



Aarni Ravea

# Viemärirobotin tuotekehitys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

09.05.2024

# Tiivistelmä

Tekijä:	Aarni Ravea
Otsikko:	Viemärirobotin Tuotekehitys
Sivumäärä:	37 sivua
Aika:	09.05.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine:	Koneautomaatio
Ohjaajat:	Yliopettaja Jyrki Kullaa Projekti-insinööri Daniel Korhonen

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella konsepti miehittämättömästä viemärirobotista, joka on tarkoitettu pääviemäriverkoston halkeamien korjaamiseen asentamalla niihin korjauspantoja. Projekti on osa Metropolia Ammattikorkeakoulun ja Underground City Oy:n yhteistyötä ja on osana TECHBOOST-hanketta. Projektin on tarkoitus jatkaa vielä 1,5 vuotta tämän opinnäytetyön julkaisun jälkeen.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käsitellään tuotekehitysprosessia ja tuotekehitysprosessin vaiheita. Projektia on edistetty tämän teorian pohjalta. Tässä työssä pyrittiin vastaamaan konkreettisiin tarpeisiin, kuten robotin kykyyn liikkua sujuvasti putkistossa, korjaustoimenpiteen sujuvuuteen sekä kestävyysviemäriolosuhteissa. Opinnäytetyössä kerrotaan projektin lähtötilanne, asiakkaan tarpeet ja vaatimukset, konseptin suunnitteluosuus ja miten konsepti valittiin. Työn lopussa on mainittuna myös lopputulokset, projektin jatkotoimenpiteet ja opit projektista.

Avainsanat: tuotekehitys, konsepti, suunnittelu, viemärirobotti

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author: Aarni Ravea  
Title: Sewer Robot Product Development  
Number of Pages: 37 pages  
Date: 9 May 2024

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Mechanical Engineering  
Professional Major: Machine Automation  
Supervisors: Jyrki Kullaa, Principal Lecturer  
Project Engineer Daniel Korhonen

---

The aim of this thesis is to design a concept for an unmanned sewer robot intended for repairing cracks in main sewer networks by installing repair clamps. The project is part of a collaboration between Metropolia University of Applied Sciences and Underground City Ltd and is part of the TECHBOOST initiative. The project is expected to continue for another 1.5 years following the publication of this thesis.

In the theoretical section of the thesis, the product development process and its phases are addressed. The project has been advanced based on this theory. This work aimed to meet concrete needs, such as the robot's ability to move smoothly in main sewer pipes, the optimization of the repairing operation, and durability in sewer conditions. The engineering thesis discusses the initial state of the project, the needs and requirements of the customer, the concept design phase, and how the concept was selected. The conclusion of the work also mentions the results, future actions for the project, and lessons learned from the project.

Keywords: product development, concept, design, sewer robot

# Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tausta ja tutkimuksen merkitys	1
1.2	Tavoitteet ja tutkimuskysymykset	1
1.3	Asiakasyrityksen esittely	2
1.4	TECHBOOST	2
2	Tuotekehitys	3
2.1	Tuotekehitysprosessin merkitys	3
2.2	Tuotekehitysprosessin vaiheet	3
2.2.1	Suunnittelu	4
2.2.2	Konseptin kehittäminen	6
2.2.3	Järjestelmätason suunnittelu	8
2.2.4	Yksityiskohtainen suunnittelu	8
2.2.5	Testaus ja hienosäätö	8
2.2.6	Tuotannon lisääminen	9
3	Projektin lähtökohdat ja vaatimukset	9
3.1	Lähtötilanne	9
3.2	Asiakkaan käytössä oleva työkalukärry-robotti-yhdistelmä	11
3.3	Viemärirobottikonseptin tarpeet ja vaatimukset	14
4	Konseptisuunnittelu	14
4.1	Suunnitteluprosessi ja menetelmät	14
4.2	State of Art	15
4.3	Konseptien arviointi ja valinta	16
5	Tekninen suunnittelu	19
5.1	Moottorin, moottorin ohjauskortin ja alennusvaihteiston valinta	19
5.2	Renkaiden, akselien pidennyspalojen ja pyörännavan suunnittelu	24
5.3	Suojakotelon suunnittelu	27
5.4	Datan- ja virransiirto sekä liittimien valinta	30
5.5	Vetotavan ja ohjausmekanismin valinta	32
5.5.1	Vetotapa	32
5.5.2	Ohjausmekanismina differentiaaliohjaus	33

6	Yhteenveto ja johtopäätökset	35
6.1	Projektin pääkohdat ja saavutetut tulokset	35
6.2	Henkilökohtaiset opit ja kokemukset projektista	35
6.3	Jatkotoimenpiteet	36
	Lähteet	37

## Lyhenteet

- IPR: Intellectual Property Rights eli immateriaalioikeudet ovat oikeuksia, jotka suojaavat ihmismielen tuotoksia. Yksi yleisimmistä immateriaalioikeuksista on patentti.
- PWM: Pulse Width Modulation eli pulssinleveysmodulaatio on menetelmä ohjata sähköistä signaalia. PWM:llä voidaan säätää digitaalisen signaalin tehoa säätämällä pulssin leveyttä.
- HNBR: Hydrogenated Nitrile Butadiene Rubber on erikoistunut kumilaatu.
- FKM: Fluoroelastomeeri on erikoistunut kumilaatu.
- RST: Ruostumaton teräs on metalliseos, joka pitää sisällään rautaa, kromia ja usein myös nikkeliä tai muita metalleja.
- CAD: Computer-Aided Design, eli tietokoneavusteinen suunnittelu. CAD-järjestelmiä käytetään monenlaisissa suunnitteluprosesseissa. Keskeisiä toimintoja on mm. 3D-mallinnus, 2D-piirustukset ja Simulaatiot.
- IP: Ingress Protection eli IP-koodi koostuu kahdesta numerosta esim. IP67. Ensimmäinen numero kertoo suojauksen tason kiinteiltä esineiltä ja pölyltä, ja toinen numero ilmoittaa kestävyuden vettä vastaan. IP-koodi on suojaluokituskoodi ja on osa kansainvälistä standardia IEC 60529.

# 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoite on luoda konsepti miehittämättömästä viemärobotista, joka pystyy asentamaan korjauspantoja pääviemäriverkoston halkeamiin tai tarjota muu vaihtoehtoinen ratkaisu asiakkaan kohtaamiin ongelmiin.

## 1.1 Tausta ja tutkimuksen merkitys

Viemärijärjestelmät ovat välttämätön osa kaupunkien infrastruktuuria. Ne varmistavat jätevesien turvallisen ja tehokkaan poiston asutusalueilta. Viemärijärjestelmien ylläpito ja tarkastukset ovat olennaisia tehtäviä, jotka vaativat jatkuvaa huomiota ja uusia innovatiivisia ratkaisuja. Viemärobotiikka tarjoaa korvaamatonta apua viemäriverkostojen tarkastelussa ja kuntokartoituksessa sekä huollossa. Viemärobotit tuovat merkittäviä etuja kansanterveydelle, ympäristönsuojelulle sekä infrastruktuurin pitkäikäisyydelle.

## 1.2 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Suunnittelun tavoitteena on luoda konsepti viemärobotista, joka pystyy liikkumaan moitteettomasti pääviemäreissä ja asentamaan metallista ja kumista valmistettuja korjauspantoja vuotaviin viemäriputkiin.

Viemärobotin on tarkoitus korvata asiakkaan nykyinen ratkaisu, vetorobotin liikkuttama työkalukärry, jonka avulla pystyy kiinnittämään korjauspantoja sisähalkaisijaltaan erikokoisiin viemäriputkiin. Työkalu on kumista ja metallista valmistettu pneumaattisesti täytettävä ontto kappale, jossa on sivulla kiinnitettävä uloke ja 4 kappaletta renkaita. Asiakas on käyttänyt työkalua vetorobotin avulla, jossa on CCTV-kamera. Yhdistelmärobotti ei ole toiminut moitteettomasti. Aikaisemman systeemin ongelmiksi on muodostunut kaksiosaisen yhdistelmärobotin viemäriputkeen paikoittamiseen viemä aika, korjauspannan paikoitus ja asennusongelmat sekä robottiyhdistelmän liikkuvuuden ongelmat. Suunnittelun tavoitteena on ratkaista kyseiset ongelmat. Tutkimukseni tavoitteena on selvittää,

miten robottiteknologiaa voidaan hyödyntää viemärihuollon tehokkuuden parantamiseen, sekä millaisia teknisiä vaatimuksia viemärirobotti kohtaa ja miten ne voidaan ratkaista konseptitasolla.

### 1.3 Asiakasyrityksen esittely

Underground City Oy on yritys, joka tarjoaa erilaisia viemärihuollon palveluita sekä uusia helppokäyttöisiä työkaluja kuntien ja kaupunkien vesihuolto-omaisuuden hallintaan. Yritys kehittää uusia innovatiivisia menetelmiä viemäriverkostojen kunnan mittaamiseen, visualisointiin ja automaattiseen analysointiin. He tarjoavat vesiyhtiöille nopean, edullisen ja kattavan seulontatarkastuksen viemäriverkoston kunnan tarkasteluun. Seulontatarkastus auttaa paikantamaan viemäriputken vuotokohdat sekä tukokset ja mahdollistaa korjaustoimenpiteiden tehokkaamman kohdistamisen verkoston heikoimpiin kohtiin. Seulontatarkastuksen tiedot kirjataan Underground City Oy:n tarjoamaan UC Application -sovellukseen. UC Application on pilvipohjainen sovellus, joka tukee vesihuoltoverkoston seuranta ja hallintaa käyttäjäystävällisyyden huomioiden. Tarkastustyökalu visualisoi tiedot UC-sovelluksessa, tarjoten asiakkaalle selkeät ja ymmärrettävät tulokset. [1.]

### 1.4 TECHBOOST

Tämä projekti on osana TECHBOOST-hanketta. TECHBOOST-hanke on kehitetty tukemaan uusien teknologioiden kehitystä robotiikan ja tekoälyn aloilla. Hanke toteutetaan kuuden eri korkeakoulun TECHBOOST-verkoston yhteistyönä. Hankkeeseen osallistuu 30 eri suomalaista asiakasyritystä. Hankkeessa lupaavia pieniä ja keskisuuria yrityksiä autetaan ottamaan käyttöön, kehittämään ja järjestelmällisesti soveltamaan uusia teknologioita painottaen robotiikan ja tekoälyn aloja. TECHBOOST-verkosto auttaa yrityksiä kehitysprojekteissa, löytämään rahoitusta ja kumppaneita sekä teknologiatoimittajia. Hanke mahdollistaa osallistujien keskinäisen oppimisen, tiedon ja asiantuntemuksen vaihdon sekä toistensa teknologisten ratkaisujen ja tilojen tehokkaan hyödyntämisen. Hankkeen kokonaisbudjetti on 1,8 miljoonaa euroa ja kesto 2 vuotta.

## 2 Tuotekehitys

### 2.1 Tuotekehitysprosessin merkitys

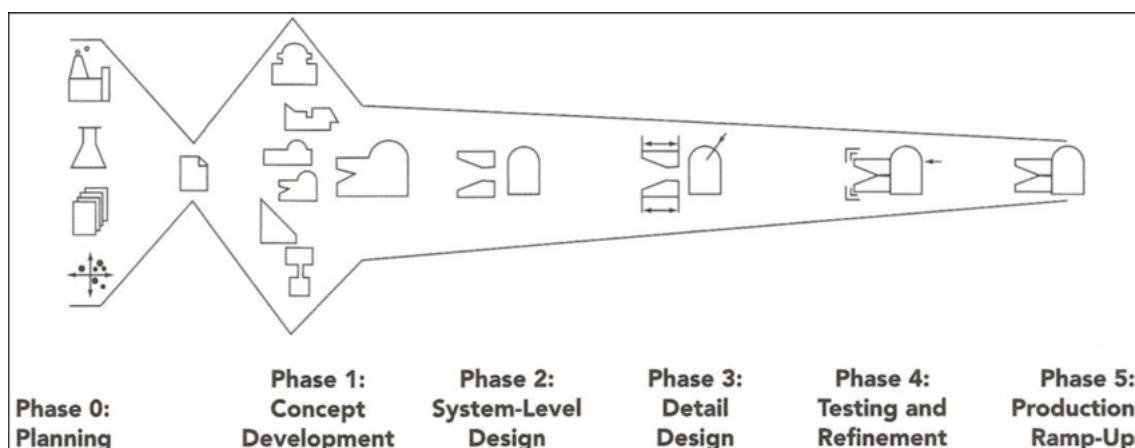
Tuotekehitys on välttämätön osa menestyvän yrityksen toimintaa. Ilman jatkuvaa tuotekehitystä tuotteen houkuttelevuus ja hyöty asiakkaiden näkökulmasta heikkenee, joka johtaisi myynnin laskuun ja lopulta markkinoilta poistumiseen. Tuotteiden elinikä, eli ajanjaksoon, jonka kuluessa tuote on markkinoilla myynnissä ja käytössä, vaihtelee teollisuuden alojen mukaan. Perinteisesti muotialan tuotteiden elinikä on lyhempi kuin raskasteollisuuden. Tuotteiden elinikä on yleisesti lyhentymässä eri aloilla teknologian kehityksen ja tuotannon optimoinnin ansiosta.

Tuotekehitys on prosessi, jonka avulla pyritään luomaan uusi tai paranneltu versio aiemmasta tuotteesta, jolloin keskitytään luomaan kustannustehokkaampi ja kokonaisvaltaisesti parempi tuote. Tuotekehityksen piiriin kuuluu myös vanhan tuotteen tai laitteen käyttö uudessa käyttötarkoituksessa. Vastaavassa tilanteessa joudutaan suunnittelemaan yksittäisiä osia uudestaan ratkaisuperiaatteen pysyessä samana. Tavoitteena ei ole kuitenkaan kokonaan uuden tuotteen suunnittelu. [2.]

### 2.2 Tuotekehitysprosessin vaiheet

Tuotekehitysprosessi käynnistyy suunnitteluvaiheella, jossa ideat ja tarpeet muutetaan konkreettisiksi konsepteiksi. Prosessi etenee suunnittelusta kehityksen ja testauksen kautta aina tuotantoon saakka, jossa ideat muuttuvat lopulta valmiiksi tuotteiksi. Tässä kappaleessa tarkastelemme yksityiskohtaisesti, mitä kaikki tuotekehitysprosessin vaiheet pitävät sisällään ja kuinka ideasta tulee valmis tuote. Teoriaosuus on painotettu vahvasti suunnittelu- ja konseptien kehittämisvaiheen prosesseihin, koska osallisuuteni projektissa keskittyi eniten näihin

osa-alueisiin.



Kuva 1. Tuotekehitysprosessin vaiheet. [3.]

### 2.2.1 Suunnittelu

Suunnitteluvaihe, jota kutsutaan myös nimellä ”Vaihe Nolla” on onnistuneen tuotekehitysprosessin perusta. Suunnitteluvaihe tapahtuu yrityksissä ennen projektin virallista hyväksyntää ja varsinaisen tuotekehitysprosessin alkua. Suunnitteluvaihe sisältää markkinoinnin, suunnittelun ja valmistuksen näkökulmat.

Suunnittelu alkaa markkinamahdollisuuksien sekä markkinasegmenttien määrittämisellä. Tämä vaihe pitää sisällään muun muassa markkinatutkimuksen, haastatteluja ja markkinatrendien analysoimisen. Markkinatrendien analysoinnissa pyritään löytämään aukkoja markkinoilta, joita uusi tuote voisi täyttää. Tässä vaiheessa tarkoituksena on ymmärtää mitä asiakkaat todella haluavat ja mitä ongelmia asiakkaat ovat kohdanneet sekä mitä ongelmia uusi tuote voisi ratkaista.

Markkinatarpeiden selvittämiseksi voidaan tehdä demografisia tutkimuksia, analysoida kuluttajakäyttäytymistä ja tehdä arviointi kilpailutilanteesta. Kun halutaan selvittää, mitä ongelmia uusi tuote voisi mahdollisesti ratkaista, tunnistettujen tarpeiden pohjalta ilmaistaan, kuinka tuote voi vastata näihin tarpeisiin ja miten uusi tuote on parempi kuin muiden kilpailijoiden tuotteet. Tätä kutsutaan Markkinamahdollisuuksien artikuloinniksi. Kun halutaan jakaa laaja ja monimuotoinen

kuluttajakunta pienempiin hallittavampiin ryhmiin, joilla on samankaltaisia tarpeita tai ominaisuuksia, tehdään Markkinasegmenttien määrittäminen. Markkinasegmentointi auttaa räätälöimään markkinastrategioita ja tuoteominaisuuksia tehokkaasti kunkin segmentin erikoistarpeisiin.

Suunnittelun näkökulmasta vaiheessa nolla harkitaan tuotealustaa ja arkkitehtuuria, sekä arvioidaan uutta teknologiaa. Kun harkitaan tuotealustaa, pitää harkita, käytetäänkö jo olemassa olevaa tuotealustaa vai tehdäänkö uusi tuote täysin uudelle tuotealustalle. Tuotealustan valinta on hyvin tärkeä osa projektin alkua, koska se vaikuttaa suunnitteluun, kehitysaikaan sekä kustannuksiin. Kun tuotetta lähdetään kehittämään kokonaan uudelle alustalle voi tämä mahdollistaa tuotelinjan skaalautuvuuden ja sopeutumiskyvyn eli mukautua erilaisiin muuttuviin olosuhteisiin, tarpeisiin ja vaatimuksiin markkinoilla. Tuotteen arkkitehtuurin valinnassa käydään läpi tuotteen perusrakenne, asettelu, keskeisimmät komponentit ja alajärjestelmät. Tuotteen arkkitehtuurin luonti luo perustan suunnittelutyölle. Suunnittelun kannalta on tärkeä arvioida uusia teknologioita, joita voisi integroida tuotteeseen. Uusien teknologioiden arviointi pitää sisällään teknologiset edistysaskeleet, patentit sekä innovatiiviset ratkaisut.

Valmistus tapahtuu tuotekehityksen loppupäässä, mutta sitä on valmistettava jo vaiheessa nolla. Silloin tutkitaan, mitkä asiat voivat rajoittaa tuotannon määrää tai laatua, ja voidaanko näitä ongelmia ratkaista. Tätä kutsutaan tuotantorajoitteiden tunnistamiseksi. Lisäksi valmistusta varten laaditaan toimitusketjun strategia, johon kuuluu sisällään toimittajien valinta, varastonhallinnan ja logistiikan hallinnan määrittäminen. Tuotantorajoitteiden tunnistaminen auttaa ymmärtämään, mitkä asiat voi rajoittaa tuotantomäärää tai laatua ja miten näitä ongelmia voidaan käsitellä jo varhaisessa vaiheessa. Hyvä toimitusketjun strategian asettaminen edistää kustannustehokkuutta.

Vaiheen nolla askeleet varmistavat tuotteen elinkelpoisuuden markkinoilla, tuotannon mahdollistamisen sekä sen, että tuote tukee yrityksen strategisia tavoitteita. [3.]

## 2.2.2 Konseptin kehittäminen

Konseptin kehittämisvaiheessa tunnistetaan kohdemarkkinoiden tarpeet, joiden perusteella valitaan yksi tai useampi konsepti, jota lähdetään jatkokehittämään ja testaamaan. Konsepti kuvaa tuotteen muotoa, toimintoa ja sen ominaisuuksia. Konseptissa on liitettyä myös kilpailijoiden tuotteiden analyysi ja taloudellinen perustelu projektin varalle. Konseptin kehittäminen koostuu useammasta aktiviteetista: asiakkaan tarpeiden ja vaatimusten tunnistaminen, määrittely, konseptien generointi, konseptien valinta ja lopullinen määrittely. Aktiviteettejä ei yleensä toteuteta järjestyksessä, vaan ne voivat olla päällekkäisiä ja uuden tiedon myötä voidaan palata aiempaan aktiviteettiin. Suositus on, että tuotetta kehitetään iteroimalla eli toistamalla aktiviteetteja, kunnes saavutetaan haluttu tulos.

Ensimmäinen aktiviteetti on tunnistaa asiakkaan tarpeet ja vaatimukset. Kun tunnistetaan asiakkaan tarpeita, on tärkeä huomioida piilevät tarpeet, joita he eivät itse ole miettineet. Asiakkaan tarpeista tehdään lista tärkeimmästä vähiten tärkeään ja se annetaan kehitystiimille.

Määrittelyssä kehitystiimi kuvaa tarkasti mitä tuotteen tulee tehdä. Tavoitteet asetetaan konseptin kehittämisen alussa ja niissä huomioidaan tunnistetut konseptin rajoitteet. Tuloksena on lista teknisistä vaatimuksista, jotka tuotteen pitää täyttää.

Konseptin generoinnissa tutkitaan erilaisia konseptivaihtoehtoja, jotka voisivat täyttää asiakkaan tarpeet. Tässä vaiheessa tiimi suorittaa monipuolisen lähestymistavan, joka yhdistää ulkopuolisen tutkimuksen, luovan ongelmanratkaisun ja järjestelmällisen analyysin tiimin tuottamista ratkaisuehdotuksista. Tämän vaiheen tuloksena on monien eri konseptien lista, joista on tyypillisesti lyhyt sanallinen- ja visuaalinen kuvaus.

Konseptien valinta -vaiheessa kaikki esitetyt tuotekonseptit analysoidaan tiimin kesken ja lopputuloksena valitaan yksi lupaavin konsepti, jota lähdetään

jalostamaan eteenpäin. Tämä vaihe pitää sisällään useita iteraatioita, lisäkonseptien kehitystä ja hienosäätöä.

Konseptien testaus -vaiheessa yhtä tai muutamaan konseptia testataan ja konsepti arvioidaan tiimin ja asiakkaan kanssa. Arvioidaan täyttääkö konsepti asiakkaan vaatimukset, arvioidaan markkinapotentiaali ja täytetään mahdolliset puutteet. Jos asiakkaan palaute on erityisen huonoa, voidaan projekti joko keskeyttää tai toistaa aikaisempia vaihtoehtoja uudestaan.

Kun konseptit on valittu ja testattu, asetetaan tarkat rajoitteet tuotteelle, jotka kuvastavat asiakastarpeiden mukaista suorituskykyä. Näitä rajoitteita voi olla esimerkiksi kustannusten ja suorituskyvyn väliset kompromissit sekä teknisten mallinnuksien kautta havaitut rajoitteet. Tätä vaihetta kutsutaan lopulliseksi määrittelyksi.

Projektin suunnittelu -vaiheessa tiimi laatii yksityiskohtaisen aikataulun ja strategian kehitysajan minimointiin ja varaavat tarvittavat resurssit projektille. Vaiheen aikana laaditaan sopimuskirja, joka toimii dokumenttina sopimuksesta tiimin ja ylemmän johdon kanssa. Sopimuskirja pitää sisällään toiminta-ajatuksen, asiakkaan tarpeet, konseptin yksityiskohdat, aikataulun, projektin henkilöstön ja budjetin.

Taloudellinen analyysi -vaiheessa taloudellisen analyytikon avulla laaditaan taloudellinen malli tuotteelle. Kyseistä mallia käytetään uuden tuotteen kehitysohjelman oikeuttamiseen ja kustannusvaihtoehtojen, esimerkiksi kehitys- ja valmistuskustannukset, valintaan. Taloudellinen analyysi laaditaan yleensä aina ennen projektin alkua ja sitä muokataan projektin edetessä.

Benchmarking-aiheessa tuotekonseptia vertaillaan alan muihin kilpaileviin tuotteisiin. Ymmärrys kilpailevista tuotteista auttaa uuden tuotteen ideoinnissa ja tuotantovaiheen suunnittelussa. Kilpailukykyistä vertailuanalyysiä suoritetaan useissa tuotekehitysprosessin alkuvaiheissa. [3.]

### 2.2.3 Järjestelmätason suunnittelu

Järjestelmätason suunnitteluvaihe pitää sisällään arkkitehtuurin suunnittelun, komponenttien ja osajärjestelmien suunnittelun sekä alustavan tuotesuunnittelun. Järjestelmätason suunnittelussa ajatellaan jo tuotteen elinkaaren loppuun asti, mutta ei lukita suunnitelmaa pysyvästi. Alustavat suunnitelmat johtavat tyyppillisesti tuotteen geometriseen aseteltuun, osajärjestelmien toimintojen erittelyyn sekä tärkeimpiin kokoonpanon oletuksiin. [3.]

### 2.2.4 Yksityiskohtainen suunnittelu

Yksityiskohtainen suunnittelu on vaihe, jossa tuotteen komponenttien geometria, materiaalit, toleranssit määritellään tarkasti. Tässä vaiheessa määritellään tarkasti tuotteen arkkitehtuuri, eri komponenttivalinnat ja komponenttien toimittajat. Tarkan määrittelyn jälkeen luodaan tuotteen valmistussuunnitelma ja miten kokoonpano toteutetaan. Yksityiskohtaisen suunnittelun tuloksena on tuotantoprosessin dokumentaatio, joka sisältää tuotteen tekniset piirustukset, komponenttiedostot, kokoonpanon, ostettujen osien tekniset dokumentit ja tuotantosuunnitelman. Tässä vaiheessa voidaan saada jo melko täsmällinen arvio tuotannon kestosta ja valmistuskustannuksista. [3.]

### 2.2.5 Testaus ja hienosäätö

Testaus ja hienosäätö -vaiheessa selvitetään vastaako prototyypit suunnittelultaan ja toimivuudeltaan haluttua tuotetta. Testauksen aikana arvioidaan tuotetta ja mahdollisesti parannetaan sitä asiakkaan toiveiden mukaisesti ennen tuotannon käynnistämistä. Prototyypit voidaan lajitella alfa- tai beta-prototyypeiksi. Alfaprototyypissä on samat materiaali- ja osavalinnat kuin tuotantoon menevällä tuotteella, mutta prototyypin tuotantoprosessi ei yleensä vastaa valmiin massa-tuotetun tuotteen valmistustapaa. Beta-prototyypit vastaavat materiaali- ja osavalinnoissa tuotantovalmista tuotetta ja kyseisen prototyypin osat valmistetaan tuotannossa samoin prosessein kuin markkinoille valmis tuote. Beta-prototyyppejä arvioidaan tarkasti sisäisesti ja testataan asiakkaan ympäristössä Testaus-

ja hienosäätövaiheessa on tärkeää selvittää täyttääkö prototyyppi asiakkaan vaatimukset ja odotukset. Jos asiakkaan toiveet ei täyty, voi vielä tässä vaiheessa muuttaa tuotteen suunnittelua. [3.]

## 2.2.6 Tuotannon lisääminen

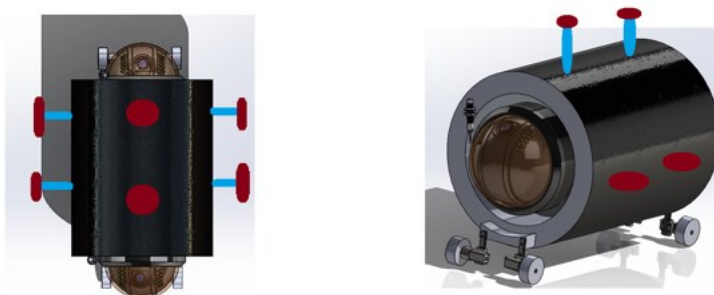
Tuotannon lisääminen -vaiheessa tuote valmistetaan käyttäen koko tuotantojärjestelmää. Tämän vaiheen tarkoitus on kouluttaa työvoimaa ja tunnistaa mahdolliset ongelmat eri tuotantovaiheen prosesseissa. Valmistetut tuotteet viedään asiakkaalle ja ne arvioidaan perusteellisesti. Jos tuotteessa esiintyy puutteita, ne korjataan. Tämän vaiheen jälkeen siirrytään suoraan kokonaisvaltaiseen tuotantoon ja tuote on valmis julkaistavaksi. Kun tuote on julkaistu, arvioidaan tuote kaupallisesta ja teknisestä näkökulmasta katsoen. Projektin arvioinnin perusteella tunnistetaan keinot tulevien projektien kehitysprosessin parantamiseksi. [3.]

# 3 Projektin lähtökohdat ja vaatimukset

## 3.1 Lähtötilanne

Projekti ei lähtenyt liikkeelle puhtaalta pöydältä. Osana Big Flash -hanketta oli yritykselle tehty kehitysprojekti konenäöstä, josta kirjoitettiin yksi opinnäytetyö [4 ; 5]. Oppilaat olivat tehneet myös karkean konseptin viemärirobotikonseptista osana Simulointi käyttöjen ja ohjauksen suunnittelussa -kurssia. Lähtökohtana oli jatkaa konseptin kehitystä eteenpäin eli tavoitteena oli luoda toteutuskelpoinen viemärirobotikonsepti. Edellinen ryhmä kehitti kolme eri konseptia, joista lopulta mallinnettiin yksi. Mallinnetussa konseptissa ominaisuuksina oli robotin korkeudensäätö lineaarijohteilla, joka auttaa liikkumaan esteiden läpi, kaksi kappaletta paikannussensoreita, jotka laskevat keskipisteen paikannettavaan kohtaan, 360 kamera valonlähteellä ohjauksen ja lukituspannan paikoittamisen avuksi, sähköllä ohjattava paineilman poisto ja paikkausputken tasapainotus vesiliukoisilla painoilla. Projektin lopussa ryhmä tuli siihen lopputulokseen, että 2 eri konseptin ominaisuuksia yhdistetään ja alla olevan kuvan konseptia

lähdetään jatkokehittämään. Tässä konseptissa tavoitteena olisi poistaa paineilma toleranssiongelmien vuoksi ja korvata paineilmalla toimiva työkalu sylindereillä, joiden päässä on imukupit (Kuva 2).



Kuva 2. Viemärirobottikonsepti Syksy 2023.

Tuotekehitysprojektin alussa kävimme läpi edellisen ryhmän konseptin Metropolian projekti-insinööri Daniel Korhosen ja edellisen ryhmän oppilaan kanssa. Palaverin lopputuloksena saimme vastauksia edellisen konseptin toimintaperiaatteen ja mitä kysymyksiä sekä ehdotuksia viemme Underground City Oy:n tiimin kanssa pidettävään aloituspalaveriin.

Projektin aloituspalaveri pidettiin Riihimäellä 23. helmikuuta 2024. Aloituspalaveriin osallistui minun lisäksi Metropolian henkilökunnasta yliopettaja ja projekti-päällikkö Antti Liljaniemi, projekti-insinööri Daniel Korhonen ja Underground City Oy:n tiimi.

Aloituspalaverissa käytiin läpi Underground City Oy:n liiketoimintamalli ja heidän kohtaamat ongelmat viemärirobottiyhdistelmän käytössä. Kävimme läpi myös minun roolini opinnäytetyön tekijänä. Palaverissa mietittiin, mitä ongelmia on mahdollista ratkaista huomioon ottaen kustannustehokkuuden ja teknisen toteutuskelpoisuuden. Kävimme läpi myös aikaisemman ryhmän konseptin. Yrityksen mielestä heidän suurimmat ongelmansa viemärirobottiyhdistelmässä on yhdistelmän kokonaispituus, joka vaikuttaa haitallisesti robotin mobiilisuuteen ja sen sijoitukseen viemäriputkeen sekä että robotin kameran visuaalinen kenttä

on liian rajoittunut. Työkalukärryn suurimmat ongelmat olivat pannan tiiveyden mittaaminen ja työkalun paikoitukseen liittyvät ongelmat. Paikoituksessa operaattori ohjaa robottia manuaalisesti yhden kameran avulla.

### 3.2 Asiakkaan käytössä oleva työkalukärry-robotti-yhdistelmä

Asiakkaalla on työkalukärryjä, joiden avulla pystyy kiinnittämään korjauspantoja pääviemäriputkiin. Viemäriputkien sisähalkaisijoiden vaihteluväli on 150–800 mm. Työkalukärryjen runko on valmistettu metallista ja runkoon kiinnitetty laajeneva pneumaattinen painelihas on valmistettu kumista (Kuva 3). Asiakas on käyttänyt työkalua vetorobotin avulla, jossa on CCTV-kamera (Kuva 4).



Kuva 3. Työkalukärryn laajentunut painelihas.



Kuva 4. Yhdistelmärobotin alas lasku viemäriputkeen

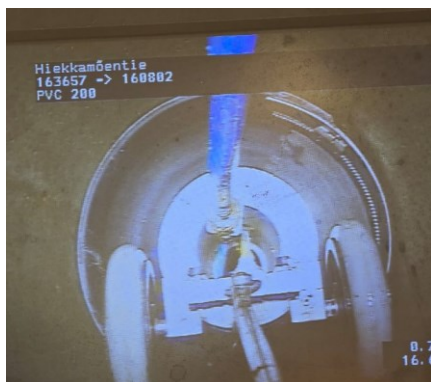
Korjaustoimenpide alkaa, kun operaattori asentaa korjauspannan painelihaksen ympärille talkin avulla (Kuva 5). Painelihakseen lisätään juuri tarpeeksi painetta (0,5 bar) että panta pysyy paikoillaan, mutta niin että pannan halkaisija ei vielä muutu.



Kuva 5. Korjauspanta ja työkalukärry.

Seuraavaksi yhdistetään tarkastusrobotti ja työkalukärry toisiinsa ja yhdistelmä lasketaan alas viemäriputkeen. Kun työkalukärry-robotti yhdistelmä on laskettu

alas viemäriputkeen onnistuneesti, voi operaattori lähteä liikuttamaan yhdistelmää kauko-ohjaimen avulla. Kun työkalukärry-robotti yhdistelmä saapuu korjaustoimenpidettä vaativan halkeaman kohdalle, lisää operaattori painetta paineilmalihakseen. Ilmanpainetta lisätessä korjauspanta laajenee ja lukittuu viemäriputken sisäpintaan (Kuva 6).



Kuva 6. Korjaustoimenpide viemäriputkessa.

Korjauspanta toimii kuin käänteinen nippuside, eli sisähalkaisijan laajentuessa se ei enää supistu alkuperäiseen pienempään muotoon (Kuva 7). Toimenpiteen ansiosta vuotokohta saadaan tukittua onnistuneesti.



Kuva 7. Korjauspanta.

Tämän yhdistelmän suurimmat ongelmat ovat robotin yhdistelmän pituus ja kömpelyys, pannan paikoitukseen ja asettamiseen liittyvät ongelmat sekä robotin alas laskentaan liittyvät ongelmat.

Työkalukärry-robotti-yhdistelmän kokonaispituus on 1,5 metriä, mikä tekee sen alas laskemisesta vaikeaa. Monesti toimenpiteeseen tarvitaan 2 henkilöä, toisen alas viemäriputken tasolle ja toisen maantasolle, jotta yhdistelmä saadaan sijoitettua viemäriputkeen onnistuneesti. Yhdistelmä kaatuu myös useasti sen 2-osaisuuden sekä sen kokonaispituuden takia. Yhdistelmän kaatuessa on se lähes mahdotonta kääntää oikeinpäin maantasolta operoiden.

### 3.3 Viemärirobottikonseptin tarpeet ja vaatimukset

Viemärirobottikonseptin tulisi pystyä liikkumaan viemäriputkessa eteenpäin ja taaksepäin sulavasti ilman, että robotti jää jumiin tai kaatuu kyljelleen. Robotin tulee myös saavuttaa tarpeeksi nopea kulkemisnopeus ja olla helposti ohjattavissa. Robotin tulisi pystyä myös reaaliajassa kuvaamaan korjausoperaatiota, niin että panta saadaan paikoitettua oikein, jotta vältetään uudelta korjaustoimenpiteeltä. Robotin komponenttien tulisi kestää hankalia viemäriolosuhteita. Viemäriolosuhteissa voi esiintyä mm. Rikkivetyä ( $H_2S$ ), Hiilidioksidia ( $CO_2$ ), Ammoniakki ( $NH_3$ ), rasvoja ja öljyjä sekä muita biohajoavia materiaaleja, jotka aiheuttavat korroosiota ja mahdollisesti syövyttävät erilaisia materiaaleja. Robotin tulee myös olla turvallinen ja helposti huollettavissa. Robotin alas laskenta viemäriin tulisi myös olla helppo ja tehtävissä yhden henkilön voimin. Tarpeena on suunnitella pitkäikäinen, yksinkertainen, kustannustehokas ja laadukas tuote.

## 4 Konseptisuunnittelu

### 4.1 Suunnitteluprosessi ja menetelmät

Suunnittelu lähti liikkeelle asiakkaan tarpeiden ja tavoitteiden määrittelystä, jota kuvattiin aiemmassa luvussa. Kun tarpeet ja tavoitteet oli määritelty, lähdettiin selvittämään mitä aikaisempia tutkimuksia viemärirobotiikkaan liittyen on tehty,

mitä ongelmia on kohdattu ja mitä ratkaisuja näihin on keksitty. Tutkimuksen tuloksena kirjoitin 25 sivua pitkän ”State of Art” -katsauksen, joka kuvaa viemärirobotiikan tekniikan ja tietämyksen korkeinta kehitysastetta. ”State of Art” pitää sisällään mm. viemärirobotiikan markkinakatsauksen, aikaisempien tutkimusten läpikäynnin, Teknologiat ja metodit ja haasteet sekä puutteet. Tutkimustyön tuloksena oli hyvä pohja lähteä kehittämään viemärirobotikonseptia asiakkaan tarpeisiin nähden. ”State of Art” katsausta voidaan pitää osana benchmark -vaihetta. Seuraavassa kappaleessa käydään läpi tämä katsaus tiivistettynä.

Ideointi- ja konseptivaihtoehtojen kehittämisvaiheessa menetelmänä oli piirtää hahmotelmat paperille. Tässä vaiheessa tein paljon tutkimustyötä ja komponenttivalintaa. Viikoittaisissa palavereissa projekti-insinööri Daniel Korhosen kanssa ideat ja niiden kehittely olivat jatkuvassa liikkeessä. Uusia ajatuksia joko unohdettiin nopeasti tai ne otettiin mukaan konseptin kehitykseen. Paperille piirretyt hahmotelmat konkretisoituivat 3D-CAD-ohjelmistossa.

Kaikki viemärirobotin osat ja työkalukärry mallinnettiin SolidWorks 3D-CAD ohjelmistolla BLDC-moottoreita, moottorinohjaukskortteja ja kaapelin liittimiä lukuun ottamatta, jotka ladattiin valmistajan sivuilta tai Grabcad-mallinnuskirjastosta. 3D-CAD ohjelmistossa hyödynnettiin mallinnus- ja kokoonpanotyökaluja.

Erilaisten teknisten laskelmien kuten moottorin ja alennusvaihteiston mitoittamiseen sekä budjetointilaskelmiin käytettiin Microsoft Excel -ohjelmistoa.

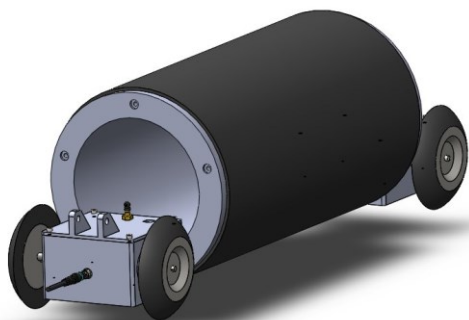
## 4.2 State of Art

”State of Art” katsauksen tarkoituksena on antaa suunnitteluprosessille hyvä tietopohja tai vaihtoehtoisesti löytää ratkaisu markkinoilta asiakkaan ongelmiin. Ensimmäinen vaihe oli selvittää mitä eri ongelmia kohdataan viemärihuollossa ja mitä työkaluja huoltotoimenpiteissä hyödynnetään nykypäivänä. Kun alkoi selkeytyä viemärihuollon nykytila, siirryttiin selvittämään mitä eri ratkaisuja on tarjolla markkinoilla, jotka voisivat tarjota ratkaisun asiakkaan ongelmiin. Asiakkaan tarpeet kohdistuivat vuotavien viemäriputkien korjaukseen sekä

tiivistämiseen. Tutkimusvaiheessa luettiin paljon tutkimuksia sekä artikkeleita viemärirobottikasta ja viemärihuollosta. Selvitettiin, mihin tarkoituksiin ja minkälaisia viemärirobotteja on kehitetty sekä mitä ratkaisuja markkinoilta löytyy. Vertailtiin useamman kilpailevan yrityksen viemärirobotteja ja niiden ominaisuuksia. Innovatiivisia ratkaisuja viemäriverkostojen ylläpitoon tarjoavat esimerkiksi Vortex Companies ja IMS Robotics Group [6 ; 7]. Robotteja on kehitetty eri tarkoituksiin kuten viemäriverkoston tarkastukseen, korjaukseen ja puhdistukseen sekä huoltotoimenpiteisiin. Tutkittiin mitä eri liikkumistapoja on hyödynnetty viemärobotiikassa ja mitkä niiden hyödyt sekä haitat ovat. Vertailussa oli mukana 4-jalkaiset robotit, sylinterimäiset robotit ja telaketjuilla kulkevat ”crawler” robotit sekä 4-pyörällä liikkuvat robotit [8 ; 9]. Katsauksessa selvitettiin myös mitä eri navigointi- ja ohjausjärjestelmiä hyödynnetään viemärirobotiikassa. ”State of Art” katsaus esitettiin asiakkaalle, mutta mikään markkinoilla olevista viemärirobotteista ei vastannut sellaisenaan asiakkaan tarpeisiin. Katsauksesta oli kuitenkin erittäin paljon hyötyä, koska sen avulla saatiin laaja kuva siitä mitä ratkaisuja on tarjolla markkinoilla, mitä ratkaisuja voidaan nähdä lähitulevaisuudessa markkinoilla, sekä mitä kilpailevien yritysten robottien ominaisuuksia voimme hyödyntää uuden viemärirobotin suunnittelussa.

#### 4.3 Konseptien arviointi ja valinta

Underground City Oy:n tarpeiden ja vaatimusten perusteella päädyttiin kolmeen eri konseptivaihtoehtoon. Ensimmäinen konseptivaihtoehto oli lähteä kehittämään kokonaan uusi viemärirobottikonsepti (Kuva 8) (Kuva 9). Ensimmäisen vaihtoehdon hyödyt ovat aiempaa robottiyhdistelmää parempi liikkuvuus, työtehokkuuden lisääntyminen ja että operaattorin ei tarvitse mennä asentamaan robottia alas viemäriputkeen, mikä vähentää tapaturmariskiä. Konseptissa on myös irrotettavat vetoyksiköt, mikä mahdollistaa robotin käytön monien halkaisijaltaan erikokoisten pneumaattisesti toimivien työkalujen käytön.



Kuva 8. Viemärobottikonsepti.



Kuva 9. Viemärobottikonsepti sivuperspektiivi.

Toinen konseptivaihtoehto oli lähteä suunnittelemaan kokonaan uudenlainen työkalukärry. Toisessa konseptivaihtoehdossa oli ideana lähteä selvittämään, miten nykyinen työkalu on valmistettu, mitkä sen valmistuskustannukset ovat ja onko keksinnössä patenteja (IPR). Patentit voisivat mahdollisesti estää tuotteen valmistuksen tuotannossa. Toisen konseptivaihtoehdon hyödyt ovat mahdolliset taloudelliset hyödyt yritykselle (Kuva 10).



Kuva 10. Käytössä oleva työkalukärry.

Kolmas konseptivaihtoehto oli työkalukärryn mekaanisen toimivuuden kehittäminen. Kolmannessa konseptivaihtoehdossa on ideana keskittyä työkalukärryn mekaanisen toimivuuden kehittämiseen mikä pitää sisällään paineilmalihakseen menevien venttiilien syöttöjen ja paineohjauksen optimoinnin. Tässä vaihtoehdossa keskityttäisiin myös parantamaan paikkauspannan kiinnitystä työkalukärryyn. Kolmannen konseptivaihtoehdon hyödyt ovat putken korjaustoimenpiteen sujuvuuden parantaminen ja pannan jumitustilanteiden vähentäminen.

Konseptin valinnassa päätösvastuu on asiakkaalla. Jokainen konseptivaihtoehto oli hyvin harkittu ja toteutuskelpoinen. Asiakas päätyi valitsemaan konseptin 1 eli uuden viemärobotin kehittämisen. Päätöksen taustalla oli se, että konsepti 1 täytti parhaiten yrityksen tarpeet ja edusti heidän ideologiaansa.

Pidimme aikaisemman Simulointi käyttöjen ja ohjauksen suunnittelussa -kurssilaisten viemärirobotikonseptia hyvänä lähtökohtana. Kuitenkin katsomme, että paineilman korvaaminen sähköisillä sylintereillä ei ole suositeltavaa. Sylinterien tekemien plus-liikkeiden epätasaisesti kohdistuva voima pannaan sisäpintaan voisi vaurioittaa ja vääntää pantaa. Sylinterien lisäys myös vaatisi enemmän investointia vanhan hyvän ratkaisun tilalle, tästä syystä jätimme kyseisen ominaisuuden pois uudesta konseptista. Päätimme, että pidämme Underground Cityn käytössä olevan työkalukärryn ja lähdemme rakentamaan uutta konseptia sen ympärille. Aikaisemman ryhmän konsepti antoi hyvän lähtökohdan projektin alkuvaiheessa, mutta ensimmäisen yhteisen palaverin Underground City Oy:n tiimin jälkeen päätimme aloittaa uuden konseptin kehittämisen puhtaalta pöydältä.

## **5 Tekninen suunnittelu**

Teknisen suunnittelun vaihe on keskeinen osa konseptin 1 eli viemärirobotin kehittämistä. Tekninen suunnittelu mahdollistaa muuttamaan teoreettiset ideat käytännön ratkaisuksi. Suunnittelussa keskitymme robotin keskeisimpien komponenttien ja materiaalien valintaan ja suunnitteluun. Erityisesti keskitymme vetoyksikön suunnitteluun. Erityistä huomiota saa komponentit kuten moottorit, moottorinohjaukset ja alennusvaihteisto, jotka mahdollistavat robotin sujuvan liikkumisen, renkaiden, akselien ja pyörännavan lisäksi. Suojakotelon suunnittelu puolestaan keskittyy vetoyksikön komponenttien suojaamiseen viemäriolosuhteilta. Käsittelemme myös datan- ja virransiirron sekä liittimien valintaa, mikä on olennaista luotettavan ja tehokkaan toiminnan varmistamiseksi. Moottorin, moottorin ohjauksen ja alennusvaihteiston valinta.

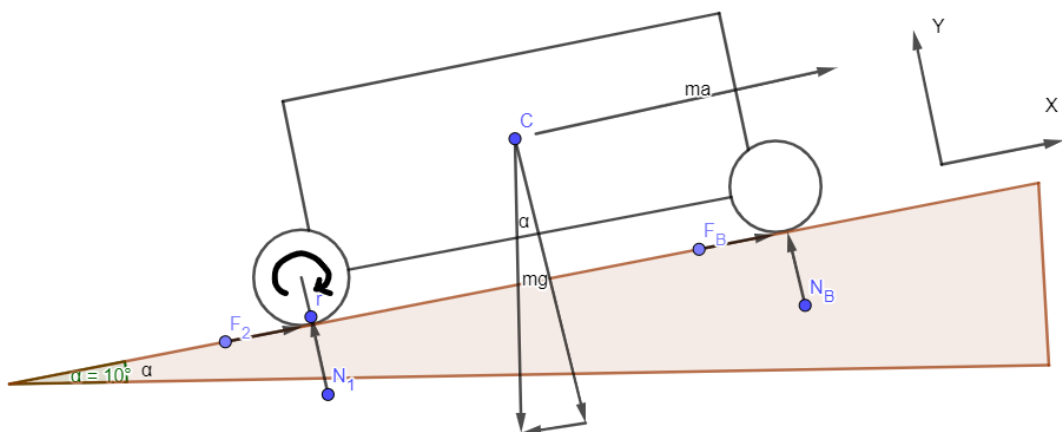
### **5.1 Moottorin, moottorin ohjauksen ja alennusvaihteiston valinta**

Moottorivalinnassa jouduttiin ottamaan huomioon useita eri tekijöitä kuten robotin kokonaispaino, sen haluttu maksiminopeus, ympäristötekijät ja vääntömomentin tarve. Todellisuudessa valinnassa pitää huomioida lukuisia muitakin seikkoja, mutta näistä on hyvä lähteä liikkeelle.

Konseptiin valittiin yhteensä 4 eri moottoria, koska se mahdollistaa differentiaaliohjauksen ja 4 moottoria tuottaa paljon vääntöä, mikä mahdollistaa painavan robotin liikkumisen viemäriputkistoissa. Yhdessä irrotettavassa vetoyksikössä on 2 eri sähkömoottoria.

Sähkömoottorityypin valinnassa huomioimme moottorin tarpeet ja parhaaksi ratkaisuksi muodostui harjaton DC-moottori (BLDC-moottori). Koska BLDC-moottoreissa ei ole harjoja, jotka kuluisivat käytössä, ne kestävät huomattavasti paremmin kuin normaalit DC-moottorit. BLDC-moottorin muita mainitsemisen arvoisia hyötyjä ovat mm. korkea energiatehokkuus, korkea vääntömomentti alhaisilla kierrosluvuilla sekä vähäinen lämmöntuotto.

Moottorin valinnassa jouduimme selvittämään ensimmäiseksi robotin halutun liikkumisnopeuden ja painon. Kyseiset tiedot saimme, kun kävimme katsomassa korjausoperaatiota Sipoossa, jossa kokenut viemärirobotin operaattori kertoi meille nykyisen robotin ominaisuuksista ja sen ongelmista. Tulimme lopputulokseen, että optimaalisin nopeus robottikonseptille on 0,4 m/s. Robottikonseptin arvioitu paino on n.30 kg. Näillä tiedoilla pääsimme alkuun moottorien ja vaihteiston mitoituksessa. Oletetaan, että kitkakerroin on 1 ja että robotti on takavetoinen (Kuva 11).



Kuva 11. Vapaakappalekuva robottiin vaikuttavista voimista ylämäessä.

Ensimmäiseksi laskemme moottorin tarvittavan väännön  $T$ . Tuntemattomia muuttujia vapaakappalekuvassa ovat normaalivoimat  $N_A$ ,  $N_B$ ,  $F_A$ . Tarkastellaan kolmea eri yhtälöä. Ensimmäinen yhtälö kuvaa koordinaatiston x-suuntaisia resultanttivoimia (Kaava 1).

$$\sum F_x = ma_x \quad (1)$$

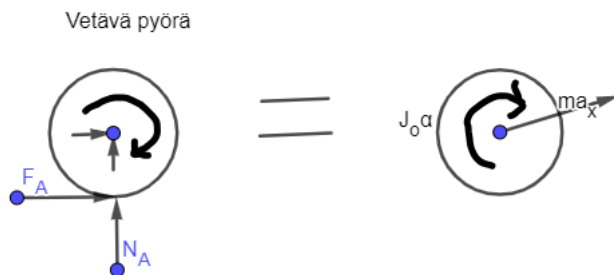
Toinen yhtälö kuvaa koordinaatiston y-suuntaisia resultanttivoimia (Kaava 2).

$$\sum F_y = ma_y = 0 \quad (2)$$

Kolmas yhtälö kuvaa vapaakappalekuvan momenttien summaa pisteeseen  $c$  nähden.  $J_O$  on vetävän pyörän hitausmomentti ja  $\alpha$  kulmanopeus (Kaava 3).

$$M_c = J_O \alpha = 0 \quad (3)$$

Tarkastellaan vetävän pyörän voimia (kuva 12).



Kuva 12. Vetävän pyörän vapaakappalekuva.

Saadaan pääteltyä vetävän pyörän momenttiyhtälö (kaava 4).

$$F_A - T = -J_O \alpha \quad (4)$$

Tarkastellaan myös vetävän pyörään vaikuttavia voimia ja saadaan yhtälö kaikista siihen vaikuttavista voimista (kaava 5).

$$F_A - mgsin\alpha = ma_x \quad (5)$$

Oletetaan, että hitausmomentti  $J_O$  on pieni. Yhdistämällä vetävän pyörän vaikuttavien voimien ja momenttien yhtälöt saamme ratkaistua moottorin tarvittavan väännön  $T$  (kaava 6). Otetaan laskussa huomioon mahdollinen ajopinnan kaltevuus  $\alpha$ , joka on maksimissaan 10 astetta ja kiihtyvyys  $a$ , joka kuvastaa kiihtyvyyttä maksiminopeuteen. Kaavaan sijoitetaan myös pyörän säde  $r$ , joka on 0,06 m ja gravitaatio  $g=9,81 \text{ m/s}^2$  (kaava 6). [10.]

$$T = m(a + gsin\alpha)r \quad (6)$$

Laskutoimituksen ulostulona saadaan moottoreiden kokonaismomentin tarve. Koska valitsemme 4 moottoria, voimme jakaa ulostulon 4:llä, jolloin tarvitsemme 0,75 Nm vääntöä per moottori.

Määrittelemme kuinka nopeasti moottorin pitää pyöriä (kaava 7). [10.]

$$\text{Revolutions per Minute (rpm)} = \frac{v \times 60s}{2\pi \times r} \quad (7)$$

Ulostulona saamme pyöristettynä 63,66 rpm.

Lopulta määrittelemme, kuinka paljon tehoa moottoreiden on tarjottava ja käytämme yhtälöä (kaava 8). [10.]

$$P = T \times \omega \quad (8)$$

Missä  $\omega$  on kulmanopeus. Kulmanopeus mitataan radiaaneina sekunneissa. Ulostulona saamme kulmanopeudeksi 6,7 radiaania sekunnissa ja tehoksi 20 Wattia tai 0,027 hevosvoimaa, joka jaetaan neljällä ja saamme 0,00672 hp tehoa per moottori.

Lasketut arvot pätevät ideaalimaailmassa, mutta todellisuudessa pitää huomioida häviöt DC-moottorissa ja vaihteistossa. Oletetaan, että häviöt ovat 50 % tai suuremmat. Valitaan teholle kaksinkertainen varmuuskerroin, jotta moottori toimii varmasti halutulla tavalla. Ideaalimoottorissa tulisi olla 1500mNm vääntöä ja moottorin kierrosluvun kuormalla tulisi olla 64 rpm.

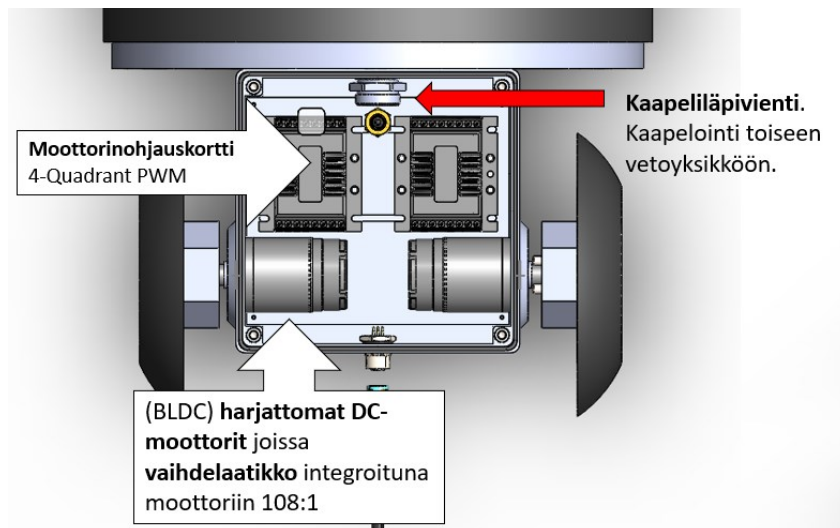
Kyseisillä arvoilla ei löydy tarpeeksi pientä BLDC-moottoria, joka mahtuisi kotelon sisälle. Valitsemme BLDC-moottorit, joissa on sovitettuna vaihdelaatikko. Vaihdelaatikon tehtävänä on lisätä moottorin vääntöä. Vaihdelaatikon lisääminen tiputtaa moottorin kierroslukua.

Kun valitaan DC-moottoreita mobiilirobottiin, on tärkeää ymmärtää Tehon, Virran ja Jännitteen suhdetta. Tässä tapauksessa robotti painaa kymmeniä kilogrammoja, jolloin joko virran- tai jännitteen tarve on suurta. Tämä suuren virran- tai jännitteen tarve tulee huomioida liittimien, moottorinohjauskortin ja muiden komponenttien valinnassa (Kaava 9). [10.]

$$P = V \times I \quad (9)$$

Moottorinohjauskortiksi valikoitui nelikvadranttinen PWM-moottorinohjauskortti (kuva 13). Kyseinen moottorinohjauskortti mahdollistaa moottorin suunnanvaihdon ja aktiivisen jarrutuksen, mikä mahdollistaa viemärobotin tarkan paikoittamisen ja sujuvan liikkumisen viemäriputkessa. Moottorinohjauskortti tukee regeneratiivista jarrutusta, missä moottorista saatava energia hidastettaessa tai kuormien laskiessa saatava energia syötetään takaisin virtalähteeseen, parantaen energiatehokkuutta.

Valitsin alustavasti moottorit ja saman valmistajan moottorinohjauskortit konseptiin. Markkinoilla on tarjolla suuri määrä erilaisia DC-moottoreita, ja siksi otimme eri jälleenmyyjiin yhteyttä. Neuvottelut ovat vielä käynnissä ja lopullista moottoria ja moottorinohjauskorttia ei ole vielä valittu.

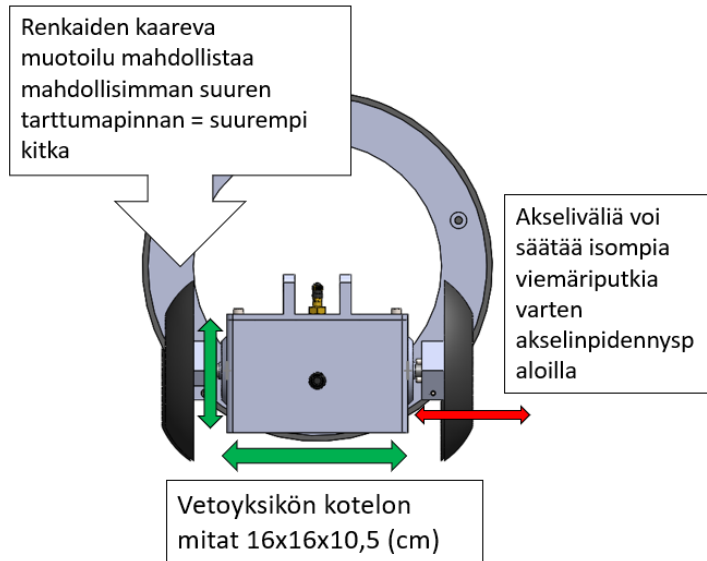


Kuva 13. BLDC-moottorit ja moottorinohjauk kortit mallinnettuna.

## 5.2 Renkaiden, akselien pidennyspalojen ja pyörännavan suunnittelu

Renkaiden, renkaiden adaptereiden ja pyörännavan suunnittelussa otettiin vahvasti inspiraatiota muilta viemärirobottien valmistajilta. Komponentit on mallinnettu SolidWorks-ohjelmistolla.

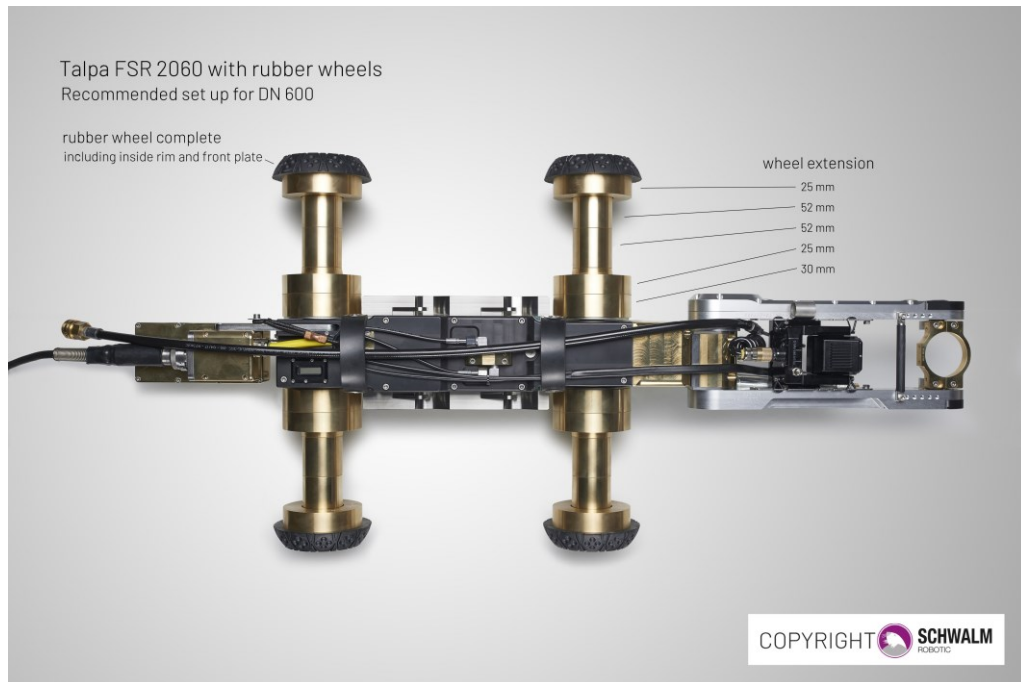
Yritykset, jotka ovat vuosikymmenien tuotekehitystyön tuloksena valmistaneet viemärien tarkastus- ja kunnostusrobotteja ovat kaikki päätyneet renkaiden osalta melko samantyyppiseen ratkaisuun, missä renkaissa on erikoismuotoiltu ulkoreuna, joka on mukautettu putken halkaisijalle, mikä tarjoaa laajan kosketusalueen putken seinämään (Kuva 14).



Kuva 14. Renkaiden muotoilu ja ominaisuudet.

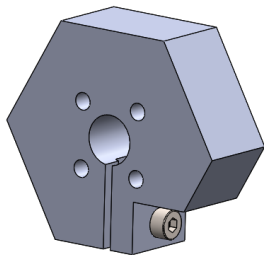
Renkaan keskiön materiaalivalinta on ruostumaton teräs RST. Renkaan kumi-  
osuuden materiaalivalinnaksi paras vaihtoehto on HNBR-kumimateriaali. HNBR  
valikoitui parhaaksi valinnaksi sen korkean kemikaalienkestävyyden, lämmön-  
kestävyyden, kulutuksenkestävyyden, hyvän mekaanisen lujuuden ja joustavuus-  
den omaisuuksien perusteella. HNBR on kustannuksiltaan halvempi valinta ver-  
rattuna esimerkiksi fluorikumiin (FKM), joka osui valinnaksi suojakotelon tiivis-  
teissä. [11.]

Viemärirobotissa pyörien akselin pituutta on tarpeellista muuttaa, kun robotti  
operoi sisähalkaisijaltaan isommissa viemäriputkissa. Tähän ongelmaan ratkai-  
suna on akselien pidennyspalat. Pidennyspalojen ansiosta viemärirobotin pito  
ja stabiilisuus säilyy erikokoisissa viemäriputkissa. Inspiraationa valmistajan  
Schwalm Robotics -akselin pidennyspaloista on konseptiin tarkoitukseen valmistaa  
samanlaiseen tarkoitukseen soveltuvat komponentit (Kuva 14).

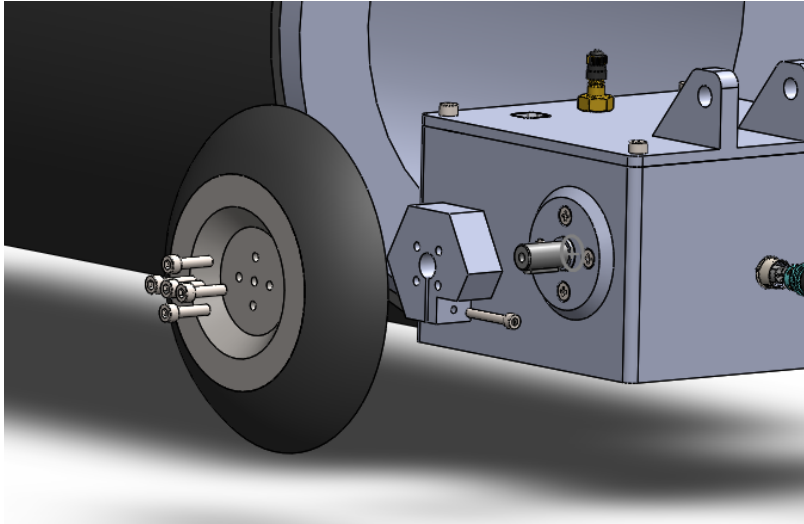


Kuva 15. Schwalm Robotics -akselin pidennyspalat [12].

Pyörännavan tarkoitus on yhdistää robotin pyörä ja sen akseli toisiinsa. Pyörännava kiinnittyy akseliin (Kuva 16). Pyörännava kiinnittyy moottorin akseliin yhdellä ja renkaaseen neljällä kappaleella M4-ruuvilla (Kuva 17).



Kuva 16. Pyörännava.



Kuva 17. Rengas, ruuvit, pyörännapa. Räjätyskuva.

Kyseiset komponentit ovat kallis valmistaa, joten on järkevämpää yrittää löytää markkinoilta moottorin akseliin sopivia komponentteja. Markkinatutkimukseni perusteella sopivia pyörännapoja löytyy tarkoitukseemme. Jos asiakas haluaa putken halkaisijalle mukautetut renkaat ja niihin akselinpidennyspalat tulee nämä todennäköisesti valmistaa itse.

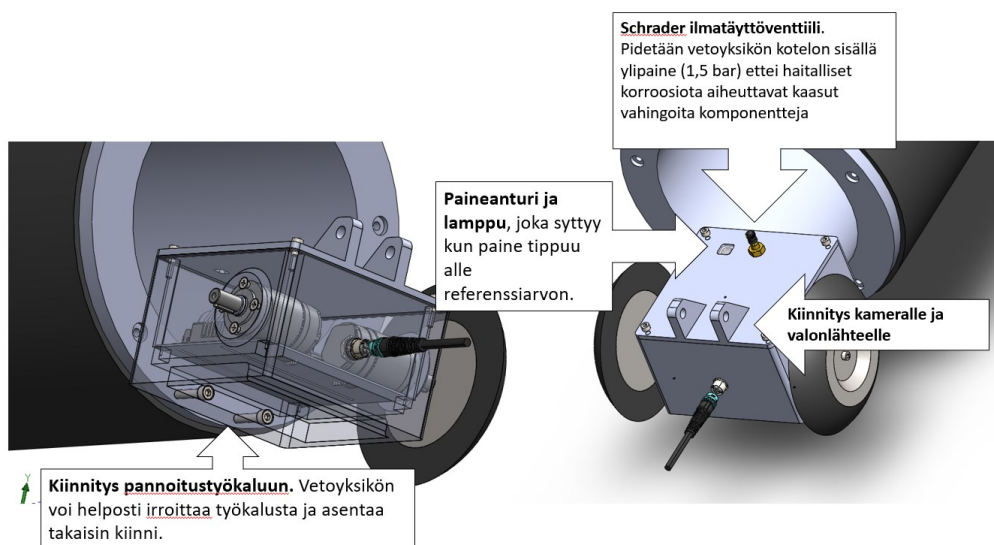
### 5.3 Suojakotelon suunnittelu

Suojakotelon suunnittelussa on huomioitava siihen kohdistuvat tarpeet ja vaatimukset. Suojakotelon materiaalin tulee olla korroosion ja syöpymisen kestävä viemäriolosuhteissa. Suojakotelon tulee myös olla vesi- ja pölytiivis ja olla helpposti valmistettavissa.

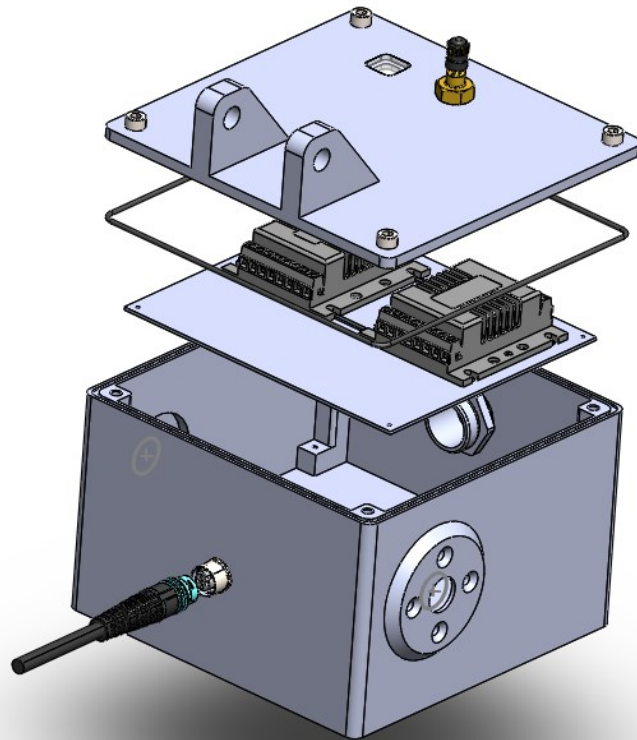
Suojakotelon suunnittelu alkoi robotin muiden komponenttien mittojen keräämisestä tai arvioimisesta. Arvio suojakotelon koosta selkeytyi, kun piirsin ja hahmottelin komponentit paperille mittoineen. Komponenttien sijoittelussa huomioin turvavälin muihin komponentteihin, ylläpidon tarpeet, mahdolliset muutokset komponenttivalinnoissa sekä johtojen ja kaapelien asetteluun.

Koska vetoyksikön huoltotoimenpiteiden ja muutosten tulisi olla vaivattomia, suunniteltiin erikseen kiinnitettävän 1,2 millimetrin paksuisen aluslevyn komponenttien kiinnitykseen suojakotelon pohjalle. Tämä aluslevy pitää sisällään reiät ja kiskot komponenttien kiinnitykseen. Aluslevy kiinnitetään Suojakoteloon 4 kappaleella M2 ruuveilla. Suojakotelossa on kierteet näille ruuveille. Alumiininen aluslevy on halpa ja reiät sekä kiskot on helppo työstää laserleikkurilla.

Suojakotelon alustava materiaalivalinta on ruostumaton teräs ja erityisesti korkean kromi- ja molybdeenipitoisuuden omaava ruostumaton teräslaji AISI 316 koitui parhaaksi valinnaksi sen korroosion kestävyyn takia. Suojakotelo on jaettu kahteen osaan, suojakotelon alaosaan ja sen kanteen. Nämä kaksi kappaletta kiinnitetään toisiinsa neljällä M5-ruuvilla. Suojakotelon kannessa on upotus suojalasille, Schrader-ilmatäyttöventtiilille ja alustava kiinnike kameralle. Suojakotelon alaosa kiinnitetään ruuveilla työkalussa valmiiksi oleviin kierteellisiin reikiin (Kuva 18) (Kuva 19).



Kuva 18. Suojakotelon ominaisuudet



Kuva 19. Suojakotelo. Räjätyskuva.

Koska viemäriverkostoissa on paljon haitallisia korroosiota aiheuttavia kaasuja, tulee suojakotelo olla ylipaineistettu n. 1,5 baarilla. Ylipaineeksi riittää vain n. 50 Pascalia yli ilman absoluuttisen paineen pitääkseen haitalliset kaasut poissa. Schrader-ilmatäyttöventtiilillä saadaan pidettyä ylipaine kotelon sisällä. Koteloon lisätään vetyä sen kemiallisten ominaisuuksien takia. Vetyä varastoidaan kaasupullossa, josta vetyä voidaan lisätä venttiiliin kautta koteloon. Vastaavanlaiset systeemit eivät ole kuitenkaan aivan ilmatiiviitä ja paine pääsee mahdollisesti laskemaan pidemmällä ajanjaksolla. Tähän ongelmaan ratkaisuna on paineanurin lisääminen kotelon sisälle ja led-valo, joka syttyy, kun paine menee viitearvon alapuolelle esim. 1,2 bar. Led valo näkyy kotelon kannessa olevan suojalasin läpi, joka ilmoittaa operaattorille selkeästi, että pitää lisätä vetyä venttiiliin kautta suojakoteloon n. 1,5 baariin asti. Suojakotelon pitää tiiviinä suojakotelon alaosan ja suojakotelon kannen välissä oleva kuminen O-rengas. Kannessa ja

suojakotelossa on urat o-renkaan sijoitusta varten [13]. O-renkaan materiaalivalinta on Viton fluorihilikumi. Viemäriputkissa olevat kemikaalit huomioon ottaen antaa Viton (FKM) laajan kemiallisen kestävyuden näitä aineita vastaan. Viton on tunnettu sen korkeasta kemiallisesta kestävydestä, lämmönkestävyydestä ja hyvästä mekaanisesta kestävydestä.

#### 5.4 Datan- ja virransiirto sekä liittimien valinta

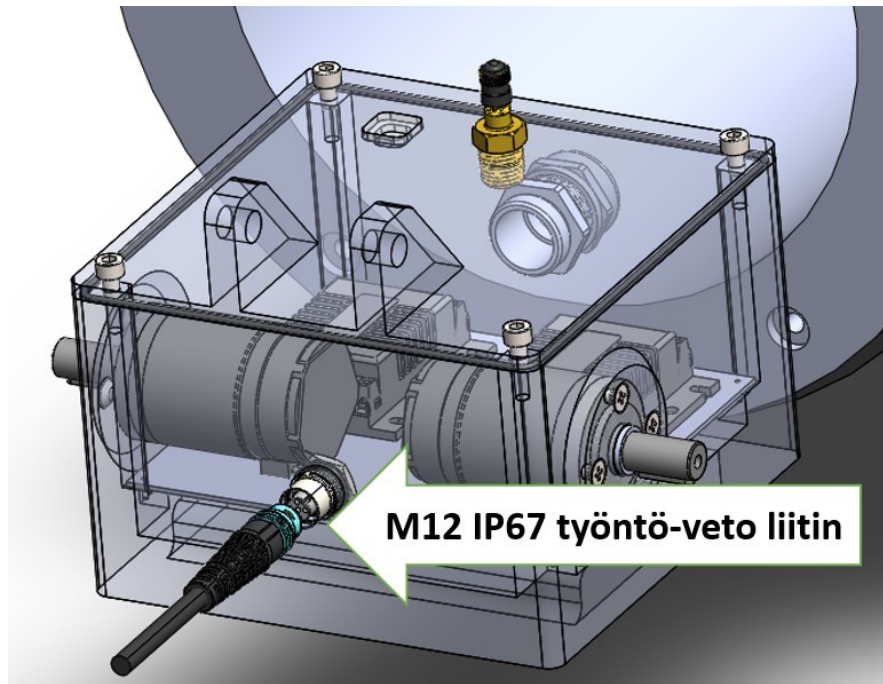
Robotin liittimen valinnassa asiakkaalla oli toiveena, että data ja virta siirtyy kaapelia pitkin langattoman vaihtoehdon sijaan. Mobiilirobotti akkupaketilla ja langattomalla datansiirrolla kuten Wifillä tai Bluetoothilla sivuutettiin projektin alkumetreillä vedoten siihen, että signaali saattaa katketa robotin ollessa viemäriputkessa, jolloin robottia voi olla vaikea saada pois kohteestaan. Langallisessa vaihtoehdossa robotti ei voi jäädä jumiin, koska se on kiinnitetty automaattiseen kaapelikelaimen ja robotin voi kelata/vetää pois viemäriputkesta ongelmatilanteissa. Langallisen datan ja virransiirron hyödyt ovat sen vakaus ja luotettavuus.

Tällä hetkellä asiakkaalla on käytössä IPEK International GmbH:n Cable Reel RAX500 (Kuva 20). Automaattinen kaapelikelain, johon IPEK:in tarkastusrobotti kiinnitetään käytetään IP 67 M12 12-nastaista hybridi työntö-veto-liitintä. Kaapelia pitkin siirtyy data ja virta kaapelia pitkin robotille.



Kuva 20. IPEK International GmbH:n Cable Reel RAX500 [14].

Konseptissa oli tarkoitus yhdistää konseptirobotti samaan kaapelikelainjärjestelmään. Kuitenkin asiakkaan ja projektiin osallistuvien henkilöiden kesken päätettiin, että valmistajan IPEK-ohjausyksikön ”reverse engineering” yhteensovittaminen robotin vetoyksikön kanssa hylätään. Jatkotoimenpiteenä valitaan toisen valmistajan ohjausyksikkö, joka räätälöidään vetoyksikön tarpeisiin. Ohjausyksikön ja robotin väliseksi liittimeksi valitaan kaapelikelaan sopiva IP 67 M12 12-nastainen hybridi työntö-veto-naarasliitin (Kuva 21).



Kuva 21. M12 IP67 työntö-veto-liitin.

Liittimen yhteensopivuuden selvittämiseksi tulee ottaa huomioon koko robottiyhdistelmän virtavaatimukset sekä laskea moottoreiden, moottorinohjauksettien, anturien, kameran ja muiden komponenttien jännite- ja virtavaatimukset. Liittimen tulee pystyä käsittelemään komponenttien suurin tarvittava virta n.25–30 % turvamarginaalilla. Liittimen valinnassa tulee myös huomioida signaalin tyyppi ja määrä sekä liittimen nastojen määrä. [15.]

## 5.5 Vetotavan ja ohjausmekanismin valinta

### 5.5.1 Vetotapa

Viemärirobotin vetotavaksi valittiin neliveto. Nelivedon edut verrattuna esimerkiksi etu – ja takavetoon ovat paremman pidon ja vetovoiman tarjoaminen, tasainen voiman jakautuminen, paranneltu liikkeenhallinta ja ketteryys, vähentynyt renkaiden ja laitteiden kulumisen riski sekä suurempi energiatehokkuus vaikeissa olosuhteissa. [16.]

Neliveto tarjoaa tarpeellisen pidon ja vetovoiman liikkuaakseen epätasaisessa ja liukkaassa viemäriverkostossa. Akselistoon kiinnitetty 4 pyörää mahdollistaa paremman liikkeen hallinnan ja sitä kautta juuttumisen riski on pienempi kuin esimerkiksi etu- tai takavedossa.

Nelivedossa voima jakaantuu tasaisesti kaikille neljälle pyörälle mikä mahdollistaa tasaisemman ja tehokkaamman liikkeen, joka on erityisen tärkeää, kun liikutaan ympäristössä, jossa on epätasaisia pintoja ja pyörien väliset korkeuserot voivat olla merkittäviä.

Nelivedossa yksi suuri etu on sen liikkeen hallinta ja mahdollisuus suorittaa monimutkaisempia liikkeitä ja tehdä käännöksiä pienemmillä säteillä. Tämä on erityisen hyödyllistä ahtaissa tiloissa ja käännöksissä.

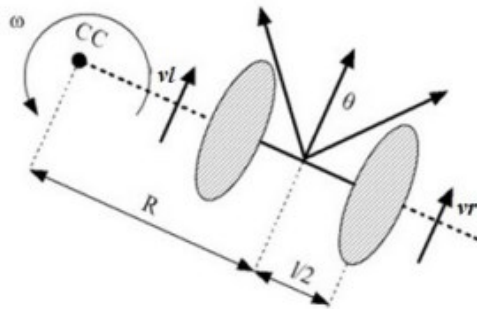
Nelivedossa moottorit kuluttavat useammin enemmän energiaa kuin etu- ja takavedot, mutta viemäriputken kaltaisessa liukkaassa ja epätasaisessa ympäristössä, voi tilanne olla juuri toisinpäin. Etu- tai takavetoisen robotin suurempi pyörien liukuminen ja mahdollinen jumiutuminen voi kuluttaa enemmän energiaa kuin nelivedon vakaa liike.

Yhteenvedona neliveto on viemärirobotin operaattorin ja käyttöympäristön näkökulmaa katsoen paras vaihtoehto. [16.]

### 5.5.2 Ohjausmekanismina differentiaali-ohjaus

Kun suunnitellaan miten mobiilirobotit liikkuvat niiden ympäristössä, on ohjausmekanismin valinnalla suuri painoarvo. Ohjausmekanismit valitaan robotin toimintaympäristön, tehtävien vaatimusten ja suunnittelun kompleksisuuden perusteella. Viemärirobotissa ohjausmekanismin valinta oli helppo, koska yksinkertaisin ohjausmekanismi mobiiliroboteissa eli differentiaali-ohjaus täytti viemärirobotin liikkumisen kriteerit. Robotin on lähtökohtaisesti tarkoitus liikkua vain eteen- ja taaksepäin, eikä siltä vaadita monimutkaisempaa ohjausmekanismia kuten sekventiaali-ohjausta.

Differentiaalihjauksessa järjestelmän kaksi pyörää on asennettu yhdelle pyörivälle akselille, joissa aktuaattoreina eli laitteina, jotka muuntavat energian mekaaniseksi liikkeeksi, toimivat kaksi erillistä servomoottoria. Servomoottorissa on takaisinkytkentälaitte kuten enkooderi, mikä mahdollistaa moottorin asennon tarkan seurannan ja säätelyn. Differentiaalihjausperiaatetta voi hyödyntää myös meidän tapauksessamme nelivedossa, koska molemmat pyörät yhdellä puolella pyörivät samalla kulmanopeudella (Kuva 22).



Kuva 22. Differentiaalihjausperiaate [10].

Differentiaalihjauksen periaate on se, että mobiilirobotin liikkeet ovat riippuvaisia sen kahden vetävän pyörän kulmanopeuksista. Mobiilirobotin kääntyminen tapahtuu kulmanopeuksien muutosten avulla. Nopeudet ( $v_r$  ja  $v_l$ ) määrittävät robotin liikeradan säteen  $R$  ja pyörimisnopeuden  $\omega$ .  $v_r$  on oikean vetävän pyörän nopeus ja  $v_l$  vasemman pyörän nopeus,  $l$  on pyörien etäisyys toisistaan ja  $R$  on kiertosäde (Kaava 10). [10.]

$$v_r = \omega \times \left( R + \frac{l}{2} \right), v_l = \omega \times \left( R - \frac{l}{2} \right) \quad (10)$$

Kun pyörien nopeudet ovat yhtä suuret ( $v_l = v_r$ ), on mobiilirobotin liikerata suora ja säde teoreettisesti ääretön. Jos nopeudet ovat ( $v_l = -v_r$ ), mobiilirobotti pyörii pystyakselinsa ympäri paikallaan. Eri arvoilla  $v_l$  ja  $v_r$  mobiilirobotti liikkuu ympyränmuotoista rataa säteellä  $R$  suhteessa kaarevuuden keskipisteeseen  $CC$  (Kaava 11). [10.]

$$R = \frac{[l \times (vr+vl)]}{[2 \times (vr-vl)]}, \omega = (vr - vl)/l \quad (11)$$

## 6 Yhteenveto ja johtopäätökset

### 6.1 Projektin pääkohdat ja saavutetut tulokset

Projekti alkoi tutkimustyöllä, joka käsitteli viemärobotiikan viimeisimpiä ratkaisuja ja teknologioita ja siitä kehitettiin konsepti, joka hyödyntää uusimpia teknologioita ja täyttäisi asiakkaan asettamat vaatimukset. Keskeinen tavoite oli suunnitella toteutuskelpoinen robotti, joka olisi mobiilisuudeltaan parempi aiempiin ratkaisuihin verrattuna, sekä tarjota parannettu tyotehokkuus ja käyttäjäturvallisuus. Projektin aikana suoritettiin benchmarkkaus-, konseptisuunnittelu ja budjetointivaiheet, joiden tuloksena saatiin toteutettavissa oleva viemärobotikonsepti. Selvitettiin myös, että tuote on valmistettavissa ja sillä on kaupallista potentiaalia.

### 6.2 Henkilökohtaiset opit ja kokemukset projektista

Osallistuminen tähän mielenkiintoiseen projektiin Metropolian henkilökunnan ja Underground City Oy:n tiimin kanssa toi minulle paljon oppeja ja oli kokemuksesta antoisaa. Projektin aikana opin paljon mekatroniikasta, robotiikasta ja viemärihuollosta toimialana. Opin myös paljon tuotekehitysprosessista ja mitä seuraavassa tuotekehitysohjelmassa kannattaa tehdä eri tavalla.

Kun katsoo taaksepäin, mitä projektissa olisi voinut tehdä eri tavalla, päädyin seuraaviin lopputulemiin. Tarkka projektisuunnitelma alusta lähtien, joka olisi noudattanut täsmällisesti eri tuotekehitysprosessin vaiheita olisi mahdollisesti nopeuttanut tiettyjen projektin etappien saavuttamista. Tuotekehitysprosessin vaiheiden kuvauksessa todettiin, että iteratiivinen toiminta eli vaiheiden

toistuminen tai päällekkäisyys on yleistä, kunnes saavutetaan haluttu lopputulos. Toisin sanoen kronologiseen järjestykseen ei välttämättä edes pyritä. Konseptien ideoimisessa olisi myös voinut ahkerammin kehittää useampia konseptivaihtoehtoja. Vaikka päästiin haluttuun lopputulokseen, ei lisävaihtoehtojen laatiminen olisi haitannut ja lisävaihtoehtojen ominaisuuksia olisi voitu mahdollisesti lisätä parhaaseen konseptivaihtoehtoon. Kun paras konsepti ja sen tekniset yksityiskohdat alkoivat hahmottua, olisi voinut heti aluksi ottaa yhteyttä jälleenmyyjiin ja mekatroniikan alan osajiin. Esimerkiksi moottorin valinnassa suoritin laskutoimituksia, joiden perusteella valitsin alustavan moottorin. Tämän vaiheen olisi suoraan voinut ulkoistaa jälleenmyyjille, joka olisi nopeuttanut prosessia. Lopulta saatavuusongelmien takia kyseinen moottorivalinta vaihtuikin toiseen.

### 6.3 Jatkotoimenpiteet

Projektin jatkon seuraava vaihe on tehdä lopulliset komponenttivalinnat jälleenmyyjien tarjousten perusteella. Kun lopulliset komponenttivalinnat on tehty, tehdään mahdolliset muutokset 3D-malleihin ja laaditaan Alfa-prototyypin tarkat tekniset piirustukset. Alfa-prototyypin koteloinnin suunnittelussa tulee huomioida kotelon vesi- ja pölytiiveysvaatimukset. Kaikki osat, joita ei voi ostaa jälleenmyyjiltä, valmistetaan parhaan tarjouksen tehneellä konepajalla. Kun prototyyppi Alfa-komponentit ja ohjausyksikkö ovat saapuneet ja Alfa-prototyyppi rakennettu, siirrytään testaus- ja hienosäätövaiheeseen. Testauksen aikana selvitetään, miten prototyyppi liikkuu viemäriputkessa, mitä ongelmia se kohtaa ja mitä mahdollisia muutoksia joudutaan tekemään. Ennen testausta asiakkaan ympäristössä testataan aktuaattoreiden sekä muiden komponenttien toiminta ja luodaan, sekä optimoidaan ohjausyksikön ohjelmakoodi sen käyttötarkoitusta varten. Myös vetoyksikön kotelon vesi- ja pölytiivyyttä tulee kokeilla ennen Alfa-prototyypin testausta asiakkaan ympäristössä. Vetoyksikön kotelon tulee täyttää IP67 vaatimukset.

## Lähteet

- 1 Underground City Oy. Luettu 23. huhtikuuta 2024, verkkosivulta <https://ugc.fi/en/>
- 2 Jokinen T. Tuotekehitys 6. painos. Helsinki: Tekniikan Kustannus; 2001.
- 3 Ulrich T, Karl & Eppinger D, Steven. Product Design and Development 6. Painos: Mc Graw Hill education, 2015.
- 4 Big Flash - hanke. Luettu 3. Toukokuuta 2024, verkkosivulta <https://big-flash.metropolia.fi/>
- 5 Paajanen M. (2023). Koneoppiminen viemäriverkoston kuntotutkimuksen apuna. Insinööri (AMK) Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Tieto- ja viestintätekniikka.
- 6 Vortex Companies. Luettu 9. Toukokuuta 2024. Verkkosivulta: <https://vortexcompanies.com/>
- 7 IMS Robotics. Luettu 9. Toukokuuta 2024. Verkkosivulta: <https://www.ims-robotics.de/en/home>.
- 8 Kolvenbach, H., Wisth, D., Buchanan, R., Valsecchi, G., Grandia, R., Fallon, M., & Hutter, M. 2020. Towards autonomous inspection of concrete deterioration in sewers with legged robots. Journal of Field Robotics, 37(S8). Verkkosivulta <https://doi.org/10.1002/rob.21964>
- 9 Law, W. C., Chen, I.-M., Yeo, S. H., Seet, G. L., & Low, K. H. 2015. A Study of In-pipe Robots for Maintenance of Large-Diameter Sewerage Tunnel. Presented at the 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, October 25-30, 2015. DOI: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS13.045.
- 10 Crenganis, M., Biris, C., & Girjob, C. 2021. Mechatronic design of a four-wheel drive mobile robot and differential steering. MATEC Web of Conferences, 343, 08003. Verkkosivulta <https://doi.org/10.1051/matec-conf/202134308003>
- 11 M-Seals. (n.d.). Hydrogenated Nitrile Rubber (HNBR/HSN). Luettu 24. huhtikuuta 2024, verkkosivulta <https://www.m-seals.com/fi/fi/products/engineered-machined-seals/engineered-materials/hydrogenated-nitrile-rubber-hnbr-hsn/>

- 12 Schwalm Robotic. (n.d.). Axle Extender Set for TALPA FSR 2060. Luettu 24. huhtikuuta 2024, verkkosivulta <https://www.schwalm-robotic.de/en/products/robot-tools-accessories/robot-wheels/axle-extender-set-for-talpa-fsr-2060.html>
- 13 Designing a Waterproof Enclosure Artikkel. Luettu 23. huhtikuuta 2024. Verkkosivulta <https://jiga.io/injection-molding/designing-waterproof-enclosure-a-guide/>
- 14 Direct Industry. Luettu 23. huhtikuuta 2024. Verkkosivulta <https://www.directindustry.com/prod/ipek-international-gmbh/product-90629-2037013.html>
- 15 Norcomp Artikkel. Luettu 23. huhtikuuta 2024. Verkkosivulta [Connectors for Robotics and Industrial Applications | NorComp](#)
- 16 Xu, S., Wei, L., Zhang, X., Bai, Z., & Jiao, Y. 2022. Research on Multi-Mode Drive Optimization Control Strategy of Four-Wheel-Drive Electric Vehicles with Multiple Motors. Sustainability, 14(12), 7378. Verkkosivulta <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/12/7378>

