaan yksinkertaisia laitteita. Ne ovat erittäin monipuolisia ja vankkoja ja ne pystyvät toimimaan laajalla lämpötila-alueella. Lämpöparit voidaan valmistaa erittäin pieniin mittoihin ja moniin erilaisiin muotoihin, standardeihin ja erikoistarkoituksiin. Lisäksi ne ovat edullisia ja helposti keskenään vaihdettavissa tai korvattavissa. Mutta niiden toiminta täytyy ymmärtää, jotta niillä voidaan mitata haluttua tilaa vaaditulla tarkkuudella.

4.5 Konseptuaalisen lämmönmittauslaitteen rakenne

Kuvassa 8 on havainnollistettu mahdollisen lämmönmittauslaitteen rakenne. Kotelossa on ritilä, jonka tarkoitus on suojata lämpöparin lankoja laskeutumisen aikana mahdollisesti lentäviltä kiviltä. Sen lisäksi lämmönmittauslaitteessa on kaiken varalta useampi lämpöpari rinnakkainkytkennällä. Koska lämpöparit ovat rinnakkainkytkennällä, se ei nosta syntyvän jännitteen suuruutta vaan ainoastaan vahvistaa virran suuruutta. Koska lämpötilan mittaus perustuu jännitteen mittaamiseen, katkeava lämpöpari ei haittaa mittausta, mikäli se ei katketessaan oikosulje muita johtimia. Tämä tilanne voidaan välttää asettamalla niiden välille niitä erottavat seinät. Lämpöparien metallit ovat ohuita ja paljaana, jotta lämpösäteilyllä on mahdollisimman pieni vaikutus mitattavaan lämpötilaan ja niiden reagointiaika ja resoluutio olisi nopea ja tarkka. Samalla liian, kuten hiekkapölyn, tarttuminen lankaan on vaikeampaa sen ollessa hyvin ohut. Kertynyt lika aiheuttaa virheellisiä mittaustuloksia.



Kuva 8. Lämmönmittauslaitteen osaleikkauskuva

Lämmönmittauksessa maston läheisyydessä kasvava kaasuvirtaus ei ole haitaksi samalla tavalla kuin tuulenmittauksessa. Suurempi kaasuvirtaus vaikuttaa ainoastaan lämmönjohtumisen nopeuteen eli lämpötilaerojen tasaantumiseen, mutta ei sen suuruuteen. Kaasun lämpötila pysyy samana riippumatta virtausnopeudesta ja lämpö johtuu ainoastaan lämpötilaerojen välillä. Konseptuaalisessa mallissa lämmönmittauslaite on matalaprofiilinen ja lämpöparin johtimet sijaitsevat lähellä mastoa. On kuitenkin täysin varmistamatta, riittääkö konseptuaalisessa mallissa johtimien lyhyt matka riittävän suuren mitattavan jännitteen luomiseen. Lisäksi lämpöparit ovat mahdollisesti liian lähellä mittalaitteen elektroniikkaa, jonka hukkalämpö lämmittää kaasua sen läheisyydessä. Vaihtoehtoisesti lämmönmittauspiste voitaisiin sijoittaa pitkän varren pätyyn.

Lämmönmittauslaitteeseen on sijoitettava jännitettä tulkitsevaa elektroniikkaa, koska jännitteen saamiseen vaikuttaa lämmönjohtuminen johtimia pitkin ja hyödyllisen ennustettavissa olevan jännitteen mittaaminen

vaatii kontrolloitua johtimen pituutta ja lämpöparit on kalibroitava asennettuun kohteeseen. Tästä syystä ei ole mahdollista sijoittaa ainoastaan mittauspistettä mittauslaitteeseen ja sijoittaa kaikkea jännitettä tulkitsevaa elektroniikkaa Mars-laskeutujan sisälle. Mittauslaitteeseen voidaan sijoittaa jännitettä vahvistavaa elektroniikkaa ja sitä tulkitsevaa digitalisoivaa elektroniikkaa voidaan sijoittaa Mars-laskeutujan sisätilaan. Tämä elektroniikka voidaan integroida ohjainlaitteen elektroniikkapiirille.

Vielä on selvittämättä mitä lämpöparia käytetään ja millä tavalla Marsin kaasukehä tai muu ympäristö vaikuttaa valitun lämpöparin tyyppiin sekä kuinka nopeasti lämpöparin oletetaan vanhenevan ja sen vaikutus virhelukeman suuruuteen.

5 MITTAUSLAITTEIDEN KOMMUNIKOINTI JA TEHONKULUTUS

Jotta mittalaitteista yhdistettyä järjestelmää voidaan ohjata, on laitteiden rajapinnat selvitettävä. Rajapinta tarkoittaa kommunikointia laitteiden välillä. On selvitettävä muun muassa millaisia signaaleja ja kuinka monta, pinnijärjestys, yhdistäminen eli liittimet ja kaapelit, vastaanotettavat ja lähetettävät käskyt ja datan tiedostomuoto. Tässä kohdassa on keskitytty pääasiallisesti laitteiden signaalien tyyppeihin ja lukumäärään.

5.1 Rajapinta

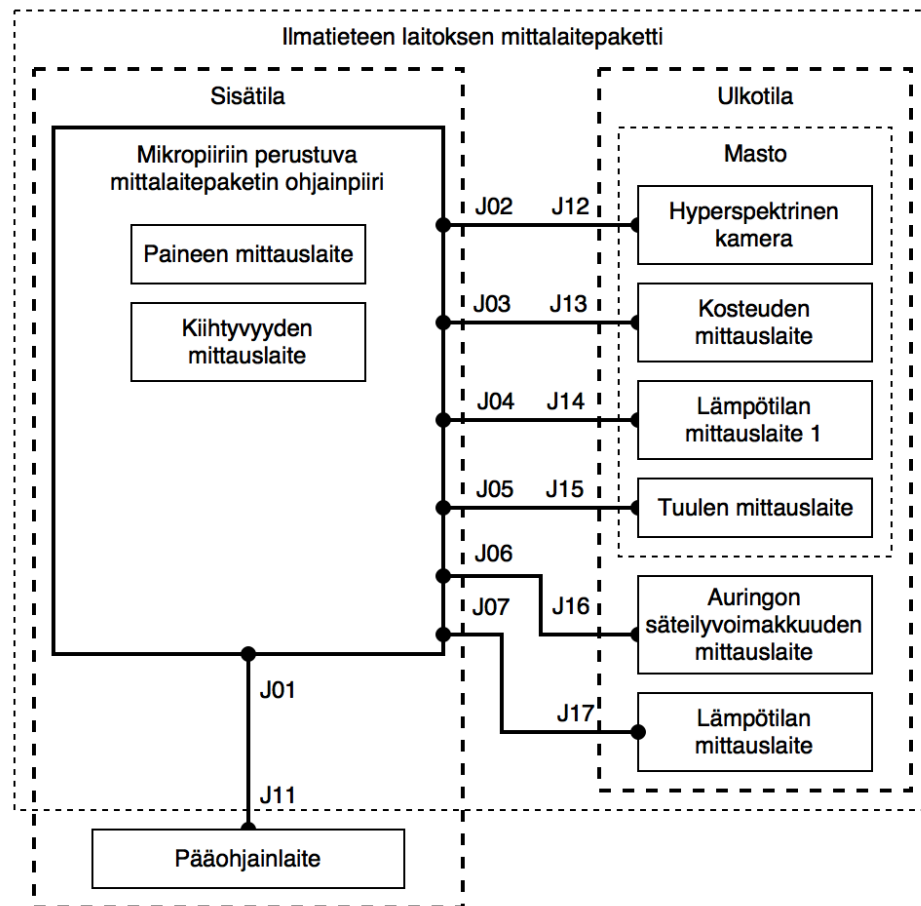
Mittalaitteita ohjaa mikrokontrolleriin eli MCU:hun perustuva ohjainpiiri. Sen on tarkoitus kommunikoida mittalaittepakettia käyttävän Mars-laskeutujan pääohjainpiirin kanssa. Laitteiden signaalitaulukot ovat liitteessä 1 sivuilla 1-3. Mittalaitteepaketin ohjainpiiri kommunikoi RS-422 standardin mukaisesti ja ohjainpiiriltä lähtee kahdeksan signaalilinjaa Mars-laskeutujan pääohjainpiirille.

Mittalaitteepaketin ohjainpiiri vastaanottaa mittalaitteilta signaaleja. VTT:n spektrikamera kommunikoi digitalisesti käyttämällä SPI-väylää ja laite vaatii seitsemän signaalilinjaa. Painetta, lämpötilaa ja auringonsäteilyvoimakkuutta mittaavat mittalaitteet kommunikoi RS-422:n määrittämisen mukaan. Painemittalaite vaatii kahdeksan, lämpötilamittalaite ja auringonsäteilyvoimakkuutta mittaavat laitteet vaativat kuusi signaalilinjaa. Kosteusmittalaitteelta tulee ainoastaan niitä taajuuksia, joita painemittalaite tulkitsee, laite vaatii 14 signaalilinjaa. Tuulenmittalaitteelta tulee taajuuksia, joita tulkitsee laitteeseen kuuluva erillinen prosessointiyksikkö. Prosessointiyksiköltä ohjainpiirille tulee kuusi signaalilinjaa.

Ennen kuin mittauslaiteohjainta voidaan lähteä kehittämään, sen toiminnot ja laajuus pitää hahmotella. Lohkokaavio on nopea ja yksinkertainen tapa hahmotella toiminnallisuutta. Suunnittelun kuvaus aloitetaan korkean tason lohkokaaviosta ja suunnittelun edetessä siirrytään aina alemmalle tasolle, jossa tulee enemmän yksityiskohtia näkyviin. Jotta lohkokaaavio pysyy lukukelpoisena, se kannattaa jakaa sitä ylemmällä tasolla olevan lohkokaaavion määrittelemiin ryhmiin.

Kuvassa 9 on korkean tason lohkokaaavio, jossa näkyy mittalaitteet, ohjain, ulkoinen laite ja niiden välillä olevat liitännät. Liitännän nimitys tulee kaapelin Jack-liittimestä, joka on naarasliitin. Ensimmäinen numero ilmaisee liittimen kiinnityskohteen. Nolla liitetään ohjainlaitteeseen ja vastaa vasti yksi liitetään mittalaitteeseen. Jälkimmäinen numero on kaapelin yksilöivä tunnus.

Kuvaajasta on tarkoitus hahmottaa mittauslaitepakettiin kuuluva osuus, mastossa ja ohjaimen yhteydessä sijaitsevat mittauslaitteet, käytettävät rajapinnat, sekä pääpiirteittäiset kytkennät. Datayhteyksissä rajapinnalla tarkoitetaan standardoitua metodia, jolla laitteet kommunikoivat toistensa kanssa. Standardista käyvät ilmi kommunikointiin vaadittavat liitännät, sekä signaalin tyyppi.



Kuva 9. Mittauslaitepakettin lohkokkaavio

5.2 Tehonkulutus

Taulukossa 2 on esitetty laitteiston jännite, virta ja suurin hetkellinen tehonkulutus. Laitteet eivät ole koko ajan päällä vaan niitä käytetään muutamina kertoina päivässä. Kosteuden mittalaitteen lämmitysvastusta käytetään ainoastaan kerran viikossa.

Taulukko 2. Teho

Mittalaite	Jännite (V)	Virta (mA)	Teho (mW)	Kuvaus
Kosteus	12		1300	Lämmitysvastus

Kosteus	12		90	Mittaus
Paine	5		60	
Paine	12		80	
Kamera	5	500	2500	
SIS	5	500	2500	
Tuuli	5	50	250	
Lämpö	-	-	-	
Kiihtyvyys	3.3	1	3.3*	Ainoastaan komponentti, ei sisällä oheis-elektroniikkaa
Ohjainpiiri	5 12	-	500**	

* Ainoastaan kiihtyvyyssanturin komponentti, ei sisällä muuta vaadittua elektroniikkaa

** Arvio todellisesta kulutuksesta

5.3 Kaapelijohdinten ja liitinpinnien mitoitus

Kosteudenmittalaite, lämpötilanmittalaite ja kaksi tuulenmittalaitetta sijaitsevat maston keskivaiheilla. Kamera sijaitsee maston päässä ja auringsäteilyvoimakkuudenmittalaite sijaitsee Mars-laskeutujan kannella. Mahdollinen ylimääräinen lämpötilanmittalaite voidaan sijoittaa laskeutujan kylkeen. Paineenmittalaite on yhdistettynä ICU:n kanssa samalle piirilevyille, joka sijaitsee laskeutujan sisällä.

Säteilyvoimakkuudenmittalaite ja mahdollinen ylimääräinen lämpötilanmittalaite liitetään tavallisella pyöreäprofiilisella kaapelilla. Maston mittalaitteille käytetään lattakaapeleita maston taivutuksen vuoksi. Lattakaapeleita on kaikkiaan kolme ja ne kulkevat nipussa toistensa päällä pitkin mastoa. Kameran ja lämpötilamittalaitteen signaalilinjat on niputettu samaan kaapeliin, joka haarautuu lämpötilamittalaitteen kohdalla. Kosteusmittalaitteen signaalilinjat ovat omassa lattakaapelissaan sijaiten keskimmäisenä. Päällimmäisenä on kahden tuulenmittalaitteen signaalilinjat samassa lattakaapelissa, joka haarautuu tuulenmittalaitteiden kohdalla.

Liittiminä on pitkään käytetty Glenairin avaruuskelpoisia Micro-D-liittimiä, joita saa muun muassa 9-, 15-, 21- ja 25-pinnisenä. Liitin mahdollistaa laitteen helpon kokoonpanon, mutta jokainen liitin tuo enemmän painoa verrattuna suoraan piirilevyihin juottamalla tehtyyn kokoonpanoon. Mitä enemmän liittimessä on pinnejä, sitä pienemmässä suhteessa liittimen muu rakenne ja kiinnitys ovat kokonaisuudessaan. Massan kannalta on edullista yhdistää useampia kaapeleita samaan isompaan liittimeen, mikäli käyttämättä jääviä pinnejä ei tule liikaa.

Säteilyvoimakkuudenmittalaitteen ja ylimääräisen lämpötilamittalaitteen kaapelit lähtevät samasta 15-pinnisestä Micro-D-liittimestä niputettuna ja haarautuvat, siinä missä kaapeli tulee ulos laskeutujan sisätiloista. Mastolle kulkee yksi 14-johtiminen ja kaksi 12-johtimista lattakaapelia. Maston lattakaapeleiden yhteinen signaalilinjojen määrä on 38. Käyttämällä 14-johtimiseen kaapeliin 15-pinnistä liittintä ja niputtamalla kaksi 12-johtimista kaapelia samaan 25-pinniseen liittimeen, jää käyttämättä jäävien pinnien määrä vain kahteen. Mikäli jokaiselle kaapelille käytettäisiin omaa 15-pinnistä liittintä, tulisi ylimääräinen liitin suhteellisesti painamaan enemmän ja seitsemän pinniä jäisi käyttämättä.

6 MITTALAITEPAKETIN MEKAANINEN RAKENNE

Mittalaitepaketti sisältää erilaisia kaasukehän mittalaitteita. Sen mekaaniseen suunnitteluun kuuluvat mittauslaitteiden sijoittelu, niitä yhdessä pitävien rakenteiden ja mittauslaitteiden välisen kommunikoinnin johdotuksen rakenne, liitännät ja sijoittaminen. Työssä on käytetty tietoa aiemmista Mars-laskeutujien rakenteista. Maston rakennetta on suunniteltu vertaamalla muun muassa Mars Science Laboratory- (MSL) ja Mars Exploration Rover-robotteja toisiinsa (MER) ja ottamalla niistä mallia.

Tyypillisesti ilmatieteellinen mittausasema ja sen anturit on sijoitettu siten, että mittalaitteet ja ympäristössä olevat esteet aiheuttavat mahdollisimman vähän häiriötä. Esimerkiksi tuulenmittauslaitteiden varsien tulee olla pitkiä, jotta anturit sijoittuvat mastosta kauemmaksi, koska maston kiertävä kaasuvirtaus aiheuttaa virhelukemia. Masto voi varjollansa haitata auringon säteilyvoimakkuuden mittalaitetta. Kyseistä mittalaitetta ei voida asentaa maston liikkuvaan päähän, joten sen on oltava riittävällä etäisyydellä mastosta. Jotta vältetään laskeutujan muiden laitteiden varjostukselta, mittalaite voidaan sijoittaa pienempään mastoon.

6.1 Masto

Tieteelliseltä kannalta masto on sitä parempi, mitä korkeammalle päästään, koska korkealta on parempi näkyvyys. Toisaalta käytännölliset syyt rajoittavat maston korkeutta. Mastosta voidaan saada pitkä ja kuljetuksen ajaksi se voidaan mahduttaa pieneen tilaan, kun siitä tehdään sivuttain nouseva ja teleskooppivartinen. Toisaalta on parempi välttää ylimääräisiä liikkuvia rakenteita kylmähitsautumisen vuoksi. Niiden täytyy luotettavasti toimia käyttöympäristössä odotetun eliniän.

Tässä työssä mastosta suunniteltiin sivuttain nouseva. Teleskooppivartinen masto olisi liian haasteellinen ja monimutkainen, jonka myötä siitä tulisi epäluotettava toiminnaltaan. Toimintatapansa vuoksi se hankaloittaa muun muassa mittalaitteiden sijoittamista sekä kaapeleiden kiinnityksiä ja liikkeitä. Teleskooppinen rakenne lisäisi liikaa liikkuvien rakenteiden määrää suhteessa saatuun hyötyyn.

Mastoa ei voida tehdä liian isoksi suhteessa Mars-laskeutujan muuhun rakenteeseen. Ongelmaksi voi tulla maston aiheuttaman massakeskipisteen siirtyminen liian korkealle. Mikäli Mars-laskeutuja on liikkuva robotti, maston täytyy olla jäykkärakenteinen, jotta huojunta ja värähtely olisi mahdollisimman vähäistä karussa maastossa liikkumisesta aiheutuvista iskuista. Jäykkärakenteisuus tuo merkittävästi sitä enemmän massaa, mi-

tä pidempi masto on. Tarkempi vertailu halutun pituuden ja jäykkyyden hyödyistä on tekemättä.

Raketin lennon ja robotin laskeutumisvaiheen aikana maston on tarkoitus olla taitettuna Mars-laskeutujan runkoa vasten. Maston kameran puolelta päätyä varten laskeutujan runkoon on asetettu tukirakenne. Sen tarkoitus on lukita masto siten, ettei moottoroidun päädyn nivelelle aiheudu liian suuria rasituksia kuljetuksen aikana. Tämä tuki on lukollinen ja lukon avaaminen voidaan toteuttaa muun muassa patruunaan tai solenoidiin perustuvalla sokan vetimellä. Patruunaan etuja on painon säästö. Samaa mekanismia on käytetty esimerkiksi MER-laskeutujassa (Warden ym. 2004).

Masto saattaa käyttäytyä lämpölaajenemisessa eri tavalla kuin Mars-laskeutujan kansi, johtuen erilaisista geometrioista. Lukitus on suunniteltava siten, että sillä on varaa mukautua mittojen muutoksiin. Lukituksen tuki voidaan suunnitella siten, että se tukee sivuttaisissa liikkeissä, mutta antaa myöten lämpölaajenemisen suuntaan, esimerkiksi jättämällä kiinnitykseen vällys. Maston tyvi antaa riittävän tuennan pituussuunnan liikkeisiin.

Aiemmissa Mars-missioissa maston nostomekanismeja on ollut pääpiirteiltään kahta tyyppiä. Masto voidaan nostaa pystyyn vinoon asetetulla nivellytyksellä. Tämän etuna voidaan pitää tarvetta asentaa ainoastaan yksi laakerointi. Moottorin välityssuhde oli toteutettu integroimalla hammasrattaat maston juuren kotelon sisäpuolelle. Moottorin akseli oli ulkopuolelta vedetty maston sisälle. Moottorin akselissa oli pieni hammasratas ja välityssuhde oli toteutettu ainoastaan yhdellä hammasparilla.

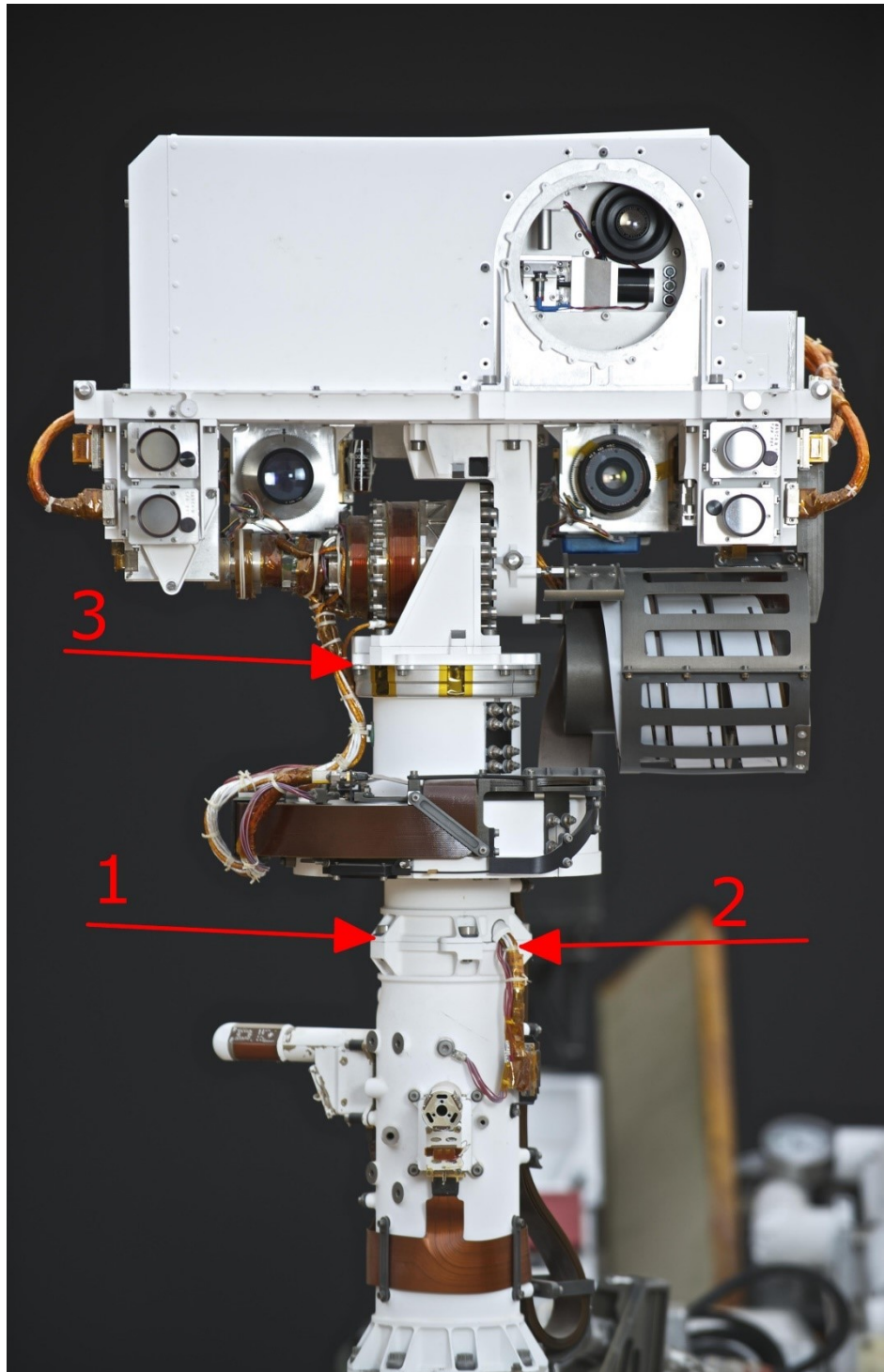
Maston nousemista kaareissa voidaan pitää etuna, mikäli laitteistoja halutaan asentaa tiiviisti. Masto voidaan asentaa Mars-laskeutujan reunalle ja sillä voidaan ohittaa yläpuolella sijaitsevat laitteet kuten lautasantenni. Mikäli yläpuolelle ei ole tarvetta sijoittaa laitteistoa, maston haitaksi tulee vaatimus sijoittaa masto siten, että se ei noustessaan vaurioita vieressä sijaitsevia laitteita. Maston kiertyminen nousussa rajoittaa mittalaitteiden sijoittamista. Maston kylkeen sijoitettu mittalaite ei saa nousun aikana osua Mars-laskeutujan kanteen.

MSL-robotissa maston nostomekanismi on toteutettu suoraan ylös nostavana. Tällaisessa maston nostomekanismissa mittalaitteiden sijoittamisessa ei ole maston kiertymisen estävää tekijää. MER-robotissa ei myöskään ollut mittalaitteita sijoitettuna maston varrelle. Nostotavasta huolimatta aiemmissa Mars-missioissa on onnistuttu sijoittamaan masto siten, että ei ole ollut tarvetta väistää muuta laitteistoa. Tässä työssä päätettiin toteuttaa suoraan pystyyn nouseva masto, joka ei mahdollisesti vaadi Mars-laskeutujan reunaan sijoittamista eikä rajoita mittalaitteiden sijoitusta mastoon samalla tavalla kuin kiertyvä masto.

Maston nostavassa nivelessä on kaksi laakeria molemmin puolin ja nivelen kotelon sisälle sijoitettu moottori. Tässä tapauksessa moottorin välityssuhde kannattaa toteuttaa planeettavaihteistolla, pienen koon ja saman keskiakselin sijainnin vuoksi.

Kuvassa 10 maston puolivälissä kahden putken välillä olevasta ruuviliitoksesta (nuoli 1) havaitaan, että ylempi maston osuus on paikallaan pysyvä. Myös liitoskohdasta jatkuvan putken halkaisija on pienempi kuin yläpuolella kaapelin yhteydessä oleva putki. Alemmasta liitoskohdasta havaitaan putken sisälle kulkeva kaapeli (nuoli 2). Yläpuolen putken liitostyyppi (nuoli 3) on erilainen kuin alempana. Lattakaapelin liitostapa tukikoteloon viittaa siihen, että kaapelikotelon on tarkoitus pyöriä kameran mukana. Tämän kotelon sisällä kaapelin on tarkoitus liikkua vapaana. Todennäköisesti moottori, vaihteisto ja laakerointi ovat sijoitettu mahdollisimman lähelle kameraa putken sisälle. Syynä on mahdollisesti MSL-robotin Chemistry & Camera (ChemCam) tarkkuusvaatimukset (100 mikroradiaanin tarkkuus eli 0.5mm poikkeama 7000mm matkalla) (Wiens, Maurice. n.d.).

Mastoon on myös sijoitettu mittauslaitteita, jotka vaativat paikallaan pysymistä ja joita ei aiemmassa MER-robotin mastossa ollut. MER-robotin koko masto oli pyörivä ja moottori laakereineen sijoitettiin maston juureen (Warden, Cross, Harvison 2004, 264). Ilmatieteen laitoksen mittalaittepakettissa mastoon sijoitettujen tutkimuslaitteiden on oltava paikallaan pysyviä. Koska muun muassa tuulenmittauslaite antaisi virheellisiä mittauksia maston liikkuesssa, on maston alempi osuus liikkumaton rakenne.



Kuva 10. Kaukohavainnointimasto MSL-robotissa (NASA/JPL-Caltech, n.d.). Kuvaa on muokattu.

Spektrometrikamera ei vaadi tarkkaa ohjausta, minkä takia moottori voidaan sijoittaa alemmas tutkimuslaiteputken sisälle. Ylemmän pyörivän putken osuus mastosta on tarkoitus saada nostettua kamera ylemmäksi. Mikäli kameran sijoittaminen korkeammalle ei ole tarpeen, voidaan ylempi putken osa jättää pois, jolloin kamera kiinnittyy heti alemman putken sisälle sijoitetun moottorin akseliin.

Yksi vaihtoehtoista on toteuttaa koko masto yhdestä pitkästä putkesta ja sijoittaa kameran horisontaalinen moottori putken ylempään päähän. Myös kaapelipakka täytyisi sijoittaa ylemmäksi. Tämä järjestely kuitenkin siirtäisi maston massakeskipistettä korkeammalle. Maston pystyyn nostavan moottorin, vaihteiston ja laakerin koko kasvaisi, koska tarvittava vääntömomentti olisi suurempi.

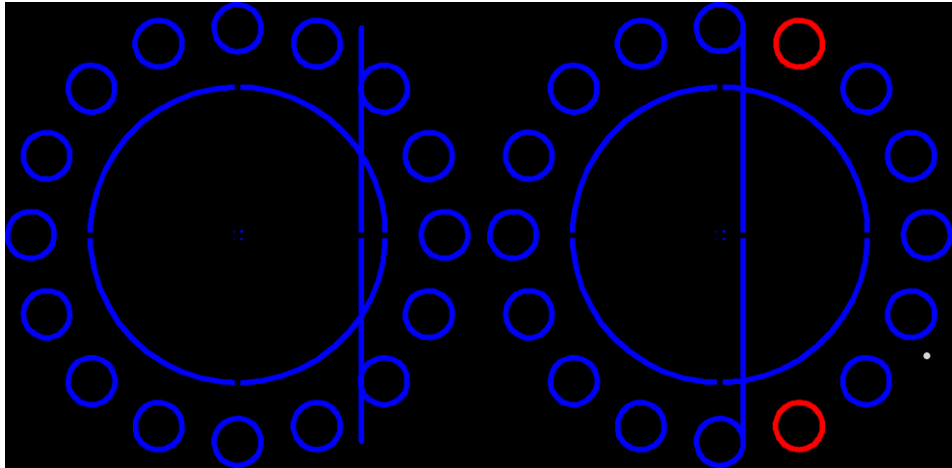
Valmistuksen kannalta maston keskeisin osa, putki, muodostuu kolmesta erikseen valmistetusta osasta, jotka laserhitsataan yhteen. Laserhitsauksessa lämmönjohtuminen ei ulotu kauas ja lämpövaikutuksen alue pysyy pienenä. Laserhitsaus on aina robottiohjattua ja hitsauksen laatu pysyy kauttaaltaan hyvänä. Putki valmistetaan erillisistä osista, jotta kokonaisuudessaan monimutkaisten muotojen valmistus voidaan toteuttaa monella yksinkertaisella valmistusmenetelmällä. Siten osan valmistus ei vaadi kalliita laitteistoja ja monimutkaisia vaiheita. Putken ylä- ja alakiinnityskannat koneistetaan yksittäisistä kappaleista. Putken keskimäinen osa työstetään vahvasta putkesta ohuemmaksi, jotta siihen saadaan mitauslaitteen kiinnityksille ulokkeet, joissa on kierteitys.

6.2 Maston kiinnitys ja nivel

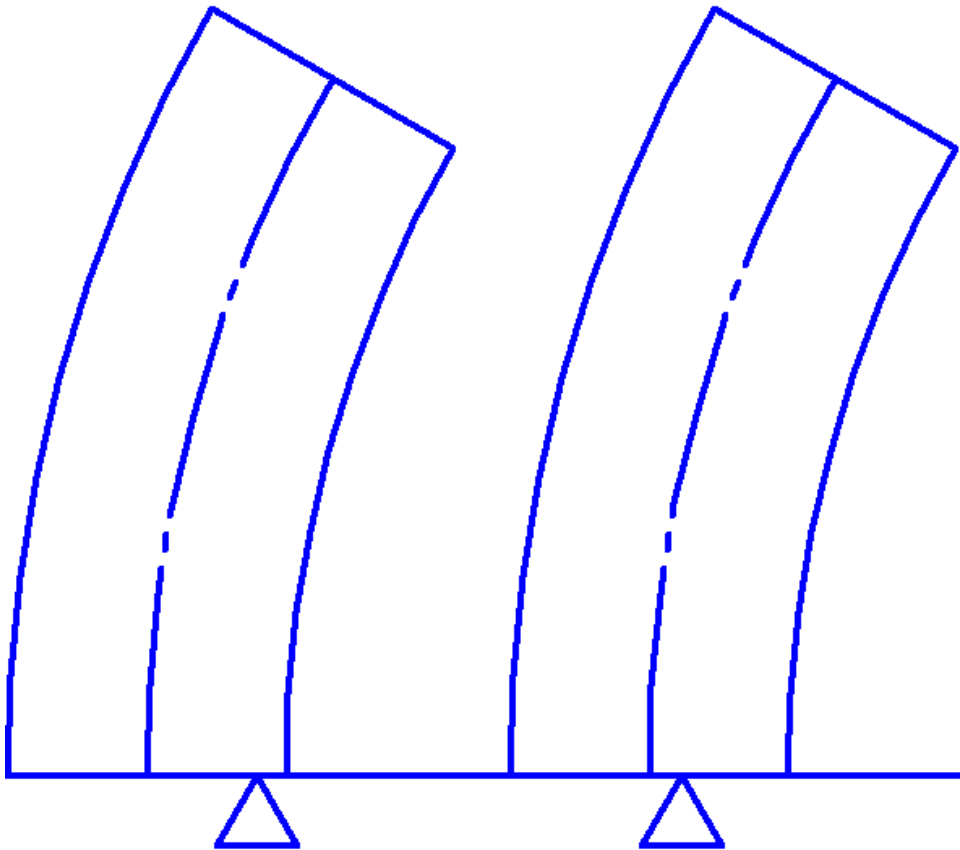
Mastonkannan kiinnitykseen käytettävien ruuvien mitoitus määräytyy kuormituksen, rakenteen jäykkyyden ja käytettävien ruuvien määrän perusteella. Kiinnitys on sitä tukevampi mitä tasaisemmin se voidaan toteuttaa. Tässä tapauksessa ruuvit sijoitetaan tasaisella jaolla putken kehälle. Mitä enemmän käytetään ruuveja, joille kuormitus jakautuu, sitä pienempiä ne voivat olla. Koska JPL ei käytä alle M4-koon ruuveja, voidaan alustavassa mitoituksessa käyttää M4-ruuveja.

Mitä vähemmän ruuveja käytetään, sitä vahvempia ja monimutkaisempia tukirakenteiden tulee olla muodoltaan, jotta ruuvien antama tuenta jakautuu tasaisesti putken kehälle. Taivutuksessa puristus- ja vetokuormitus ovat eri puolilla tukipistettä. Mitä joustavampi rakenne, sitä keskemälle tukipiste siirtyy. Mikään puristusalueelle jäävä ruuvi ei osallistu kuormituksen voimien jakoon (kuva 11). Koko putken ei tarvitse olla jäykkärakenteinen. Riittää että kiinnitysalue on jäykempi kuin muu osa putkesta, jotta taivutuksessa tukipiste saadaan mahdollisimman lähelle putken reunaa.

Kuvissa 11 ja 12 on esitetty tukipisteen sijoittuminen jäykkään ja joustavaan mastorakenteeseen. Kuvan 11 joustavassa rakenteessa käy ilmi kuormituksen tukemisessa merkityksettömien ruuvien lisääntyminen kahdella (merkitty punaisella). Ruuvien muuttuminen merkityksettömäksi ei ole ainoa haittapuoli. Tukipisteen siirtyessä lähemmäksi vetokuormitukseen osallistuvia ruuveja, niihin kohdistuu suurempi voima kuin jäykkässä rakenteessa. Kuvassa 12 on havainnollistettu tukipisteen sijoittumista sivusuunnasta.



Kuva 11. Vasemmalla on jäykän rakenteen tukipiste ja oikealla on joustavan rakenteen tukipiste ylhäältäpäin kuvattuna. Putkea kiertää ruuvit.

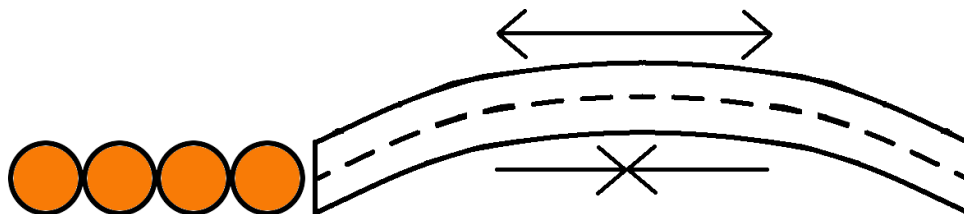


Kuva 12. Putki ja tukipiste sivulta. Vasemmalla on jäykän rakenteen ja oikealla on joustavan rakenteen tukipiste.

6.3 Kaapelit

Kaapeleiden valmistajat ovat määritelleet omien kaapeleidensa sallitut taivutussäteet, joiden rajoissa kaapeliin ei kohdistu sitä rikkovia voimia. Nämä taivutussäteet eivät kuitenkaan ota huomioon toistuvasti taivuttavaa liikettä, joka väsyttää kaapelin rakenteita ja pitkäaikaisessa käytössä rikkoo sen. Kaapelin geometrialla, johtimen rakenteella ja materiaaleilla voidaan vaikuttaa siihen, miten kaapeli kestää toistuvaa rasitusta. Toistuviin taivutuksiin on olemassa monia siihen suunniteltuja kaapeleita. Mikäli johdotuksen on tarkoitus pysyä paikallaan asennuksen jälkeen, siinä voidaan käyttää tavallista pyöreäprofiilista kaapelia.

Kuvassa 13 on esitetty kaapelin neutraaliakseli ja nuolet kuvaavat jännityksen suunnan, yläpuolella veto ja alapuolella puristus. Neutraaliakselilla tarkoitetaan taivutuksessa olevan kappaleen keskimmäistä aluetta, johon ei muodostu taivutuksen veto- tai puristusjännityksiä. Mitä kauemmaksi siirrytään neutraaliakselilta kohti materiaalin reunaa, suunnasta riippuen, sitä suuremmat puristus- tai vetojännitykset ovat.



Kuva 13. Kaapelin neutraaliakseli taivutuksessa. Vasemmalla on kuvakulma päädyistä katsottuna.

Kaapeleista saadaan joustavampia ja kestävimpiä, kun käytetään kierrettyä monisäikeistä johdinta. Johto joustaa helpommin, kun sen johtimet pääsevät vapaasti järjestäytymään uudelleen. Johtimet hakeutuvat limitäin ovaaliin muotoon taivutuksen alaisena. Yksisäikeisessä johtimessa taas johtimen kauempana neutraaliakselilta oleva materiaali ei pääse siirtymään, koska se on kiinteän metallirakenteen sitoma.

Nivelletyissä kohteissa, kuten kameran ja maston akselien kohdalla, on käytettävä tarkoitukseen sopivaa ohutta lattakaapelia. Lattakaapeleissa kuparijohtimet on saatu mahdollisimman lähelle kaapelin neutraaliakselia, millä varmistetaan kaapelin mahdollisimman suuri joustavuus ja pitkäikäisyys toistuvassa taivutuksessa.

Litteässä johdossa päästään suuriin taivutussäteisiin ja kestävyteen yhdellä akselilla, kun toisella akselilla siitä luovutaan. Kolmiulotteinen taipuminen toteutetaan sarjaan kytketyillä litteillä kaapeleilla, jotka sallivat taivuttamisen eri akseleille.

Kameran niveltämisen tapauksessa horisontaalinen pyöriminen akselin ympäri mahdollistetaan käärimällä nauhakaapelia maston ympärille. Kaapeli on tuettu maston ympärillä olevalla pyöreällä kotelolla. Kaapeli täytyy mitoittaa siten, että sillä on kameran pyöriessä tarpeeksi varaa kiristyä ja löystyä maston ympärillä. Marsin laajat lämpötilavaihtelut johtavat merkittäviin mittojen muutoksiin, mikä on otettava huomioon kaapelin mitoituksessa, jotta kaapeli ei puristu mastoa tai kaapelin tukirakennetta vasten kameran kääntyessä ääriasentoon.

Tarkoitus on sallia kameralle yli täyden kierroksen pyörimisvara, jotta kameran kääntösäde aiheuttaisi harvemmin rajoitteen kuvattaessa vieressä olevaa kiinnostavaa kohdetta. Ilman käytännön testejä, joista ilmenee käytännön tarpeet kääntyvyydelle, tarvittavan kääntösäteen on arvioitu olevan puolitoistakertainen.

6.4 Lattakaapelityypin määrittäminen

Pysyviin asennuskohteisiin voidaan käyttää perinteistä pyöreäprofiilista kaapelia. Kaapeleissa, jotka joutuvat toistuvan liikkeen rasittamaksi, on käytettävä siihen paremmin soveltuvaa taipuisaa kaapelia. Pyöreäprofiilinen kaapeli saadaan joustavammaksi käyttämällä monisäikeisiä johtimia ja niissä monikerroksista suojakuorta kitkaa vähentävistä materiaaleista. Pyöreäprofiilinen kaapeli on siitä huolimatta jäykempi kuin lattakaapeli. Lattakaapelissa johtimet ovat rinnakkain, mikä tekee siitä pyöreäprofiiliseen kaapeliin verrattuna taivutussäteeltään ylivoimaisen, kun kaapelia taivutetaan litteämmän tason normaalin suuntaisesti. Lattakaapelityyppejä ovat taipuisa piirilevy, nauhakaapeli, polytetrafluorieteeni eli PTFE-kaapeli ja Flexx-Sil-kaapeli.

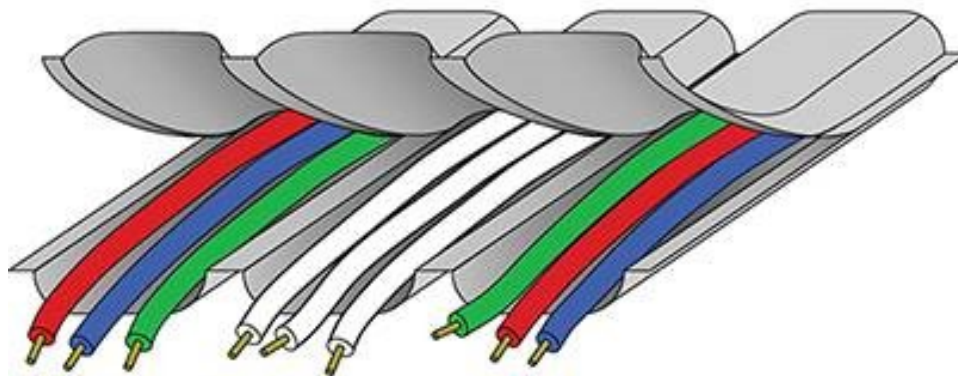
Taipuisalla piirilevymenetelmällä toteutettu kaapeli on käytännössä pitkä piirilevy, jossa on kuparijohtimet koko piirilevyn matkalla. Tyypillisesti taipuvissa piirilevyissä on käytetty polyimidikalvoa substraatin materiaalina. Avaruuskäyttöön kelvollinen piirilevy voisi olla valmistettu tähän käyttöön hyväksytystä Kaptonista, joka on DuPont:n tavaramerkki sen polyimidimateriaaleilleen. Kaapelikäytössä kuparijohtimet kulkisivat kahden polyimidin välissä. Ongelmana on kuparipinnoituksesta johtuva kuparijohtimien pieni halkaisijan pinta-ala, joka rajoittaa käytettävän virran määrää. Kuparipinnoitusta saa paksumpana, mutta ongelmaksi tulee niiden kiinteä rakenne.

Piirilevyssä on mahdotonta toteuttaa kuparijohtimet monisäikeisinä. Lisäksi piirilevystä puuttuisi säikeiden kierteinen punonta, joka rakenteensa vuoksi sallii suuremman taipuman. Kierteisessä punonnassa puristuspuoleiset säikeet pääsevät liikkumaan vetopuolelle, jossa on enemmän tilaa kuin puristuspuolella. Punontatyylin tarkoitus on sallia kaapelin liikkuminen ja materiaalivalinnoilla voidaan vähentää kitkaa ja aiheutuvaa lämpenemistä.

Nauhakaapeli on pitkään käytössä ollut lattakaapelityyppi. Nauhakaapelin johtimen koko ja kuorimateriaali on standardoitu. Nauhakaapeleissa johtimia saa vain yhtä kokoa AWG28, mikä rajoittaa sen käyttöä ja kuorimateriaali on tyypillisesti polyvinyylikloridi eli PVC, joka on avaruuskäyttöön soveltumaton, johtuen sen korkean kaasuuntumisen tasosta. On mahdollista saada erikoisnauhakaapeleita, joissa käytetään eri kuorimateriaaleja.

PTFE-kaapelin materiaali on matalakitkaista, joten PTFE-lattakaapelin käyttökohteeksi soveltuvat toistuvan taivutuksen alaiset rakenteet, joissa vaaditaan pitkää käyttöikää. PTFE-kaapelin heikkous on kahden puolikkaan PTFE-kotelon sintraus tasaisin välimatkoin johtimien ympärille muodostaen niin sanotun sandwich rakenteen. Sintrattu sauma on potentiaalinen heikko kohta, joka lopulta murtuu. Kaapeli on havainnollistettu kuvassa 14.

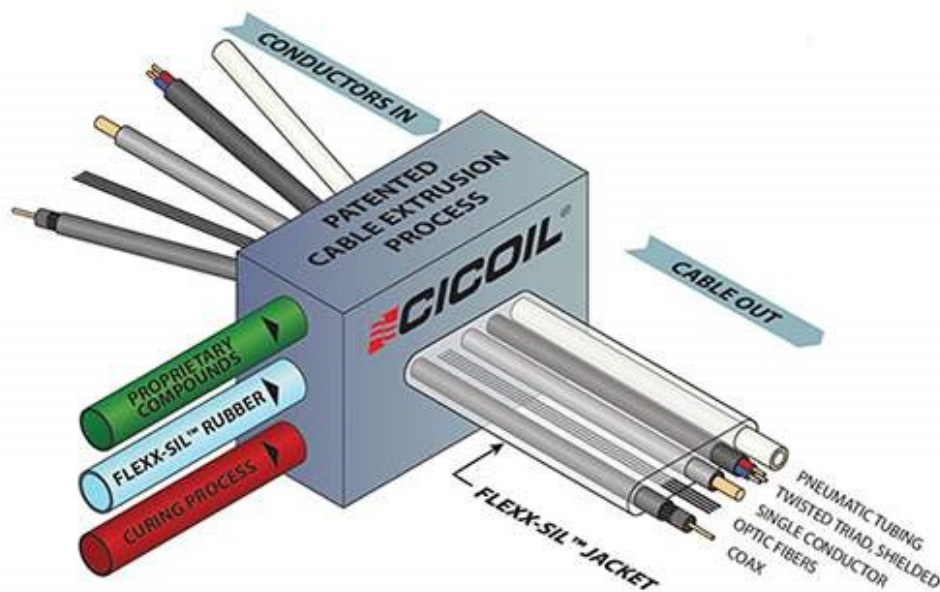
2-Piece PTFE Cable Construction



Kuva 14. PTFE-kaapelin rakenne

Lisäksi johtimet PTFE-koteloinnissa eivät ole kiinnittyneet paikallensa kotelointimateriaalin avulla. Johtimet pääsevät liikkumaan vapaasti ja saattavat rasitusvoimien vaikutuksesta irrota liittimistä johtimien päädyissä. Tämän estämiseksi PTFE-kaapeleissa on puristusliittimiä johtimien lukitsemiseksi tasaisin välein, mikä nostaa kuluja. Myös massa kasvaa johtaen suurempaan inertiaan, järjestelmän tärinään ja pidempään asettumisaikaan. Kapton- ja PTFE-muovien pienestä kaasuuntumisen määrästä huolimatta niitä ei suositella, mikäli on olemassa vaihtoehtoinen käyttökohteeseen soveltuva materiaali.

Flexx-Sil-kaapeli on erilaisten johtojen yhdistelmä, joka on kapseloitu Flexx-Sil-vaippamateriaaliin erityisellä pursotusmenetelmällä. Tämä on Cicoil Corporation yhtiön patentoitu menetelmä, joka on havainnollistettu kuvassa 15. Tyypillisesti kaapelit on asetettu rinnakkain litteään kaapelin valmistamiseksi, mutta muitakin muotoja voidaan valmistaa erityisvaatimuksia vastaamaan.



Kuva 15. Cicoil Flexx-Sil-kaapelin pursotusmenetelmä

Yleisesti pyöreäprofiiliset taipuisat kaapelit valmistetaan kapseloimalla eristetyt johtimet usealla kerroksella tekstiili- tai polymeerimateriaalia, mikä vähentää kitkalämpöä johtimen liikkuesssa. Kuorimateriaali on tyypillisesti PVC. Mikäli kyseessä on maadoitettu kaapeli, siihen tulee ylimääräinen kerros matalakitkan materiaaleja punospäällystetyllä kuparilla ja PVC- tai muulla kulumiskestäväällä kuorella. Toisin kuin taipuisa pyöreäprofiilinen kaapeli, Flexx-Sil-kaapeli ei tarvitse pienkitkaisia materiaaleja, sillä johdin ei liiku Flexx-Silin kuorimateriaalin sisällä.

Lattakaapelissa on kiinteä kaapeliprofiili, jonka vuoksi kaapeleiden sähköiset ominaisuudet ovat yhdenmukaisia ja stabiileja. Johtimien välysten paikallaanpysyminen taivutuksessa johtaa siihen, että näennäisvastus, induktiivinen vastus, varautumiskyky, aikaviive, ylikuuluminen ja vaimennus pysyvät vakiona. Kaikilla johtimilla on sama fyysinen ja sähköinen pituus. Dielektriset ominaisuudet pysyvät vakiona, mikä vuoksi signaalien vinoutuma ja niiden väliset differentiaaliset aikaviiveet pysyvät minimissään. Lattakaapelit voivat olennaisesti muodostaa suuritiheyksisen yhdistetyn järjestelmän. Lattakaapelin pakkaustiheys on paljon suurempi, kuin pyöreäprofiilisen kaapelin. Johtimet voivat olla näkyvissä, mikä helpottaa vianetsintää. (Repas 2015)

Pursotettu Flexx-Sil-kaapeli ei tarvitse puristusliittimiä, kuten PTFE-kaapelit, koska johtimet eivät voi siirtyä Flexx-Sil-koteloinnin sisällä. Flexx-Sil-kapselointi absorboi tärinää, vaimentaen ja vähentäen sitä. Lisäksi materiaali on itsekorjautuva, sulkién piénet lävistyksét.

Tyyppillisesti PTFE-kaapelin taivutussäde on kaksinkertainen Flexx-Sil-kaapeliin verrattuna, kun johdinten mitta on sama. Toistuvassa taivutuksessa on parempi käyttää johdinta, joka muodostuu useammasta pienes-

tä säikeestä, sillä ne kestävät pidempään. Esimerkiksi AWG28 voidaan valmistaa seitsemästä AWG36-johdosta tai yhdeksästätoista AWG40-johdon säikeestä. Hienojakoisemmassa johtimessa esiintyy vähemmän kylmämuokkaantumista toistuvassa taivutuksessa, mikä mahdollistaa miljoonat taivutussyklot.

Johtimet ovat kokonaan kaapelimateriaaliin suljettuna Flexx-Sil-kaapelissa toisin kuin PTFE kaapelissa, jossa irralliset johdot hiertävät toisiansa vasten, lisäten kitkaa ja kylmämuokkausta, mikä aiheuttaa lyhyemmän johdon käyttöiän. PTFE puristusliittimet lisäävät massaa, mikä taas lisää inerttia.

PTFE-kaapelin muotoilu on rajoitettu, koska johdot asetellaan PTFE-kotelon kouruihin. Flexx-Sil-pursotettua kaapelia voidaan valmistaa vaa-dittuun mittaan ja muotoon. Se mahdollistaa minkä tahansa profiilin tilantarpeen optimoimiseksi ja sitä voidaan valmistaa kaareviin ja ei-lineaarisiin muotoihin.

Tavallisen Flexx-Sil-kaapelin käyttölämpötila on taattu -65 – 260 Celsius-asteen alueella. Kaapeli tarvitsee erillisen validoinnin avaruuskäyttöön. Flexx-Sil-kaapelin lämpölaajentuminen on pieni verrattuna PTFE-kaapeliin. (Repas 2015)

Flexx-Sil on vesitiivis, sietää useimpia kemikaaleja, säilyttää toimintakykynsä vuosia voimakkaassa ultraviolettisäteilyssä, lähes vapaa epäpuh-tauksista, ei sisällä halogeeniä ja omaa vahvan molekyyllisidoksen, joka täyttää avaruuskäyttöön soveltuvan materiaalin kaasuntuumiselle asetet säädökset. (Cicoil Not your father's flat cable n.d.)

Lisäksi Flexx-Sil-kaapeleissa etuna on mahdollisuus yhdistellä eri johdin-kokoja ja -tyyppejä, putkia ja valokuituja rinnakkain.

6.5 Kaapelien liittimet ja kiinnikkeet

Kaapelit kiinnitetään runkoon ruuvattavilla metallisilla pidikkeillä. Pyöreiden kaapeleiden tapauksessa metallipidike on hattuprofiilinen. Lattakaapeleiden tapauksessa kyseessä on suora lista. Liittimien reunat on pyöris-tetty vaurioriskin vähentämiseksi.

Mittauslaitteiden ohjauskotelolta tulevat kaapelit, jotka menevät mas-toon, on massan kannalta edullista ryhmittää samaan kaapeliin ja isoon monipinniseen liittimeen. Isopinnisemmässä liittimessä on pinnien suh-teen vähemmän lukituksen mekanismille kuuluvaa massaa. Maston mit-tauslaitteille menevät kaapelit kulkevat samassa linjassa. Maston juurella jäykkärakenteinen kaapeli muutetaan nauhakaapeliksi.

6.6 Moottorit

Maston noston ei tarvitse tapahtua nopeasti. Moottoreissa painoa voidaan säästää mitoittamalla moottorit teholtansa hyvin pieniksi ja tuottamalla tarvittava momentti vaihteistolla.

Maston nostovaiheen turvaaminen vikatiloilta voidaan varmistaa jousiteulla tapilla, joka siirtyy hammasrattaassa aina seuraavaan loveen varmistuen, ettei masto pääse kaatumaan, mikäli moottorista katkeaa virta. Vaihtoehtoisesti moottorissa voidaan käyttää integroitua jarrua, joka kytkeytyy aina virran katketessa. Samanlaista pitojarrua voidaan käyttää kameraa kääntävissä moottoreissa. Vaakatasossa kääntävässä moottorissa sen merkitys ei ole niin suuri, kuin pystytasossa kääntävän moottorin kohdalla. Mikäli moottorilta katkaistaan virta energian säästämiseksi ja kamera ei ole tasapainossa nivelen tarjoaman tukipisteen päällä, se lähtee kääntymään.

6.7 Laakerit

Laakereissa käytetään pääosin neulalaakereita. Neulalaakereiden pienen halkaisijan vuoksi laakeroinnin sisä- ja ulkokotelon mitat ovat lähellä toisiaan. Mittojen ollessa pieniä ja lähellä toisiaan, lämpölaajenemisen aiheuttama mittojen välinen suhde pysyy lähes samana. Laakeroinnille suunnitellun välyksen on pysyttävä sallituissa rajoissa koko oletetun käyttölämpötilan alueella. Riskinä voi olla laakeroinnin hirttäytyminen tai so-viteosien irtoaminen.

Laakerointi on suojattu lialta tekemällä laakeriin suhteellisen ohut ja pitkällä jänneväliillä oleva metallieriste, joka painautuu laakerin koteloa vasten. Metallieristeen joustavuus takaa pienen kuormituksen moottorille. Metallieristeen jälkeen tulee labyrinttiin perustuva eristys, joka ei lisää moottorille ylimääräistä kuormitusta. Metallieristys estää ilmapvirtauksen, Marsin tapauksessa kaasuvirtauksen, jonka mukana yleensä hiekka kulkee laakereille. Labyrintti-eristyksen tarkoitus on estää sisälle mahdollisesti joutunutta hiekkaa valumasta laakerille.

Kameran horisontaalisen kääntymisen salliva laakerointi on toteutettu työstämällä laakerin uloimmainen pesä kameran jalkaan, joka kiinnittyy maston yläpäähän. Tällä tavalla rakenteesta saadaan kiinteämpi ja kevyempi, kun erillinen laakerin osa ja kiinnitys ovat tarpeettomia.

6.8 Ohjainpiirin kotelo

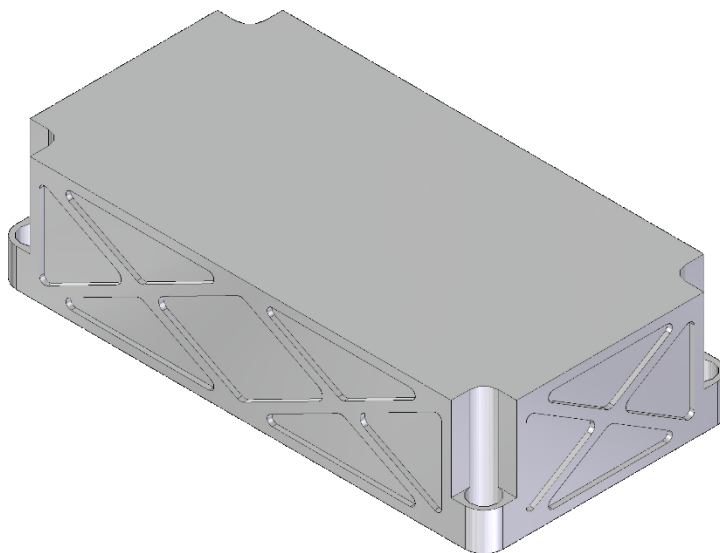
Mittauslaitteiden mittauslaitteiden ohjainpiirin koteloinnissa käytetään mallina aiemmin valmistettua koteloa painemittauslaitteelle. Painemittauslaitte tullaan integroimaan ohjainpiiriin. Painetta läpipäästävä putki tullaan lisäämään myös ohjainpiirin kotelointiin. Putki pyritään sijoitta-

maan kotelon lyhyemmän sivun reunaan, jotta putken massan aiheuttamat rasitukset olisivat lyhyellä jänneväliä kiinnityksiin. Siten kotelon rakenteessa vähennetään massan määrää, kun tukirakenteita tarvitaan vähemmän kuin putken sijaitessa keskellä koteloa.

Mikäli mittauslaitteita on tarve lisätä tai jättää pois riippuen tutkimuskohteesta, on mittauslaitteiden rakenteen suotavaa olla modulaarinen, jotta tarpeeton kotelointi ei lisää turhaa painoa. Toisaalta modulaarinen rakenne lisää kotelon massaa ja on lopulta painavampi kokonaisuudessaan kuin yhtenäinen kotelointi.

Tarkoitus on suunnitella virtuaalisesti kotelorakenne, jonka saa pienillä suunnittelun muutoksilla uuteen käyttöympäristöön soveltuvaksi. Avaruuskäytössä on suotavaa tavoitella pientä seinämävahvuutta, jotta rakenne olisi mahdollisimman kevyt.

Kuvassa 16 on esitetty avaruuskäyttöön soveltuva kotelorakenne. Kotelo on ohutseinämäinen rakenne, jossa on ristikkäiset tukirakenteet. Kotelo on valmistettu yhdestä kappaleesta. Seinämien tukirakenteet on työstetty sivulta päin ja kannen tukirakenne alhaaltapäin. Ruuvien ulkonevat kiinnityskannat sijaitsevat kotelon kulmissa ja ne on tuettu koteloon tukirakenteilla. Ruuvit on kiristettävä mittatarkasti käyttäen momenttiavaimia. Hienomekaaniset rakenteet on työstetty pienillä terillä, jotta reunojen pyöritykset olisivat mahdollisimman pieniä. Suuret reunapyöritykset eivät anna merkittävää tuentaa ja tuovat ylimääräistä massaa rakenteeseen.



Kuva 16. Ohjainpiirin kotelo

Vastaavasti Maassa käytettävässä kotelossa ei tarvitse rajoittaa massaa suunnittelemalla kotelorakenteelle hienomekaanisia rakenteita. Kotelon ulkokuoresta voidaan tehdä itsensä kantava rakenne kasvattamalla koteloinnin seinämän vahvuutta, jolloin ylimääräiset hienomekaaniset tukirakenteet voidaan jättää pois valmistuskustannuksien pienentämiseksi.

Samalla kotelon reunanpyörityksiä voidaan suurentaa, jotta kotelon koneistaminen onnistuisi isoimmilla terillä ja nopeammilla työstönopeuksilla. Valmistustoleranssien vaatimukset voidaan laskea koneistuksessa käytetyn yleisen ISO-toleranssin mukaan karkeaan toleranssirajaan.

6.9 Laitteiston massat ja tilavuudet

Tämän työn jatkosuunnittelun tavoitetiedot perustuvat edellisten avaruusluotainohjelmien laitteisiin. Konseptuaalisissa tapauksissa on käytetty vastaavanlaisten laitteiden lähtöarvoja ja suhteutettu ne uuden mittakaavan mukaan. Arvioinnissa otettiin huomioon laitteeseen mahdollisesti tehtävät avaruusohjelmakohtaiset muutokset ja kehitystyöt.

Laitteiston massataulukko on esitetty taulukossa 3. Laitteiston massa- ja mittamarginaaliprosentit määräytyvät seuraavasti: mikäli vertaislaite on olemassa, sille on asetettu 5 % marginaali. Jos laitetta on tarkoitus käyttää muutettuna, marginaali on 10 %. Uuden kehitetyn laitteen marginaali on 20 %, mikäli se on todennettu mekaanisella analyysillä, ilman analyysia 30 %. Marginaalien tarkoitus on ottaa huomioon epävarmuustekijät. Taulukoiden merkitys on ohjata yksittäisten laitteiden suunnittelua jo varhaisessa vaiheessa varmistamalla, että kokonaisuus pysyy samassa mittasuhteessa.

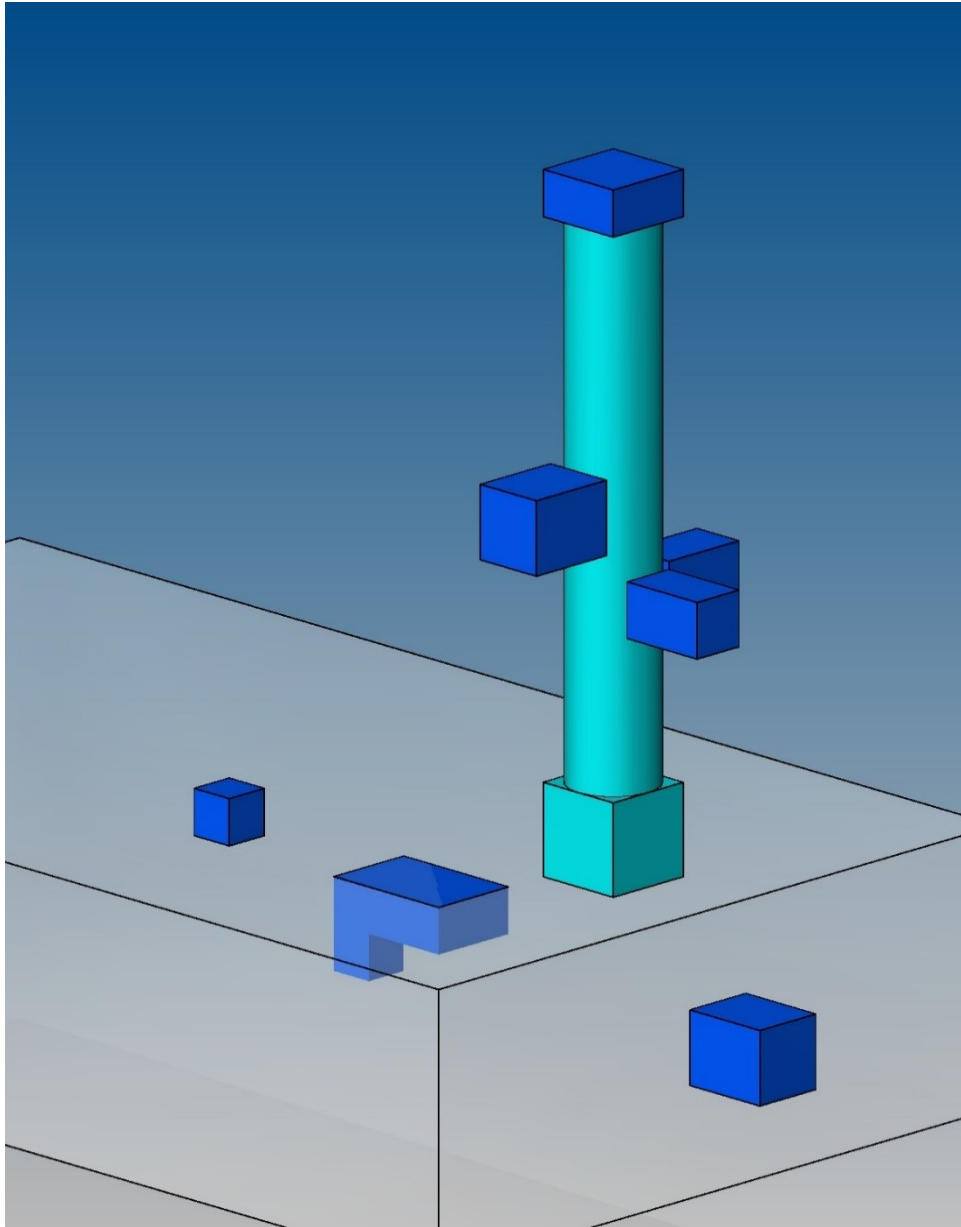
Taulukko 3. Laitteiston massataulukko

Kohde	Massa (g)	Marginaali (%)	Massa (g) pienin	Massa (g) Suurin
Kosteus	45	± 20	36	54
Ohjainpiiri Paine Kiihtyvyys	160	± 30	112	208
SIS (OH+PE)	77	± 20	62	92
Kamera	600	± 20	480	720
Tuuli 1	140	± 10	126	154
Tuuli 2	140	± 10	126	154
Lämpö 1	60	± 30	42	78
Lämpö 2	60	± 30	42	78
Masto	300	± 30	210	390
Kaapelit ja liittimet	110	± 30	77	143
Yhteensä	1692		1314	2071

Taulukossa 4 on esitetty laitteiston äärimittoihin perustuva tilanvaraus-taulukko ja vastaavasti niiden perusteella on luotu esimerkkirakenneteeeseen not to exceed eli NTE-kuva, joka on havainnollistettu kuvassa 17.

Taulukko 4. Laitteiston tilanvarauksen äärimitat

Laite	Mitat. Pituus Leveys Korkeus (mm)
Kosteus	60 x 30 x 80
Ohjainpiiri, Paine, Kiihtyvyys	150 x 100 x 50
SIS optinen pää	45 x 35 x 25
SIS elektroniikkayksikkö	80 x 50 x 15
Kamera	100 x 100 x 50
Tuuli	50 x 50 x 200
Lämpö 1	100 x 70 x 70
Lämpö 2	100 x 70 x 70
Masto ja kiinnityskanta	100 x 100 x 600



Kuva 17. Not to exceed eli NTE-kuva esimerkkilaskeutujassa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Suunnittelutyö perustuu valtaosin tulkintaan ja loogiseen päättelyyn. Kaikessa mittauslaitepaketin suunnitteluun liittyvissä asioissa on myös tutkittu aiemmin käytettyjä vertailuun sopivia samankaltaisia laitteita. Niistä on julkaistu suunnittelua ja kehitystyötä koskevia tutkimuksia ja valokuvia. Tutkimustiedotteita on käytetty tukemassa laitteiden rakenteiden viisuaalisen tulkinnan johtopäätöksiä.

Suunnittelun lähtökohta ei ollut tuottaa lopullista täysin perusteltua ratkaisua. Tarkoituksena oli löytää oikeanlainen lähtökohta perustellulle suunnittelulle. Työssä on onnistuttu löytämään tähän mittauslaitepakettiin sopivat toteutustavat, joiden avulla voidaan valmistaa toiminnallinen prototyyppi. Jatkossa rakenteellinen toteutustapa on tarpeellista mitoitaa käyttötarkoitukseensa laskennallisesti, jotta massa voidaan pitää mahdollisimman pienenä. Tämän jälkeen voidaan aloittaa käytännön rasi-tustestit. Ne ovat kalliimpia kuin matemaattiset menetelmät, mutta niillä voidaan varmistaa matemaattisen perustelun paikkansapitävyys.

NASA on tehnyt laakeroinnin voiteluaineille soveltuvuustutkimuksia avaruuskäyttöön, mutta ajanpuutteen vuoksi tietoa ei ole ehditty soveltaa mittalaitepaketin laakerointiin. Lisäksi ei tiedetä, sopiiko tietyn tyyppinen avaruuskäyttöön hyväksytty voiteluaine kaikkiin laakerityyppeihin. Mahdollisesti tyhjiö tai matalapaine aiheuttaa voiteluaineen kaasuuntumisen.

Mittalaitepaketin liikkuvissa osissa ei ole ehditty tarkastelemaan kylmähitsautumisen todennäköisyyttä tai sen estämisen tapoja. Todennäköisesti riski on suurin usein liikuteltavissa rakenteissa kuten kameran laakeroinnissa. Mahdollisesti maston pystyyn nostavalla laakeroinnilla ei ole vaaraa kylmähitsaantua, sillä liike toteutetaan vain kerran. Jos kameraa ei liikuteta avaruudessa kuljetuksen aikana, maassa muodostunut suojakerros pysyy ehjänä Marsin ympäristöön asti. Vielä ei tiedetä onko Marsin kaasukehä riittävä luomaan uuden suojakerroksen liikkuvien mekanismien pinnoille.

Kaapeloinnissa on tarpeellista selvittää signaalien ylikuulumisen voimakkuus ja onko siitä johtuva häiriö merkittävä laitteiston toiminnalle. Oikeanlaisella kaapelityypin valinnalla voidaan vähentää ylikuulumisen voimakkuutta.

Vaikka tieto tulisi luotettavasta lähteestä, siinä saatetaan korostaa tiettyjä asioita tai jättää kertomatta jotain olennaista. Tällainen tieto on jaettu ehkä edistämään tuotteen markkinointia, mutta se saattaa antaa väärän käsityksen tuotteen soveltuvuudesta tarkoitukseen. Jotta saatu tieto olisi

luotettavaa, oikeellista ja oikein ymmärrettyä, sama tieto on haettava useammasta lähteestä ja vertailtava lähteiden antamia tietoja keskenään. Lähteiden todenperäisyyttä on käyty läpi selvittämällä, mikä on lähdetiedon tarkoituserä ja miksi se on tehty. Useammasta lähteestä saatua tietoa on vertailtu ja yhdistelty samaan aiheeseen liittyviä tietoja, ja tältä pohjalta on tultu lopulliseen päätökseen.

Pääasiallinen lämpöpareja koskeva tietolähde on Marlin Manufacturing Corporation kurssimateriaali, joka käsittelee lämpöparin perusteita. Marlin valmistaa lämpötilamittalaitteita tutkimukseen ja teolliseen käyttöön. Lähdetiedosto käsittelee perusteellisesti muun muassa lämpöparien teoriaa, työhjeistuksia, käyttökohteita, standardin luokittelua ja nimettömien lämpöparien tunnistusta. Todennäköisesti tietolähteessä ei ole esitetty asioita siten, että se olisi Marlin yhtiön eduksi, koska tietolähde ei ole tarkoitettu markkinointiin eikä se myöskään sisältänyt sitä. Kurssimateriaalille on esitetty ainoastaan yksi tekijä. Mikäli kurssimateriaalia tehdessä on sattunut inhimillinen virhe, on todennäköisempää, että se on jäänyt huomaamatta ja sen vuoksi sitä ei ole korjattu. Kurssimateriaaliin on merkitty oma lähdemerkintä. Tiedon paikkansapitävyyttä on asiakohtaisesti vertailtu muihin lähteisiin.

Aerospace Mechanisms Symposium (AMS) Past papers on perustettu kansainvälisten asiantuntijoiden tiedonjakoon. Tavoitteena on yhteisesti kehittää osaamista vaativissa suunnittelutehtävissä. Tieto on tarkistettua ja luotettavasti paikkansapitävää.

Lattakaapeleiden soveltuvuusvertailu perustuu pääosin Cicoililta saatuun tietoon. Kyseiset lähteet esittävät Cicoilin lattakaapelin etuja muihin lattakaapelityyppeihin verrattuna. Voidaan olettaa, että kyseiset tiedot on kerrottu valikoidusti siten, että ne ovat Cicoilin eduksi. Cicoilin lattakaapelin valmistus on patentoitu menetelmä ja kyseistä lattakaapelityyppiä ei saa toiselta valmistajalta. Lisäksi NASA on käyttänyt Cicoilin mittatilauskaapeleita sen Mars-laskeutujassaan. Syynä tähän voi kuitenkin olla myös se, ettei NASA osta Yhdysvaltojen (USA:n) ulkopuolelta ja Cicoil on amerikkalainen yhtiö.

LÄHTEET

3rd International Workshop on Instrumentation for Planetary Missions (2016). Universities Space Research Association USRA, Houston. Haettu 24.02.2017 osoitteesta

<http://www.hou.usra.edu/meetings/ipm2016/pdf/4114.pdf>

Arianespace, Edouard Perez (2012). Soyuz at the Guiana Space Centre User's Manual Issue 2 – Revision 0. Sojuz käsikirja, Arianespace. Haettu 24.03.2017 osoitteesta

<http://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2015/09/Soyuz-Users-Manual-March-2012.pdf>

Binet G., Freire M., Eesbeek M. V., Daly E., Drolshagen G., Henriksen T., Thirkettle A., Poinas P., Eiden M. (2006). Space specifications checklist, Innovation Triangle Initiative. European Space Agency. Haettu 04.04.2017 osoitteesta

https://iti.esa.int/iti/resource/Space_Specifications_Checklist.doc

Cicoil (2017). Not your father's flat cable, Cicoil. Haettu 15.04.2017 osoitteesta

https://www.cicoil.com/images/pdf/product-literature/Not_Your_Fathers_Flat_Cable-White_Paper-Cicoil.pdf

Cicoil, FFC overview (2016). Flexible Flat Cables capabilities overview, Cicoil. Haettu 15.04.2016 osoitteesta

https://www.cicoil.com/images/pdf/product-literature/Cicoil-Product-Overview-12-6-16_web.pdf

Duff M., Towey J. (2010). Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples Feature Simplicity, Accuracy, and Flexibility. Haettu 13.03.2017 osoitteesta

<http://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-44/number-4/articles/measuring-temp-using-thermocouples.pdf>

Dupont, general specifications (2017). Dupont™ Kapton® polyimide film general specifications, Dupont. Haettu 16.04.2017 osoitteesta

<http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-general-specs.pdf>

Dupont, summary of properties (2017). Dupont™ Kapton® summary of properties, Dupont. Haettu 16.04.2017 osoitteesta

<http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf>

ESA, Delta Mission (2004). Soyuz launch vehicle: The most reliable means of space travel, ESA. Haettu 18.04.2017 osoitteesta http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Delta_Mission/Soyuz_launch_vehicle_The_most_reliable_means_of_space_travel

European Planetary Science Congress, EPSC (2015). Solar Irradiance Sensor on the ExoMars 2016 Lander. Haettu 08.02.2017 osoitteesta <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2015/EPSC2015-850.pdf>

Fletcher K. (2009). Assessment of cold welding between separable contact surfaces due to impact and fretting under vacuum, ESA STM-279. ESA Communication Production Office, European Space Agency. Haettu 19.04.2017 osoitteesta http://esmat.esa.int/Publications/Published_papers/STM-279.pdf

Fortescue P., Stark J., Swinerd G. (2009). Spacecraft systems engineering, 3. versio. Wiley.

Gómez-Elvira J., Armiens C., Castañer L., Domínguez M., Genzer M., Gómez F., Haberle R., Harri A. -M., Jiménez V., Kahanpää H., Kowalski L., Lepinette A., Martín J., Martínez-Frías J., McEwan I., Mora L., Moreno J., Navarro S., dePablo M. A., Peinado V., Peña A., Polkko J., Ramos M., Renno N. O., Ricart J., Richardson M., Rodríguez-Manfredi J., Romeral J., Sebastián E., Serrano J., delaTorreJuárez M., Torres J., Torrero F., Urquí R., Vázquez L., Velasco T., Verdasca J., Zorzano M. -P., Martín-Torres J. (2012). REMS: The Environmental Sensor Suite for the Mars Science Laboratory Rover. Centro de Astrobiología, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Haettu 24.02.2017 osoitteesta <http://cab.inta-csic.es/remis/wp-content/uploads/2013/04/REMS.-Space-Science-Reviews-2012.pdf>

Haberle R. M. (n.d.). Planetary atmospheres / Mars. R M Haberle, NASA/Ames Research Center, Moffett Field, CA, USA. Haettu 04.04.2017 osoitteesta http://curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter12/Ency_Atmos/Planetary_Atmos_%20Mars.pdf

Haberle R. M., McKay C. P., Schaeffer J., Cabrol N. A., Grin E. A., Zent A. P., Quinn R. (2001). On the possibility of liquid water on present day Mars. Journal of geophysical research, vol. 106 nr. E10, s. 23317-23326. Haettu 04.04.2017 osoitteesta https://www.researchgate.net/profile/Nathalie_Cabrol/publication/233823532_On_the_Possibility_of_Liquid_Water_on_Present_Day_Mars/links/0f3175362f6bcc746000000/On-the-Possibility-of-Liquid-Water-on-Present-Day-Mars.pdf

Harness Requirement Specification (2012). Electronic Mailing Invitation to Tender System, EMITS. Haettu 20.02.2017 osoitteesta http://emits.sso.esa.int/emits-doc/ASTRIUMLIM/S5P_Harness/S5P.SP.ASU.SC.00039_ISS1_Harness_Requirement_Specification.pdf

Haukka H. (n.d.). Vaisalan Barocap-paineanturikuva, Ilmatieteen laitos.

Imgur (n.d.). MEMS-kiihtyvyyssanturi elektronimikroskooppikuvassa. Haettu 15.03.2017 osoitteesta <https://i.stack.imgur.com/Q841y.jpg>

NASA/JPL-Caltech (n.d.) Kaukohavannointimaston kuva MSL-robotissa.

National Instruments (2011). Temperature Measurements with Thermocouples: How-To Guide. National Instruments. Haettu 17.02.2017 osoitteesta https://s3.amazonaws.com/files.technologyreview.com/p/pub/legacy/temperature_measurements_with_thermocouples.pdf

Näsilä A. (2013). Validation of Aalto-1 Spectral Imager Technology to Space Environment. Opinnäytetyö. Koulutusohjelma. Aalto-yliopisto, Espoo. Haettu 07.02.2017 osoitteesta https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/10451/master_N%C3%A4sil%C3%A4_Antti_2013.pdf?sequence=1

Park R. M. (n.d.). Thermocouple fundamentals, Marlin kurssimateriaali. Marlin Manufacturing Corporation. Cleveland, Ohio, U.S.A. Haettu 15.03.2017 osoitteesta <http://www.advindsys.com/ApNotes/tcfundamentals.pdf>

Repas R. (2015). Designing with Flexible Flat Cable, Digi-Key Electronics. Haettu 02.04.2017 osoitteesta <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2015/may/designing-with-flexible-flat-cable>

Sokol J., Krishnan S. and Ayari L. (n.d.). High Gain Antenna Gimbal for the 2003-2004 Mars Exploration Rover Program, The Aerospace Mechanisms Symposium: past papers. European Space Mechanisms and Tribology Symposium. Haettu 06.02.2017 osoitteesta <http://esmats.eu/amspapers/pastpapers/pdfs/2004/sokol.pdf>

Spacecraft: Surface Operations: Rover, The rover's "neck and head". (n.d.) The National Aeronautics and Space Administration, NASA. Haettu 07.05.2017 osoitteesta https://mars.nasa.gov/mer/mission/spacecraft_rover_neck.html

Vaisala (2012). Vaisala HUMICAP® Sensor for Measuring Relative Humidity. Haettu 07.04.2017 osoitteesta

<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Technology%20Descriptions/HUMICAP-Technology-description-B210781EN-C.pdf>

Warden R. M., Cross M., Harvison D. (2004). Pancam Mast Assembly on Mars Rover. The Aerospace Mechanisms Symposium: past papers. European Space Mechanisms and Tribology Symposium. Haettu 06.02.2017 osoitteesta

<http://esматы.eu/amspapers/pastpapers/pdfs/2004/warden.pdf>

Wiens R. C., Los Alamos National Laboratory. Maurice S., CESR, Ranska. Chemistry & Camera (ChemCam). Haettu 02.05.2017 osoitteesta

<https://msl-scicorner.jpl.nasa.gov/Instruments/ChemCam/>

MITTALAITTEIDEN SIGNAALITAUUKOT

Taulukko 5. Kiihtyvyyssanturin komponentin pinnijärjestys

	Signaali	Tyyppi	Kuvaus
1	AVSS	GND	Analoginen referenssimadoitus, yhdistä ulkoisesti AVSS
2	A_EXTC	AOUT	Ulkoisen kondensaattorin liitäntä positiiviselle referenssijännitteelle
3	RESERVED	-	Tehdaskäyttö ainoastaan, jätä liittämättä tai liitä maadoitukseen
4	VDD	SUPPLY	Analoginen virtalähde
5	CSB	DIN	Komponentin SPI-rajapinnan valinta, 3.3v logiikka kelvollinen Schmitt-liipaisusignaali
6	MISO	DOUT	Datan ulostulo SPI-rajapinnasta
7	MOSI	DIN	Data-sisääntulo SPI-rajapinnasta, 3.3V logiikka kelvollinen Schmitt-liipaisusignaali
8	SCK	DIN	SPI-rajapinnan CLK-signaali
9	DVIO	SUPPLY	SPI-rajapinta Jännitelähde
10	D_EXTC	AOUT	Ulkoisen kondensaattorin liitäntä digitaaliliitytimelle
11	DVSS	GND	Digitaalisen syötön paluu, yhdistä ulkoisesti maadoitukseen
12	EMC_GND	EMC GND	EMC-madoituspinni, ydistä ulkoisesti AVSS

Taulukko 6. Hyperspektrisen kameran rajapinta

	Signaali	Tyyppi	Kuvaus
1	SCK	SPI	Kellosignaali
2	MOSI	SPI	Isäntä ulos, orja sisään
3	MISO	SPI	Isäntä sisään, orja ulos
4	SS	SPI	Valintesignaali
5	+ 5V	Jännitelähde	Tasavirta
6	AGND	Maadoitus	Analoginen
7	DGND	Maadoitus	Digitaalinen

MITTALAITTEIDEN SIGNAALITAUUKOT

Taulukko 7. Painemittalaitteen rajapinta

	Signaali	Tyyppi	Kuvaus
1	+5V	Jännitelähde	Tasavirta, digitaalinen
2	+12V	Jännitelähde	Tasavirta, analoginen
3	+RXD_H&P	RS422	Sisääntulo
4	-RXD_H&P	RS422	Sisääntulo
5	GND	Maadoitus	Elektroniikka
6	AGND	Maadoitus	Laitteen rungolle
7	+TXD_H&P	RS422	Ulostulo
8	-TXD_H&P	RS422	Ulostulo

Taulukko 8. Kosteusmittalaitteen rajapinta

	Nimi	Tyyppi	Kuvaus
1	Power_H	+5V	Jännitelähde
2	H_HTR_in1	+12V PWM	Jännitelähde
3	H_HTR_RT1	Maadoitus	
4	Freq_H_out		
5	PT1000_1+		
6	PT1000_COMMON		
7	PT1000_SUPPLY+		
8	AGND		
9	H_HTR_in2		
10	H_HTR_RT2		
11	Reset_H		
12	Step_H		
13	PT1000_2-		
14	PT1000_SUPPLY-		

Taulukko 9. Auringon säteilyvoimakkuuden mittauslaitteen rajapinta

	Nimi	Tyyppi	Kuvaus
1	+ 5V	Jännitelähde	Tasavirta
2	GND	Maadoitus	Elektroniikka
3	RX+	RS422	Sisääntulo
4	RX-	RS422	Sisääntulo
5	TX-	RS422	Ulostulo
6	TX+	RS422	Ulostulo

MITTALAITTEIDEN SIGNAALITAUUKOT

Taulukko 10. Tuulenmittauslaitteen rajapinta

	Nimi	Tyyppi	Kuvaus
1	GND	Maadoitus	
2	+0-5V	Tasajännite	Mittaussignaali
3	+0-5V	Tasajännite	Mittaussignaali
4	+0-5V	Tasajännite	Mittaussignaali
5	+0-5V	Tasajännite	Mittaussignaali
6	+ 5V	Jännitelähde	

Taulukko 11. Mittalaitteepaketin rajapinta Mars-laskeutujan

	Nimi	Tyyppi	Kuvaus
1	+5V	Jännitelähde	Tasavirta
2	+12V	Jännitelähde	Tasavirta
3	+RX	RS422	Sisääntulo
4	-RX	RS422	Sisääntulo
5	GND	Maadoitus	Elektroniikka
6	AGND	Maadoitus	Laitteiston rungolle
7	+TX	RS422	Ulostulo
8	-TX	RS422	Ulostulo