

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

TUKES14

2018

Juha-Matti Pettinen

# MOBIILIROBOTIN VETOKYVYN TESTAUS JA OPTIMOINTI

Juha-Matti Pettinen

# MOBIILIROBOTIN VETOKYVYN TESTAUS JA OPTIMOINTI

Tämä opinnäytetyö käsittelee VMP Interiorin NEROBOT-mobiilirobottia ja sen prototyyppiasteella olevaa tarttujaa. NEROBOT on pienehkö itsenäisesti työskentelevä kuljetinrobotti, jonka tarkoituksena on vapauttaa henkilöstövoimaa yksinkertaisista kuljetustehtävistä tärkeämpiin tehtäviin.

Työn painopiste on mobiilirobotin vetokyvyn mittaamisessa, mutta samalla käsitellään myös kyseisen mobiilirobotin ja tarttujan runkojen soveltuvuutta tavoiteltavan maksimikuormituksen kuljettamiseen. Työssä käydään myös läpi yleisesti vihurivaunujen ja mittauksessa käytetyn voima-anturin tekniikkaa ja miten autonominen mobiilirobotti eroaa perinteisestä vihurivaunusta.

Vetokykyä testataan tasaisella alustalla kuormitusta asteittain lisäämällä niin pitkälle, että vetävien pyörien pito loppuu. Mittaus tehdään simuloimalla mobiilirobotille suunnitteilla olevaa laitehyllyä haarukkavaunulla. Mobiilirobotin tulee kyetä liikkumaan myös muualla kuin pelkästään täysin tasaisella alustalla, joten myöskin teoreettinen vetokyky nykysuositusten mukaisella luiskalla lasketaan.

Lopuksi käsitellään yksinkertaisia parannusideoita vetokyvyn kasvattamiseksi, kuten parantamalla mobiilirobotin rengastusta ja lisäämällä mobiilirobotin omapainoa. Samalla pohditaan myös näiden ideoiden soveltuvuutta käytäntöön.

## ASIASANAT:

Mobiilirobotti, vetokyky, NEROBOT

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Production Engineering

2018 | 29 pages

Juha-Matti Pettinen

# TOW CAPACITY TESTING AND OPTIMIZATION OF A MOBILE ROBOT

This thesis discusses VMP Interior's NEROBOT-mobile robot and a prototype gripping device for it. NEROBOT is a small autonomously working carrier robot which aims to release human resources from simple transport tasks to more demanding and important work.

The objective of this thesis was to measure the towing capacity of this mobile robot. The structures of the mobile robot and gripping device were also briefly studied to be sure that they are suitable for targeted workloads. This thesis also discusses briefly about automated guided vehicles in general and force sensor technology that was used in the tests. The differences of automated guided vehicles and autonomous mobile robots was discussed as well.

The towing capacity was tested on a flat surface and the load was added gradually to the robot so long that the tires of the robot were slipping. Because a towing cart for the robot was not available at the time of testing it was simulated with a hand pallet truck. The mobile robot must also be able to move beyond a perfect flat surface, so the theoretical towing capacity on a slope was calculated.

Lastly the topic of some simple improvement ideas for how to increase the towing capacity of the mobile robot was discussed, including better tires and increasing mobile robot's weight and how to implement those ideas in real life and in what kinds of situations they are best suited for.

## KEYWORDS:

Mobile robot, towing capacity, NEROBOT

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO</b>	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 AGV (AUTOMATED GUIDED VEHICLE)</b>	<b>8</b>
<b>3 AMR (AUTONOMOUS MOBILE ROBOT)</b>	<b>11</b>
<b>4 MOBIILIROBOTIN JA TARTTUJAN RUNKORAKENNE</b>	<b>13</b>
<b>5 VOIMA-ANTURI</b>	<b>14</b>
5.1 Sähköiset voima-anturi tyypit	14
5.1.1 Puristus painike voima-anturi.	14
5.1.2 Puristus / veto voima-anturi	15
5.1.3 S-tyypin voima-anturi	15
5.1.4 Taivutuspalkki voima-anturi	15
5.1.5 Alusta- ja yksipiste voima-anturi	15
5.1.6 Kanisteri voima-anturi	16
5.1.7 Matalaprofiili voima-anturi	16
<b>6 MITTAUS</b>	<b>17</b>
6.1 Mittalaitteisto ja kalibrointi	17
6.2 Vetotesti	19
6.3 Kalteva taso	21
<b>7 VETOKYVYN PARANTAMINEN</b>	<b>23</b>
7.1 Lisäpainot	23
7.2 Rengastus	25
<b>8 LOPPUTULOKSET JA PÄÄTELMÄT</b>	<b>27</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>28</b>

## KUVAT

Kuva 1. Rocla ATX12 (Forkliftaction 2018)	8
Kuva 2. MiR200 Mobiilirobotti (Mobile Industrial Robots 2018b)	11
Kuva 3. Vishay S-tyyppin anturi (demmachines 2018)	17
Kuva 4. Excel-laskuri staattiseen tarkasteluun	22
Kuva 5. 3D-malli etummaisesta lisäpainosta	24

## KUVIOT

Kuvio 1. Anturin kulmakertoimen mittaus	19
Kuvio 2. Simuloitu vetotesti	20

## TAULUKOT

Taulukko 1. Tarkkuusvaa`lla saadut tulokset	18
Taulukko 2. Anturin mittaus	18
Taulukko 3. Lisäpainojen laskeminen ja vertailu	25

## KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

AGV	Automated Guided Vehicle eli automaattitrucki
AMR	Autonomous Mobile Robot eli autonominen mobiilirobotti
ERP	Toiminnanohjausjärjestelmä
MES	Tuotannonohjausjärjestelmä
OPC	Open Platform communications eli avoimen tiedonsiirron standardi teollisuuden automaatio-sovelluksissa.
ESD	<i>Electrostatic discharge</i> eli sähköstaattinen purkaus
Load cell	Punnituskenno
k	Kulmakerroin
$\Delta_y$	Anturin mitta-arvojen muutos
$\Delta_x$	Painon muutos
$\mu$	Kitkakerroin
F	Voima
m	Massa
g	Painovoima
$m/s^2$	Kappaleen kiihtyvyys
$m^2$	Neliometri
$m^3$	Kuutiometri

# 1 JOHDANTO

Autonomisia robotteja on käytetty varastoissa ja suljetuissa tiloissa jo suhteellisen pitkään, mutta ihmisten seassa vapaasti kulkevat apurobotit ovat vasta tulossa suosioon. Ihmisten seassa kulkevilla roboteilla pyritään nostamaan tuottavuutta eri aloilla niin, että ihmisen ei tarvitse enää suorittaa yksinkertaisia, toistuvia ja aikaa vieviä työtehtäviä. Myös vaaralliset ja fyysisesti rasittavat työtehtävät voidaan siirtää ihmiseltä robotille.

Tämän opinnäytetyön kohteena on VMP Interiorin pienehkö ihmisten seassa autonomisesti kulkeva NEROBOT-mobiilirobotti. Tämän mobiilirobotin on tarkoitus suorittaa erilaisia logistisia tehtäviä itsenäisesti esimerkiksi sairaalaympäristössä. Tutkittavana aiheena on sen vetokyky uuden prototyypin tarttujan kanssa. Vetokykyyden vaikuttavia tekijöitä on useita, kuten rakenteissa käytetyt materiaalit ja niiden ainevahvuudet. Vetävän laitteen omapaino, rengasmateriaalit ja käytössä oleva ajoalusta vaikuttavat myös todella paljon vetokykyyden.

Tavoitteeksi NEROBOT-mobiilirobotille ja sen uudelle prototyypin tarttujalle annettiin rengastettu laitehylly, joka tulisi painamaan kuormattuna noin 200 kg. Mobiilirobotin tulisi kyetä siirtämään sitä helposti ja turvallisesti. Työympäristöksi sille on määrätty sairaalatilat, joten ajoalusta on oletettu pinnaltaan puhtaaksi ja liukumattomaksi.

Valmistaja lupaa tarttujan kestävän 150 kg:n suoran vedon, joten oletuksena sen pitäisi kestää tavoitteeksi asetettu kuorma helposti, sillä laitehyllyn rengastus omaa todella hyvän laakeroinnin ja tätä kautta laitehyllyn liikkeelle saamiseksi vaadittava vaakasuoraan vaikuttava voima pienenee huomattavasti. Mobiilirobotin ja tarttujan runkorakennetta tarkasteltiin kuitenkin alkuun silmämääräisesti, jotta nähtäisiin mahdolliset ongelmakohdat.

Vetokykyä mitattiin yksinkertaisella tavalla käyttäen mobiilirobotin ja vedettävän kuorman välissä voima-anturia. Kuorman määrää lisättiin asteittain, kunnes mobiilirobotin renkaiden ja ajoalustan välinen kitka ylittyisi ja tätä kautta selviäisi todellinen vetokyvyn raja.

## 2 AGV (AUTOMATED GUIDED VEHICLE)

AGV (Automated Guided Vehicle) tunnetaan Suomessa paremmin nimellä vihivaunu. Vihivaunulla tarkoitetaan trukkia eli haarukkavaunua, joka kykenee ohjaamaan itseään ilman kuljettajaa ja suorittaa yleensä yksinkertaisia kuljetustehtäviä varastoissa ja tuotantotiloissa. Tällaisia trukkeja on valmistettu Suomessakin jo ainakin vuodesta 1983 lähtien ja nykyään valmistajia on maailmanlaajuisesti useampia. Vihivaunuja voi olla tuotantotiloissa samanaikaisesti useampi, riippuen tuotannon suuruudesta ja automaattisen logistiikan tarpeesta. (Rocla 2018a)

Vihivaunuja on kaiken kokoisia ja niille on saatavilla erilaisia nostimia aina kuvan 1 mukaisesta normaalimmin tunnetusta matalasta haarukkatyypistä, yli 10 metrin nostokorkeuteen kykeneviin teleskooppihaarukoihin. Paperiteollisuutta varten on olemassa myös erilaisia tarttuvia ja nostimia, joilla pystytään siirtämään jopa 6000 kg painavia rullia. Nykyään valmistetaan myös sarjatuotantona modulaarisia trukkeja, joihin nostin tai tarttuja voidaan vaihtaa tarpeen mukaan. (Rocla 2018b)



Kuva 1. Rocla ATX12 (Forkliftaction 2018)



Käyttövoimansa vihivaunut saavat niihin asennetuista akuista eli ne ovat sähkökäyttöisiä. Akkuvaihtoehtoja on useampia ja ne vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Lyijy-akku on yleisimmin käytetty akkutyyppi ja sillä on paras hinta-laatusuhde. NiCad-akut voidaan ladata nopeammin, mutta ovat herkkiä ympäristön suhteen. Vihivaunu voidaan ladata manuaalisesti tai ohjelmoida se menemään latausasemalle automaattisesti, kun akunvaraus on alittanut tietyn pisteen tai työsyklissä on sopiva aikaväli akkujen lataamiselle. Vihivaunuun on myös mahdollista vaihtaa akut. Tämä voidaan suorittaa manuaalisesti tai automatisoidusti. Automatisoidussa järjestelmässä vihivaunu ajetaan asemalle, jossa sen akku irrotetaan ja tilalle asennetaan täyteen ladattu akku. Tyhjentyneet akut asennetaan latausjärjestelmään, josta se voidaan asentaa ladattuna taas seuraavaan vihivaunuun. Akkuja on siis latausjärjestelmässä useampi, jotta vihivaunuun saadaan välittömästi asennettua aina täysin ladattu akku. Tämä mahdollistaa sen, että vihivaunu ei ole toimeettomana kuin korkeintaan muutaman minuutin ja työsykliin ei tule pitkiä katkoja. (Rocla 2018c)

Vihivaunu navigoi yleensä laserskannauksen, lattiaan asennettujen magneettisten pisteiden tai johdotuksen avulla. Näitä voidaan myös yhdistää, jotta voidaan varmistua tarkasta ja keskeytymättömästä navigoinnista. Laserskannauksessa vihivaunu lähettää lasersäteitä ympäristöön ja skannaa ympäristöstä takaisin heijastuvat säteet. Näistä takaisinheijastumista vihivaunu laskee trigonometrian avulla sijaintinsa suhteessa ympärillä oleviin pintoihin. Tällä menetelmällä lattiaan ei tarvitse erikseen asentaa mitään, vaan tuotanto voidaan aloittaa välittömästi, kun ajoreitit on ohjelmoitu. Se on myös luotettava menetelmä ja suhteellisen joustava, sillä ajoreitit voidaan päivittää hetkessä ohjelmiston avulla. Sillä saavutetaan myös suurimmat ajoneuvonopeudet. Lattiaan asennettavat magneettiset pisteet ovat modernein menetelmä ja niiden avulla on myös suhteellisen helppoa päivittää ajoreitit. Tätä menetelmää tosin suositellaan vain laserskannauksen avuksi, jos jostain syystä pelkkä laserskannaus ei ole mahdollista. Lattiaan asennettava johdin on näistä menetelmistä vanhin ja sitä pyritäänkin välttämään, sillä se vaatii ylimääräisen asennustyön ennen kuin tuotanto voidaan aloittaa. Sillä ei myöskään voida päivittää ajoreittejä ilman lattian uudelleen työstöä. Tätä kuitenkin käytetään vielä useissa vanhoissa järjestelmissä. (Rocla 2018d)

Vihivaunujen ohjaus tapahtuu tietokoneohjauksella. Järjestelmään kuuluu yleensä keskustietokone, johon ajoreitit, kartat ja työtehtävät päivitetään sisäisen verkon välityksellä erillisellä verkkopohjaisella graafisella käyttöliittymällä. Keskustietokone on yhteydessä ERP ja MES järjestelmien kanssa, jolloin tuotanto on täysin hallittavissa. Vihivaunut

vastaanottavat työtehtävät ja ajoreitit langattomasti keskustietokoneelta OPC serverin välityksellä. Vihivaunujen sijainti ja työtehtävät ovat reaaliaikaisesti seurattavissa näiden avulla. (Rocla 2018e)

### 3 AMR (AUTONOMOUS MOBILE ROBOT)

AMR (Autonomous Mobile Robot) eli autonominen mobiilirobotti on uudenlainen vaihtoehto perinteiselle vihivaunulle. Autonominen mobiilirobotti, kuten kuvan 2 mukainen MiR200 eroaa perinteisestä vihivaunusta lähinnä sen kyvyllä reagoida ympäristöönsä. Perinteiset vihivaunut kulkevat yleensä vain täsmällisesti esiannettua reittiä pitkin ja esteen tullessa pysähtyvät. Autonominen mobiilirobotti taas kykenee laskemaan uuden vaihtoehtoisen reitin ja käyttämään sitä, jos sen reitille ilmestyy jokin este. Tällaiset mobiilirobotit ovat siis huomattavasti joustavampia ympäristön suhteen. (Mobile Industrial Robots 2018a)



Kuva 2. MiR200 Mobiilirobotti (Mobile Industrial Robots 2018b)

Mobiilirobotit ovat tekniikaltaan edistyneempiä, mutta silti niiden aloituskustannukset ovat yleensä pienempiä ja takaisinmaksu aika lyhyempi, koska ne eivät vaadi tuotantotilojen muokkauksia. Tämän ansiosta ne soveltuvatkin paremmin myös pieniin ja jatkuvasti muuttuviin tuotantotiloihin. Ne kykenevät myös skannaamaan ympäristöään reaaliajassa ja tämän avulla uuteen ympäristöön ja tehtäviin siirtyminen on nopeaa. Tehtävät

voidaan manuaalisesti määrittää robottikohtaisesti, jolloin yksittäinen robotti tekee sille määrätyt työt järjestyksessä. Useamman mobiilirobotin ollessa samassa tilassa, voidaan myös ohjelmiston avulla määrittää ne toimimaan niin sanotussa laivuetilassa, jossa automaattisesti ohjelmisto valitsee käynnissä olevaan tehtävään parhaiten soveltuvan vapaana olevan mobiilirobotin sen sijainnin perusteella. (Mobile Industrial Robots 2018c)

## 4 MOBIILIROBOTIN JA TARTTUJAN RUNKORAKENNE

Esitutkimuksen aikana selvitettiin olisiko mobiilirobotin tai tarttujan runkorakenteessa ongelmia, jotka estäisivät halutun tavoite kuorman siirtelyn. Tarttujan runko on valmistettu vahvasta alumiiniprofiilista ja mekanismi, joka tarraa laitehyllyyn osoittautui rakenneteträkseksi. Tarttuja asetetaan mobiilirobotin päälle neljällä (4) M8 kokoisella pultilla. Mobiilirobotin runko on valmistettu vahvasta maalatusta teräsprofiilista. Laitehyllyn rakenne on suunniteltu niin, että se kantaa kaiken pystysuuntaisen kuorman itse, joten mobiilirobotin eikä tarttujan runkoon kohdistu tätä kautta voimia. Näiden perusteella molempien runkojen tulisi ainakin silmämääräisellä tarkastelulla kestää moninkertaisesti tavoite painon aiheuttamat kuormitukset.

Lähemmällä tarkastelulla mobiilirobotin vetävien pyörien pito osoittautui suoraan oleellimmaksi ongelmakohdaksi koko esitutkimuksen aikana, johtuen sen pienestä omapainosta ja vetävien pyörien pienestä koosta. Pyöriä on yhteensä kuusi (6) kappaletta, ja ne ovat tasajaolla robotin molemmin puolin. Näistä kuitenkin vain keskimmäiset pyörät ovat vetäviä. Tämä siksi, että robotti pystyy tarvittaessa kääntymään myös täysin paikallaan. Mobiilirobotin omapainoksi mitattiin vain noin 60 kg ja lisäakulla saatu painonlisäys oli vain 10 kg. Yhteispaino jää siis 70 kg:n tienoille. Pyörät olivat esivalittuina ESD-luokiteltuja, ja ne antaisivat mahdollisen kilpailuedun kilpailijoihin nähden, mutta samalla heikentävät maksimipitoa. Valmistajalta olisi ilmeisesti saatavilla suoraan hieman paremmalla pidolla olevia pyöriä, mutta tehtävänannon mukaisesti haluttiin tutkia kuinka pitkälle ESD-luokitelluissa pyörissä riittää pitoa halutun kuorman ollessa vähintään tuo enakkoon tavoiteltu 200 kg.

## 5 VOIMA-ANTURI

Load cell eli punnituskennu on muunnin, joka muuttaa mekaanisen voiman mitattavaksi sähköiseksi lähteeksi. Näitä kutsutaan usein myös voima-antureiksi. Voima-antureita on monenlaisia, mutta yleisimmin käytetyt ovat rasitusvoimaa mittaavat anturit. Tällaiset voima-anturit reagoivat niihin kohdistuvaan voimaan muuttamalla sisäistä sähköistä vastustaan suhteessa kuormitukseen. Teorian voima-antureissa käytettävään tekniikkaan laati englantilainen fyysikko Sir Charles Wheatstone vuonna 1843, mutta vasta 1940-luvulla kehitettiin ensimmäinen varsinaisesti toimiva voima-anturi. Tekniikan kehittyminen ja halventuminen on mahdollistanut tällaisten mitta-antureiden käytön yleisesti nykyaikana. Tätä ennen käytettiin mekaanisia vaakoja. Nykyaikana sähköiset voima-anturit ovatkin todella suosittuja teollisuudessa. Tarkkuudeksi tällaisille antureille luvataan koko mitta-alueella jopa 0,03 %. Ne soveltuvat melkein mihin teollisuudenalaan tahansa. Tarkkuuden ja monikäyttöisyyden lisäksi niiden suosiota teollisuudessa on lisännyt digitalisoituminen ja sähköinen integrointi tietokoneohjattujen järjestelmien kanssa. (Omega 2018a)

### 5.1 Sähköiset voima-anturi tyypit

Sähköisiä voima-antureita löytyy usean tyyppisiä ja ne soveltuvat erilaisiin käyttökohteisiin. Jokaisella voima-anturi tyypillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Anturin tyyppi vaikuttaa mitattavan painoalueen laajuuteen ja tarkkuuteen. (Omega 2018b)

#### 5.1.1 Puristus painike voima-anturi.

Puristus voima-anturissa on yleensä integroitu painike, johon voima kohdistuu. Tällainen anturi on hyvä valinta kohteeseen, jossa tila on rajallinen. Ne ovat myös yleensä pitkäikäisiä ja edullisia. Heikkoutena tällaisella anturilla on, että kuorman pitää olla tarkasti keskitetty eikä se saa liikkua mittauksen aikana yhtään. (Omega 2018c)

### 5.1.2 Puristus / veto voima-anturi

Puristus / veto voima-anturi nimensä mukaisesti kykenee mittaamaan niin puristusta, kuin vetoa. Anturissa on yleensä kierteistetyt tapit helppoa kiinnitystä varten. Sitä käytetään kohteissa, jossa kuormitus saattaa vaihdella näiden kahden välillä. Ne soveltuvat myös yleisesti kohteisiin, joissa tila on rajallinen. (Omega 2018d)

### 5.1.3 S-tyyppin voima-anturi

Nimensä anturi saa sen rungon muodosta, joka näyttää s-kirjaimelta. S-tyyppin anturi kykenee myös mittaamaan niin puristusta, kuin vetoa. Se hylkii todella tehokkaasti voimia, jotka eivät kohdistu anturiin kohtisuorasti. Tällaisissa antureissa on myös kierteistetyt tapit kiinnitystä varten. Yleisiä käyttökohteita ovat kuorma-autojen, säiliöiden ja syötösuppiloiden painon mittaaminen. (Omega 2018e)

### 5.1.4 Taivutuspalkki voima-anturi

Taivutuspalkki voima-anturi on matala, palkin muotoinen anturi, jota voidaan käyttää useissa kohteissa. Matalan profiilinsa ansiosta se on suosittu erilaisissa teollisuuden prosesseissa, joissa esimerkiksi ainemäärien tarkkailu astioissa on tärkeää. Ne ovat yleensä edullisia ja rakenteeltaan yksinkertaisia. Heikkoutena tämän tyyppisillä antureilla on yleensä niiden suojaamisen tarve. (Omega 2018f)

### 5.1.5 Alusta- ja yksipiste voima-anturi

Alusta- ja yksipiste voima-anturia käytetään yleisesti kaupallisissa ja teollisissa punnitusjärjestelmissä. Se antaa tarkan mittaustuloksen riippumatta siitä, missä kohtaa mitattava kappale sijaitsee mitta-alustalla. Ne voidaan myös valmistaa ruostumattomasta teräksestä. Heikkoutena tämän tyyppisillä antureilla on, että kuorma ei saa liikkua mittauksen aikana yhtään. (Omega 2018g)

### 5.1.6 Kanisteri voima-anturi

Kanisteri voima-anturia käytetään yksittäis- tai monipiste mittauksiin. Usein ne ovat täysin hermeettisesti suljettuja, jotta ne kestävät pesuja ja märkiä olosuhteita. Ne myös valmistetaan usein tästä syystä ruostumattomasta teräksestä. (Omega 2018h)

### 5.1.7 Matalaprofiili voima-anturi

Matalaprofiili voima-anturi on nimensä mukaisesti voima-anturi, joka on profiililtaan erittäin matala. Niissä on kierteistetyt kiinnitysreiät valmiiksi ja niitä käytetään usein suorassa linjassa tapahtuvien voimien mittaamiseen erinäisissä tutkimuksissa. (Omega 2018i)



## 6 MITTAUS

### 6.1 Mittalaitteisto ja kalibrointi

Testausmenetelmänä käytettiin suoraa vetokuormitusmittausta ja mittalaitteistona toimi Philips Digital 380 prosessointiyksikkö ja kuvan 3 kaltainen Vishay S-tyyppin voima-anturi, joka on mitoitettu aina 250 kg kuormalle asti, ja joka vastaa noin 2452 N voimaa. Kyseinen mittalaitteisto valittiin käyttöön yksinkertaisesti siitä syystä, että se oli heti käytettävissä ja soveltui tarvittaviin mittauksiin riittävästi.



Kuva 3. Vishay S-tyyppin anturi (demmachines 2018)

Oletuksena renkaille oli maksimissaan pitokerroin 0.5, joten omapainon jäädessä alle 100 kg:n ei anturiin kohdistuisi teoriassakaan kuin maksimissaan 490 N voima. Tällä oletuksella anturin mitta-asteikko on riittävä. Philips Digital 380 ei suoraan näytä anturiin kohdistuvaa voimaa newtoneina, vaan sillä on tehtävä esimittauksia tiedossa olevilla voimilla. Näistä saatujen mittaustulosten avulla voidaan laskea anturin kulmakerroin. Kulmakertoimen avulla voidaan myöhemmin määrittää saatavat mittaukset mobiilirobotin vetokyvystä suoraan newtoneiksi.

Esimittaukseen tarvittavat painot mitattiin erillisellä tarkkuusvaa`alla, jolle valmistaja lupaa 10 g:n tarkkuuden. Sallittu maksimikuorma vaa`alla oli 40 kg. Esimittauksen testikappaleiksi valittiin testipaikalta löytyneitä metallikappaleita. Nämä kytkettiin sidontaliinoilla tarkkuusvaa`an mittakoukkuun. Mittaus suoritettiin siis roikottamalla kappaleita sidontaliinon varassa. Tulokset kirjattiin muistiin taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Tarkkuusvaa`alla saadut tulokset

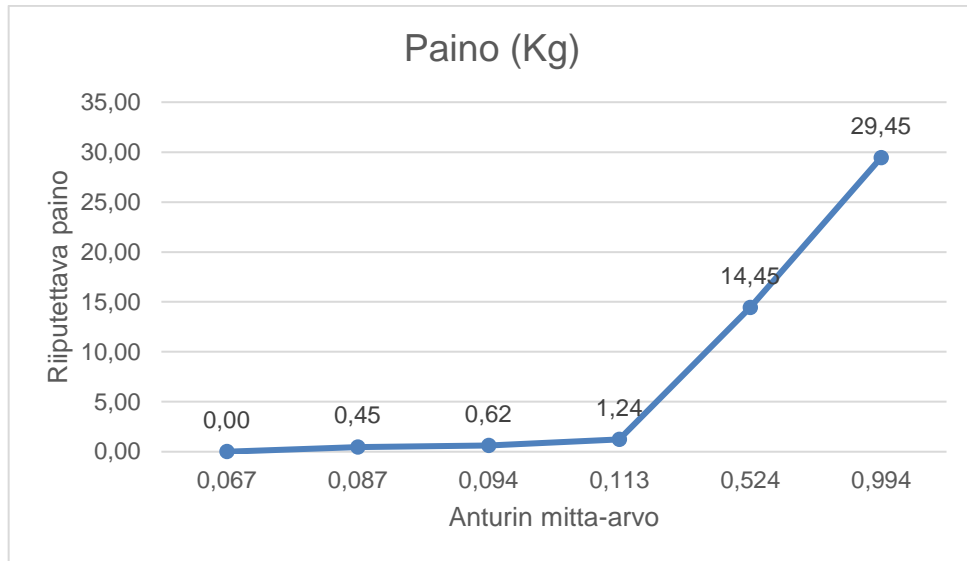
Testikappale1	0,62	Kg
Testikappale2	0,62	Kg
Sidontaliinat	0,45	Kg
Testisylinteri	14,00	Kg
Isompi Testisylinteri	29,00	Kg

Kulmakertoimen selvittämiseksi vaadittava mittaus suoritettiin edeltävää mittausta mukaillen riiputtamalla testikappaleita sidontaliinon varassa anturista suoraan alaspäin. Tällä kertaa voitiin kuitenkin hyödyntää anturissa olevaa kiinnitys kohtaa käyttäen siinä M12-nostosilmukkaa. Mittaukset suoritettiin kahdesti ja molemmilla kerroilla saatiin samat tulokset (taulukko 2).

Taulukko 2. Anturin mittaus

Testinumero	Mitattava kappale	Paino (Kg)	Philips mitta-arvo
1	Tyhjänä	0,00	0,067
2	M12+Sidontaliina	0,45	0,087
3	M12+m.mittari+Testikappale1	0,62	0,094
4	M12+m.mittari+Testikappale1+Testikappale2	1,24	0,113
5	M12+Sidontaliinat+Testisylinteri	14,45	0,524
6	M12+Sidontaliinat+Isompi Testisylinteri	29,45	0,994

Taulukosta tehtiin myös kuvio havainnollistamaan paremmin saatu mittaustulos (kuvio 1). Kuvioista voidaan todeta onnistunut lineaarinen mittaustulos. Anturin mitta-arvo nousee siis suoraan suhteessa riiputettavan painon määrään.



Kuvio 1. Anturin kulmakertoimen mittaus

Tästä voitiin laskea anturin kulmakerroin riiputettavan painon muutoksen ja sitä vastaavan anturin mitta-arvon muutoksen suhteella. Kaava muodossa:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{29,45 - 14,45}{0,994 - 0,524} = 31,91$$

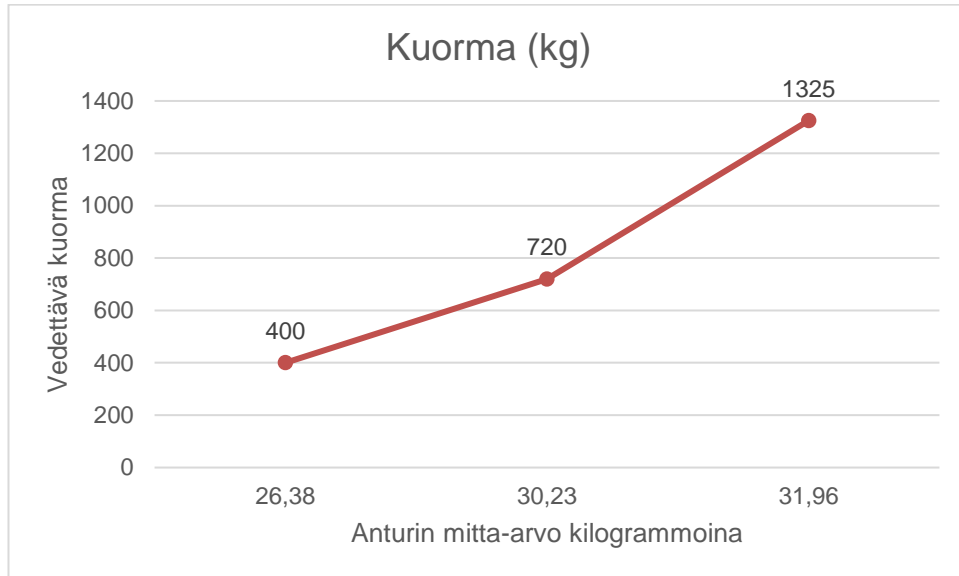
Tuloksessa oli havaittavissa hyvin pientä vaihtelua riippuen siitä minkä mittatuloksen  $\frac{y_1}{x_1}$  muuttujaksi valitsee. Tämä todennäköisesti johtuu anturissa olevasta marginaalisen pienestä mittavaihtelusta, joka on riippuvainen mitattavan kuorman suuruudesta. Vaihtelu on kuitenkin niin pientä, ettei sillä ole merkitystä testauksien reliabeliuteen.

## 6.2 Vetotesti

Rengastettua laitekärkyä ei testausvaiheessa ollut vielä saatavilla, joten sitä simuloitiin Rocla-merkkisillä pumppukärkyillä, joissa on integroitu vaaka. Laitekärky ja pumppukärkyjen rengastus osoittautui hyvin samanlaisiksi laakeroinniltaan ja renkaan halkaisijaltaan, joten niillä saavutettiin tarpeeksi samantyyppiset olosuhteet testejä varten.

Vetokykyä mitattiin kolmella eri kuormituksella: 400 kg, 720 kg ja 1325 kg. Kuormitusten kilomäärät eivät olleet tarkoituksella valittuja vaan määräytyivät suoraan mittauspaijalla olevien kuormalavojen painojen mukaan. Näihin painoihin on otettu huomioon myös

pumppukärryjen omapaino, joka on noin 100 kg. Kuormat on mitattu pumppukärryjen omalla integroidulla vaa`alla ja valmistajan mukaan toleranssi niillä on noin 5 kg. Mittaus tapahtui suhteellisen puhtaalla pinnoitetulla betonilattialla ja jokainen vetotesti suoritettiin kolme kertaa, joista kaikista otettiin keskiarvo. Tuloksista saatiin kuvion 2 mukainen Excel-kuvio.



Kuvio 2. Simuloitu vetotesti

Ensimmäisellä kuormituksella mobiilirobotilla ja vetolaitteella ei ollut mitään ongelmia 400 kg:n kuorman liikkeelle saamisessa tai sen pysäyttämässä, vaan se suoriutui siitä kevyen näköisesti. Toisestakin kuormituksesta suoriuduttiin vielä kevyen oloisesti kiihtyvyyden ollessa hieman hitaampi, mutta liikkeelle lähtö ja pysäytys näyttivät olevan hallittuja, vaikka kuormaa oli jo 720 kg. Kolmas kuormitus tuotti ongelmia liikkeelle lähtöön ja mobiilirobotin vetopyörät pyörivät hieman tyhjää saaden kuitenkin 1325 kg:n kuorman liikkeelle. Testausympäristö oli testauksen ajaksi putsattu, joten voidaan hyvin todeta, että tuo kolmas kuormitus oli todella lähellä maksimikuormaa, jonka mobiilirobotin renkaat kykenivät siirtämään.

Tuloksista laskettiin pyörien liikekitkakerroin jakamalla mitattu maksimi vetokyky robotin omapainolla.

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{mg} = \frac{31,88 * g}{70 * g} = \frac{31,88 * 9,81 \frac{m}{s^2}}{70 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,455 \approx 0,46$$

Tulokseksi saatu 0,46 on niin rajalla pyörien tyhjään pyörimisen kanssa, että luotettavampana kertoimena voidaan pitää 0,44.

### 6.3 Kalteva taso

Mobiilirobotin tulisi pystyä kulkemaan tehtävänannon mukaisesti myös tarvittaessa 5%:n nousua, joka vastaa noin kolmea (3) astetta tasokulman mittayksikkönä. Tätä tarkastelua varten Excelillä tehtiin laskuri, jolla pystytään laskemaan teoreettinen mobiilirobotin vetokyky eri omapainolla ja kaltevuusasteella (kuva 4). Laskuri ei ota huomioon robotin itse aiheuttamaa kiihtyvyyttä vaan tarkastelee tilannetta staattisessa muodossa. Kiihtyvyys pyrittiin aluksi ottamaan mukaan laskelmiin, jotta ne kuvastaisivat mahdollisimman realistisesti robotin käyttäytymistä oikeassa elämässä. Luotettavien mittaustulosten saaminen osoittautui kuitenkin mahdottomaksi käytettävissä olevilla mittareilla, joten kiihtyvyys päätettiin jättää laskuista pois. Valmistaja lupaa mobiilirobotin kykenevän liikuttamaan 200 kg:n kuormaa maksimissaan kolmen (3) asteen nousulla. Laskurin suuntaa-antavan tuloksen mukaan mobiilirobotti kykenisi teoriassa liikkumaan vielä kuuden (6) asteen nousulla kuorman ollessa 200 kg, joka indikoi valmistajan varmuuskertoimen olevan todennäköisesti noin kaksi (2).

Kaltevasato							
Paino(kg)		Normaalivoima(N)		Kulma (asteina)	0	Kaltevavoima(N)	0
	270		2648,7		1		46,23
					2		92,44
Robotin paino (kg)	70				3		138,62
Kuorman paino (kg)	200				4		184,76
					5		230,85
					6		276,86
Suurin mahdollinen vetokyky (N)					7		322,80
312,75					8		368,63
					9		414,35
Todellisempi maksimivetokyky (N)					10		459,94
303,36					11		505,40
					12		550,70
					13		595,83
Vetokyky suhteessa painoon					14		640,78
Painon kasvu (%)		0,00			15		685,53
Vetokyvyn kasvu (%)		0,00			16		730,08
					17		774,40
					18		818,49
					19		862,33
					20		905,91
					21		949,21
					22		992,22
					23		1034,93
					24		1077,32
					25		1119,39
					26		1161,11
					27		1202,48
					28		1243,49
					29		1284,12
					30		1324,35

Kalteva taso

Voima (Nm)

Aste -luku

Aste -luku	Voima (Nm)
1	46,23
2	92,44
3	138,62
4	184,76
5	230,85
6	276,86
7	322,80
8	368,63
9	414,35
10	459,94
11	505,40
12	550,70
13	595,83
14	640,78
15	685,53
16	730,08
17	774,40
18	818,49
19	862,33
20	905,91
21	949,21
22	992,22
23	1034,93
24	1077,32
25	1119,39
26	1161,11
27	1202,48
28	1243,49
29	1284,12
30	1324,35

Kuva 4. Excel-laskuri staattiseen tarkasteluun

## 7 VETOKYVYN PARANTAMINEN

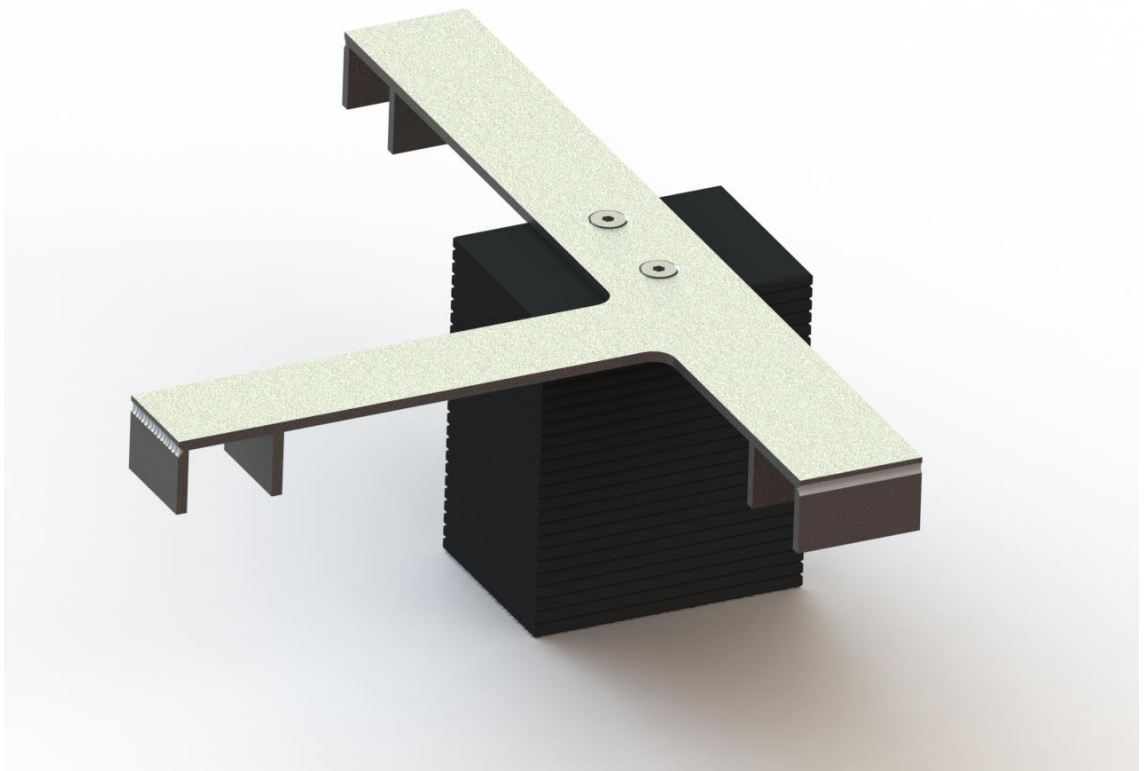
Vaihtoehtoja mobiilirobotin vetokyvyn parantamiseksi tässä tapauksessa on joko vaihtaa rengastus paremmaksi tai lisäämällä mobiilirobotin omapainoa. Mobiilirobotin omapainon lisääminen tuo mukanaan suuremman virrankulutuksen ja täten kuluttaa akkuja nopeammin, joten jos mobiilirobotin on määrä kulkea päivässä pitkiä matkoja, olisi pitävämpi rengastus parempi vaihtoehto. Uudella rengastuksella taas menetetään ESD-ominaisuudet, joten vetokyvyn parannustapaa tulee katsoa tilanne kohtaisesti.

### 7.1 Lisäpainot

Yksinkertaisin vaihtoehto olisi lisätä mobiilirobottiin metallisia painoja. Materiaaliksi kelpaisi joko maalattu rakenneteräs tai ruostumaton teräs. Palat tulisi leikata paksusta levyästä ja liittää yhteen hitsaamalla tai vaihtoehtoisesti poraamalla paloihin reiät ja liittää ne yhteen pitkillä pulteilla. Lisäpainot sijoittuisivat rungon sisälle ja kiinnitys tulisi tehdä mobiilirobotin rungon yläkehikkoon, koska se on ainoa runkorakenne, joka kestäisi tuon ylimääräisen massan.

Rungon sisältä otettujen mittojen avulla laskettiin teoreettiset massat mahdollisille lisäpainoille kahdella eri materiaalilla (taulukko 3). Näiden mittojen pohjalta tehtiin myös 3D-malli havainnollistamaan robottiin soveltuvan painon mallia (kuva 5). Tässä mallissa käytettiin pulttiliitos ideaa, jolla säästytään ylimääräisiltä hitsauksilta. Lisäpaino laskettaisiin mobiilirobotin profiiliputkirungon päälle, eikä täten vaatisi toimenpiteitä robotin rungon muokkaamiseen, sillä pienet hitsatut korvakkeet estäisivät sitä liikkumasta eteen tai

taakse. Yläpuolelle asetettava tarttujan runko estäisi lisäpainoa liikkumasta ylöspäin.



Kuva 5. 3D-malli etummaisesta lisäpainosta

Materiaalin ollessa ruostumatonta terästä olisi etuosaan mahdollista mahduttaa teoriassa 13,9 kg ja takaosaan 20,29 kg näiden ollessa yhteensä 34,18 kg. Kiinnitysmahdollisuudet ja valmistustekniset syyt huomioon ottaen olisi yhteenlaskettu painonlisäys todellisuudessa lähempänä 30 kg kuin tuo teoreettinen 34,18 kg. Ruostumattoman teräksen tiheyden ollessa noin  $8000 \text{ kg/m}^3$  ja tavallisen rakenneteräksen tiheyden ollessa noin  $7850 \text{ kg/m}^3$  ei materiaalivalinnalla ole painon suhteen juurikaan merkitystä, koska ero tiheydessä näiden materiaalien välillä on vain noin 1,91% joka vastaisi maksimissaan 0,65 kg lisäystä eikä täten oikeuta ruostumattoman teräksen huomattavasti kalliimpaa hintaa. Tämän hetkinen hinta 6 mm paksulle ruostumattomalle teräslevylle on noin  $273.6 \text{ € / m}^2$  (palametalli 2018a) ja vastaavan paksuiselle kuumavalssatulle teräslevylle vain  $75 \text{ € / m}^2$  (palametalli 2018b).



Taulukko 3. Lisäpainojen laskeminen ja vertailu

Etuosassa			
	Leveys	Pituus	Syvyys
Mitat (m)	0,09	0,127	0,152
Tilavuus (m <sup>3</sup> )	0,00174		
Paino (kg)	13,90		
Takaosassa			
	Leveys	Pituus	Syvyys
Mitat (m)	0,09	0,245	0,115
Tilavuus (m <sup>3</sup> )	0,00254		
Paino (kg)	20,29		
Yhteispaino vertailu			
Paino yhteensä (kg)	34,18		
Paino yhteensä (kg)	33,53		
Painoero (kg)	0,65		
Materiaalit			
Rauta	7850	Kg/m <sup>3</sup>	
Ruostumatonteräs (316)	8000	Kg/m <sup>3</sup>	
Erotus	150	Kg	
	1,91	%	

Toinen vaihtoehto olisi lisätä rungon sisälle akkuja, mutta käytettävissä olevan tilan epämääräisen muodon vuoksi lisäakuista saatavat kilot jäisivät mitättömän pieniksi verrattuna metallisiin lisäpainoihin. Lisäksi usean akun järjestelmä, jossa akkujen kapasiteetit eroavat toisistaan saattaisi aiheuttaa ongelmia mobiilirobotin latausjärjestelmään. Lisäakut pitäisi myös pystyä koteloimaan, mikä taas vie käytettävissä olevaa tilaa entisestään. Lisäakkujen tämän hetkinen hinta on myös huomattavasti korkeampi kuin metallisten lisäpainojen, koska mobiilirobotti käyttää litium-ioni-akkuja.

## 7.2 Rengastus

Paremmalla pidolla olevia renkaita ei testauksien aikana päästy kokeilemaan, mutta teoriassa vetävien renkaiden kitkakertoimen nostaminen nostaisi myöskin mahdollista vetokyvyn määrää suhteellisen paljon. ESD-luokitelluilla pyörillä kitkakerroin jäi alle luke-man 0,5 kun kumin ja betonin liikekitkakertoimen tunnetaan olevan parhaimmillaan jopa

0,7 (Peda 2018). Jos käyttöympäristössä ei ole käytössä ESD-luokiteltua alustaa, ei ESD-luokitelluista pyöristä ole käytännössä mitään hyötyä, koska robotti ei kykene maa-doittamaan itseään alustan kautta kunnolla. Tässä kohtaa käyttöympäristö tuleekin ottaa tarkoin huomioon ja rengastus valita suoraan sen mukaisesti.

## 8 LOPPUTULOKSET JA PÄÄTELMÄT

Testituloksien ja laskettujen arvojen perusteella NEROBOT-mobiilirobotti ja sen prototyyppi tarttuja suoriutuu sille annetusta tavoitteesta, mikäli vedettävää kuorman määrää ei huomattavasti ylitetä, vaan se jätetään noin 200 kg:n tuntumaan. Laskurin mukaan teoreettinen maksimikuorma, jolla mobiilirobotti kykenisi vielä kulkemaan kolmen (3) asteen kaltevaa tasoa olisi 539kg, mutta laskurin simuloidessa tilannetta staattisessa muodossa ei tuo arvo sovellu puhtaasti käytäntöön. Lepokitka, joka kuvastaa staattista tilannetta on tunnetusti yleensä korkeampi kuin liikekitka, minkä vuoksi on hyvin todennäköistä, että mobiilirobotti ei kykene tuota kuormaa liikuttamaan kaltevaa tasoa pitkin ylös. Turvallisinta on pitää maksimikuorma mitatulla ESD-rengastuksella tuossa tavoitellussa 200 kg:ssa, jotta varmuuskerroin kaltevan tason kulkemiselle pysyy mahdollisimman korkeana.

Rengastuksen vaihtuessa huomattavasti paremmalla kitkakertoimella varustettuihin pyöriin voidaan teoriassa maksimikuormitusta lisätä runsaasti, mutta todellinen maksimikuormitus tulee mitata käytännössä uusiksi, jotta voidaan olla täysin varmoja siitä, miten paljon mobiilirobotin vetokyky kasvaa. Rengastyyppiä muuttamalla saattaa ilmetä uusia muuttujia, joihin tässä testissä ei kyetä ottamaan kantaa.

Painoja lisäämällä mobiilirobotin rungon sisälle voidaan myös teoriassa nostaa sen vetokykyä, mutta sen nostaessa samalla akkujen kulutusta voi tämä ratkaisu olla tietyissä tilanteissa huono. Varsinkin jos robotin tulee kulkea päivittäin pitkiä matkoja, joutuisi se käymään latausasemalla useammin. Toisaalta jos robotin on määrä kulkea vain lyhyitä matkoja ja se voi väliaikana olla latausasemassa kiinni, ei tuo ylimääräinen painonlisäys olisi liiaksi haitaksi. Painojen valmistuksen tuomia lisäkustannuksia ei toki pidä myöskään olla ottamatta huomioon, vaikka niitä ei tässä työssä laskettukaan.

Paras ratkaisu yleisesti olisi valita vetäviksi renkaiksi sellaiset, joissa liikekitkakerroin olisi mahdollisimman iso, juuri sillä alustalla, jolla mobiilirobotin on tarkoitus liikkua. Tällä saavutettaisiin paras hyötysuhde mobiilirobotin vetokyvyn kannalta suhteessa sen omapainoon.

## LÄHTEET

Rocla 2018a. Viitattu 18.12.2018

<https://www.rocla-agv.com/sites/default/files/sample-files/rocla-agv-brochure.pdf>

Rocla 2018b. Viitattu 18.12.2018

<https://www.rocla-agv.com/sites/default/files/sample-files/rocla-agv-brochure.pdf>

Forkliftaction 2018. Viitattu 18.12.2018

<https://www.forkliftaction.com/news/newsdisplay.aspx?nwid=13368>

Rocla 2018c. Viitattu 18.12.2018

<https://www.rocla-agv.com/sites/default/files/sample-files/rocla-agv-brochure.pdf>

Rocla 2018d. Viitattu 18.12.2018

<https://www.rocla-agv.com/sites/default/files/sample-files/rocla-agv-brochure.pdf>

Rocla 2018e. Viitattu 18.12.2018

<https://www.rocla-agv.com/sites/default/files/sample-files/rocla-agv-brochure.pdf>

Mobile Industrial Robots 2018a. Viitattu 18.12.2018

<https://www.mobile-industrial-robots.com/en/resources/whitepapers/agv-vs-amr-whats-the-difference/>

Mobile Industrial Robots 2018b. Viitattu 18.12.2018

<http://www.mobile-industrial-robots.com/da/resources/marketing-materials/product-pictures/mir200/>

Mobile Industrial Robots 2018c. Viitattu 18.12.2018

<https://www.mobile-industrial-robots.com/en/resources/whitepapers/agv-vs-amr-whats-the-difference/>

Omega 2018a. Viitattu 18.12.2018

<https://www.omega.co.uk/prodinfo/load-cells.html>

Omega 2018b. Viitattu 18.12.2018

<https://www.omega.co.uk/prodinfo/load-cells.html>

Omega 2018c. Viitattu 18.12.2018

<https://www.omega.co.uk/prodinfo/load-cells.html>

Omega 2018d. Viitattu 18.12.2018

<https://www.omega.co.uk/prodinfo/load-cells.html>

Omega 2018e. Viitattu 18.12.2018

<https://www.omega.co.uk/prodinfo/load-cells.html>

Omega 2018f. Viitattu 18.12.2018

<https://www.omega.co.uk/prodinfo/load-cells.html>

Omega 2018g. Viitattu 18.12.2018

<https://www.omega.co.uk/prodinfo/load-cells.html>

Omega 2018h. Viitattu 18.12.2018

<https://www.omega.co.uk/prodinfo/load-cells.html>

Omega 2018i. Viitattu 18.12.2018

<https://www.omega.co.uk/prodinfo/load-cells.html>

Demmachines 2018. Viitattu 2.12.2018

<https://demmachines.com/product/vishay-s-type-614-load-cell/>

Palametalli 2018a. Viitattu 2.12.2018

<https://www.palametalli.fi/terasmyynti/ruostumattomat/levyt/>

Palametalli 2018b. Viitattu 2.12.2018

<https://www.palametalli.fi/terasmyynti/rakenneterakset-kauppa/teraslevy-kuumavalssattu/>

Peda 2018. Viitattu 2.12.2018

<https://peda.net/sonkajarvi/lkl/fysiikka-ja-kemia/8a-fysiikka/efysiikka-82/taulukot/kitkakertoimia>