

Hannes Rämö

AUTONOMISEN KAIVOSROBOTIN PUO- MIN PARAMETRINEN SUUNNITTELU

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Jussi Aaltonen
Kari Koskinen
Kesäkuu 2023

TIIVISTELMÄ

Hannes Räme: Autonomisen kaivosrobotin puomin parametrinen suunnittelu
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2023

Suunnittelun vaatimukset vaihtelevat tapauskohtaisesti ja suunnittelun alussa tietoa on rajallisesti, jonka vuoksi suunnittelumenetelmää on haastava automatisoida ja suunnittelijalle jää päätettäväksi mitä tutkitaan ja kuinka paljon. Suunnittelun helpottamiseksi on kehitetty menetelmiä, jotka ohjaavat suunnittelijaa tekemään mahdollisimman hyviä päätöksiä ja auttaa välttämään yleisiä virheitä, kuten turhan suunnittelun tekemistä. Pelkästään koneensuunnitteluun on kehitetty useita menetelmiä, jotka soveltuvat erilaisiin tapauksiin ja jonka takia sopivan menetelmän valitseminen on haastavaa. Suunnittelumenetelmien valitsemiseen vaikuttaa käytettävissä olevat resurssit, ongelman toistuvuus ja mitattavuus, suunnittelijoiden kokemus ja työryhmän laajuus. Menetelmät sisältävät suunnittelutyökaluiksi kutsuttavia tekniikoita. Suunnittelutyökalut ovat konkreettisesti ohjeistettuja menetelmiä, joilla on selkeä tavoite.

Tässä työssä on tarkoitus tutkia, sopiiko parametrinen suunnittelu autonomisen kaivosrobotin puomin suunnitteluun Robominers projektissa. Robominers projektissa suunnitellaan ja rakennetaan konseptintodistus luonnon inspiroima, modulaarinen ja uudelleen konfiguroitava robotti pienille ja hankalasti tavoitettaville malmiesiintymille. Kuten aiemmin todettiin, suunnittelumenetelmien soveltaminen on tapauskohtaista ja siksi parametrinen suunnittelu muokataan sopivaksi ottaen vaikutteita muista suunnittelumenetelmistä. Tarkasteltavat menetelmät ovat mallipohjainen systeemisuunnittelu, konseptisuunnittelu ja monitieteellinen optimointi. Työssä käydään läpi mitä suunnittelutyökaluja edellä mainitut menetelmät sisältävät ja valitaan työkalut, jotka katsotaan soveltuvan parhaiten puomin suunnitteluun. Luotua suunnittelumenetelmää on sovellettu työssä tapaustutkimuksena ja lopuksi arvioitu kuinka hyvin menetelmä soveltui tapaustutkimukseen.

Tutkimus vahvisti parametrinen suunnittelun soveltuvan tapaukseen, jossa suunnitteluvaatimukset muuttuvat suunnittelun aikana. Tapaustutkimuksessa fyysisiin malleihin tehtiin voimakkaita yksinkertaistuksia, jotta parametrinen mallin ratkaisemisessa olisi mahdollisimman vähän iterointia ja epälineaarisia yhtälöitä. Yksinkertaistusten seurauksena suunnittelun oli mahdollista tehdä algoritmisesti python skriptillä ja kykeni käsittelemään noin 1,5 miljoonaa tapausta minuutissa. Tämän takia työssä ei hyödynnetty hienostuneita optimointimenetelmiä.

Avainsanat: Parametrinen suunnittelu, konseptintodistus, tapaustutkimus, konseptisuunnittelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Hannes Råme: Designing autonomous mining robots boom with parametric design method.
Master of Science Thesis
Tampere University
Mechanical engineering
June 2023

The requirements of the design are case dependent and at the beginning of the design there is limited information available, which is why it is challenging to automate the designing method. Therefore, the designer is left to decide what to investigate and how much. Methods have been developed to make engineering more effective by guiding the designer to avoid common mistakes, such as making unnecessary design planning. Several methods have been developed for mechanical design alone, which are suitable for different cases. Controlling design methods is influenced by usable resources, the quantity of the production, measurability, the experience of the designers and the scope of the work group. The methods include design tools, that are concretely instructed methods that have clear goal for their usage.

The purpose of this work is to investigate whether parametric design is suitable for the design of the boom of an autonomous mining robot in the Robominers project. The goal for the Robominers project is to design and make a proof-of-concept for nature-inspired, modular, and reconfigurable robot for small and hard-to-reach ore deposits. As noted, the application of the design method is case-specific, and therefore parametric design is modified with suitable adaptations from other design methods. The examined methods in this project are model-based system design, concept design and multidisciplinary optimization. In this work, we go through which design tools the above-mentioned methods have and choose the tools that are considered to suit for the design of the boom. The created design method has been applied in the work as a case study. Then the usage of the modified method is evaluated on how well it suited for this specific application.

The study confirmed that parametric design is suitable for the case where design requirements change during design. In the case study, strong simplifications were made to the physical models to have as little iteration as possible and non-linear equations were not used. The simplifications enabled the design to be solved algorithmically with one single Python script. The script was able to process about 1.5 million cases per minute, which is why sophisticated optimization methods were not used in the work.

Keywords: Parametric design, proof-of-concept, case study, concept design

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Tampereen Yliopiston Mekatroniikan tutkimusryhmän Robominers projektiin. Olen kiitollinen mahdollisuudesta päästä tutustumaan ja kehittämään tulevaisuuden kaivostoimintaa mielenkiintoisessa projektissa. Haluan kiittää koko työryhmää. Erityisesti opintotyön ohjaajia Jussi Aaltosta ja Kari Koskista, sekä suunnittelutyössä avustanutta Tuomas Salomaata, jotka auttoivat diplomityön edistämässä niin teoreettisella tasolla kuin käytännönasioissa.

Tampereella, 21.6.2023

Hannes Rämö

SISÄLLYSLUETTELOSS

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tavoitteet	1
1.2 Autonomisen kaivosrobotin erityispiirteet	3
2. TYÖKALUT SUUNNITTELUMENETELMISSÄ.....	5
2.1 Mallipohjaisen systeemisuunnittelun työkalut	8
2.2 Konseptisuunnittelu ja konseptisuunnittelun työkalut.....	12
2.3 Parametrinen suunnittelu ja työkalut	15
2.4 Monitieteellinen optimointi ja sen työkalut	19
3. PARAMETRISEN SUUNNITTELUN ESIVAATIMUSTEN SELVITYS PUOMILLE	22
3.1 Suunnittelutyökalujen valitseminen	22
3.2 Osa-alue jaottelu puomille.....	24
3.3 5 why menetelmän soveltaminen	25
3.4 Puomin vaatimusten luokittelu.....	26
3.5 Puomin toimilaitteiden jaottelu ja samankaltaisten laitteiden vertailu ..	30
3.6 Konseptivaihtoehtojen listaaminen ja vertailu	32
4. PARAMETRISEN SUUNNITTELUN SOVELTAMINEN PUOMIIN.....	39
4.1 Keskinäiskytken tarkastelu	39
4.2 Parametrisessä laskennassa käytetyt fyysiset mallit	41
4.3 Parametrisen ratkaisijan laskentajärjestys ja käytetyt arvot.....	56
5. PUOMISSA SOVELLETUN SUUNNITTELUMENETELMÄN ANALYSOINTI	61
6. YHTEENVETO.....	68
LÄHTEET	70
LIITE A: PARAMETRISEN RATKAISIJAN PYTHON SKRIPTI	72
LIITE B: KÄÄNTYMISEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ.....	78
LIITE D: AINEOMINAISUUDET LIUKUPALOILLE	83

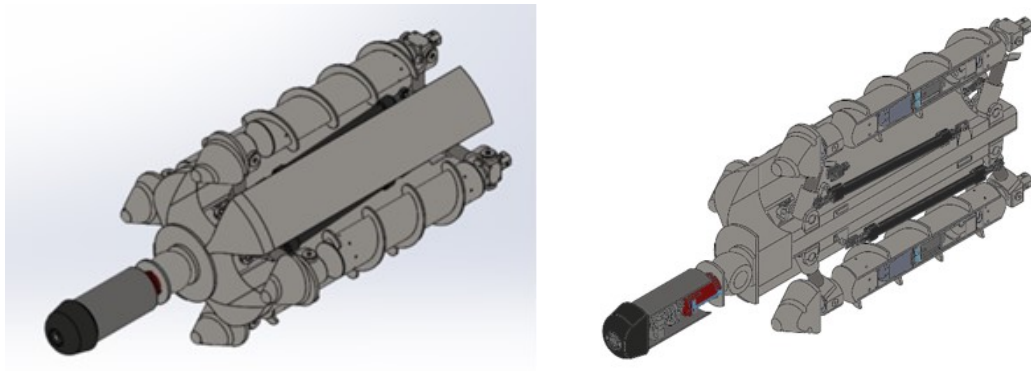
LYHENTEET JA MERKINNÄT

CAD	tietokoneavusteinen suunnittelu eng. computer aided design
DSM	Riippuvuusmatriisi eng. Design structure matrix
KS	konseptisuunnittelu
MBSE	mallipohjainen systeemisuunnittelu eng. model based system engineering
MDO	monitieteellinen optimointi eng. multidicipline optimization
PS	parametrinen suunnittelu
RHS	neliön muotoinen rakenneputki
PEEK	polyeetterieetteriketoni
POM	polyasetaali
UHMW-PE	ultrasuurimolekyylinen polyeteeni
reach	puomin kääntyessä työkalun uloimman pisteen radiaali etäisyys kaivettavan tunnelin seinältä
<i>Space1</i>	Ensimmäisessä kriittisessä pisteessä y-akselilla väliin jäävä etäisyys
<i>Space2</i>	Toisessa kriittisessä pisteessä y-akselilla väliin jäävä etäisyys
stroke	Hydraulisyylinterin iskunpituus
turning radius	robotin teoreettinen minimikäntymissäde
<i>Ynew1</i>	Rungon uloimman pisteen etäisyys y-akselilla ensimmäisellä kriittisellä pisteellä
<i>Ynew2</i>	Rungon uloimman pisteen etäisyys y-akselilla toisella kriittisellä pisteellä
α	puomin suurin kulma
β	lyhyemmän hydraulisyylinterin kulma rungon keskiakselilta
γ	Nivellaakerin suurin sallittu kulma
ω	pidemmän hydraulisyylinterin kulma rungon keskiakselilta
A_x	lyhyemmän hydraulisyylinterin pituus rungon x-akselilla
A_y	lyhyemmän hydraulisyylinterin pituus rungon y-akselilla
A_{xp}	pidemmän hydraulisyylinterin pituus rungon x-akselilla
A_{yp}	pidemmän hydraulisyylinterin pituus rungon y-akselilla
d	sylinterin varren halkaisija
$dy1$	Hydraulisyylinterin keskikohdan y-akselinen etäisyys ensimmäisellä kriittisellä tarkastelupisteellä
$dy2$	Hydraulisyylinterin keskikohdan y-akselinen etäisyys toisella kriittisellä tarkastelupisteellä
$dY1$	Hydraulisyylinterin paksuudesta johtuva y-akselin suuntainen etäisyys ensimmäisellä kriittisellä tarkastelupisteellä
$dY2$	Hydraulisyylinterin paksuudesta johtuva y-akselin suuntainen etäisyys toisella kriittisellä tarkastelupisteellä
D	sylinterin pään halkaisija
D_t	Kaivettun tunnelin halkaisija
E	Hydraulisyylinterin varren kimmomoduuli
F_1	lyhyempään sylinteriin kohdistava voima
F_2	pidemmän sylinterin kohdistama voima
F_{3y}	työkaluun kohdistuva voima
F_{4y}	niveleen kohdistuva säteensuuntainen voima

F_{3D}	maksimivoima kolmiulotteisessa tapauksessa
F_{in}	Hydraulisyylinterin tuottama voima supistuessa
F_n	nurjahdusvoima
F_{out}	Hydraulisyylinterin tuottama voima työntyessä
G_y	Puomin gravitaatiovoima omasta massasta
h	Puomin nivellaakerin radiaali etäisyys puomin keskipisteestä
H	Puomin kardaninivelen ja rungon nivellaakerin radiaali etäisyys
$H2$	Rungon RHS palkin sivun reunan etäisyys palkin keskiakselilta
$H3$	Puomin sisemmän neliöpalkin reunan etäisyys keskiakselilta
I	Hydraulisyylinterin jäyhyysmomentti
L	puomin pituus
L_0	puomin x-akselin pituus puomin ollessa suorassa
L_{00}	puomin x-akselin pituus niveleen maksimikulmassa
L_1	Puomin kardaninivelen ja nivellaakerin välinen aksiaalinen pituus
L_s	on hydraulisyylinterin nivelten välinen suurin mahdollinen etäisyys
p	paine hydraulisessa sylinterissä
R	Kääntymissäde
$S1$	Itseensä törmäämisen ensimmäisen kriittisen tarkastelupisteen etäisyys kardaninivelestä rungon x-akselilla.
$S2$	Itseensä törmäämisen toisen kriittisen tarkastelupisteen etäisyys sylinterin paksuus
t	
UJL	Kardaninivelen keskikohdan etäisyys nivelen kiinnityspintaan
X	Työkalun uloimman piikin etäisyys kardaninivelestä rungon x-akselilla
X_1	lyhyemmän hydraulisyylinterin voimakomponentti puomin aksiaalisessa suunnassa
X_2	lyhyemmän hydraulisyylinterin voimakomponentti puomin aksiaalisessa suunnassa
Y	Työkalun uloimman piikin etäisyys kardaninivelestä rungon y-akselilla
Y_1	lyhyemmän hydraulisyylinterin voimakomponentti puomin radiaalisessa suunnassa
Y_2	lyhyemmän hydraulisyylinterin voimakomponentti puomin radiaalisessa suunnassa
$y1$	on Hydraulisyylinterin ulkoreunan etäisyys y-akselilla nivellaakerista ensimmäisellä kriittisellä tarkastuspisteellä
$y2$	on Hydraulisyylinterin ulkoreunan etäisyys y-akselilla nivellaakerista toisella kriittisellä tarkastuspisteelle

1. JOHDANTO

Tämä työ on tehty Tampereen yliopiston mekatroniselle tutkimusryhmälle *Robominers* projektiin, jonka rahoitus tulee EU:n *Horizon* projektista. *Horizon* projektin tarkoitus on lisätä Euroopan huoltovarmuutta harvinaisten mineraalien suhteen ja kehittää kaivos-toimintaa. *Robominers* projektin tarkoitus on kehittää luonnon inspiroima, modulaarinen ja uudelleen konfiguroitava robotti pienille ja hankalasti tavoitettaville malmiesiintymille. Kaivoslaitteiden koon pienentämällä ja autonomisointi mahdollistaa pienimuotoisemman kaivostoiminnan ja mahdollistetaan pienempien malmiesiintymien hyödyntämisen, mikä vähentää harvinaisten maametallien tuotannon keskittymistä ja vähentää mahdollisuutta käyttää maametallien vientiä poliittisena vaikutuskeinona. Kuvassa 1 on esitetty suunniteltavan robotin suunnittelun lähtökohta. (robominers.eu, cordis.europa.eu)



Kuva 1. Vasemmalla kuva *Robominers* robotin prototyypimallista ennen tämän diplomityön aloittamista ja oikealla läpileikkaus samasta mallista.

Projektin tarkoituksena on tehdä konseptintodistus, eli osoittaa idea toteutuskelpoiseksi. Tämä tehdään hyödyntäen simulointia, tekemällä pienen mittakaavan versioita robotista ja rakentamalla täysikokoinen toiminnollinen robotti. Suunniteltavan robotin erityispiirteitä on esiteltyä tarkemmin 1.2 luvussa.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tässä työssä tarkoituksena on tutkia, soveltuuko parametrinen suunnittelu *Robominers* projektissa puomin suunnittelussa. Suunnittelu on *R&D* toimintaa, jossa eri asiantuntijaryhmät kehittävät osakokonaisuuksia. Suunnittelutyössä ryhmät antavat suunnit-

telurajoitteita toisille ryhmille, joihin heidän suunnitteluvalintansa vaikuttavat. Suunnittelun edetessä annetut ja annettavat parametrit muuttuvat. Tämä hidastaa kehitystä ja altistaa työn turhien tilanteiden tutkimiseen. *R&D* työssä on siis tärkeää pystyä nopeasti muuttamaan suunnittelua annettujen vaatimusten perusteella. Parametrinen suunnittelu on menetelmä, jossa tehdään suunniteltavasta kohteesta fysikaalinen malli, joka on muutettavissa parametrien avulla algoritmisesti. Koska konseptintodistuksessa on laaja joukko erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja, on parametrinen ratkaisijan käyttö mahdotonta moinutkaisuuden ja laskenta-ajan kasvaessa. Siksi parametrinen suunnittelu vaatii hyvän alkuarvauksen käytön. Lisäksi todellisuuden ilmiöiden tehokas matemaattinen mallinnus vaatii yksinkertaistuksia. Tässä tutkimuksessa selvitetään, millaisia suunnittelumenetelmiä on mahdollista ja hyödyllistä käyttää parametrinen ratkaisijan kehittämiseksi konseptin kehitykseen. Lisäksi työssä kehitetään *python* skripti, joka tuottaa toimilaitteen ominaisuuksille ratkaisun suunnittelukriteerien avulla, jotta iterointiin kuluu mahdollisimman vähän aikaa.

Diplomityön tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Millaisia yksinkertaistuksia parametrinen ratkaisijan mallit vaativat ja millaisia yksinkertaistuksia on mahdollista käyttää?
- Miten nopeasti ja kuinka laajan ratkaisuavaruuden ratkaisija kykenee käymään läpi?
- Mitä esivaatimuksia parametrillä suunnittelulla on konseptintodistuksessa?

Tutkimusmenetelmänä työssä on tapaustutkimus. Työssä ensimmäisenä on selvitetty mitä parametrinen suunnittelu on ja millaisia piirteitä sillä on. Toiseksi työssä on tehty kirjallisuuskatsaus siitä, millaisia työkaluja suunnittelussa on mahdollista käyttää. Kolmannessa vaiheessa työssä valitaan tapaustutkimukseen sopivat suunnittelutyökalut. Neljäntenä suunnittelumenetelmää on sovellettu tapaustutkimukseen ja lopuksi arvioitu suunnittelumenetelmän käytön onnistumista.

Tutkimus on käytetty viittä lähdettä, jotka on esitetty tarkemmin luvussa 1.2. Työssä on tarkasteltu puomia ja rajoitteina on huomioitu puomiin kiinnitettävä rumpuleikurin vaatimuksia ja rungon mittoja. Tarkastelusta on jätetty pois esimerkiksi sensoreiden ja lietepumpun tilanvaraus ja sijoittaminen. Työ on toteutettu yhdellä python skriptillä, jonka vuoksi edistyneet laskentaohjelmat, kuten *CAD* ja *FEM* tarkastelu, on jätetty pois. Työssä arvioidaan, miten paljon työtä parametrinen suunnittelu vaatii ja miten paljon menetelmä säästää aikaa suunnitelmien muuttuessa. Työssä suunnittelun onnistuvuuden arviointi rajoittuu puomin osien tilaamiseen.

1.2 Autonomisen kaivosrobotin erityispiirteet

Tässä luvussa on esiteltyä suunniteltavan kaivosrobotin erityispiirteitä, jotka vaikuttavat puomin suunnitteluun.

Modulaarisuus tarkoittaa, että tuote koostuu moduuleista, jotka voidaan vaihtaa. Puomin kohdalla tämä tarkoittaa, että esimerkiksi työkalu on helposti vaihdettavissa ja/tai puomi on helposti vaihdettavissa runkoon. Konseptintodistuksessa modulaarisuuden toteuttaminen on vähempiarvoinen ominaisuus. Modulaarisuutta kuitenkin tarvitaan suunnittelussa, sillä suunnitelmien pitää muutoksien varalle olla helposti muutettavissa ja koonpantavissa.

Konfiguroitavuus tarkoittaa, kuinka vähällä työllä mitoitusmuutoksia on mahdollista toteuttaa. Puomin kohdalla konfiguroitavia ominaisuuksia ovat kaivettavan tunnelin halkaisijan kasvattaminen, isomman työkalun asettaminen ja poraukseen vaadittavien voimien muuttaminen.

Liikkuvuus tarkoittaa, miten robotti liikkuu. Suunniteltava robotti poikkeaa tyypillisistä ratkaisuista, sillä rumpuleikkuri (*longitudinal roadheader*) poratessa kallioon syntyy voimakas työntövoima robotin runkoon. Työkalun porautuakseen kallioon, on robotin kyettävä ankkuroitumaan itsensä kiinni. Perinteisessä roadheader tyyppisessä rumpuporaamisessa kaivinkoneessa ankkurointi on toteutettu massalla ja hydraulisilla jaloilla. Suunniteltavassa robotissa ongelma on ratkaistu käyttämällä ruuveja liikkumiseen, jotta laitteella olisi jatkuvassa kontaktissa seinään ja sylinterien avulla olisi mahdollista painamaan kierreruuvit seiniin ankkuroiden robotin paikoilleen. Tämän ansiosta porauslaite voi olla massaltaan kilpailevia laitteita kevyempi. Ruuvit kuitenkin lisäävät kääntymisen monimutkaisuutta tunnelissa, sillä kääntyessä kontaktipintana toimivat kiinteät ja pitkät ruuvit.

Yksinivelisyys tarkoittaa, että puomi pystyy pallokoordinaatistossa kääntymään horisontaalisesti ja vertikaalisesti samalla nivelellä. Ratkaisun tarkoitus on vähentää massaa ja tilavuutta robotissa, sekä jakaa työkalun voimat tasaisesti robotin runkoon. Tämänkaltaisia sovelluksia samassa mittakaavassa on vähän. Esimerkiksi keskeltä kääntyvissä pyöräkoneissa voimansiirto suoritetaan kaksiosaisella kardaanimivelellä.

Rumpuleikkuri on louhintatyökalu, jota robotissa käytetään. rumpuleikkuri on päästä leikatun kartion muotoinen laite, johon on kiinnitetty piikkejä. Louhintatyökalu työnnetään aluksi kallioon ja sen jälkeen työkalua liikutellaan sivusuuntiin, jolloin työkalun kyljet louhivat kalliota. Laite vaatii suuren määrän voimaa, jotta työkalun piikeistä vapautuva ener-

gia pystyy hajottamaan kalliota. Työkalu aiheuttaa jatkuvaa kuormitusta ja tärinää. Lisäksi työkalun hajottaa kiveä iskuilla, eli rakenteen tulee olla jäykkä, jotta työkalu pystyy mahdollisimman tehokkaasti louhimaan kiveä (Vougt, 2016, Yang, 2017).

Vesihydrauliikka tekee kaivostoiminnasta ympäristöystävällisemmän, sillä robotin hydrauliikassa ei ole öljyä, joka voisi vikatilanteessa vuotaa ympäristöön. Haittapuolina käytettävissä olevien materiaalien ja komponenttien määrä on vähäinen.

Toimintaympäristö suunniteltavalle robotille on haastava, sillä tarkoitus on pystyä toimimaan veden täyttämässä kaivoksissa. Ympäristössä on hiekkaa, pölyä ja lentäviä kiviä, joiden vuoksi mitoituksessa tulee olla tarpeeksi varmuuskerrointa. Lisäksi letkut tulee sijoittaa mahdollisimman turvalliseen paikkaan.

Autonomisuus on tärkeä osa suunniteltavaa robottia, sillä toimintaympäristö on ihmiselle vaarallinen. Puomissa tulee olemaan sensoreita, joiden pitää kestää vaativissa olosuhteissa. Näiden sijoittelu vaatii tilaa, jota robotissa on rajallisesti.

Työn tarkoituksena on luoda parametrinen ratkaisija. Kyseessä on ohjelma, joka käy algoritmisesti käy läpi matemaattisessa mallissa muuttujia ja luo autonomisen robotin puomille suunnitteluratkaisuja ja arvioi vaihtoehtojen hyvyyden.

2. TYÖKALUT SUUNNITTELUMENETELMISSÄ

Suunnittelun tutkimus on laajasti tieteellisesti tutkittu aihe ja siihen on kehitetty monia lähestymistapoja ja menetelmiä, joilla pyritään järjestelmällisesti löytämään ratkaisu. Valitsemalla sopivan lähestymistavan suunnittelussa säästyy turhalta suunnittelulta ja löytää mahdollisimman hyvän ratkaisun, jolloin resursseja säästyy. Oikean menetelmän valitseminen ei kuitenkaan ole helppoa, sillä suunnittelun tarpeet vaihtelevat tapauskohtaisesti. Taulukossa 1 on eriteltynä menetelmiä, joiden käyttöä on harkittu puomin suunnitteluun.

Taulukko 1. *Erlaisia suunnittelumenetelmiä.*

Menetelmä	Ominaisuudet	käytetty	Perustelu
Kokeellinen suunnittelu	Tarkastellaan yksittäisiä parametrejä erikseen ja niiden vaikutusta suhteessa muihin parametreihin	ei	Suuri määrä parametrejä tarkasteltavana, parametreillä ristikkäisvaikutuksia todennäköisesti.
Monitehtinen optimointi	Laaja-alaisten ilmiöiden tarkastelua ja kokonaisuuden optimointia.	osittain	Tarkasteltavat ongelmat rajoittuvat yhden tieteenalan sisälle ja optimointimenetelmään ei yksin luoteta.
Mallipohjainen systeemisuunnittelu	Systemaattinen lähestymistapa suunnitteluun kokonaisuutena.	osittain	Työ on laajuudeltaan suppea ja siksi osa systemaattisuudesta nähdään liian hitaana menetelmänä. Lähestymistavassa runsaasti työkaluja, joita pyritään tapauskohtaisesti hyödyntämään.
Konseptisuunnittelu	Menetelmä, jossa vertaillaan erilaisia suunnitteluvaihtoehtoja.	osittain	Konseptin todistamisessa on mahdollista ratkaista ongelmia monin eri tavoin. Parametrinen suunnittelu vaatii helposti muuttuvat arvot ja konseptin todistamisella on mahdollista vähentää suunnitteluvaihtoehtoja.

Tämän työn suunnittelumenetelmät perustuvat kolmeen päälähteeseen. Lähteistä ensimmäinen on Eetu Frimanin diplomityö, jossa on luotu viitekehys (*framework*) systeemin mallinnuskielen avulla (*System Modeling Language, SysML*). Menetelmä kuuluu mallipohjaiseen systeemisuunnitteluun (*Model based system engineering, MBSE*). Menetelmään on lisäksi haettu työkaluja Montgomery (2013) ja *SEBoK.org* nettisivuilta.

Parametrisen suunnittelun pohjana on Alex Lallan diplomityö (2017), joka käsittelee parametristä suunnittelua rakennetekniikan näkökulmasta. Työssä todetaan parametrisen suunnittelun ja mallintamisen olevan käytössä pääsääntöisesti rakenne-, LVI- ja konesuunnittelussa. Lallan mukaan parametrinen suunnittelu poikkeaa konesuunnittelusta

rakennesuunnitteluun verrattuna toiminnallisuustavoitteellisuudella ja korkeammilla alkuarvausvaatimuksilla. (Lalla 2017, Myung & Han, 2001).

Mahdollisimman hyvän alkuarvauksen kehitykseksi on käytetty Aino Maija Myllärin diplomityötä (2012), jossa kehitetään olemassa olevaa tuotetta konseptisuunnittelumenetelmällä. Myllärin työssä sovelletaan Pahl et al. ja Ulrichin & Eppingerin tuotekehitysmenetelmiä. Tässä työssä konseptisuunnittelua käytetään suppeasti, sillä loppupuolen suunnittelu on toteutettu parametrinen suunnittelun työkaluilla.

Lisäksi suunnittelun alussa käytettiin hyväksi monitieteellinen optimointia (*Multidisciplinary optimization, MDO*). Menetelmän hyödyntämisen tarkoitus oli vastata konetekniikan parametrinen suunnittelun toiminnallisuustavoitteellisuuteen. Menetelmässä oli kuitenkin samankaltaisuutta parametrinen ratkaisijan optimointiosan kanssa. Parametrinen ratkaisijan on tarkoitus olla helposti integroitavissa laajempaan mallipohjaiseen systeemisuunnitteluun. Tarkoituksena ei ole toteuttaa integraatiota, mutta pohtia millaisia muutoksia ja kuinka paljon työtä integrointi vaatii.

Edellä mainitut lähteet keskittyvät suunnittelun eri vaiheisiin. Kokonaisuuden hahmottamiseksi suunnittelumenetelmistä löytyneet suunnittelutyökalut on jaoteltu taulukossa 2 suunnittelun eri vaiheisiin ja taulukossa 3 on esitetty, kuinka monta suunnittelutyökalua kullakin suunnittelumenetelmällä on eri vaiheisiin. Suunnittelun eri vaiheet ovat seuraavat:

- A. Vaatimusanalyysi
- B. konseptivaihtoehtojen generoiminen
- C. konseptien arviointi
- D. Konseptien vertailu
- E. Fysikaalisen mallin luominen
- F. Fysikaalisten mallien yhdistäminen
- G. Integraatio

Taulukko 2. *Suunnittelumenetelmien suunnittelutyökalut jaottelu suunnittelumenetelmäkohtaisesti. MBSE viittaa mallipohjaiseen systeemisuunnitteluun, KS konseptisuunnitteluun, PS parametriseen suunnitteluun ja MDO monitieteelliseen optimointiin.*

MBSE	KS	PS	MDO
-osa-alueiden jako (<i>framework</i>) A	-vaatimusanalyysi	-Alkuarvaus D	-Fysikaaliset mallit
-5 Why A	A	-Fyysiset mallit E	E
-Vaatumusten luokittelu A	-toimilaite-erittely	-muuttujien valitseminen E	-muuttujien ja vaikeiden määritys E
-DSM E	A	-Yhtälöryhmien muodostus E	-tavoitteiden määritys F
	-Aivoriihi B		

-Fysikaalinen mallinnus E -kausaalikuvaaja F -integraatio G	-samankaltaisten laitteiden vertailu B -visualisointi B -karkeat laskelmat C -listaaminen D -konseptin vertailu D -fysikaalinen mallinnus E -tuotannon ja kehityksen suunnittelu G	-reunaehdot E -lisäehdot E -hintafunktio F -optimointi F	-Integrointi G -optimointi G
-------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------	---------------------------------

Taulukko 3. *Suunnittelumenetelmien osavaiheiden jaottelu vaihekohtaisesti. Vasemmalla on esitetty menetelmä ja yläotsikoituna on esitetty suunnitteluvaihe.*

	A	B	C	D	E	F	G
MSBE	3 kpl				2 kpl	1 kpl	1 kpl
KS	2 kpl	3 kpl	1 kpl	2 kpl	1 kpl		1 kpl
PS				1 kpl	5 kpl	2 kpl	
MDO					2 kpl	1 kpl	2 kpl

Työssä käytettävä suunnittelumenetelmä eli parametrinen suunnittelu keskittyy taulukon 3 perusteella fysikaalisten mallien luomiseen (E) ja fysikaalisten mallien yhdistämiseen (F). Parametrinen suunnittelu hyödyntämiseksi on kuitenkin oltava jokin pohja, eli alkuarvaus, jota mallintaa Tätä varten työssä on käytetty konseptisuunnittelua.

Konseptisuunnittelu sijoittuu taulukon 3 perusteella vaatimusanalyysiin (A) ja fysikaalisten mallien luomiseen (F). Konseptisuunnittelun tavoite on saada sopiva alkuarvaus parametrin ratkaisijaa varten. Laaja alkuarvaus tarkoittaa suurempaa määrää muuttuvia parametrejä, enemmän keskinäisriippuvuuksia ja pahimmillaan algoritmissa käytettävien totuusmuuttujien käyttöä laskentamallien vaihtamiseksi. Toisaalta pitkälle viety suunnitteluvaihtoehto vähentää muuttuvia parametrejä ja siten heikentää suunnittelun kykyä löytämään mahdollisimman hyvä ratkaisu ja huonontaa parametrin ratkaisijan kykyä vastaamaan vaatimusten muutoksiin Konseptisuunnittelun hyödyntäminen parametrin suunnittelun alkuarvaukseksi on siis kompromissi, jossa yksinkertaistusten ja konkretisoinnin avulla vähennetään parametriseen suunnitteluun vaadittavaa työtä.

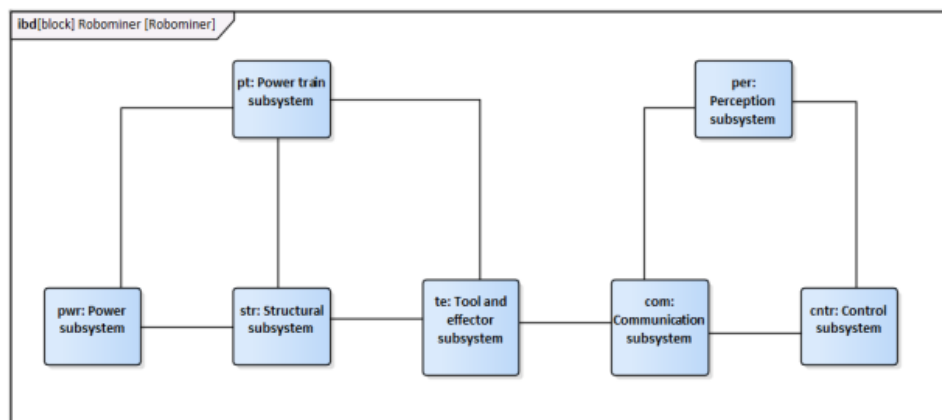
MBSE antaa lisää työkaluja vaatimusanalyysiin (A) ja integrointiin (G). Näistä etenkin vaatimusanalyysi on hyödyllinen suunnittelun alussa, kun arvioidaan mitä vaatimuksia puomin suunnitteluun kohdistuu ja kuinka puomin suorituskykyä on mahdollista arvioida. **MBSE**:n integraatiosta on hyötyä työn loppuvaiheessa, kun arvioidaan menetelmän hyödyllisyyttä ja soveltamista laajemmin koko robotin suunnitteluun.

MDO:n työkalut puolestaan keskittyvät parametriseen suunnitteluun tapaan fysikaaliseen mallinnukseen (E) ja fysikaalisten mallien yhdistämiseen (F). *MDO*:n eroavaisuus parametriseen suunnitteluun verrattuna on optimoimisen järjestäminen. Menetelmässä optimointi jaetaan useaan malliin ja mallien tulokset asetetaan uuteen optimoijaan, joka päättää kuinka muuttujia on muutettava. Menetelmä on siis tarkoitettu monimutkaisten ja laajojen systeemien optimoimiseen.

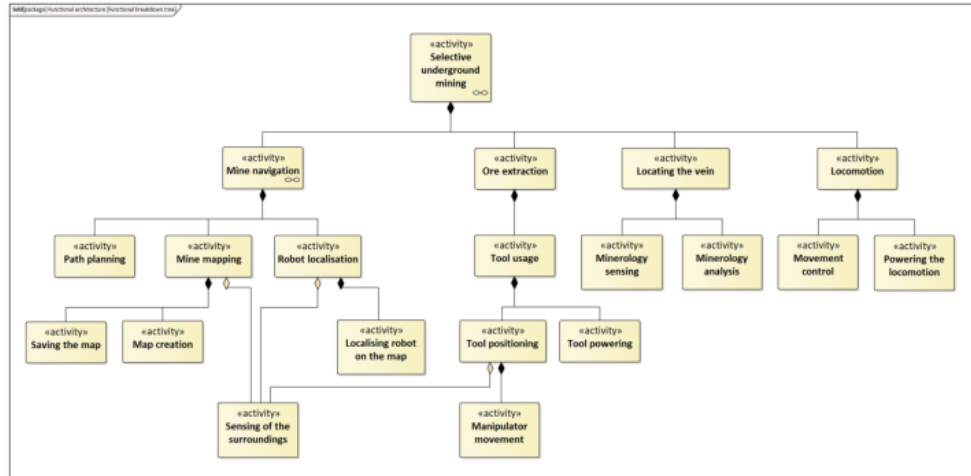
Seuraavissa luvuissa käydään läpi edellä mainittuja menetelmiä ja niistä valitaan taustatutkimukseen soveltuvia osavaiheita, jotka hyödyntävät parametriseen ratkaisijan suunnittelussa.

2.1 Mallipohjaisen systeemisuunnittelun työkalut

MBSE eli mallipohjainen systeemisuunnittelu on kompleksisten kokonaisuusien suunnitteluun kehitetty systemaattinen suunnittelumenetelmä (Friman, 2020). Systeemi-suunnittelussa aloitetaan suunniteltavan systeemin vaatimuksista ja luoda keskitetty mallipohjainen kartta, joka koostuu koherentisti luoduista alimalleista. Tällöin prosessin kokonaisuudesta on korkean tason kuvaaja, joista selviää toimilaitteiden kokonaisvaikutus systeemiin. Korkean tason kuvaajassa puolestaan on viittauksia yksittäisten toimilaitteiden malleihin, joista löytyy parametrien vaikutusten matemaattiset yhtälöt. Kuvassa 2 on esitetty korkean tason kuvaaja ja kuvassa 4 funktiokuvaaja suunniteltavasta projektista.



Kuva 2. Korkean tason kuvaaja osa-aluejaossa (Frimanin 2020)



Kuva 3. Funktiokuvaaja osa-aluejaosta (Friman 2020)

osa-alueiden jako (framework) on menetelmä, jonka tarkoituksena on jakaa systeemin kokonaisuus pienempiin osiin, eli alisysteemeihin. Osa-alueiden jaossa on tärkeää tietää mitä tavoitteita ja siten mitä vaatimuksia suunniteltavalla systeemillä on. Menetelmän tarkoituksena on jakaa laaja ja monenlaista osaamista vaativa projekti tiimeihin, jotka keskittyvät omiin ongelmiinsa. Tiimeihin jako vaatii tarkat rajapinnat, jotta ryhmien välinen yhteistyö olisi sujuvaa ja turhaa suunnittelua olisi vähän. Suunnittelun tulee siis olla kokonaisvaltaista, jonka vuoksi alkuvaiheessa tulee olla kokonaiskuva projektin etenemisestä. Hahmottamisen parantamiseksi osa-alueiden jaossa hyödynnetään hahmottamismenetelmiä, kuten riippuvuusmatriisia (*DSM, Design, Structure Matrix*), systeemin integraatiota, sekä v-mallia.

5 why on menetelmä, jossa tarkoituksena on päästä kiinni suunnittelutavoitteiden perimmäisiin tarkoituksiin. Menetelmässä käydään läpi kaikki suunniteltavan systeemin tavoitteet ja vaatimukset kysymällä vähintään viisi kertaa, miksi vaatimus on asetettu. Tavoitteena on selventää syy-seuraus-suhteet, suunnittelun juurisyyt ja välttää virheelliset johtopäätökset suunnittelussa, eli välttää turhaa suunnittelua.

Vaatimusten luokittelu on menetelmä, jossa tarkoituksena on luokitella vaatimukset niiden luonteen perusteella ja lopulta konkretisoida vaatimukset numeraaliseen ja tarkkaan muotoon. Vaatimukset tukevat tarpeista ja täten vaatimusten analysointi alkaa tarpeiden analysoinnista. Tarpeiden ja vaatimusten sitomiseen yhteen käytetään systeemi-suunnittelun vaatimusten luokittelu menetelmää (*design requirements classification*). Menetelmässä tarkoituksena on luoda kuvaaja, jossa funktiot ovat jaoteltuna hierarkki-

sesti laajakäsitteisistä sanallisista tarpeista alempiin tarkkoihin numeraalisiin toiminta-vaatimuksiin, joita tullaan käyttämään parametrisessä ratkaisijassa. Hierarkkisen jaotellun tarkoitus on kuvata mahdollisimman selkeästi systeemiä. Kuitenkin Friman esittää *Lamm & Weilkiensin* (2010) ettei jaotellua ole mahdollista tehdä systemaattisesti tai automatisoidusti. Tästä syystä tasojen jaottelu on käyttäjän käsissä. Kuvassa 5 on esitelty menetelmää.

Vaatimusten luokittelu	
Toiminnollinen analyysi	Mitkä ovat systeemin toimintoja (kielellinen)
Vaatimusten määrittely	Mitkä ovat toimintojen vaatimukset (kielellinen)
Vaatimusten erittely	Mitkä ovat vaatimusten rajat (numeraalinen)

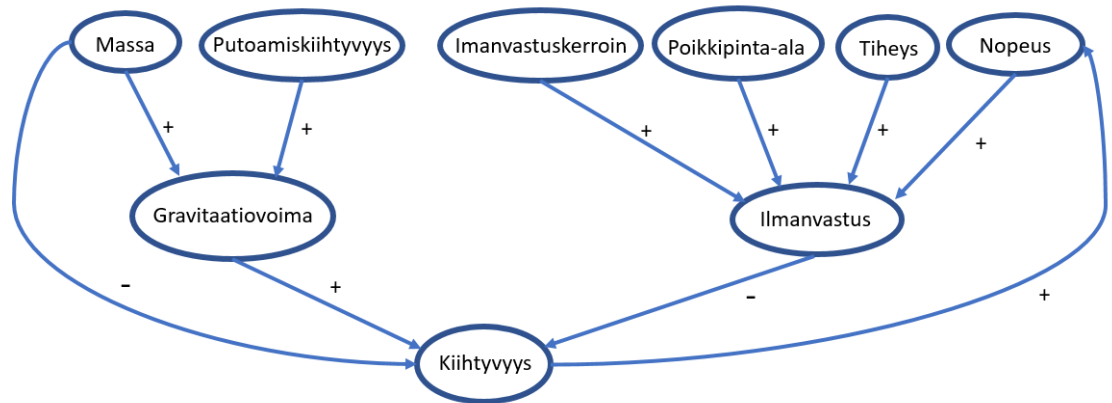
Kuva 4. *Vaatimusten luokittelun tasot*

Riippuvuusmatriisi (*design structure matrix, DSM*) on iteroinnin minimoimiseen tarkoitettu työkalu, jossa tarkastellaan suunnitteluvaiheiden riippuvuuksia. Menetelmässä rivit ja sarakkeet nimetään toimilaitteiden mukaan ja suunnitteluriippuvuus merkataan matriisiin. Riville asetetaan tarkasteltava toimilaite ja riville laitetaan merkki niiden sarakkeiden kohdille, joihin tarkasteltava toimilaite vaikuttaa. Tämän jälkeen matriisin rivit ja sarakkeet järjestetään algoritmien mukaisesti siten, että riveille tulee järjestys, jonka mukaisessa järjestyksessä suunniteltuna iteroitava määrä on vähäisin.

DSM käytettäessä tulee kuitenkin huomioida laskentavaiheiden laskettavuus, sillä tietokone ei käytä jokaiseen vaiheeseen yhtä kauan aikaa. Lisäksi rajoitteet ovat iteroinnin lopettavia tekijöitä, joten ne tulee sijoittaa mahdollisimman aikaiseen vaiheeseen. Tämän vuoksi rajoitteet tulee listata ja antaa niille arviot, miten herkästi ne hylkäävät parametrisetin. Tämän jälkeen *DSM* ja rajoitetaulukon pohjalta päätetään, missä järjestyksessä laskenta kannattaa tehdä. Arvio toteutetaan projektin yksinkertaisuuden ja työn laajuuden rajaamiseksi.

Fysikaalisen mallinnus tarkoittaa fysikaalisten ilmiöiden mallintamista muuttujien ja parametrien avulla. *MBSE* menetelmässä mallinnus aloitetaan korkealta tasolta, eli halettujen toimintojen kuvaamisesta. Ajattelussa laskeudutaan alemmille tasoille yleistäen ongelmia siten, ettei mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja rajata ulos oletuksilla. Tavoitteena on päästä parametritasolle ja saada selville mitä ominaisuuksia on mahdollista manipuloida suunnittelun hyödyksi.

Kausaalikuvaaja (*causal graph*) on parametrisesti eritelty kuvaaja, joka esittää fysi- kaalisten ilmiöiden riippuvuuksia toisiinsa nähden nuolien avulla. Nuolet lähtevät aiheut- tavista parametreistä ja osoittavat tavoitteita kohti. Kausaalikuvaaja voi paljastaa, mitkä tavoitteet ovat ristiriidassa keskenään. Kausaalimallinnukseen tarkoitetuilla ohjelmilla on mahdollista asettaa painokertoimia parametreille ja siten löytää optimaalinen ratkaisu annetuin rajaehdoin. Kuvassa 6 on esimerkki kausaaligraafista.



Kuva 5. Esimerkki kausaaligraafista, jossa painovoima ja ilmanvastus vaikuttavat putoavaan kappaleeseen.

Kuvassa 6 on kuvattu kausaaligraafilla vapaasti tippuvan kappaleen kiihtyvyyttä, kun ilmanvastus on huomioitu. Kuvaajan perusteella kiihtyvyyteen on mahdollista vaikuttaa muuttamalla parametrejä, joita ovat massa, putoamiskiihtyvyys, ilmanvastuskerroin, poikkipinta-ala, tiheys ja nopeus. Kuvaajan perusteella massalla on kiihtyvyyteen sekä pienentävä että kasvattava vaikutus. Lisäksi nopeus ja kiihtyvyys ovat ristiriidassa keskenään. Kuvaajan perusteella kiihtyvyyden parantamiseksi kannattaa pyrkiä parantamaan putoamiskiihtyvyyttä, ilmanvastuskerrointa, poikkipinta-alaa ja ilman tiheyttä. Kuvaaja ei kerro kuinka paljon kukin parametri vaikuttaa ja siksi mallilla ei voi suorittaa optimointia.

Systemin integraatiolla tarkoitetaan alisysteemin sulauttamista kokonaissysteemiin, eli kyseessä on verifiointin ja validoinnin systemaattinen suunnittelu (*Montgomery, 2013*). Integraation käsite on hyvin laaja ja erilaisia toteutuksia ja suunnittelutyökaluja on useita. Tässä tutkimuksessa integraatio käsitellään pinnallisesti. Integraatiossa suunnitellaan milloin ja kuinka eri osa-alueet liitetään toisiinsa, sekä kuinka usein ja miten laajalti eri alisysteemien vaatimuksia varmistetaan ja päivitetään. Montgomeryn mukaan hyvänä periaatteena integroinnissa on testata alisysteemien toimintaa mahdollisimman useasti, jotta virheet suunnittelussa paljastuisivat mahdollisimman aikaisin. Lisäksi integraatiossa tulee varmistaa osakokonaisuuksien kuten hydraulikan ja rungon yhteensopi-

vuus. Esimerkiksi suunnittelun tavoitteena on hydrauliiikan mahduttaminen runkoon. Integraatio kertoo milloin ja mitä ominaisuuksia on ilmoitettava ja kenelle, sekä kuinka laaja vaikutus muutoksella on kokonaisuuteen. Laajoissa kokonaisuuksissa integrointiriippuvuudet voi kasvaa monimutkaisiksi ja siksi integroimisessa tulee välttää alisysteemejä, joihin kohdistuu monta integraatiovaatimusta. Suunnittelu tulee siis toteuttaa siten, että on mahdollisimman paljon pieniä erillään testattavia kokonaisuuksia. Montgomeryn mukaan integraation tulee vaikuttaa testaamisen lisäksi suunnitteluun, jotta projektin onnistuisi hyvin. Integraatiota on myös mahdollista hyödyntää systeemin käyttöönnotossa, sekä operoinnissa inkrementaalisen kehittämistä edistämiseksi. Esimerkiksi voimalaitoksen uudistuksessa uuden laitteiston asentamisesta on integraation näkökulmasta järkevää suunnitella mahdollisimman nopeasti asennettava, jotta voimalan alhaallaoloaika olisi lyhyt. Lisäksi mikäli tiedossa on jonkin uuden lupaavan tekniikan markkinoille tulo, joka parantaa laitoksen hyötysuhdetta, kannattaa teknologian mahdollinen käyttöönotto huomioida suunnittelussa.

2.2 Konseptisuunnittelu ja konseptisuunnittelun työkalut

Käytetyt konseptisuunnittelun menetelmät pohjautuvat Aino-Maija Myllärin (2012) Diplomityössä esitettyihin menetelmiin. Diplomityössään Myllärinen esittelee Pahl et al (2007) ja *Ulrichin & Eppingerin* (2008) konseptisuunnittelumenetelmät, sekä ottaa molemmista menetelmistä omaan tapaustutkimukseensa sopivat osavaiheet.

Kumpikin Pahl et al. ja Ulrichin ja Eppingerin menetelmistä koostuu kahdesta vaiheesta, joista ensimmäinen on vaatimusten selventämistä. Tämä vaihe on katettu vaatimusanalyysillä. Pahl et al. menetelmän rakenne on suppeasti esiteltynä seuraava:

1. Abstraktion tarkoituksena on löytää ratkaistavan ongelman ydin.
2. Funktionaalisen rakenteen luomisessa luodaan ratkaistavalle ongelmalle funktio ja jaetaan se alifunktioihin.
3. Toimintaperiaatteiden etsimisessä etistään keino alifunktioiden ratkaisemiseksi. Mahdollisia menetelmiä ovat luonnon analysointi, tunnetun teknillisen laitteen tutkiminen, kirjallisuuskatsaus, analogiat, aivoriihi, 635 metodi *Gallery* menetelmä, *Delphi* menetelmä, synteesi, järjestelmän luokittelu.
4. Toimintarakenteiden yhdistämisessä tarkoituksena on löytää ratkaisuvaihtoehtoja alifunktioille/aliongelmile.
5. Sopivien yhdistelmien valitsemisessa alifunktioiden ratkaisujen sopivuutta analysoidaan ja vertaillaan.
6. Variaatiovaihtoehtojen analysoinnissa tarkastellaan tarkemmin mahdollisia kokonaisuusvaihtoehtoja. Analysointiin käytettäviä menetelmiä ovat suuntaa antavat laskelmat, yksinkertaiset luonnokset, markkinatutkimus ja fyysisten mallien tekeminen.

7. Variaatiovaihtoehtojen arviointi on viimeinen vaihe, jossa valittujen kriteerien perusteella valitaan paras konseptivariaatio. Arviointikriteerejä ovat kokoonpantavuus, kustannukset, ergonomia, toimivuus, ylläpidettävyyys, käytettävyys, tuotettavuus, laadunvalvottavuus, uudelleenkierrätettävyyys, turvallisuus ja kuljetettavuus.

Ulrichin ja Eppingerin Menetelmä on puolestaan suppeasti esitettyä seuraava:

1. Asiakkaan tarpeiden tunnistamisessa tunnistetaan asiakkaan oleelliset tarpeet. Tämän selvittämiseksi suositeltavia menetelmiä ovat asiakkaan haastattelu, kuvailla tarvetta ratkaisun sijaan, olla spesifi, vaatimusten positiivinen lausemuotoilu, valmistettavaan tuotteeseen kannattaa suhtautua välineenä päämäärän sijaan ja kuvaa vaatimuksia neutraalisti.
2. Laatuvaatimusten asettamisen tarkoituksena on asettaa ideaaleja arvoja, joihin voidaan verrata arvoja tuotteen suunnittelua iteroidessa.
3. Tuotekonseptien luominen koostuu viidestä vaiheesta: Ongelman selkeyttäminen ja jakaminen pienempiin osiin, ratkaisujen hakeminen ulkoisista lähteistä, ratkaisuvaihtoehtojen kehittäminen ryhmän sisäisesti, tutkittujen ratkaisujen systemaattinen tutkiminen ja lopuksi konseptivaihtoehtojen tulevaisuuden kehityksen tunnistaminen.
4. konseptin valitseminen, jossa Ulrich ja Eppinger suosittelee alkuun konseptivaihtoehtojen alustavaa seulontaa ja sen jälkeen realististen konseptivaihtoehtojen pisteyttämistä.
5. Konseptin toimivuuden testaaminen.
6. Toimintakyvyn päivittäminen konseptin kykyihin matemaattisesta mallista.
7. Konseptin tuotannon ja myynnin suunnittelu.

Myllärin mukaan menetelmät ovat samankaltaisia ja on sen perusteella yhdistelty menetelmiä sopimaan autonomisen kaivosrobotin puomin suunnitteluun. Tässä työssä tarkoituksena on tehdä konseptintodistus, joka on luonteeltaan erilainen kuin olemassa olevan tuotteen kehittäminen. Tästä syystä konseptinkehityksessä käytetään omaa menetelmää, johon valitaan projektin laajuuden ja projektin toiminnan suhteen mahdollisimman tehokkaat menettelytavat. Menetelmässä kuitenkin pyritään hyödyntämään ja huomioimaan Ulrich & Eppingerin ja Pahl et al. periaatteet ja suositukset.

Vaatimusanalyysi on menetelmä, jonka tarkoituksena on selvittää, mitä vaatimuksia suunniteltavalla kohteella on. Konseptisuunnittelu ei ota kantaa vaatimusten selvittämiseen, mutta niiden tulee olla suunnittelumenetelmän mukaan yksiselitteisiä ja mitattavia.

Toimilaite-erittely tarkoittaa alisysteemin vaadittavien toimintojen erittelyä. Erittelyn perusteella selvitetään, millaisia toimilaittevaihtoehtoja on olemassa kuhunkin ongelmaan. Vaihtoehtoja hyödynnetään listausvaiheessa. Menetelmä muistuttaa MBSE:n osa-alueiden erittelyä, mutta alemmalla ja yksityiskohtaisemmalla tasolla.

Aivoriihi on tiimityöskentelymenetelmä, jonka tavoite on tuottaa mahdollisimman paljon ratkaisuvaihtoehtoja. Menetelmä on epäformaali ja antaa vain antaa asenneoh-

jeita ja tekniikoita, jotka luovat innovatiivisuutta herättävän ilmapiirin. Menetelmän alkutilanteessa on tavoite, jonka saavuttamisen ongelmia käydään läpi ja niihin etsitään ratkaisuja. Innovatiivisuuden kannalta tärkeä on olla positiivinen ja esittää mahdollisimman paljon ideoita ilmiselvistä hullunkurisiin, jotta tarkasteltava vaihtoehtoavaruus olisi mahdollisimman laaja.

Samankaltaisten laitteiden vertailussa tarkoitus on etsiä suunnittelussa olevaan ongelmaan valmis ratkaisu. Menetelmä perustuu siihen, että toiminnot ovat joukko perustavanluonteisia ongelmia, joihin löytyy ratkaisuja luonnosta ja aiemmista suunnitteluratkaisuista. Ratkaisut ovat yleensä eri mittakaavassa, mutta skaalattavissa. Yleensä valmis saatavilla oleva ratkaisu säästää resursseja.

Visualisointi on menetelmä, jonka tarkoitus on parantaa ihmisen ajattelukykyä graafisilla esityksillä. Ongelmia ratkaistaessa pyrimme mielessämme hahmottamaan ongelmatilanteen. Tätä menetelmää lähes kaikki ovat käyttäneet muun muassa välivaiheita ylös kirjoittaessa haastavia matemaattisia tehtäviä ratkaistaessa. Konseptisuunnittelu on kompleksista ja mielikuvitusta vaativaa, joten suunnittelussa on järkevää pyrkiä systemaattisesti visualisoimaan konseptiehdotuksia. Tämä vähentää virheiden määrää, lisää innovatiivisuutta ja kykyä tunnistaa ongelmatilanteita. Hahmotusmenetelmiä on useita erilaisia ja yleisesti ottaen menetelmissä tasapainotellaan resurssien, ajankäytön ja hyötyjen kesken.

karkeissa laskelmissa tarkoituksena on hahmottaa erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen toteutettavuus. Menetelmässä lasketaan voimakkaasti yksinkertaistetuilla laskuilla suuntaa antavia tuloksia ja siten saada nopeasti selville ominaisuuksia ja vaatimuksia eri designeille. Esimerkkejä yksinkertaistamista on vähän vaikuttavien komponenttien oletaminen nolaksi tai vakioksi, muotojen ja kulmien yksinkertaistaminen, sekä konservatiiviset arviot. Menetelmä nopeuttaa eri vaihtoehtojen läpikäymistä ja huonojen vaihtoehtojen eliminoimista. Kuitenkin liika yksinkertaistaminen voi johtaa käypien vaihtoehtojen hylkäämiseen.

Listaminen on menetelmä, jossa tarkoituksena on tuoda eri konseptivaihtoehdot keskenään verrattaviksi. Vaihtoehtojen hyvät ja huonot puolet esitetään numeroarvoin. Tämä helpottaa suunnittelun muuttamista myöhemmissä vaiheissa, koska konseptivaihtoehtojen hyvät ja huonot ominaisuudet ovat dokumentoituna.

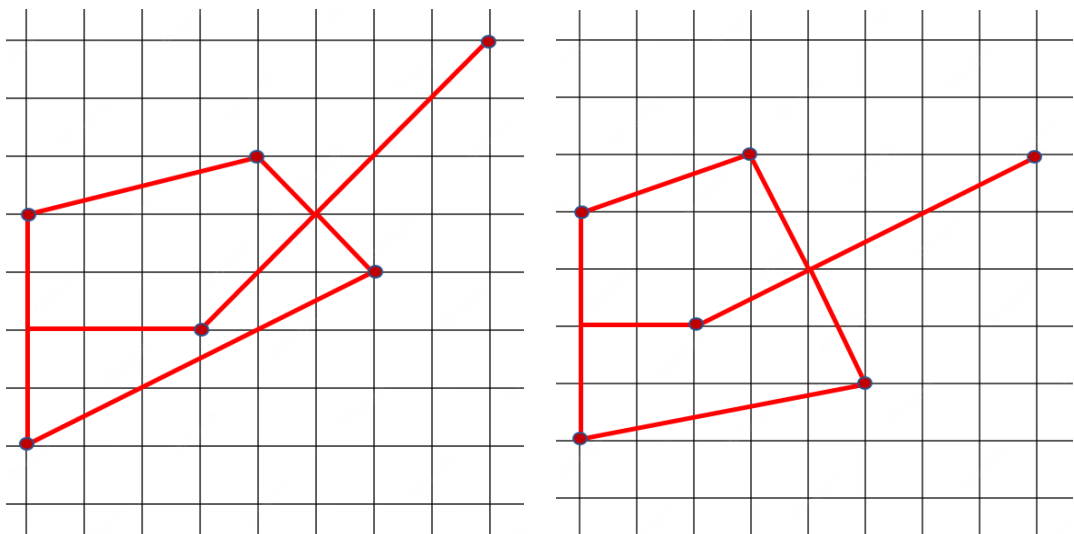
Konseptin vertailu on konseptien listaukselle jatkoa. Tarkoituksena on vertailla karkeasti eri vaihtoehtojen ominaisuuksia yksiselitteisillä lukuarvoilla ja valita parhaat vaihtoehdot tarkempaan käsittelyyn. Useampi vaihtoehto valitaan, koska tässä vaiheessa

tehdyt laskelmat eivät ole vielä tarkkoja. Menetelmässä toimintojen ominaisuuksille annetaan painoarvot tärkeyden mukaan. Eri ominaisuuksien vertailussa tulee pyrkiä objektiivisuuteen ja tästä syystä hintafunktion käyttö on suositeltavaa. Hintafunktio muuttaa ominaisuudet rahassa mitattavaan määrään, sillä yritysten toiminnan hyvyttä mitataan tuottavuudella.

Fysikaalinen mallinnus tarkoittaa parhaimmille konseptivaihtoehdoille tehtäviä toiminnan kannalta tarkkojen laskentamallien tekoa. Tarkoituksena on saada selville vaihtoehtojen ominaisuudet. Menetelmä on konseptisuunnittelussa esitetty pintapuolisesti laajana kokonaisuutena.

2.3 Parametrinen suunnittelu ja työkalut

Lallan (2018) mukaan parametrinen suunnittelu käytetään yleisesti arkkitehtuurissa ja teollisessa muotoilussa. Menetelmää käytetään myös koneteknisessä suunnittelussa. Menetelmällä tarkoitetaan Lallan mukaan tyypillisesti sopivan muodon löytämistä muuttamalla suunnitteluparametreja algoritmisesti annetuilla rajoitteilla. Lallan mukaan parametrinen suunnittelu käytetään paljon periaatteita ja tekniikoita, jotka muistuttavat muita suunnittelumenetelmiä, kuten algoritmiavusteista suunnittelua. Parametrinen suunnittelulle on kuitenkin formaali rakenne, jonka pohjalta suunnittelu toteutetaan. Lisäksi suunnittelussa jätetään hankalasti objektiivisesti mitattavia asioita pois, kuten turvallisuus. Parametrin mallin luominen on Lallan mukaan työlästä, jonka vuoksi menetelmää suositellaan käytettäväksi vain, kun tarkastava geometria on monimutkainen tai kun suunnittelussa odotetaan tulevan paljon muutoksia. Kuvassa 7 on esimerkki parametrin suunnittelun ongelmasta



Kuva 6. *Esimerkki parametrisen ratkaisijan joukoista. Ruudukko on geometrinen avaruus, punaiset sauvat ovat geometrisia elementtejä ja punaiset pisteet muuttujia. Reunaehtona sauvat eivät saa törmätä toisiinsa. Esimerkissä alkeellinen versio suunniteltavasta puomista. (Mukaillen Lalla 2018)*

Hoffmann & Joan-Arinyo (2005) mukaan geometrinen reunaehtotehtävän on mahdollista ratkaista neljän joukon avulla:

1. E, geometrinen avaruus
2. O, geometriset elementit
3. X, muuttujat
4. C, reunaehdot

Kuvassa 7 on esitetty esimerkki parametrisestä systeemistä. Systeemissä ristikko on R^2 Euklidinen avaruus, jonka rajoissa parametrejä voidaan muuttaa. Geometrisiä elementtejä ovat muodon perusyksiköt. Esimerkiksi kuvassa 7 geometrisiä elementtejä ovat punaiset sauvat, jotka esittävät pisteiden etäisyyksiä. Muuttujia ovat elementit, joiden arvoa muutetaan eri tarkastelutilanteissa. Reunaehdot ovat vaatimuksia eri tarkastelutilanteiden käyvyydelle. Tällaisia ovat pituus-, kulma- ja symmetriaehdot. Reunaehdot voivat olla riippuvaisia muuttujista. Geometrisille elementeille voidaan antaa lisäksi joukon ominaisuuksia A_0 , jotka voivat olla esimerkiksi poikkileikkauksen leveys, kimmokerroin tai jäyhyysmomentti.

Parametrinen suunnittelussa geometrinen reunaehto ratkaisuun on useita menetelmiä. Diplomityössään Lalla jakaa ratkaisumenetelmät kahteen osaan: numeeriseen ja graafiseen ratkaisumenetelmään. Ensimmäisessä menetelmässä muodostetaan yhtälöryhmä ja ratkaistaan numeerisesti iterointimenetelmällä. Lalla nostaa diplomityössään (2017) esille Bourman et al. (1995) ja Hoffmann & Joan-Arinyo (2005) teoksista *Newton* ja *Newton-Rhapon*-menetelmän. Graafisessa ratkaisumenetelmässä puolestaan ongelmat puretaan aliongelmiksi. Tämän jälkeen muodostetaan yksittäisiä yhtälöitä, jotka ratkaistaan algebrallisesti. Menetelmän on visuaalisesti helpommin ymmärrettävä. Kummassakin menetelmässä matemaattisen yhtälön muodostaminen voi olla haastavaa tai mahdotonta. Tästä syystä käytetään lisäehtoja, (geometrisiä lisäehtoja) joilla pyritään välttämään hankalia tai tuntemattomia riippuvuuksia. Tällöin ratkaisu on mahdollista jakaa geometrinen reunaehto ratkaisemiseen ja lisäehto tarkastamiseen.

Parametrisessä suunnittelussa ratkaisuja etsitään algoritmin avulla. Algoritmia muodostaessa tulee pohtia mitä geometrisia elementtejä pitää muuttujina, jotta laskenta-aika, monimutkaisuus ja uudelleen käytettävyyden olisivat mielekkäitä. Lisäksi parametrien ja riippuvuuksien määrä tulee pitää mahdollisimman vähäisenä. Tätä varten on tehtävä yksinkertaistuksia, jotka heikentävät mallin tarkkuutta. Lisäksi parametrisiä yhtälöitä

muodostaessa tulee huomioida uudelleenkäytettävyys, sillä Lallan (2017) mukaan parametrinen mallin muodostaminen on aikaa vievää ja kallista. Tarkastelutilanteista siis halutaan mahdollisimman yleistettäviä. Lisäksi muutettava parametri kannattaa valita parametri, jonka muuttamisella on selkeä vaikutus kokonaisuuteen. Esimerkiksi tarkasteltavan elementin pisteen voi valita tarkasteltavaksi suhteessa globaaliin koordinaatistoon tai suhteessa toisen elementin sijaintiin ja asentoon. Lisäksi algoritmiin luodaan hintafunktio, jonka avulla arvioidaan eri parametrien hyvyys. Viimeisenä on optimointimenetelmän valitseminen. Yleisesti ottaen parametrinen suunnittelu ei ota kantaa mitkä optimointimenetelmää käytetään. Lalla (2017) esittää työssään käytetyn *Rhinoceros*-ohjelmiston lisäosan Galapagos ratkaisijan käyttöä. Lisäksi Lalla mainitsee työssään Jalkasen (2007), Lambertin (2008) ja Melan (2013) tutkineen heuristisia optimointimenetelmiä ristikkorakenteiden optimoinnissa. Tässä työssä ei kuitenkaan käytetä varsinaisia optimointimenetelmiä ja siksi optimointimenetelmiin ei syvennytä.

Alkuarvaus esitetään parametrinen suunnittelun teoriassa vaatimuksena, mutta menetelmä ei anna ohjeistusta, miten muodostetaan alkuarvaus suunnittelulle. Vaatimuksena alkuarvaukselle kuitenkin esitetään mahdollisimman helposti parametriseen muotoon muokattava arvaus. Haastavaa parametriseissä suunnittelussa on totuusarvomutujat, jotka muuttavat yhtälöiden riippuvuuksia.

Fyysisten mallien muodostus on samankaltainen kuin muissa menetelmissä. Huomioon otettavaa on kuitenkin ilmiöiden jakaminen siten, että niiden yhtälöt olisivat uudelleenkäytettävissä. Lisäksi riippuvuuksia mallintaessa tulee huomioida mahdolliset yksinkertaistukset mallien hyödyntämiseksi.

Muuttujien valitsemisessa valitaan geometriset parametrit, joita muutetaan eri tarkastelutilanteissa. Valinta tehdään tarkoituksenmukaisesti, eli valitaan parametri, jonka muuttamisella on selkeä vaikutus haluttuihin ominaisuuksiin.

Yhtälöryhmiä muodostaessa selvitetään fyysikaalisen mallien riippuvuudet ja mallien tyyppi. Valitusta geometrisen ratkaisumenetelmän mukaan on erilaisia keinoja ratkaista eri muotoisia yhtälöryhmiä, kuten aiemmissa kappaleissa on osoitettu. Lisäksi yhtälöiden riippuvuudet ja keskinäisriippuvuudet tulee selvittää. Keskinäisriippuvuus johtaa tilanteeseen, jossa alkuarvaus vaikuttaa parametriin, joka vaikuttaa suoraan geometrian tai lisäehtojen avulla alkuarvaukseen. Tällaisen suunnittelutason takaisinkytkennän seurauksena yhtälöryhmä muuttuu epälineaariseksi ja siten tekee laskennasta raskaampaa. Epälineaarisuus voi myös olla itse fyysikaalisessa mallissa.

Reunaehtojen muodostuksessa valitaan millä välillä ja diskreetissä tilanteessa kuinka tiheään muuttujia tarkastellaan. Yleisesti ottaen insinöörisuunnittelussa parametrisoitu suunnittelu tehdään diskreetissä avaruudessa. Tiheämpi tarkasteluverkko on laskennallisesti raskaampi, mutta löytää useamman ratkaisun ja siten mahdollisesti paremman ratkaisun. Riippuen geometristen reunaehtojen ja lisäehtojen laskentanopeudesta, laskennan voi jakaa moneen osaan. Aluksi laajalla ja harvalla muuttujaverkolla ja sen jälkeen suppealla ja tiheällä verkolla. Laskennan voi myös tehdä laajalla ja tiheällä verkolla, mikäli laskenta on nopeaa tai laskennalla ei ole kiirettä.

Lisäehtojen tehtävä on yksinkertaistaa monimutkaisia tai tuntemattomia riippuvuuksia, sekä varmistaa, että suunnittelu täyttää suunnitteluvaatimukset, joihin reunaehdot ei pysty vastaamaan. Yleensä lisäehdot ovat yksinkertaistuksia, jotka heikentävät mallin tarkkuutta verrattuna todellisuuteen. Tästä syystä yksinkertaistusten tulee tehdä konservatiivisesti, jotta lisäehto ei hyväksy huonoja tai toimimattomia suunnitteluvaihtoehtoja. Lisäehdot voidaan jakaa funktionaalisesti kahteen ryhmään: lisäehto voi auttaa selvittämään fysikaalisten mallien riippuvuutta muodostamalla apuparametrin tai lisäehto voi osoittaa vaihtoehdon käymättömäksi, eliminoida suunnitteluvaihtoehdon ja käskeä algoritmia siirtymään seuraavaan parametrijärjestelmään.

Hintafunktion tehtävä on kuvata matemaattisesti ja yksiselitteisesti, kuinka hyviä eri suunnitteluvaihtoehdot ovat. Yleensä suunnittelun kohteella on useita toiminnallisia tavoitteita. Kuitenkin yritysten tavoitteena on tuottaa voittoa ja siksi hintafunktioksi muodostetaan sen suhteen, miten paljon suunnitteluvaihtoehto kykenisi tuottamaan voittoa. Konseptin todistuksessa hintafunktion tekeminen taloudellisin perustein on aikaa vievää. On olemassa myös muita yksinkertaisempia menetelmiä hintafunktion toteuttamiseksi. Esimerkiksi subjektiivisempi menetelmä, jossa asetetaan eri toiminnoille tavoitearvo, jolla jaetaan saatu ominaisuus, jolloin saadaan dimensioton arvo. Tämän jälkeen dimensioton arvo kerrotaan painoarvokertoimella riippuen ominaisuuden tärkeydestä. Mikäli arvo on sitä parempi, mitä pienempi lukuarvo on, pitää ottaa luvusta käänteisarvo. Tämä toistetaan jokaiselle arvioitavalle toiminnolle ja luvut kerrotaan yhteen, jolloin muodostuu yksiselitteinen arvo, joka kuvastaa suunnitteluvaihtoehdon hyvyyttä. Menetelmä on kuitenkin subjektiivinen, eikä mallit aina kuvasta täydellisesti todellisuutta ja tästä syystä parhaimpien suunnitteluvaihtoehtojen arvojen tallentaminen on suositeltavaa. Hintafunktion kanssa voi käyttää luovuutta, kunhan painoarvo luokittelee, kuinka tärkeä ominaisuus on. Esimerkiksi dimensiottoman arvon potensioimisella voi lisätä ominaisuuden herkkyyttä suhteessa, kuinka kaukana ominaisuus on tavoitteesta. Lisäksi ominaisuuksille voi asettaa diskreettejä rajoja, jolloin jokin ominaisuus on parempi kuin toinen.

Optimoinnissa käydään muuttujia läpi järjestelmällisesti arvoja muuttaen siten, että paras mahdollinen ratkaisu löytyy mahdollisimman vähällä etsimisellä. Parametriseen suunnitteluun sopivia optimointimenetelmiä ovat heuristinen optimointi, joka tarkoittaa tarpeeksi hyvän ratkaisun löytämistä.

2.4 Monitieteellinen optimointi ja sen työkalut

Monitieteellinen optimointi (*Multidisciplinary optimization, MDO*) käytetään monimutkaisten systeemien suunnitteluun, jossa hyödynnetään useaa tieteenalaa ja tieteenalojen ratkaisuihin käytetään edistyneitä ratkaisumenetelmiä. Edistyneitä ratkaisumenetelmiä ovat esimerkiksi *FE* mallinnus ja virtauslaskenta. *MDO* menetelmää käyttävistä aloista ovat autoteollisuus ja lentokoneteollisuus (Bailing & Sobieszczyński-Sobieski, 1994). Esimerkiksi lentokoneen suunnittelu voi jakaa kolmeen poikkitieteelliseen osa-alueeseen: suorituskykyyn, aerodynamiikkaan ja mekaniikkaan tutkimiseen. *MDO*:ssa optimoidaan systeemin kokonaisuutta. Kokonaisuus koostuu useasta mallista. Perinteisesti aerodynaaminen malli ja mekaaninen malli optimoidaan erikseen. Optimoidut tulokset voi olla keskenään ristiriidassa, jonka vuoksi optimaalisen ratkaisun löytäminen vie useita laskentaiteraatioita. *MDO* yhdistää mallit yhteen. Menetelmään on kehitetty useita tapoja kytkeä mallit yhteen, joita on esitetty Dépincé et al. (2010) artikkelissa. *MDO* menetelmä ei ota kantaa alifunktioiden optimointimenetelmiin ja siksi *MDO*:n optimoinnin alkuvaihe on optimoinnin standardimuotoa, mutta sisältää yhden lisävaiheen, jossa mallit kytketään toisiinsa:

1. suunnittelumuuttujat
2. rajoitteet
3. tavoitteet
4. mallit
5. mallien keskinäiskytkentä

Muuttujat ovat *MDO* menetelmässä samankaltaisia kuin parametrisessä suunnittelussa. Kuitenkin *MDO*:ssa huomioitavaa on myös muuttujien rajoittamisen suhteen konvergoitumisen paraneminen hienostuneimmilla optimointimenetelmillä (Jodei et al., 2007). *MDO* ei ole rajattu Euklidiseen avaruuteen, joten muuttujan arvot voivat muuttua useammalla tavalla. Muuttumisvaihtoehdot riippuvat siitä, miten helposti muutettava kohde on muutettavissa. Vaihtoehtoja on kolme:

1. epädiskreetti
2. diskreetti

3. totuusarvomuuttuja

Esimerkiksi Hydraulisyylinterin runko ja varsi vaativat tarkkoja toleransseja, mutta niiden tuotanto on suurta. Tämän vuoksi halkaisijoiksi kannattaa valita standardimitta. Hydraulisyylinterin halkaisijat ovat siis diskreettejä muuttujia. Puolestaan hydraulisyylinterin pituus on muutettavissa sahauskohtaa siirtämällä, jonka vuoksi yritykset tarjoavat helpommin kustomoituja pituuksia rungoille ja varsille. Näin ollen sylinterin halkaisija on epädiskreetti muuttuja. Lisäksi vaihtoehtona voi olla käyttää vaihtoehtoista toimilaitetta, jolloin käytettävät yhtälöt muuttuvat, jolloin totuusarvoja on mahdollista käyttää erilaisten laskentamallien hyödyntämiseksi.

Rajoitteet ovat numeropohjaisia vaatimuksia, jotka varmistavat suunniteltavan laitteen toimivuuden. Rajoitteet ovat samankaltaisia parametrin suunnittelun reunaehtojen ja lisäehtojen kanssa. *MDO*:ssa niitä ei ole kuitenkaan eroteltu toisistaan.

Tavoitteet ovat numeropohjaisia vaatimuksia, joiden tehtävä on kuvata suunniteltavan laitteen suorituskykyä. Tarkoitus on täyttää vaatimusanalyysin asettamat vaatimukset tarpeeksi hyvin. Tavoitteiden tulee olla mahdollisimman objektiivisia ja tarkoituksenmukaisia. Systemin tavoitteiden hyvyyttä kuvaa hintafunktio. Hintafunktio voi muodostua suoraan parametreista tai osa-alueiden omista hintafunktioista riippuen keskinäiskytkenässä valitusta menetelmästä.

Mallit ovat matemaattisia yhtälöitä, jotka kuvaavat millaisia vaikutuksia parametreilla ja muuttujilla on keskenään. Malleiksi tulee valita menetelmiä, jotka ovat helposti algoritmisesti laskettavissa. Optimointimenetelmiä *MDO* menetelmässä on enemmän kuin parametrissa suunnittelussa, koska muuttujien muuttumisvaihtoehtoja ei ole rajoitettu. *MDO* ei ota kantaa mitä optimointi menetelmää tulee käyttää, vaan on ohjeistus sille, kuinka optimointia käytetään. Optimointimenetelmät voidaan kuitenkin luokitella jakaa kahteen pääryhmään:

1. Gradienttipohjainen optimointi
2. Evoluutioalgoritmit

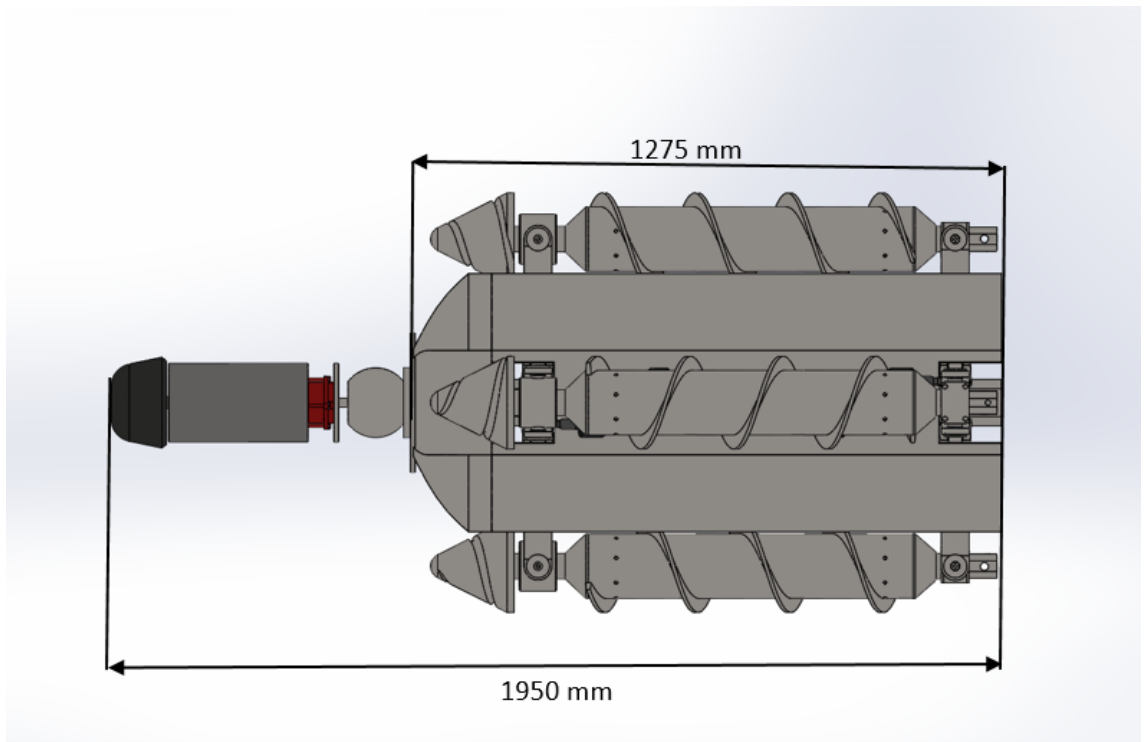
Gradienttipohjaisessa optimoinnissa valitaan tarkastelupiste, lasketaan muuttujien muutosnopeus suhteessa eri muuttujiin ja valitaan uusi tarkastelupiste. Tätä toistetaan, kunnes tarkastelupiste on paikallisessa tai globaalissa minimissä.

Evoluutioalgoritmeissa lasketaan joukko suunnittelumuuttujia ja parhaita arvoja saaneiden muuttujien piirteitä periytetään seuraavan joukon suunnittelumuuttujille. Menetelmän vahvuutena on tilastopohjainen laskeminen, jonka voi jakaa rinnakkaiseen laskentaan. Parametrin suunnittelun menetelmät ovat evoluutioalgoritmeja.

Mallien keskinäiskytcentä on vaihe, jossa osamallit kootaan yhteen. Keskinäiskytcentään on useita malleja, joita Dépincé et. al ja Yi et.al. (2008) on luetellut artikkelissaan. Menetelmiä ovat: *Multiple-discipline-feasible (MDF)*, *Individual-discipline-feasible (IDF)*, *All-at-once (AAO)*, *Concurrent subspace optimization (CSSO)*, *Collaborative optimization (CO)*, *Bi-level integrated system synthesis (BLISS)*. Dépincén mukaan *MDF* on käytetyin *MDO* menetelmä, jossa osa-alueiden rajoitteet ja hyvyydet tarkastetaan erikseen. Menetelmän hyvänä puolena on helppo soveltuvuus. Huonona puolena Dépincén mukaan menetelmässä on keskinäiskytcentän heikkous, joka heikentää konvergenssia. *All-at-once* menetelmässä koko systeemi käsitellään yhtenä optimoitavana mallina. Dépincén mukaan menetelmän hyvänä puolena on konvergenssi ja kyky käsitellä suuria malleja. Huonona puolena menetelmässä pitää mallintaa keskinäiskytcentöjä, jonka vuoksi mallien luominen on työlästä. Dépincén luottelee myös monitasoisia malleja (*CSSO*, *CO*, *BLISS*), joissa optimoidaan sekä osa-alueita että kokonaisuutta. Esimerkki monitasoisesta mallista on Jodei et.al. (2007) tutkimus, jossa herkkyysanalyysin avulla optimoitiin pieniä kiinteän polttoaineen laukaisulaitteita.

3. PARAMETRISEN SUUNNITTELUN ESIVAATIMUSTEN SELVITYS PUOMILLE

Puomin suunnittelu on aloitettu kuvan 7 lähtötilanteesta. Hahmotelma oli hyvin yksinkertainen ja koostui työkalusta, nivelestä ja kuoresta. Tärkeitä toiminnollisia ominaisuuksia, kuten työkalun teleskooppi ja ohjauslaitteet uupuivat, kuten myös työkalu, sen akseli, laakerointi ja vaihteisto. Työkalun nivel ei perustunut oikeaan saatavilla olevaan tuotteeseen ja hydrauliiikan asennettavuutta ei ollut huomioitu. Suunnittelun alussa vaatimukset ja suunnittelualueen rajaus olivat tiedossa, jonka vuoksi MBSE työkalujen käyttö jäi vähäiseksi. Tämän luvun tarkoitus on valita puomin suunnitteluun sopivat suunnittelutyökalut ja muokata lähtötilanne parametrisesti mallinnettavaksi.



Kuva 7. Kuva suunniteltavan puomin lähtökohdasta.

3.1 Suunnittelutyökalujen valitseminen

Suunnittelussa pyritään toteuttamaan parametrise suunnittelun periaatteita, sillä työkalun vaatimat voimat kallionporauksessa perustuvat kirjallisen materiaalin vertailuun, jossa käsitellään eri kokoluokan laitteita. Lisäksi tunnelissa kaivamisen tilarajoituk-

set ja puomin pituus hankaloittavat robotin kykyä kääntyä. Kääntyäkseen puomin on ylettävä oman säteensä ulkopuolelle. Tästä syystä pienellä parannuksella puomin kääntyvyyteen on suuri merkitys robotin kääntymiskulmaan.

Suunniteltava puomi ei suoranaisesti sovellu parametriseen suunnitteluun, sillä menetelmän hyödyntäminen vaatii alkuarvauksen ja selkeän tavoitteen. Suunnittelussa on tiedettävä mitä suunnittelukohteelta halutaan ja mihin asioihin on mahdollista vaikuttaa. Tästä syystä *MBSE* alkupään osavaiheita hyödynnetään suunnittelun alussa. Suunnittelun alussa hyödynnettäviä menetelmiä ovat seuraavat:

- Riippuvuusmatriisi
- *5 Why*
- vaatimusten luokittelu

Puomin suunnittelussa tilannetta ei ole helposti yleistettävissä. Tästä syystä konseptisuunnittelun menetelmiä tulee hyödyntää parametrisesti tarkasteltavaan malliin saakka. Konseptisuunnittelun loppupään tarkempaa analyysyä ei kuitenkaan käytetä ja täten parhaimman konseptin valitseminen perustuu vähemmän objektiivisiin mittareihin, mutta säästää aikaa. Lainattavat menetelmät konseptisuunnittelusta ovat seuraavat:

- toimilaite-erittely
- samankaltaisten laitteiden vertailu
- listaaminen
- konseptin vertailu

Parametrinen suunnittelu toteutetaan parametrisen suunnittelun menetelmin. Kuitenkin alkuarvaus on saatu aiempien menetelmien avulla. Lisäksi mallista pyritään tekemään mahdollisimman yksinkertainen, jotta optimointimenetelmiä ei tarvitse käyttää ja muuttujat voi käydä läpi tarpeeksi laajalla ja tiheällä parametriverkolla. Käytettävät parametrisen suunnittelun menetelmät ovat seuraavat:

- Fyysiset mallit
- muuttujien valitseminen
- yhtälöryhmien muodostus
- reunaehdot
- lisäehdot
- hintafunktio

Lisäksi tässä vaiheessa käytetään *MBSE*:ssä käytettävää riippuvuusmatriisia, jonka tarkoituksena on selvittää fyysisten mallien keskinäiskytkentää ja siten minimoida yhtälöiden epälineaarisuus. Muuttujien valitseminen, reunaehdot ja lisäehdot on tiivistetty yhdeksi erillisesti tarkasteltavaksi kappaleeksi. Monitieteellinen optimoinnista varsinaisia menetelmiä ei lainata työssä, mutta periaatteena lainataan kokonaisuuden optimoimista yksittäisten ominaisuuksien sijaan. Periaate ei kuitenkaan ole sovellettavissa kokonaisvaltaisesti robottiin, sillä muista laitteista ei ole saatavilla parametrisesti muuttuvaa mallia, jolla pystyy tarkastelemaan toimintojen hintaa robotin operoinnin suhteen.

3.2 Osa-alue jaottelu puomille

Osa-alueiden jako on tehty työn alussa korkealla abstraktiotasolla. Tässä tutkimuksessa osa-alueiden jakoa käytetään suppeasti suunnittelurajapintojen konkreettiseen tunnistamiseen. Rajapintoja ovat työkalua kehittävä työryhmä, mineraaleja havainnoiva työryhmä, puomin mikrotason ohjauksesta kehittävä työryhmä ja makrotason ohjausta kehittävä työryhmä. Koska projektissa ei ole yhtenevää suunnittelumenetelmää ja hintafunktiota, on rajapintojen suunnitteluparametrien vaikutusten tarkastelu haasteellista. Tästä syystä näitä parametreja on käsiteltävä yksittäistapauksina. Viestinnällisesti helpointa on antaa yksi tavoitearvo, johon kumpikin osapuoli pyrkii. Todennäköisesti piste ei ole optimaalinen systeemin kokonaisuuden kannalta. Siksi on tärkeä selvittää, kuinka parametrin muuttaminen vaikuttaa eri ominaisuuksiin. Suunnittelu on kuitenkin iteratiivista ja vaikutusten varmuus tarkentuu suunnittelun edetessä. Tästä syystä suunnittelun alussa on tärkeä tietää, kumpi rajapinnan osapuolista kykenee joustamaan paremmin suunnittelussa ja mitä on mahdollista saavuttaa realistisesti. Rajapinnat ja niiden joustavuus suhteutettuna vastapuoleen on esitetty seuraavassa taulukossa:

Annetut vaatimukset	Kallioon kohdistettava voima	Robotin halkaisija	Työkalun tilavuus	Iskunpituus
Annettavat vaatimukset	Kääntymissäde	puomin vapaa tilavuus	Puomin pituus ja massa	Hydraulisylin- terin halkaisija

Termit annetut ja annettavat vaatimukset ovat harhaanjohtavia, sillä todellisuudessa suunnittelussa on mahdollista vaikuttaa molemminpuolisesti ominaisuuksiin. Kallioon kohdistettava voima tulee työkalusta ja vaikuttaa siihen, mitä kalliota on mahdollista louhia ja kuinka monta piikkiä voi olla kerralla kontaktissa kallion kanssa. Robotin halkaisija vaikuttaa robotin etenemisnopeuteen, turhan materiaaliin louhimiseen ja robotin kuluihin. Työkalun tilavuus vaikuttaa puomin sisälle varattavaan tilaan. Iskunpituuden määrittää työkalun pituus ja puomin ohjattavuus. Kääntymissäde on tärkeä parametri

liikkuvuuteen, joka mahdollistaa mineraalisuonien tarkan seuraamisen ja uusia kallionporausstrategioita. Puomin vapaata tilavuutta vaativat letkujen, akkupankkien ja venttiilien asennus, sekä lietteen pumppaus ja sensorien asentaminen. Puomin massa ja pituus vaikuttavat robotin simulointiin ja ohjaukseen. Hydraulisyliinterien halkaisija vaikuttaa ohjauksen resoluutioon ja nopeuteen.

3.3 5 why menetelmän soveltaminen

5 why menetelmän mukaisesti siis projektin tarkoitus on:

1. Tehdä kaivosroboteista itsenäisempiä, pienempiä ja kykenemään toimimaan veden täyttämässä kaivoksissa
2. jotta kaivostoiminta vaatisi vähemmän pääomaa ja mahdollistaisi pienempien mineraalitaskujen hyödyntämisen,
3. jotta harvinaisten mineraalien tuotanto olisi hajautetumpaa,
4. jotta mineraalien saatavuutta ei voida käyttää poliittisena painostuskeinona,
5. jotta eurooppalaiselle taloudelle mineraalien hinta ja saatavuus pohjautuisi enustettavaan markkinatalouteen.

Projektin onnistumisen suhteen on tärkeä pitää mielessä edellä mainitut tavoitteet kompromissivaihtoehtoja pohtiessa.

Työkalun kohdalla puolestaan annetaan tilavaatimuksia, jotta valitut komponentit mahtuisivat puomiin, jotta työkalu kykenisi tuottamaan tarvittavan suorituskyvyn, jotta työkalu pystyisi louhimaan kiveä tavoitetulla tavalla, jotta työkalun käyttöikä olisi tarpeeksi pitkä ja robotin tuotantokapasiteetti olisi tarpeeksi suuri, jotta robotin käyttö olisi taloudellisesti kannattavaa. Työkalun tilavaatimusten suhteen on mahdollista vaihtaa komponentteja, mikäli työkalun mahduttaminen puomiin käy haastavaksi. Tilavaatimusten lisäksi työkalulla on voimavaatimus, joka pohjautuu samoihin perusteluihin. Lisäksi työkaluun kohdistettava voima mahdollistaa kovemman materiaalin louhimisen ja useamman työkalun piikin käytön, joka lisää materiaalin louhimisnopeutta.

Puomin havaintoantureiden tarkoitus on kartoittaa mineraalisuonen suunta, jotta robotti osaa itsenäisesti päättää mistä louhia kiveä, jotta robotin operointi vaatii vähemmän työvoimaa, jotta kaivostoiminta olisi taloudellisesti kannattavampaa. Taloudellisuus johdattaa raaka-ainemarkkinoiden vakaaseen hintaan ja saatavuuteen, joka on linjassa koko projektin tavoitteiden kanssa.

Puomin ohjaaminen asettaa sylinterien määrälle ja sijainnille vaatimukset. Ohjaus-sylinterien halkaisijan tulee olla tarpeeksi suuri, jotta puomin ohjauksen resoluutio on tarpeeksi suuri yksinkertaisesti ja helposti saatavilla venttiileillä, jotta työkalun mitatun

sijainnin virheen herkkyys on matala. Lisäksi puomin ohjauksen suhteen ylimäärittelyongelmaa tulee välttää, jotta sylinterit eivät kohdista voimia puomiin ja sylintereihin ohjausvirheiden vuoksi, jotta pysyviä muodonmuutoksia ei tule, jotta puomi pysyy ehjänä ja puomin automatisoitu toiminta säilyy ennustettavana.

Toiminnallisia tavoitteina puomille on asetettuna yltää mahdollisimman etäälle louhitavan tunnelin säteestä, jotta robotti voi tehdä mahdollisimman jyrkän käännöksen, jotta robotti pystyisi mahdollisimman hyvin seurata rikaspitoisia malmisuonia, jotta toiminta olisi taloudellisesti kannattavaa. Lisäksi jyrkkä kääntyminen mahdollistaa parempien tunnelinmuodostusstrategioiden käyttämisen. Tämän perusteella kääntymisen vaatimuksen suhteen on perusteltua joustaa vaadituista kääntymissäteestä, joka on 0,5 m yli robotin oman halkaisijan. Konseptin toimivuuden todistamiseksi suunniteltavan laitteen tulee kuitenkin selkeästi kyetä kääntymään. Kääntymissäde on siis suunnittelun tärkeä toiminnallinen kriteeri, joka tulee olla mahdollisimman pieni. Kyseessä on epämääräinen muoto, joten kyseinen tavoite tulee optimoida.

Puomin tulee olla lisäksi mahdollisimman kevyt ja lyhyt, jotta puomin ohjaaminen olisi mahdollisimman helppoa ja puomin toimilaitteet vaatisivat vähän voimaa, jotta laitteiden hajoamisen riskit vähenisivät, jotta laitteesta saisi tehtyä mahdollisimman kevyen, jotta laite vaatisi vähän pääomaa.

3.4 Puomin vaatimusten luokittelu

Puomi on osa konseptin toimivuuden todistamista ja siksi suunnittelua ohjaa toimivuus. Kuitenkin toimivuuden lisäksi turvallisuus tulee olla varmistettu. Puomin vaatimukset ovat määrittelyltä spesifejä, sillä suunnittelu tapahtuu systeemin matalalla tasolla. Vaatimusten tulee olla mahdollisimman yleistettäviä, jotta vaatimuksiin ei sisälly oletuksena ratkaisuvaihtoehtoa. Suunnittelussa on noudatettu tätä ohjetta, vaikka toiminnallisissa yksiköissä puhutaan konseptisuunnittelun ratkaisuista. Tämä johtuu siitä, että vaatimusten määrittely on iteratiivinen prosessi, joka tarkentuu suunnittelun edetessä.

Toimintorakenne on esitetty alla olevassa taulukossa 4. Puomin toiminnot jakautuvat viiteen päätoimintoon: kestävyyteen, ohjattavuuteen, valmistettavuuteen, työkalun liikutettavuuteen ja kiinnitettävyyteen. Tarkemmin jokaista toimintoa läpikäydään esitettyssä järjestyksessä alla olevissa taulukoiduissa toiminnollisissa yksiköissä.

Taulukko 4. *Puomin päätoiminnot.*

Puomi				
Kestävyys	Ohjattavuus	Valmistettavuus	Työkalun liikutettavuus	Kiinnitettävyyys

Kestävyydellä tarkoitetaan puomin kykyä vastustaa voimia ja pitämään muoto. Tärkeintä on, ettei runkoon tule pysyviä muodonmuutoksia ja nivelet kestävät testauksen ajan niihin kohdistuvat voimat. Voimat ovat luonteeltaan hankalasti ennustettavia työkalusta johtuvan väännön ja tärinän takia. Kuitenkaan robotin dynaamisen kestävyyspuolesta laitteen käyttöä ei tarvitse olla pitkä. Riittävä käyttöaika on arvioitu olevan sadoissa tunneissa. Tärinän vuoksi dynaaminen mitoitus tulee kuitenkin järjestää siten, että kuluvat osat ovat helposti vaihdettavissa ja mitoitukseltaan mahdollisimman kestävä. Liikkeet ovat hitaita ja siksi kestävyyspuolesta tarkastelun kohteena on staattisen kestävyys ja tavoitteena 2 varmuuskertoimeen pääsy. Lopullisessa suunnitelmassa hydraulisylinterit tuottavat 80 kN voiman ja työkalu kohdistaa 540 Nm väännön puomiin. Kestävyysvaatimukset on luokiteltu taulukkoon 5.

Taulukko 5. *Vaatimusten luokittelu puomin kääntyvyydelle.*

Kestävyys	
Staattinen kestävyys	Dynaaminen kestävyys
<ul style="list-style-type: none"> • Ei pysyviä muodonmuutoksia • Varauduttava yllättäville voimille • Mahdollisimman luja rakenne • Tarkastetaan tilanne, jossa sylinteri tuottaa suurimman voiman, vähintään 2 varmuuskerroin lujuuteen • Nivellaakereiden staattinen voima tulee olla vähintään suurempi kuin sylintereiden suurin tuotettu voima. 	<ul style="list-style-type: none"> • Niveliin kohdistuu tärinää, joten mahdollisimman ylimitoitettu • helposti vaihdettava.

Kiinnitettävyydessä tulee huomioida kolme rajapintaa: puomin kiinnitys runkoon, sensoreiden kiinnitys puomiin ja työkalun kiinnitys puomiin. Puomin ja rungon kiinnityksessä on kaksi erilaista kiinnitystä: puomin takapäädyn ja rungon keskikohdan välinen kiinnitys ja rungon, sekä puomin sylinterien kiinnitys runkoon. Kallion poraamiseksi työkalun kiinnityksen tulee olla mahdollisimman jäykkä (Yang et.al. 2017), tästä syystä kiinnitysten tulee olla mahdollisimman tukevia. Kiinnitysten tila rajoittuu robotin halkaisijaan, jonka yli sylinteri ei saa ylettyä. Siksi rungon ja sylinterin nivelen keskikohta saa olla enintään 250 mm säteellä robotin keskiakselista. Lisäksi robotin runkoon mahtuu rajallinen määrä venttiileitä, jonka vuoksi puomin puolelle tulee mahdollistaa venttiilien asentaminen. Tilavaatimus tulee huomioida kiinnityspisteitä valitessa. Työkalun tulee olla kiinnitettävissä puomiin. Työkalun suurin komponentti on vaihde, jonka sivun pituus on 142 mm, joten puomin kuoren sisähalkaisija tulee olla tätä suurempi. Lisäksi työkalun kiinnityspisteiden vuoksi työkalulle pitää antaa 640 mm tilaa pituussuunnassa. Kiinnitettävyyden vaatimukset on luokiteltu taulukkoon 6.

Taulukko 6. *Vaatimusten luokittelu puomiin kiinnitettävyydelle.*

kiinnitettävyys	
Runkoon kiinnitettävyys	Työkalun kiinnitettävyys
<ul style="list-style-type: none"> Sylinterin varsi ei saa osua kallioon runkokiinnityksen tulee olla laaja ja tukeva, varmuuskerroin vähintään 2 sylinterin maksimivoimasta. Ei muodonmuutoksia. Tilaa venttiileille. 8 venttiiliä tulee mahtua. 	<ul style="list-style-type: none"> Sisähalkaisijan pitää olla suurempi kuin vaihteella 142 mm pituuutta tulee olla tarpeeksi 600 mm kiinnityksen tulee kestää moottorin tuottama vääntö 540 Nm leikkausvoima vähintään 2 varmuuskertoimella

Valmistettavuus vaikuttaa millaisia osia on mahdollista käyttää. Koska kyseessä on konseptin todistus, valmistusmenetelmissä suositaan tunnettuja räätälöityjen tuotteiden valmistukseen sopivia ja helposti saatavia menetelmiä. Menetelmiä olivat hyllystä saatavien osien käyttö, koneistetut osat, laserleikatut osat ja taivutetut metalliosat. Mahdollista on myös käyttää valutekniikkaa, mutta vain tilanteessa, jossa muut tekniikat eivät käy. Puomia on tarkoitus valmistaa logistisesti epävarmana aikana *COVID-19* pandemian ja Venäjän-Ukrainan sodan takia, jonka vuoksi nopea toimitusaika on korostetussa asemassa. Puomin tulee olla kokoonpantava. Kuitenkin kasattavia puomeja on vain yksi, joten epäortodoksiset asennusmenetelmät hyväksytään. Tärinän vuoksi puomissa ja työkalussa voi hajota yllättäviä osia, jonka vuoksi huollettavuus tulee tehdä mahdollisimman helpoksi paikan päällä. Tästä syystä pulttiliitoksia suositaan. Valmistettavuuden vaatimukset on luokiteltu taulukkoon 7.

Taulukko 7. *Vaatimusten luokittelu puomin valmistettavuudelle.*

Valmistettavuus		
Lyhyt valmistusaika	Kokoonpantava	Menetelmät tulee olla saatavilla
<ul style="list-style-type: none"> Suositaan varastosta saatavia osia Toimitusajan tulee olla mahdollisimman lyhyt Joulun mennessä 	<ul style="list-style-type: none"> Suositaan pulttiliitoksia, hitsauksissa leikkausvaran lisääminen 	<ul style="list-style-type: none"> Suositaan yksinkertaisia valmistusmenetelmiä

Ohjauksen tulee olla mahdollisimman tarkka autonomisuuden vuoksi. Puomille ohjattavuus asettaa neljä vaatimusta. Ensimmäisenä puomin rungon tulee olla tarpeeksi luja, ettei synny tuntemattomia muodonmuutoksia. Tämä toteutuu kestävyys asettamalla vaatimuksilla. Toisena vaatimuksena on tilan varaaminen sensorille. Sensorien tulee olla likaa, pölyä ja vesivirtaa kestäviä. Tästä syystä pieniä kaupallisia elektronisia antureita ei pysty käyttämään. Tämä kasvattaa tilantarvetta. Lineaarianturin tilantarve on 70 x 70 x 300 mm, joka tulee pystyä sijoittamaan mahdollisimman turvalliseen sijaintiin. Kolmantena vaatimuksena on puomin mahdollisimman vähäinen voimantarve. Tämä tarkoittaa, että puomin massa tulee olla mahdollisimman pieni ja puomin pituus mahdollisimman lyhyt. Lisäksi puomin ohjaukseen tarkoitetut sylinterit tulee olla mahdollisimman

pieniä halkaisijaltaan, jotta virheohjauksen tehdessä puomiin kohdistuisi mahdollisimman vähän yllättäviä voimia. Kuitenkin sylinterin suurempi halkaisija lisää sylinterin tilavuutta ja siten mahdollistaa venttiilillä tarkemman resoluution sylinterin pituutta ohjattaessa. Työkalulle vaaditaan 10 kN voimaa, jonka vuoksi puomin massan keskipisteeseen kohdistuva massasta johtuva 2–3 kN voima on suhteellisen pieni. Neljäntenä vaatimuksena on puomin aseman ylimäärittelyn välttäminen. Kuitenkin konseptienvalinnassa on päädytty tilanteeseen, jossa puomin sylinterit ylimäärittelevät puomin asennon. Ongelmaan vatsataan ohjauksella, mutta jos riittävään tarkkuutta ei saavuteta, yhden sylinterin voi päästää vapaasti liikkumaan, jolloin puomin kyky painaa työkalulla kalliota vasten heikkenee, mutta ylimäärittelyongelma katoaa. Ohjattavuuden vaatimukset on luokiteltu taulukkoon 8.

Taulukko 8. *Vaatimusten luokittelu puomin ohjattavuudelle.*

Ohjattavuus			
Ei tuntemattomia muodonmuutoksia	Tilaa sensoreille	Vähän voimia	Ei ylimäärittelyä
<ul style="list-style-type: none"> • Puomin rungosta tehdään mahdollisimman jäykkä. • Rungon varmuuskerroin puomin maksimivoimien kestävyuden tulee olla varmuuskertoimella 2 	<ul style="list-style-type: none"> • Tilaa lineaarianturille ja kulma-antureilletilaa elektrodi anturille • Tilaa tulee olla vähintään 70x70x300 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Mahdollisimman pieni massa • Mahdollisimman lyhyt pituus • Tuottaa tarpeeksi voimaa työkalulle 10 kN 	<ul style="list-style-type: none"> • Ylimäärittelyä vältetään ylimäärittelyä kompensoidaan ohjauksella

Työkalun liikutettavuus jakautuu myös neljään osaan. Ensimmäisenä ja suurimpana ongelmana puomin runko ei saa osua kääntyessään kallion seinään. Tästä syystä puomin tulee olla mahdollisimman lyhyt ja kapea. Puomin tilavuus on siis hyvin rajattu ja laitteistoa tulee sijoittaa puomin perään. Robotti kulkee ruuvien avulla, joiden ankkurointipisteiden määrittely on haastavaa epämääräisessä maastossa. Lisäksi kääntyessä ruuvit kiinnittyvät kolmella pisteellä kaareutuvaan tunneliin: ulkokaarteessa ruuvin päädillä ja sisäkaareessa ruuvin keskikohdalla. Myös louhittava tunneli ei tule olemaan muodoltaan ideaalin kaarteiden muotoinen ja koostuu työkalulla tehdyistä askeleista. Puomi on runkoa pidempi, joka tuo lisähaasteen kääntymiselle. Tarkemmin kääntymisen ongelmista on esitetty liitteessä B. Näistä syistä puomin kääntymistä tutkitaan yksinkertaistusti trigonometrialla. Tekniikkaa esitellään tarkemmin 4.2 kappaleessa. Kääntyvyyden kannalta olennaista on, että työkalun uloimman pisteen kääntymissäde on pienempi kuin puomin rungosta muiden muista pisteistä laskettu kääntymissäde.

Toisena vaatimuksena on saada robotti kääntymään mineraalisuonien mukaisesti. Jotta selektiivinen kerääminen tapahtuisi mahdollisimman tehokkaasti, tulee robotin kyetä kääntymään mahdollisimman jyrkästi. Alun perin robotin kääntymissäteeksi on haluttu oman halkaisijan lisäksi 500 mm, eli kokonaisuudessa noin 1500 mm. Tämä on

kuitenkin osoittautunut haasteelliseksi työkalunvaatimien voimien vuoksi. Uutena tavoitteena työkalun tulee ylettää vähintään 200 mm robotin oman halkaisijan ulkopuolelle, jolloin ideaalissa tilanteessa kääntövyssäde olisi oman halkaisijan lisäksi 1 000 mm, eli kokonaisuudessa 2000 mm kääntövyssäteeltä teoreettisesti trigonometrisellä mallilla.

Kolmantena vaatimuksena työkalun liikuttamisen toimilaitteen, eli konseptikehityksen jälkeen sylinteri, ei saa osua puomiin itseensä. Törmäykselle tulee jättää varmuuden vuoksi pieni vara, jotta kokoonpanon epätarkkuuksien vuoksi sylinterit eivät tuhoaisi itseään. Minimietäisyysvaatimukseksi on asetettu 10 mm etäisyys.

Neljäntenä vaatimuksena työkalun pitää pystyä porautumaan kallioon vertikaalisesti oman pituutensa verran. Työkalua ei voida kuitenkaan ajaa kallioon kiinni ennen porauksen aloittamista. Tästä syystä työkalun ja seinän väliin on jätettävä käynnistymisetäisyys. Siksi Työkalun tulee pystyä tyytyä kallioon vähintään 220 mm verran. Työkalun liikuttavuuden vaatimukset on luokiteltu taulukkoon 9.

Taulukko 9. Vaatimusten luokittelu puomin liikuttavuudelle.

Työkalun liikuttavuus			
Puomin runko ei saa osua seinään	Mahdollisimman jyrkkä kääntövyys	Aktuaattorit ei saa osua puomiin	Työkalun vertikaalinen liike
<ul style="list-style-type: none"> Työkalun Kääntövyssäteen tulee olla pienempi kuin puomin korvakkeen korkein kohta tai neliöputken päädyn kulman kääntövyssäde 	<ul style="list-style-type: none"> Työkalun tulee työntyä vähintään 200 mm oman säteen ulkopuolelle 	<ul style="list-style-type: none"> Sylinterin varren ja rungon välinen etäisyys tulee olla vähintään 10 mm 	<ul style="list-style-type: none"> Vertikaalinen liike tulee olla vähintään työkalun mittainen Vertikaalinen liike tulee olla vähintään 200 + 20 mm pitkä

3.5 Puomin toimilaitteiden jaottelu ja samankaltaisten laitteiden vertailu

Seuraavaksi tarkoituksena on käydä konseptivaihtoehdot läpi, joka aloitetaan valitun menetelmän mukaisesti toimilaitte-erittelyllä. Taulukkoon 10 on puomissa tarvittavat toimilaitteet eritelty vaatimusanalyysin pohjalta.

Taulukko 10. Puomin toimilaitteet, niiden funktiot ja vaatimukset.

Toimilaitte	funktio/funktiot	vaatimukset
työnnin	työkalun ohjaus	Tuottaa työkalulle tarvittava voima työkalun kyljellä louhiessa, mahdollistaa mahdollisimman laaja liikerata
Nivellytys	Työkalun liikkuminen, työntimen liikuttaminen	Tulee kestää työntimien kohdistama voima
Runko	Kiinnittää työkalu ja komponentit puomiin	Työkalu tulee olla asennettavissa. 3 osainen, koska työkalu tulee saada sisälle. Kiinnikkeet tulee olla uudelleen avattavia

Teleskooppi	Työkalun porautuminen	painaa työkalua tarpeeksi lujaa kallioon, ei saa nurjauttaa, 2 osainen
Teleskoopin raide	Sallia työkalun työntäminen seinään ja estää sivuttaiset voimat, liukupalojen asennuttaminen	2 osainen
korvake	puomirungon kiinnitys, rungon ja sylinterin kiinnitys, sekä sylinterin ja puomin kiinnitys	nivelillä täytyy olla 2 vapausastetta, ei saa tulla plastisia muodonmuutoksia

Jaottelun perusteella toimilaitteita on tulossa kuusi kappaletta. Kuten taulukosta huomaa, toimilaitteet ovat esitetty korkealla abstraktiolla tässä vaiheessa suunnittelua. Toimilaitteiden valinta johtaa konkreettiseen laitejakoon. Konseptitason toimilaitteiden jakoa on mahdollista hyödyntää laitteiden rajapintojen jakamisessa parametriseen ratkaisijaan, mutta sen toteuttaminen on suositeltavaa vasta valitun konseptin jälkeen.

Suunniteltavaa robottia vastaava laite on roadheader-tyyppinen louhija. Roadheader on kaivinkone, johon rumpuleikkuri on alun perin suunniteltu. Louhija on mittakaavalta suurikokoisempi kuin Robominersissa suunniteltava robotti. Lisäksi louhijan tuotantokapasiteetti on moninkertainen verrattuna suunniteltavaan robottiin. Roadheader-tyyppiseten louhimien tyypillinen paino on kymmenistä tonneista yli sataan tonniin. Esimerkiksi kuvan 8 roadheader louhija on massaltaan 36 tonnia painava ja pystyy louhimaan kalvia 210 m³/h tuotantokapasiteetilla.



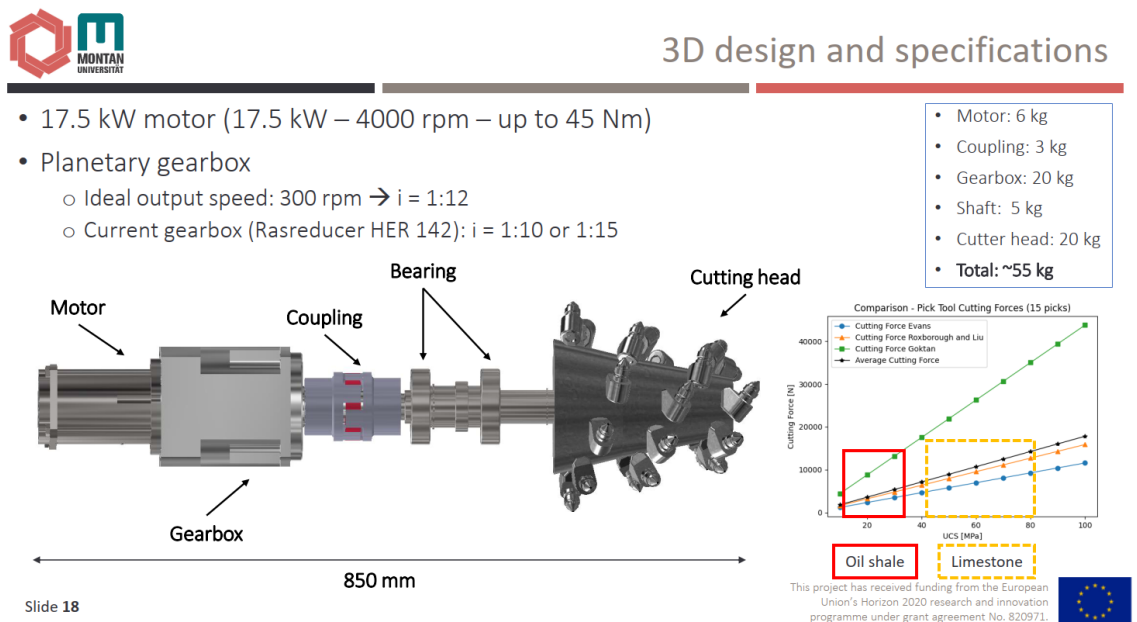
Kuva 8. Kuvassa on pienikokoinen roadheader-tyyppinen louhija NGH:n EBZ132C, jonka massa on 36 tonnia. (nhgtunnel.com)

Suunniteltavan robotin massa on noin tuhannen kiloa ja robotilla on 0,2 m³/h tuotantokapasiteetti. Kapasiteetin lisäksi laitteiden voimantuotannossa on suuri ero. kuvassa 8

olevan louhijan vaatima teho on 220 kW kun puolestaan suunniteltavan robotin teho on noin seitsemäs osa eli 30 kW. Tehon lisäksi työkoneiden massassa on eroa, jonka selittää ankkuroituminen. Kuvan 8 louhija käyttää massaansa ja takana nostettavia jalkoja pitääkseen itseään paikoillaan. Suunniteltava robotti puolestaan ankkuroi itsensä hydraulisesti liikutettavien jalkojen avulla. Roadheader-tyyppisten louhijoiden piirteitä ovat: puomi, joka on kookas runkoon verrattuna, työntösylinteri, joka on sijoitettu puomin pätyyn, kaksiosainen nivellys, hydraulisylinterien pitkän muotoinen nivelkolmio, työkalu ja puomin runko ovat paksuja, sekä työkalun liikuttamiseen on kaksi sylinteriparia. Kuitenkin vertikaaliseen suuntaan kääntymisen sylintereitä ei ole näkyvillä.

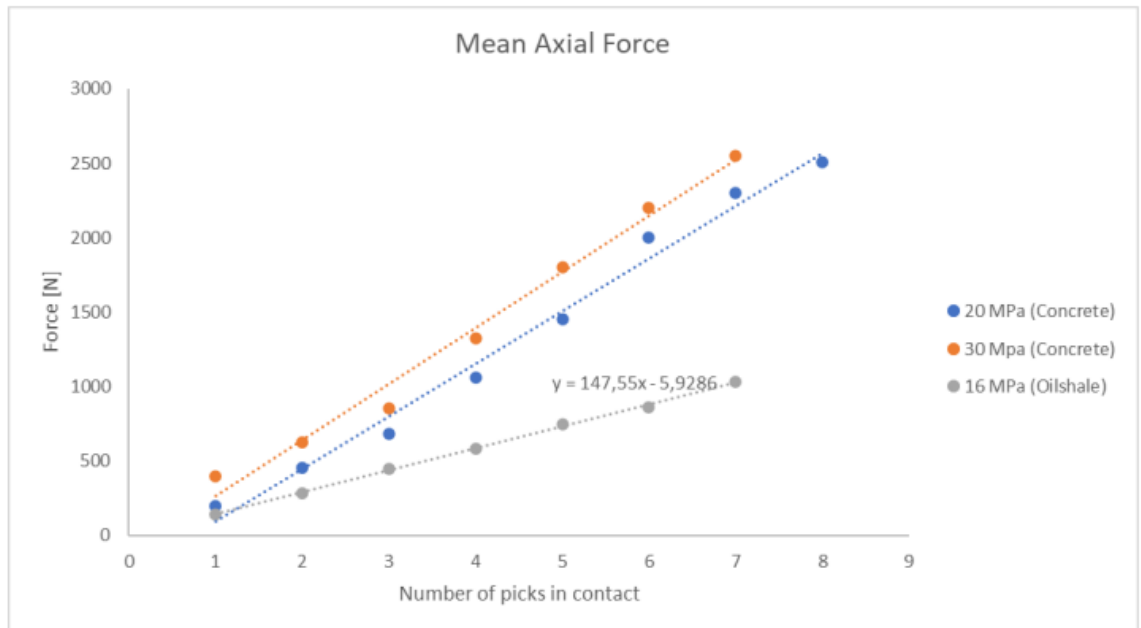
3.6 Konseptivaihtoehtojen listaaminen ja vertailu

Puomin ohjaukseen käytettäviltä laitteilta vaaditaan suuria voimia, kun työkalun kylkisalla louhitaan kalliota. Työkalun vaatimat voimat ovat sekä säteis- että aksiaaliselle suunnalle 3–10 kN. Lisäksi työkalu tuottaa 675 Nm väännön 267 rpm kierrosnopeudella. Tarkemmin työkalun tietoja on esitetty kuvassa 9.

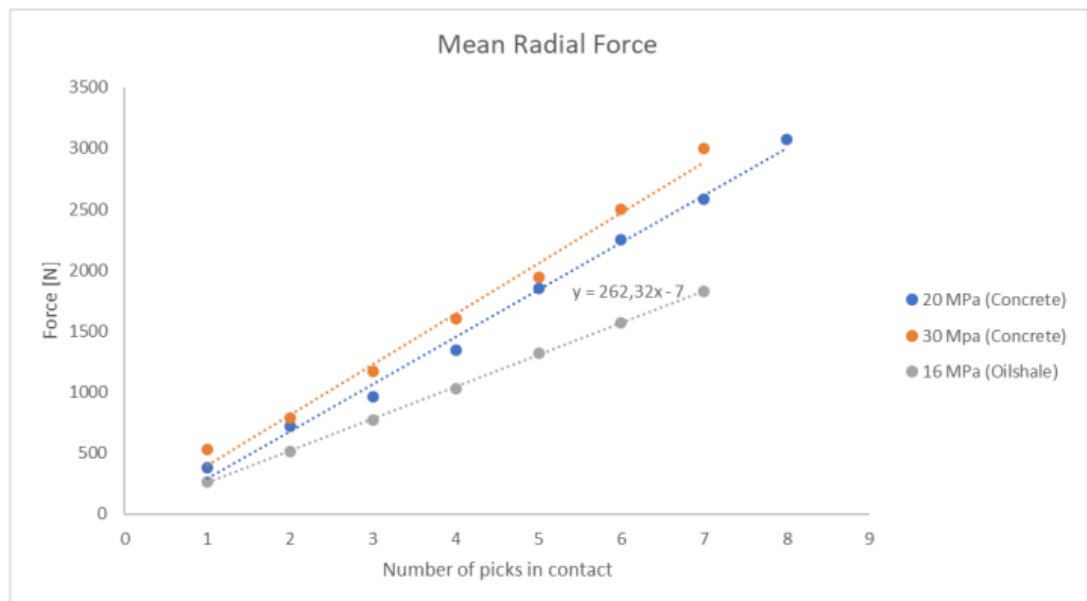


Kuva 9. Puomin työkalu ja sen sisältämät osat. Suunnittelun kannalta tärkeimpiä osia ovat vaihdelaatikko ja laakerointi, jotka määrittelevät puomin ja laakeripe-sän asennuspinnat. Kuvan on tehnyt Michael Berner Leobenin yliopistolta

Kuvissa 10 ja 11 on esitetty kokeellisten testien tuloksia puomin vaatimille voimilla. Kuvassa 10 on esitetty porautuessa työkaluun kohdistuva aksiaalinen keskimääräinen voima kontaktissa olevaa piikkiä kohden. Kuvassa 11 on puolestaan esitetty työkaluun kohdistuva radiaalinen keskimääräinen voima työkalun kyljellä louhiessa.



Kuva 10. Työkalun vaatima keskimääräinen aksiaalivoima suhteessa kontaktissa oleviin piikkeihin eri materiaaleissa. Kuvan on tehnyt Michael Berner Leobenin yliopistolta.



Kuva 11. Työkalun vaatima keskimääräinen radiaalivoima suhteessa kontaktissa oleviin piikkeihin eri materiaaleissa. Kuvan on tehnyt Michael Berner Leobenin yliopistolta.

Kuvaajien perusteella työkaluun kohdistuva aksiaalinen voima kaksinkertaistuu porattavan materiaalin puristuslujuuden kaksinkertaistuessa. Kylljellä louhiessa materiaalin puristuslujuuden kaksinkertaistaminen aiheuttaa 50 % lisää työkaluun kohdistuvia keskimääräisiä radiaalivoimia. Konseptintodistuksen on tarkoitus louhia öljyliusketta (oilshale), mutta testikaivoksella on myös kerroksia kalkkikiveä, jonka puristuslujuus on

öljyliusketta korkeampi. Korneeva et.al (2019) mukaan kalkkikiven puristuslujuus on 10–50 MPa välillä riippuen kiven laadusta. Työkalun porautuessa tai louhiessa osa työkalun piikeistä voi louhiessa olla kontaktissa kalkkikivikerrokseen, jolloin työkalun kohdistuvat voimat kasvavat. Työkalussa on yhteensä 24 piikkiä, jonka seurauksena puomiin kohdistuva suurin aksiaalivoima porautuessa öljyliuskeeseen on 4,2 kN ja kyljellä louhiessa seinään osuu puolet piikeistä, jolloin puomiin kohdistuu 3,2 kN radiaalivoima. Työkalun tulee kestää voimapiikit ja kestää kovemman materiaalin louhiminen. Tästä syystä puomin suunnitellaan kohdistavan työkaluun 10 kN voiman aksiaali- ja radiaalisuunnissa.

Työkalulle annettavan voiman merkittävä komponentti radiaalivoimat, jolloin puomin paksuus toimii vipuvartena hydraulisylinlerin tuottamille voimalle. Puomin paksuutta puolestaan rajoittaa kääntyminen. Karkeiden laskujen pohjalta ohjauslaitteiden arvioidaan vaativan noin 50 kN suuruista voimaa. Työssä keinotekoisien lihasten tarkastelu rajautui matalapaineisten keinotekoisien lihasten (*artificial muscle*) tarkasteluun saatavuuden takia. Keinotekoiset lihakset ovat huono vaihtoehto sovellukselle, sillä niillä on huono tehotehoisuus, ohjauksen kannalta ongelmallinen epälineaarisuus, voimantuotto vain supistuksessa ja lyhyt iskunpituus. Hyvänä puolena lihaksilla on kestävyys ja keveys.

Taulukko 11. Ohjauslaitteen konseptivaihtoehdot listattuna.

Ohjauslaite	voima	iskunpituus/pituus	ohjattavuus	kestävyys	massa
Keinotekoinen lihas	2	2	2	8	8
Hydraulisylinteri	8	8	8	5	5

Yllä olevan taulukon perusteella hydraulisylinteri on parempi vaihtoehto. Lisäksi hydraulisylinteri on parametrisesti helpommin käsiteltävissä, sillä keinotekoisien lihasten kohdalla voimaa on lisättävä lisäämällä niiden määrää, joka hankaloittaa käytettävää tilaa ja voimaresultantin hahmottamista.

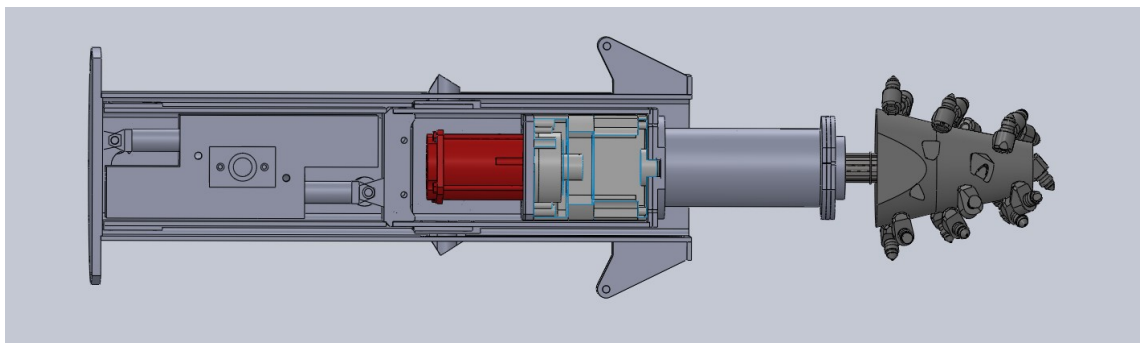
Teleskooppi työntää suurella voimalla työkalua porattavan kallion sisälle. Keinotekoinen lihas ei kykene työntämään ja vetovoiman muuttaminen työnnöksi lisää turhaa monimutkaisuutta puomiin. Näistä syistä sylinteri on sopiva työntölaite. Sijoittelun suhteen on kuitenkin useita vaihtoehtoja. Toimilaitteen pääkriteereinä on minimoida puomin massa ja pituus, sekä kääntymisen vuoksi puomista tulee tehdä mahdollisimman kapea. Lisäksi puomin nivelen jälkeinen pituus vaikuttaa puomin ulottuvuuteen.

Taulukko 12. Työntölaitekonseptivaihtoehdot listattuna.

Työntölaite	Pituus	Paksuus	Massa	Jäykkyys	Ohjattavuus	Voima	Rungon tilavuus	Kääntyvyys
Teleskooppinen hydraulisylinteri nivelen jälkeen	8	4	7	4	7	6	9	7
Hydraulisylinteri nivelen jälkeen	3	8	6	8	8	8	9	7
Hydraulisylinteri ennen niveltä	10	9	8	3	3	9	1	4
Porautuminen 4 ohjaussylinterillä	9	9	9	9	2	10	9	7
Porautuminen 3 ohjaussylinterillä	9	9	10	8	9	1	10	7
Porautuminen ilmapatjalla	9	9	9	1	7	6	9	6
Hydraulisylinteri rinnakkain moottorin kanssa	9	1	6	8	8	9	9	5

Taulukon perusteella hyviä vaihtoehtoja ovat hydraulisyylinteri ennen niveltä, sekä työntö 3 tai 4 ohjaussyylinterillä. Työntölaitteen asentaminen ennen puomin niveltä lisäisi rungkon monimutkaisuutta ja venttiilien jo rajoittunutta tilaa. Tämän lisäksi työkalua työntäessä niveliin kohdistuvat voimat ovat suuria, jos työkalua ei ole työntönsä kanssa samansuuntainen.

3 ohjaussyylinterillä ohjattavuus, tilavuus ja massa olisivat 4 sylinterin vaihtoehtoa paremmat. Kuitenkin 3 sylinterinen vaihtoehto vaatisi yhden suuremman halkaisijalta olevan hydraulisyylinterin, joka vaatisi 17 asteen kulmaan taittuvan nivelen, jonka tulisi kestää 126 kN dynaaminen kuorma. Lisäksi yhden eri halkaisijaisen sylinterin asentaminen lisäisi vaadittavien varakomponenttien määrää. Toinen 3 sylinterin vaihtoehto olisi vaihtaa kaikki sylinterit suurempiin. Sylinterien kiinnitysalustan rajatun pinta-alan vuoksi sylinteriä ei pysty asentamaan symmetrisesti, jonka vuoksi sylinterit aiheuttaisivat epätaasaisia voimia runkoon, jonka seurauksena muiden osien kestävyys ja elinikä heikkenisi. 4 ohjaussyylinterin ratkaisu puolestaan aiheuttaa ylimääritellyn tilanteen: 4 toimilaitetta ohjaa 3 vapausastetta. Tämän seurauksena aseman virhesäätö johtaa sylintereissä suuriin voimiin ja siten lisää puomin hajoamisriskiä. Tämä ongelma on kuitenkin paineakkujen ja ohjauksen avulla kierrettävissä.



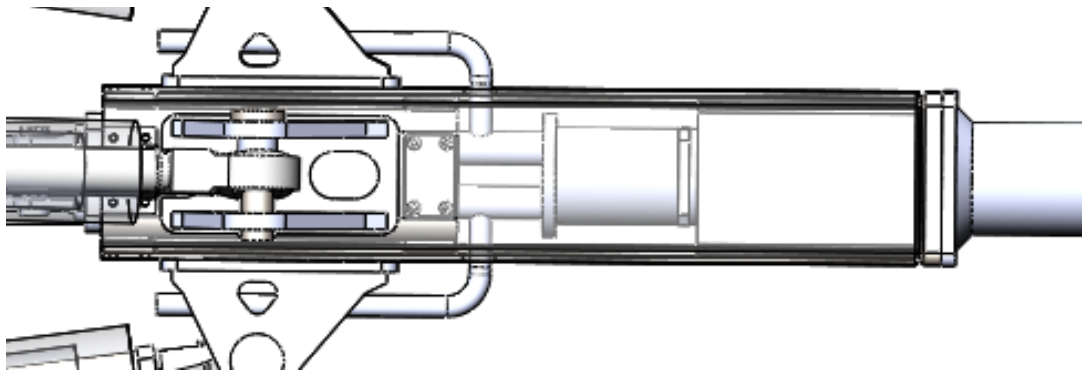
Kuva 12. Teleskooppisen hydraulisyylinterin konseptisuunnitelma. Keinotekoisien lihasten (artificial muscle) sopimattomuuden toteamisen jälkeen erillisen työntösyylinterin tarve poistui.

Letkujen tärkeimmät kriteerit ovat asennettavuus, toteutettavuus, lujuus ja suojattavuus. Asennettavuudella tarkoitetaan, kuinka helposti kyseisellä ratkaisulla kokoonpannuttavuus on. Toteutettavuus puolestaan tarkoittaa, kuinka erikoisia osia toteuttaminen vaatisi. Kulumisen kestolla tarkoitetaan, kuinka hyvässä suojassa letkut ovat hankaumilta puomin liikkuessa. Lujuus puolestaan tarkoittaa, kuinka hyvin runko kestää siihen kohdistuvia voimia.

Taulukko 13. *Hydrauliletkujen sijoittamisen konseptivaihtoehdot listattuna.*

Hydrauliikan letkutus	Asennettavuus	kulumisen kesto	Toteutettavuus	Pituus	Suojattavuus	Lujuus
Hahlo letkulle, sivusta ulos	9	4	6	9	7	1
Välikiinnitys, rungon päästä sisään	7	8	1	6	9	8
Liukumalla rungon päästä sisään	9	1	8	9	9	8
Ulkokuoresta ulos	4	8	9	4	5	8

Hahlojen lisääminen rungon sivuille on lähes kaikkien ominaisuuksien perusteella paras vaihtoehto. Kuitenkin rungon jäykkyys ei tule kestäämään *FEM* laskelmien perusteella. Välikiinnityksen lisääminen ja letkun asentaminen rullalle siten, että letku pääsisi pituussuunnassa pitenemään olisi toimiva ratkaisu, mutta korkeaan paineeseen tarkoitettujen hydrauliletkujen taivutussäde ei ole tarpeeksi pieni konseptin toteutettavaksi. Hydrauliletkun rungon päästä sisään liukuvassa ratkaisussa hydrauliletku kuluisi nopeasti rungon reunaa vasten. Parhaimmaksi konseptiksi jää puomin rungon pidentäminen, jotta letkut pääsevät puomin ulkopuolelle ennen sisäraidetta.



Kuva 13. Kuvassa hydrauliletkut kiinnitettynä hydraulimoottoriin banjopulteilla. Va-
littu konsepti.

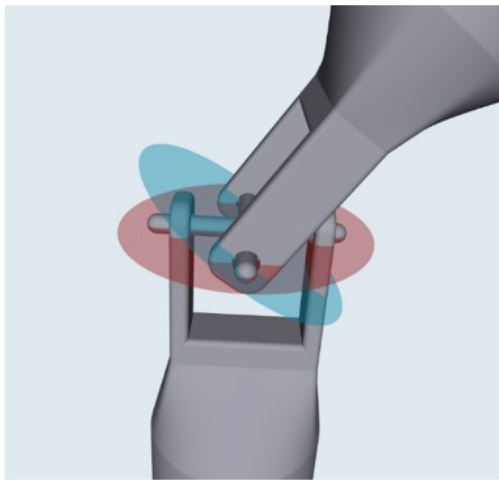
Sylinterien nivelten laakereiden valitsemisessa tärkeimpiä ominaisuuksia ovat staattinen ja dynaaminen lujuus, maksimi kulma, saatavuus ja paksuus kiinnityskohdan keskustasta. Laakeroinnin tulee kestää ohjaussylinterien tuottama maksimivoima ja siksi staattinen voima on tärkein kriteeri. Dynaaminen lujuus tulee huomioida myös, koska puomi liikkuu. Liike tulee olemaan kuitenkin olemaan hidasta ja vähän toistuvaa. Puomin maksimaalinen kulma rajoittaa työkalun kääntyvyyttä ja siksi sen on tärkeä olla mahdollisimman suuri. Laakeroinnissa on aina pieni väly, joka voi hajota tärisävissä ympäristössä nopeasti ja siksi laakereiden asennettavuus ja vaihdettavuus ovat tärkeitä ominaisuuksia. Paksuuden ongelmana on puomin paksuuden lisääntyminen, joka rajoittaa puomin maksimikulmaa.

Taulukko 14. *Hydraulisynterinin nivelien konseptivaihtoehdot listattuna.*

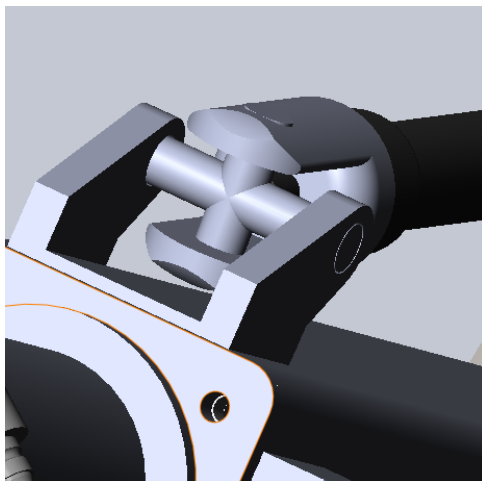
Hydraulisynterinin nivel	staattinen lujuus	dynaaminen lujuus	maksimi kulma	saatavuus	asennettavuus	Paksuus
U-joint	10	9	8	10	3	3
Rod bearing	8	8	5	10	10	9
self made u-joint	10	7	10	2	5	5

Taulukoinnin perusteella itsesuunnitellulla laakeroinnilla saisi kaikkein parhaimmat ominaisuudet lopputuotteelle. Kuitenkin laakeroinnin suunnittelu toisi lisätyötä ja epävarmuustekijöitä, joiden vuoksi työssä pitäydytään kaupallisissa tuotteissa, jotka tyydyttävät tarpeeksi hyvin toimintavaatimukset. Jäljelle jäävistä vaihtoehdoista kardaaninivel on paras vaihtoehto, mutta sen paksuus heikentää merkittävästi kääntyvyyttä ja/tai työkalulle saatavaa voimaa. Tämän vuoksi nivellaakeri on valittu parhaaksi vaihtoehdoksi.

Nivellaakerin heikkoutena on kuitenkin maksimikulma, joka on 17 astetta. Kuitenkin kohtuulliseen kääntyvyyteen vaaditaan noin 30 asteen kulmaa. Tämän vuoksi rungon ja ohjaussylinterin niveltä joudutaan tuomaan taaksepäin rungon ja puomin nivelestä. Tämä johtaa puomin pidentymiseen. Kuvissa 14 ja 15 on esitetty konseptivaihtoehdot.

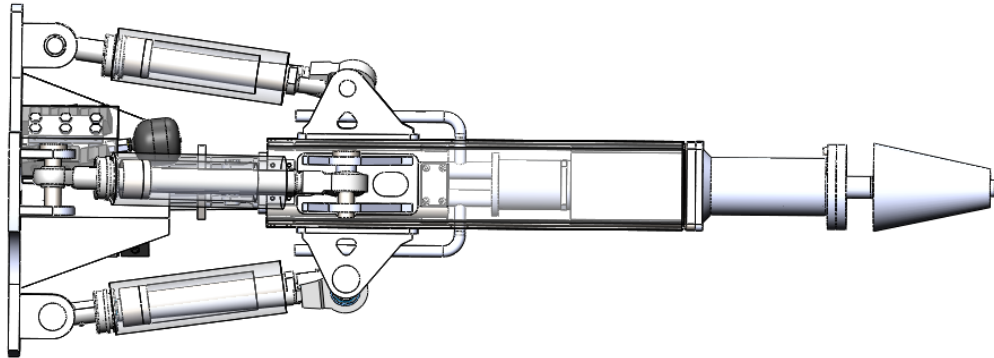


Kuva 14. *Demonstraatio kardaaninivelestä (Wikipedia.org). Oikealla Nivellaakeri (IndiaLocalShop.com)*



Kuva 15. *Konsepti itsetehtävästä kardaaninivelestä. Nivellaakeri arvioitiin tarpeeksi hyväksi ratkaisuksi ja vievän vähemmän aikaa.*

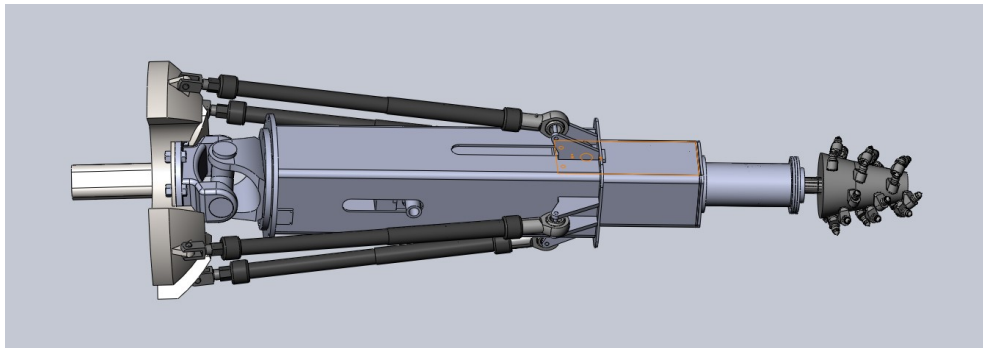
Puomin rungon tulee kestää siihen kohdistuvat voimat ilman plastisia muodonmuutoksia. Rungon tulee myös olla kokoonpantavissa ja sen tulee olla tarpeeksi tiivis, jotta kivimurska ei pääse puomin sisälle. Mahdollisia ratkaisuja on kaksi: tehdä runko pituus-suunnassa neliöpalkista ja koneistetuista osista tai puolikkaat tehdä valamalla. Palkki-ratkaisu sisältää useampia osia kuin valettu ratkaisu ja siten vaatii myös suuremman määrän koneistusta. Valuosien suunnittelusta on työryhmällä vähäisesti kokemusta, joten siihen tutustuminen vaatisi työtä ja lisää riksiä puomin valmistamisen myöhästymiselle. Hyvinä puolena valamisessa on monimutkaisempien muotojen käyttö ja pienempi määrä valmistettavia osia. Neliöpalkki on halvin ja varmin vaihtoehto. Valitut konseptit on esitetty graafisesti kuvassa 16 ja eriteltyinä taulukossa 15. Kuvassa 17 on esitetty vaihtoehtoinen konseptiehdotus.



Kuva 16. *Konseptivalintojen pohjalta suunniteltu puomi*

Taulukko 15. *Valitut konseptivaihtoehdot*

Ohjauslaite	Hydraulisylinteri
Työntölaite	Työntö 4 ohjaussylinterillä
Hydrauliset letkut	Ulkokuoresta ulos
Hydraulisylinterin nivel	Nivellaakeri
Puomin runko	Neliöputkesta



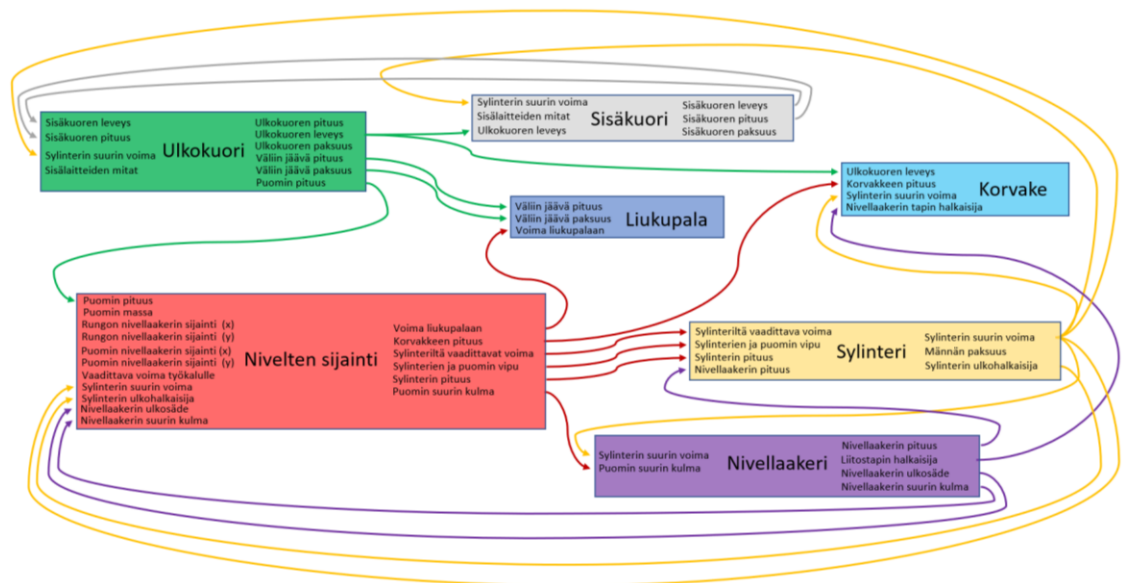
Kuva 17. *Aiempi konseptiehdotus, jossa on keinotekoiset lihakset, traktorin kardaaninivel, letkujen ulostulo kyljestä, työntölaitteena teleskooppinen hydraulisylinteri ja ulkokuori kiinnitettynä kardaaniniveleen.*

4. PARAMETRISEN SUUNNITTELUN SOVELTAMINEN PUOMIIN

Tämän luvun alussa käydään ensin läpi puomin toimilaitteiden keskinäisvaikutus ja pohditaan mallintamisessa yksinkertaistettavia asioita. Sitten käydään läpi parametrisessä suunnittelussa käytetyt fysikaaliset mallit matemaattisesta näkökulmasta. Luvun lopuksi malleja ja niiden järjestystä käydään läpi ohjelmoimisen näkökulmasta.

4.1 Keskinäiskytkennän tarkastelu

Ensimmäisenä vaiheena parametrisessä suunnittelussa hahmotettiin puomin toimilaitteiden keskinäisvaikutuksia. Toimilaitteiden välille syntyi useita kytkentöjä, jonka vuoksi suunnittelu vaatii paljon iterointia. Tilanteen selventämiseksi keskinäiskytkentää esitettiin kuvan 18 kaaviolla, jossa toimilaitteet ja niiden ominaisuudet ovat toimilaittekohtaisesti värjättyillä nuolilla kytkettyinä toisiinsa.



Kuva 18. Toimilaitteiden keskinäisvaikutukset. Kuvaajan perusteella parametrinen ratkaisija vaatii useita iterointikiertoja ilman yksinkertaistamista.

Kuvaajan pohjalta muodostettiin *DSM*, joka on esitettyinä taulukossa 16. *DSM* mukaan suunnittelu vaatii hyvin paljon iterointia. Suunnittelu kannattaa aloittaa nivelten sijainnin määrittelyllä, sen jälkeen valita sylinteri, ulkokuori, sisäkuori, nivellaakeri ja lopuksi liukupala ja korvake suunnitella vaadittujen parametrien mukaisesti. Kuitenkin laajan keskinäiskytkennän vuoksi suunnittelumuuttujien määrää pyritään vähentämään suunnittelun yksinkertaistamiseksi.

Taulukko 16. Puomin suunnittelun riippuvuusmatriisi eli DSM. Ylhäällä olevat otsikot ovat samat, mutta lyhennetyt vasemman reunan otsikoista.

	Niv Sij	Syl	U.kuori	S.kuori	N.laak.	Korv.	L.pala
Nivelten sijainti		x			x		x
Sylinteri	x		x	x	x	x	
Ulkokuori				x	x	x	x
Sisäkuori			x				
Nivellaakeri	x	x				x	
Korvake							
Liukupala							

Sisä- ja ulkokuoren tehtävä on olla tarpeeksi jäykkä ja mahdollistaa laitteisto sisälleen. Puomin tulee siis kestää odottamattomia voimakuormia, kuten kivien tippumista ja puomin iskeytymistä kalliota vasten. Näiden tapahtumien ennakointi on haastavaa, joten kuorten jäykkyys ylimitoitetaan. Kuoren suurin piirteisen pituuden arvioiminen on käsin suhteellisen helppoa. Tämän perusteella kuorten massalle on mahdollista antaa konservatiivien arvio. Kuorien leveyksien eroon vaikuttaa liukupala, joka tulee olla asennettavan paksu, mutta mahdollisimman litteä. Liukupalan tarvittavalle paksuudelle on helppo antaa myöhemmin tarkempi arvo. Näillä perusteilla sisä- ja ulkokuoren leveydelle, paksuudella ja painolle voi antaa vakioarvion.

Nivellaakereiden suhteen valinnanvaraa oli vähän, sillä kaupallisesti löydetyillä sivustoilla oli vain vähän tarjolla suuriin voimiin tarkoitettuja 17 asteeseen kääntyviä laakereita. Kuitenkin hydraulisylinterien valmistajilla oli saatavilla parempia katalogeja. Nivellaakeri oli kooltaan pieni ja vaikutti vähän puomin kokonaisuominaisuuksiin. Tästä syystä nivellaakerin ominaisuudet esitettiin parametreina.

Liukupalan valinnassa Ulko- ja sisäkuori määrittelevät liukupalan leveyden. Ainoaksi valittavaksi muuttujaksi jää pituus. Käsin laskettujen yhtälöiden perusteella liukupalalle lasketaan vaadittava pituus. Näin ollen liukupalan suunnittelu voidaan valita parametrisesti.

Korvake ei vaikuta muihin toimilaitteisiin. Lisäksi korvakkeen tulee myös kestää samoja hankalasti ennustettavia kuormia kuin sisä- ja ulkokuori. Lisäksi nivellaakeri määrittelee reikien koon. Korvakkeiden paksuudeksi valitaan 15 mm, koska paksuus on jäykkä ja valmistettavissa laserleikkauksella. Tästä syystä korvaketta ei ole tarpeellista tarkastella parametrisessä ratkaisijassa.

Nivelten x-y sijainnit voidaan esittää kolmella muuttujalla, sillä puomille halutaan ohjattavuuden helpottamiseksi ja huollettavuuden vuoksi pitää symmetrisyys. Lisäksi nivellaakereita rajoittava kulma määrittelee, miten pitkä etäisyys rungon nivellaakerista

kardaaniniveleen niveleen suhteessa kardaaninivelestä puomin nivellaakeriin. Näin ollen kahdeksan muuttujaa voidaan kuvata kolmella muuttujalla.

Puomin massa ja massan keskipiste arvioidaan konservatiivisesti, jotta arvon voi esittää parametrinä.

Männän paksuus huomioidaan antamalla rajoite puomin ja sylinterin nivelen säteen-suuntaiselle etäisyydelle rungon keskikohdalta. Lisäksi sylinteri oletetaan koko pituudeltaan männän paksuiseksi törmäystarkastelussa.

Näiden yksinkertaistusten avulla ongelma muuttuu yksinkertaisemmaksi ja iteroinnin tarve eliminoitui kokonaan. Näin ollen ratkaisijasta on tulossa matemaattisesti lineaarinen.

4.2 Parametrisessä laskennassa käytetyt fyysiset mallit

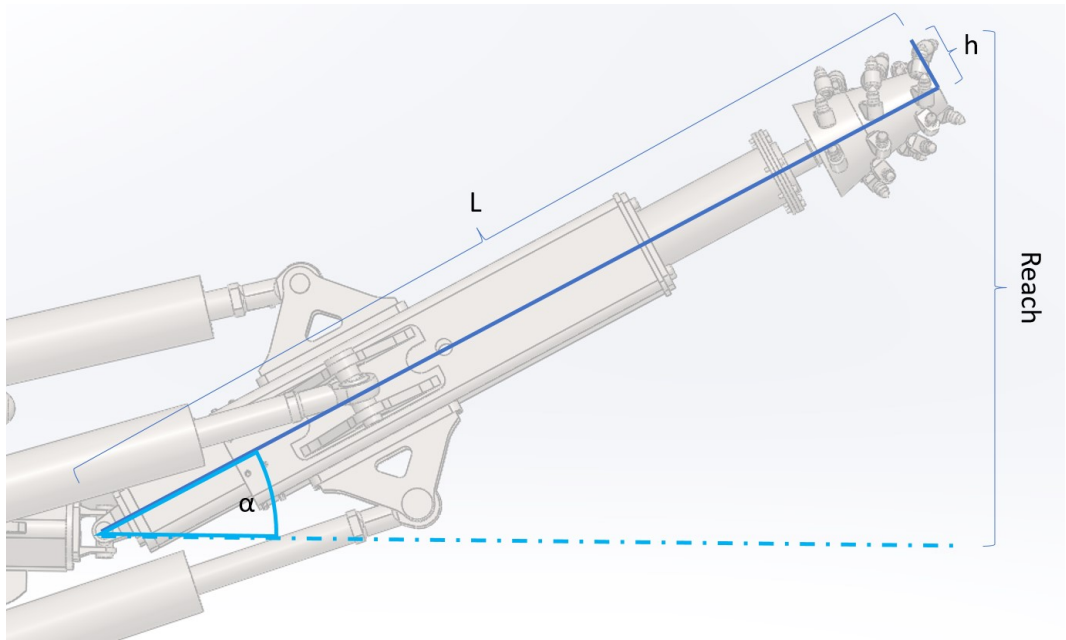
Puomilla on neljä tärkeää ominaisuutta: puomiin mekaaninen kestävyys, voimansiirto, puomin ylettävyys ja kääntymissäde. Fyysisten mallien laskenta linkittyy reunaehdoin ja lisäehtoihin. Tässä luvussa tarkoitetaan esitellä laskentamallit ja tarvittavat parametrit ominaisuuksien arvioimiseksi. Mallit keskittyvät nivelen sijainnin vaikutukseen puomin suorituskykyyn.

Nivelten sijoittelulla on kaksi tehtävää: minimoida sylintereiltä vaadittavat voimat ja mahdollistaa puomille laaja liikerata. Nivelten sijainti vaikuttaa hyödynnettäviin vipuvarsiin ja puomin geometriaan. Puomi ei saa kääntyessä osua seinään tai hydraulisyylinteri puomiin.

Puomin ylettävyys oman säteen ulkopuolelle tulee olla mahdollisimman suuri. Tämä saavutetaan puomin kulmalla, työkalun säteellä ja puomin pituudella. Näistä puomin maksimikulma halutaan maksimoida ja pituus pyritään pitämään mahdollisimman lyhyenä. Puomin halutun ylettävyyden perusteella saadaan puomin pituudella L halutuksi kulmaksi α alla olevan kaavan mukaisesti:

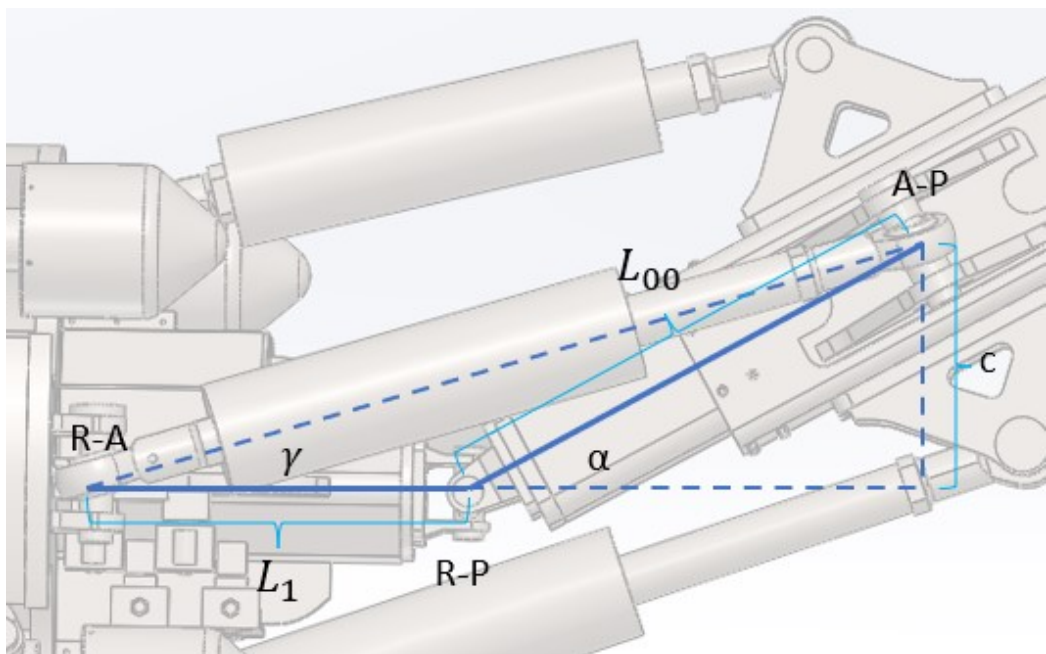
$$Reach = L \sin \alpha + h \cos \alpha \quad (1)$$

missä $Reach$ on puomin ylettävyys, α on puomin maksimikulma, L on puomin pituus nivelestä puomin päähän ja h työkalun pään säde. Tilanne on esitettyä kuvassa 22.



Kuva 19. Puomin kulman ja ylettävyyden välinen suhde.

Ylettävyyden maksimikulma alfa riippuu L_1 , ja L_{00} ja α nivellaakerin maksimikulma. Näistä L_1 on muutettava parametri, kardaninivelen maksimikulma α on vakio, ja L_{00} on funktionaalisesti muuttuva parametri. Näiden muuttujien suhteita mallinnetaan yksinkertaistetulla 2D mallilla, joka esitellään kuvassa 19.



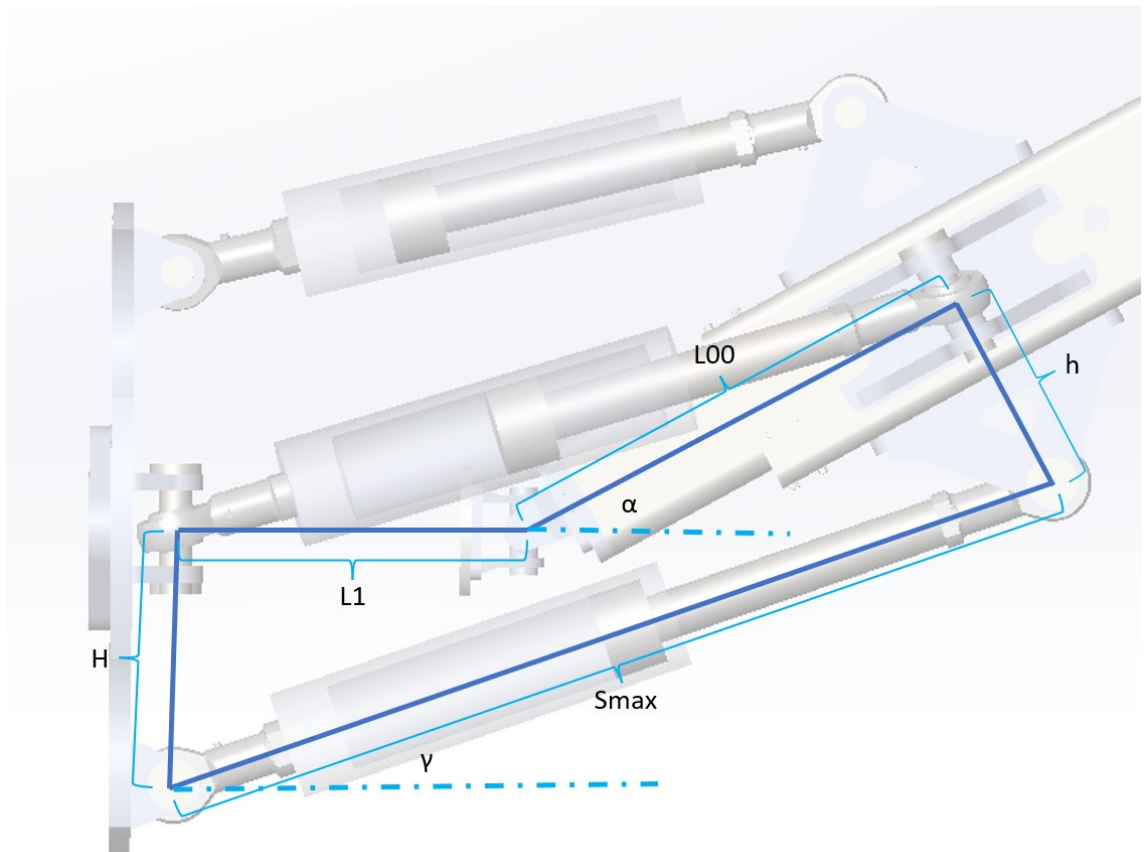
Kuva 20. Kardaninivelen ja nivellaakerin välinen puomin x-akselin suuntainen pituusmuutos puomin ollessa kulmassa α

Näistä L_1 on muutettava parametri, α ja γ on vakioita, ja L_{00} on funktionaalisesti muuttuva parametri. Näiden muuttujien suhteita mallinnetaan yksinkertaistetulla 2D mallilla, josta saadaan trigonometrinen yhtälö:

$$L_{00} = \frac{L_1 \tan \gamma}{\cos \alpha \tan \gamma - \sin \alpha}$$

jossa L_{00} on puomin x-akselin pituus niveleen maksimikulmassa, L_1 pituus ja γ on nivellaakerin maksimikulma.

Seuraavaksi varmistetaan puomin sylinterien pituuden sopivuus niveliin. Jos sylinteri on liian lyhyt, maksimikulmaa ei pysty saavuttamaan. Jos sylinteri on liian pitkä, puomi taipuu yli maksimikulman ja sylinteri saattaa osua puomiin itseensä tai nivellaakeri vaurioitua liian suuresta kulmasta. Sylinterin pituus toimii siis puomin liikkeiden mekaanisena rajoittimena. Sylinterin sopivuuteen käytettävät kaavat ovat alla esiteltynä, jonka jälkeen kaavojen käyttöjärjestys on listattuna. Kaavoissa tarvittavat muuttujat ovat esitettynä kuvassa 21. Sylinterin minimipituus voi myös olla liian pitkä ja puomin maksimikulman saavuttaminen estyy. Minimipituuden tarkastelu on jätetty parametriseen ratkaisijan ulkopuolelle.



Kuva 21. Parametrit puomin ja sylinterin sopivuuden tarkastamiseksi.

Hydraulisyliinterien nivelvään suurin pituus:

$$max = CDL + stroke2 \quad (3)$$

jossa max on hydraulisyylinterin maksimipituus hydraulisyylinterin perusteella, CDL on Hydraulisyylinterin kuollut pituus ja $stroke$ on hydraulisyylinterin iskunpituus.

Puomin nivelten x-komponentin suuntainen etäisyys puomin ollessa maksimikulmassa:

$$X_p = L_1 + L_{00} \cos \alpha + h \sin \alpha \quad (4)$$

jossa X_p on venytetyn puolen hydraulisyylinterin x-akselin pituuskomponentti ja h on puomin sylinterin nivelen radiaalinen etäisyys.

Puomin nivelten y-komponentin suuntainen etäisyys puomin ollessa maksimikulmassa:

$$Y_p = H + L_{00} \sin \alpha - h \cos \alpha \quad (5)$$

jossa Y_p on venytetyn puolen hydraulisyylinterin y-akselin pituuskomponentti ja H on rungton sylinterin nivelen radiaalinen etäisyys.

puomin nivelten välinen etäisyys:

$$s_{max} = \sqrt{Y_p^2 + X_p^2} \quad (6)$$

jossa s_{max} on hydraulisyylinterin maksimipituus nivelten perusteella

Epäyhtälö sylinterin nivelvälin pituuden ja puomin nivelten etäisyyden vertailuun:

$$max - 0.001 \leq s_{max} \leq max \quad (7)$$

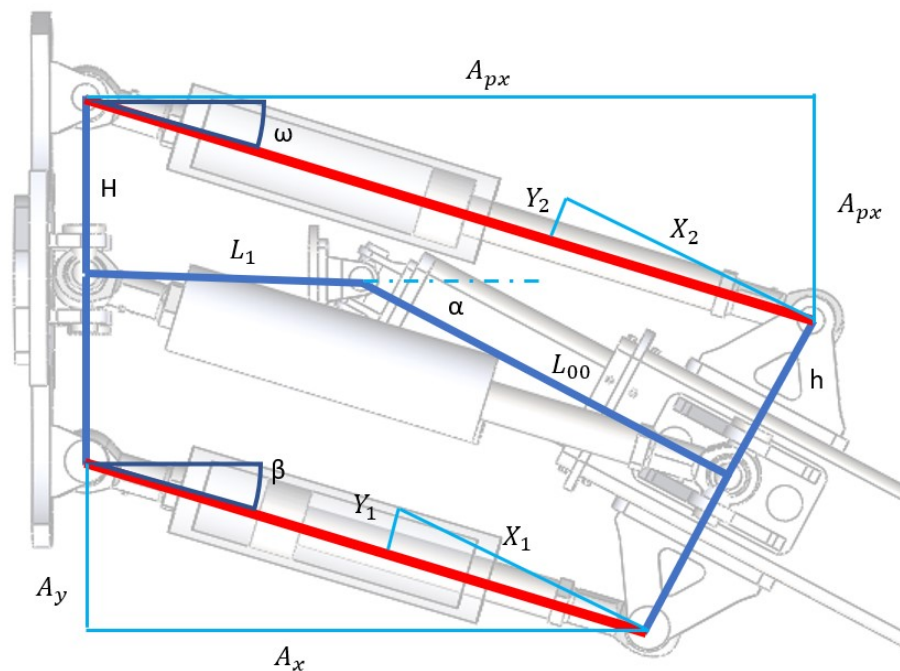
Laskenta tapahtuu seuraavassa järjestyksessä:

1. Iskunpituuden ja sylinterin kuolleen pituuden perusteella lasketaan sylinterin suurin nivelväli käyttäen kaavaa 3.
2. Lasketaan trigonometrisesti puomin nivelten x-komponentin suuntainen etäisyys puomin ollessa maksimikulmassa käyttäen kaavaa 4.
3. Lasketaan trigonometrisesti puomin nivelten y-komponentin suuntainen etäisyys puomin ollessa maksimikulmassa käyttäen kaavaa 5.
4. Lasketaan puomin nivelten välinen etäisyys x- ja y-komponentin perusteella käyttäen kaavaa 6.
5. Verrataan sylinterin nivelvälin pituutta puomin nivelien etäisyyteen toisistaan epäyhtälöllä ja annetulla virhevälillä. Kaavassa virheväliksi on asetettu 1 mm, joka vastaa realistista kokoonpanovirhettä. Tarkemman arvon käyttäminen

hidastaa ratkaisijan nopeutta. Epäyhtälön totuusarvo selvitetään epäyhtälöllä 7.

Seuraavaksi esitetään parametriseissä ratkaisijassa käytettävät voimatasapainoyhtälöt. Voimat ratkaistaan *Newtonin 2. lain* perusteella x- ja y-komponenttien tasapainosta, sekä momenttitasapainoehdosta. Sylinterien vaadittava voima määräytyy työkalun vaadittavan voiman, puomin pituuden, puomin massan, puomin maksimikulman ja nivelpisteiden sijainnin perusteella. Yhtälöiden muodostus on jaettu neljään osaan:

1. Selvitetään sylinterien x- ja y-akselin suuntaiset komponentit rumpuleikkurin porautuessa kallioon ja supistuessa suhteessa rungon keskiakseliin käyttäen kaavoja 8–11.
2. Selvittää sylinterien kulmat suhteessa rungon keskiakseliin käyttäen kaavoja 12 ja 13.
3. Selvittää sylinterien voimakomponentit suhteessa puomiin käyttäen kaavoja 14–17.
4. Muodostetaan voimatasapainoyhtälöt käyttäen kaavoja 18–21.



Kuva 22. Tarvittavat muuttujat voimakomponenttien X_1 , X_2 , Y_1 ja Y_2 ratkaisemiseksi. Kuten kuvasta nähdään, voiman vipuna toimii lähes pelkästään nivelpisteen radiaalipituus h , joka aiheuttaa voiman kallioon.

Sylinterien x- ja y-suuntaiset komponentit saa selville trinomisilla yhtälöillä käyttäen hyväksi suorakulmaisia neliöitä. A:n alaindeksillä p viitataan pidempään eli työntävään sylinteriin. Käytetyt kaavat ovat seuraavat:

$$A_x = L_{00} \cos \alpha + L_1 - h \sin \alpha \quad (8)$$

$$A_y = L_{00} \sin \alpha - H + h \cos \alpha \quad (9)$$

$$A_{xp} = L_{00} \cos \alpha + L_1 + h \sin \alpha \quad (10)$$

$$A_{yp} = L_{00} \sin \alpha + H - h \cos \alpha \quad (11)$$

jossa A_x , A_y , A_{xp} ja A_{yp} ovat hydraulisylinterien nivelen x- ja y-pituuskomponentteja lyhennetylle (A_x , A_y) ja pidennetylle (A_{xp} , A_{yp}) sylinterille, L_{00} on puomin nivelien aksiaalinen etäisyys puomin ollessa α kulmassa ja H on puomin nivelien radiaalinen etäisyys. Sylinterien kulmat suhteessa rungon keskiakseliin saadaan seuraavilla kaavoilla:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{A_y}{A_x} \right) \quad (12)$$

$$\omega = \tan^{-1} \left(\frac{A_{yp}}{A_{xp}} \right) \quad (13)$$

jossa β on lyhyemmän sylinterin kulma rungon pituussuunnasta ja ω on pidemmän sylinterin kulma rungon pituussuunnasta. Puomin vipuvarsien komponentit saadaan sylinterien ja puomin kulmien komponenteista seuraavien kaavojen avulla:

$$X_1 = \cos(\alpha - \beta) \quad (14)$$

$$X_2 = \cos(\alpha - \omega) \quad (15)$$

$$Y_1 = \sin(\alpha - \beta) \quad (16)$$

$$Y_2 = \sin(\alpha - \omega) \quad (17)$$

jossa X_1 on puomin suuntainen komponentin kerroin lyhyemmälle sylinterille kulmassa α , X_2 on puomin suuntainen komponentin kerroin pidemmälle sylinterille kulmassa α , Y_1 on puomin säteen suuntainen komponentin kerroin lyhyemmälle sylinterille kulmassa α ja Y_2 on puomin säteen suuntainen komponentin kerroin pidemmälle sylinterille puomin ollessa kulmassa α .

Puomille lasketaan voimatasapainoyhtälö kriittisessä tilanteessa. Työssä tarkastettiin kaksi kriittiseksi katsottua tilannetta: puomin ollessa yläasennossa ja louhivan sivulle, sekä puomin ollessa vaakatasossa kääntyneenä ääriasentoon sivulle ja louhivan ylös-

päin. Käsin tehtyjen laskujen perusteella molemmat tapaukset ovat lähes samansuuruisia. Parametrisessä ratkaisijassa on päädytty tarkastelemaan vain jälkimmäistä tapusta. Sylintereille vaaditut voimat on ratkaistu seuraavilla yhtälöillä:

$$\sum F_x: F_1 \cdot X_1 + F_2 \cdot X_2 = 0 \quad (18)$$

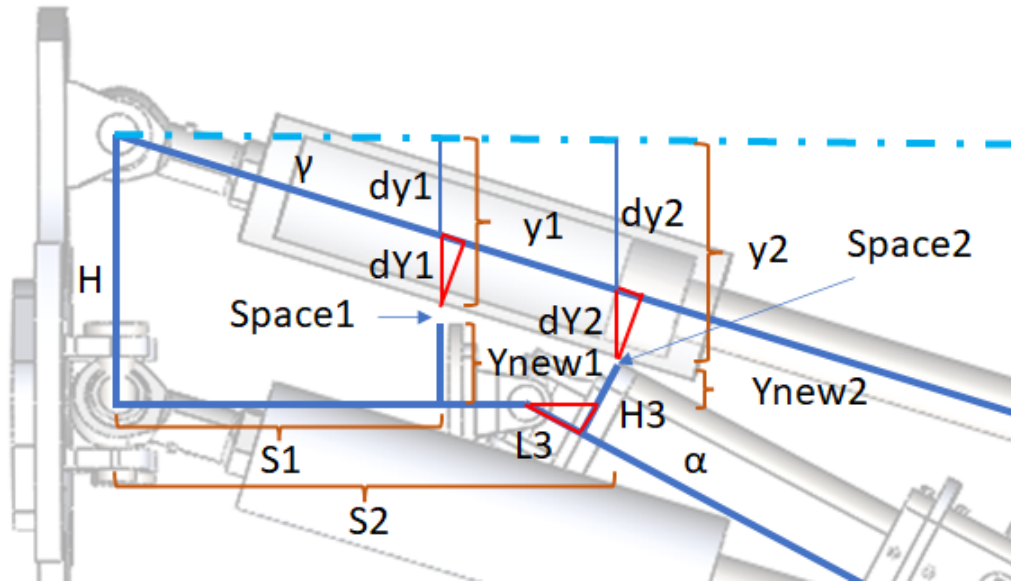
$$\sum F_y: F_1 \cdot Y_1 + F_2 \cdot Y_2 + F_{3y} + F_{4y} - G_y = 0 \quad (19)$$

$$\sum M: -F_1 \cdot X_1 \cdot h + F_2 \cdot X_2 \cdot h + F_1 \cdot Y_1 \cdot l + F_2 \cdot Y_2 \cdot l - G_y \cdot l - F_{3y} \cdot L = 0 \quad (20)$$

$$F_{3D} = F_2 \frac{1}{\cos \gamma} \quad (21)$$

Jossa F_1 on lyhyemmän sylinterin voima, F_2 on pidemmän sylinterin voima, F_{3y} on työkaluun kohdistuva voima, ja F_{4y} on rungon ja puomin väliseen niveleen kohdistuva säteissuuntainen voima, G_y on gravitaatiovoima puomin säteen suunnassa puomin ollessa kulmassa α , F_{3D} on suurin voima, kun puomi on vaakatasossa ja sivulle ääriasenossa ja γ on nivelen suurin sallittu kulma. Puomissa massaksi on oletettu 200 kg ja keskipisteeksi sylinterien ja puomin välinen pituus puomin keskiakselilla. Yhtälöryhmän ratkaistiin *Python* koodissa *Numpy* kirjaston approksimoivalla lineaarisella *linalg.lstsq* ratkaisumenetelmällä. Laskentatapa soveltuu puomin tarkkailuun vain puomin ollessa maksimikulmassa.

Seuraavaksi puomin suunnittelussa selvitetään, osuuko puomin sylinterit itseensä. Tarkasteluun tarvitaan sylinterin paksuus, joka valitaan voimatasapainojen yhtälöiden perusteella valmiiksi lasketusta vaihtoehtolistasta. Sylinterin valinta on käsitelty myöhemmin tässä luvussa. Itseensä törmäyksen tarkastuksessa käytetään kuvassa 23 esitettyjä muuttujia.



Kuva 23. Sylinterien puomiin törmäämisen tarkastelu.

Puomin törmäämisen varalta tarkastetaan kaksi pistettä, jotka ovat puomin kardaaninivelen kiinnityslaippojen kärkisärmät. Tarkastelussa sylinterin paksuus oletetaan koko matkalta suurimman halkaisijan kokoiseksi. Tarkastelu tehdään epäyhtälöillä, jolloin väliin jätetään vähintään *Space1* ja *Space2* verran tilaa y-akselin suunnassa. Tarkastelussa on neljä vaihetta:

1. Lasketaan tarkastettavien törmäyspisteiden tarkastelupituus rungon x-akselilla kaavoilla 22 ja 21.
2. Lasketaan sylinterin uloin reuna tarkastelupituudella nivellaakerin x-akselilta rungon suhteen kaavojen 24–28 avulla.
3. Lasketaan puomin uloin reuna tarkastelupituudella puomin keskiakselilta kaavojen 29–32 avulla.
4. Rungon kardaaninivelen ja nivellaakerin välisestä erosta vähennetään uloimpien reunojen pituudet ja epäyhtälöllä tarkastetaan väliin jäävä tila.

Kaavat, joilla selvitetään tarkastelupituus rungon x-akselilla:

$$S1 = L_1 - UJL \quad (22)$$

$$S2 = L_1 + \frac{UJL}{\cos \alpha} + H3 \sin \alpha \quad (23)$$

jossa *S1* on ensimmäisen törmäyspisteiden tarkastelupituus, *S2* on toisen törmäyspisteiden tarkastelupituus, *L₁* on kardaaninivelen ja nivellaakerin välinen pituusero rungon x-akselilla, *UJL* (*U-Join Length*) on kardaaninivelen pituus ja *H3* on puomin *RHS* palkin leveyden puolikas.

Seuraavilla kaavoilla lasketaan sylinterin uloin reuna tarkastelupituudella nivellaakerin x-akselilta rungon suhteen:

$$dy1 = S1 \tan \gamma \quad (24)$$

$$dy2 = S2 \tan \gamma \quad (25)$$

$$dY1 = dY2 = \frac{t}{\cos \gamma} \quad (26)$$

$$y1 = dy1 + dY1 \quad (27)$$

$$y2 = dy2 + dY2 \quad (28)$$

jossa $dy1$ on ensimmäisen tarkastelupisteen sylinterin pituudesta johtuva ulottuvuus, $dy2$ on toisen tarkastelupisteen sylinterin pituudesta johtuva ulottuvuus, $dY1$ ja $dY2$ ovat sylinterin paksuudesta johtuva ulottuvuus, $y1$ on sylinterin uloin reuna ensimmäisessä tarkastelupisteessä, $y2$ on uloin reuna toisessa tarkastelupisteessä.

Seuraavilla kaavoilla lasketaan puomin uloin reuna tarkastelupituudella puomin keskiakselilta:

$$Y_{new1} = H2 \quad (29)$$

$$Y_{new2} = UJL \sin \alpha - H3 \cos \alpha \quad (30)$$

jossa Y_{new1} on kardaaninivelen rungon puolen *RHS* palkin leveyden puolikas ja Y_{new2} on puomin uloimman reunan korkeus tarkastelupituudella.

Seuraavien kaavojen avulla selvitetään kuinka paljon jäätä tilaa rungon kardaaninivelen ja nivellaakerin väliin, kun uloimmat pisteet on vähennetty pois:

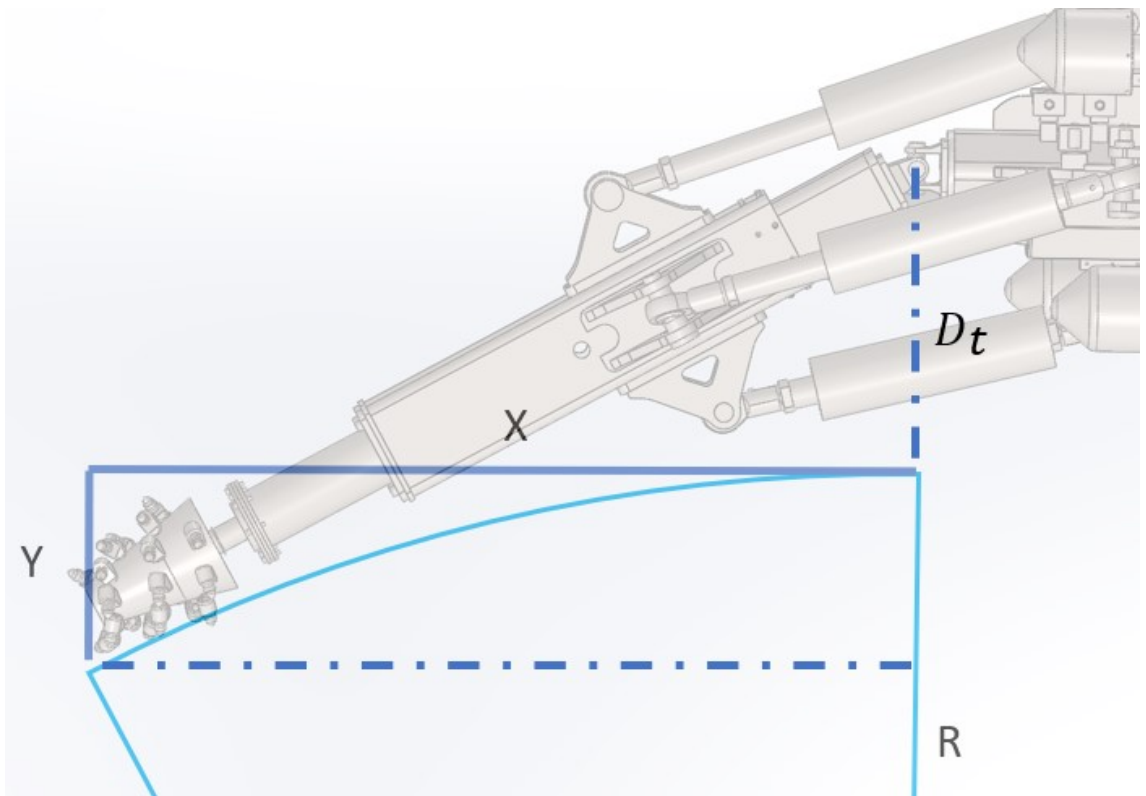
$$Space1 = H - y1 - Y_{new1} \quad (31)$$

$$Space2 = H - y2 - Y_{new2} \quad (32)$$

Jossa $Space1$ on puomin ja sylinterin väliin jäävä korkeusero ensimmäisessä tarkastelupisteessä ja $Space2$ on puomin ja sylinterin väliin jäävä korkeusero toisessa tarkastelupisteessä. Tarkastelupisteitä verrataan lopuksi tavoiteltuun korkeuseroon ja tarpeen tullen ohjelmassa eliminoidaan käymätön suunnitteluvaihtoehto.

Seuraavaksi esitetään puomin kääntyvyyden arvioimista. Menetelmässä käytetään hyväksi analyttistä geometriaa laskemalla ympyrän säde tuntien ympyrän lakipiste ja kahden pisteen välinen ero. Ympyrän keskipisteen oletetaan olevan horisontaalisesti sa-

malla suoralla kardaaninivelen kanssa ja ympyrän säteen lähtevän kaivetun suoran ympyrän ulkohalkaisijalta. Toisin sanoen kaartuminen alkaa kardaaninivelen kohdalta. Tunneli kaartuu ideaalisesti työkalun uloimpaan piikkiin saakka. Tilanne on esitetty kuvassa 24. Todellisuudessa kaartuminen on monimutkaisempi prosessi ja se vaatisi järeämpää mallinnusta, jonka ei ole arvioitu soveltuvan ratkaisijaan. Menetelmä ei siis kerro kuinka jyrkästi puomin avulla pystyy kääntyä, mutta antaa mahdollisuuden verrata eri suunnitteluvaihtoehtoja. Menetelmä antaa liian hyvän kuvan kääntymisestä, jonka takia puomin rungon seinään törmäämisen tarkastelu pitää todennäköisemmin paikkansa. Ongelmana menetelmässä on keskipisteen sijoittaminen horisontaalisesti kardaaninivelen kanssa, kun todellisuutta kuvaisi paremmin pisteen sijoittaminen robotin ja seinän etummaisimpaan kontaktipisteeseen. Todelliseen kääntymiseen huomioon otettavia asioita on käsitelty liitteessä B.

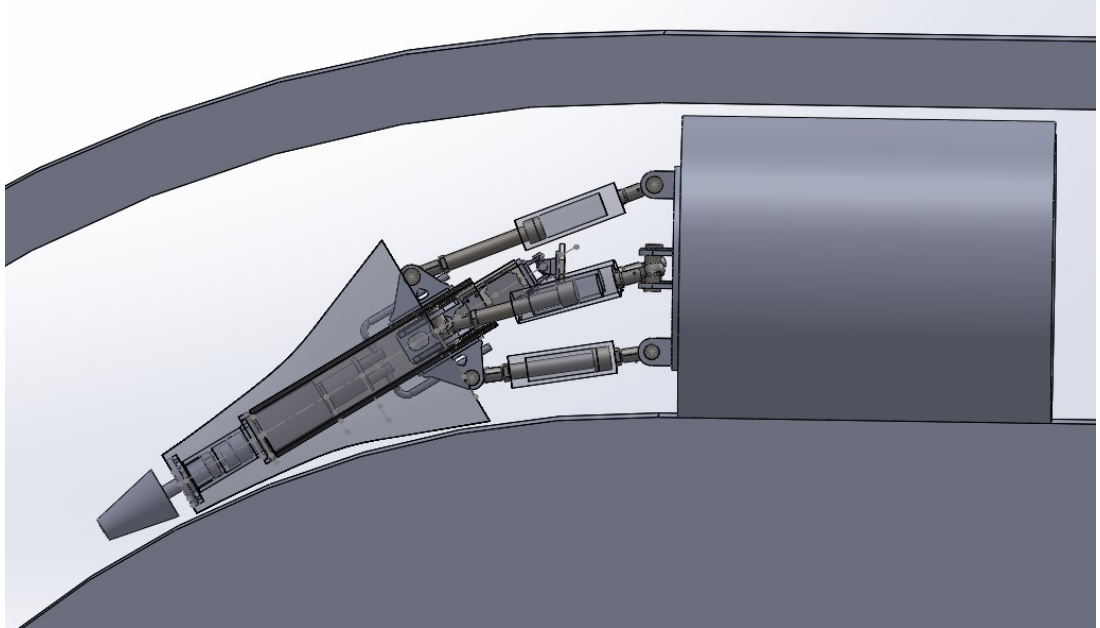


Kuva 24. Kuvassa puomin kääntymiseen vaadittavat muuttujat.

Kääntyminen saadaan laskettua kaavasta:

$$R = \frac{X^2 + Y^2}{2Y} \quad (33)$$

Jossa R on kääntymissäde, X on kardaaninivelen ja työkalun uloimman piikin välinen etäisyys rungon x-akselilla ja Y on robotin kaivaman ympyrän ulkosäteen ja työkalun uloimman piikin välinen etäisyys rungon y-akselilla. Samalla kaavalla voi laskea muiden pisteiden kääntyvyyden ja siten tarkastaa osuuko puomin runko seinään kääntyessä. Lisäksi puomin kääntyvyys vaikuttaa puomin asennustilavuuteen. Käytettävä tilavuus on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Puomiin jäävä asennustilavuus. Puomiin tulee kalliota aistivia sensoreita ja kivimurskan keräyslaite, jotka tulee olla asennettavissa puomiin. Tilaa on kuitenkin rajoitetusti.

Sylinterin tulee pystyä painamaan työkalua kalliota vasten työkalun vaatimalla voimalla. Vaadittu voima on arvioitu kirjallisuuden perusteella ja suunnittelun aikana tehtävien kokeiden perusteella, jotka tarkentavat kirjallisuuden arviota. Puomin sylinterit kuormittavat puomin runkoa, joten sylinterien pyritään tuottavan mahdollisimman vähän voimaa. Tällöin myös sylinterin halkaisija on pieni ja sylinterillä on enemmän tilaa olla osumatta puomiin kääntyessä. Kyseessä on siis muuttuva parametri.

Sylinterin valitsemisessa tulee varmistaa, ettei sylinteri tuottaa tarpeeksi voimaa sisäänpäin ja ulos työntyessä, sekä varmistaa ettei sylinterin varsi nurjahda. Hydraulisyylintereitä valmistetaan standardimittojen mukaisesti. Syinä tähän on eri valmistajien tuottamat laakerit ja tiivisteet. Tästä syystä parametrisessä ratkaisijassa on mahdollista välttää turhalta tarkastelulta luomalla lista mahdollisesti käyvistä sylintereistä. Sylinterilista on muodostettu seuraavan menetelmän avulla:

1. Arvioidaan puomin vaatimat voimat.

2. Valitaan puomiin mahdollisesti soveltuvat sylinterien halkaisijat tuotetun voiman perusteella.
3. Lasketaan sylinterien varren nurjahdusvoima nivelvälin oletetulla pituudella.
4. Listataan käyvät halkaisijavaihtoehdot ja niiden tuottamat voimat.

Alkuarvauksena puomin pituudelle on 1 800 mm ja nivelpisteiden oletetaan olevan 200 mm leveydellä. Työkalulta vaaditaan 10 kN voimaa. Sylinteriä liikuttaa vetävä ja työntävä sylinteri, jolloin yhdelle sylinterille vaadittava voima on noin 50 kN luokkaa.

Hydraulisyylinterien tuottama voima riippuu sylinterin halkaisijasta seuraavan kaavan mukaisesti:

$$F_{out} = \frac{p\pi}{4} D^2 \quad (34)$$

jossa F_{out} on hydraulisyylinterin tuottama voima männän työntyessä ulos, p on hydraulisyylinterissä oleva paine ja D on sylinterin halkaisija. Sylinterin sisään työntyessä suurin voima saadaan seuraavan kaavan mukaisesti:

$$F_{in} = \frac{p\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (35)$$

jossa F_{in} on hydraulisyylinterin tuottama voima sylinterin painuessa sisälle ja d on varren halkaisija.

Hydraulisyylinterin varsi ei saa nurjahtaa. Nurjahtamiseen vaikuttaa varren halkaisija, varmuuskerroin ja nivelvälin pituus. Varsivaihtoehdoille lasketaan etukäteen nurjahdusvoima, kun tarkasteltava hydraulisyylinteri tuottaa suurimman voimaan työntyessä 160 Bar paineella ja kun nivelten välinen etäisyys on 650 mm (250 mm iskunpituus ja 150 mm kuollut pituus). Hydraulisyylinteri oletetaan koko matkalta olevan varren paksuinen. Materiaalin kimmokerroin oletetaan olevan 210 GPa ja hydraulisyylinteri on kiinnitetty nivelillä molemmista päistä. Nurjahdusvoima lasketaan kaavasta:

$$F_n = \frac{\pi EI}{L_s^2} \quad (36)$$

jossa F_n on nurjahdusvoima, E on kimmokerroin, F_n on sylinterin pituus, L_s on hydraulisyylinterin nivelten välinen suurin mahdollinen etäisyys ja I on sylinterin männän jäyhyysmomentti, joka lasketaan männälle kaavasta:

$$I = \frac{\pi}{32} d^4 \quad (37)$$

Edellä mainittujen kaavojen perusteella Hydraulisyylinteriin kelpaavat taulukon 17 mukaiset halkaisijat.

Taulukko 17. Mahdollisesti sopivat hydraulisyylinterit, jotka eivät nurjahda ennalta arvioidulla 650 mm nivelvälillä, kun sylinterit tuottavat maksimivoiman.

	Sylinteri1	Sylinteri2	Sylinteri3	Sylinteri4
D (mm)	50	60	63	80
d (mm)	28	30	36	40
F_{in} (kN)	31,4	45,2	49,9	60,3
F_{out} (kN)	21,6	30,8	29,8	80,4

Lisäksi sylinterille tulee määritellä pituus. Pituuden voi räätälöidä helposti, sillä pituuden muuttaminen vaatii sahauspaikkojen siirtämistä. Sylintereillä on valmistustavan ja valmistajan mukaan ominainen kuollut pituus. Kuolleella pituudella tarkoitetaan pituutta nivelestä niveleen, josta on vähennetty iskunpituus. Tilattavan sylinterin kuollut pituus määräytyy tarkemmin tilausvaiheessa. Lisäksi sylinterin pituus vaikuttaa puomin nivelten sijaintiin ja siten työkaluun kohdistuvaan voimaan ja liikerataan. Näistä syistä puomin iskunpituus on muuttuja ja kuollut pituus parametri. Sylinterin pituus linkittyy voimakkaasti nivelten sijaintiin, joten nivelten sijainti määrittelee tarvittavan sylinterin.

Sylinterin nivelten tehtävä on olla tarpeeksi kestävä ja mahdollistaa tarpeeksi suuri kääntyvyys puomille. Nivelten laakerityypiksi. Ajallisten vaatimusten vuoksi konseptuaalisesti päädyttiin valitsemaan nivellaakeri. Sopivia laakereita löytyi katalogeista, jonka vuoksi nivellaakeri valitaan sylinterin perusteella. Alustavassa suunnittelussa Nivellaakeriksi valittiin 50 kN voiman kestävän nivellaakerin pituus parametriksi, jota pystyy muuttamaan tilausvaiheessa.

Liukupalan tehtävä on vähentää kulumista pintojen välillä ja minimoida pintojen välinen kitka. Työkalun on arvioitu vaativan 10 kN voimaa työntäessä ja kyljellä louhiessa ja hydraulisyylinterit tuottavat alle 30 asteen kulmalla 50 kN voiman. Kitkavoimien odotetaan jäävän vähäisiksi, jonka takia kitkakertoimen minimoiminen ei ole tarpeellista. Liukupalan tärkeimmät ominaisuudet ovat iskunkestävyys ja staattinen lujuus.

Liukupalaan kohdistuvan todellisen rasituksen arvioiminen on haastavaa, koska todellisuudessa liukupalat ja liukupinnat taipuvat. Lisäksi Tynyksen (2014) diplomityössä vanhemman rakenteiden analysoijan Kari Prässisen mukaan liukupala muuttaa kulussa muotoa ja mallin oikeellisuus heikkenee. Tynys esittää työssään työkonepuomin optimointia ja käy läpi työssään liukupalan suunnittelua, jonka ohjeita tässä työssä on käytetty. Tynyksen mukaan FE laskelmissa jännitykset kasvavat yksinkertaisessa mallinnuksessa liukupalojen reunoilla todellisuutta suuremmiksi. Tynyksen mukaan liukupalaan kohdistuva voima kannattaa mallintaa reaktiivisena voimana, jolloin voima jakautuu liukupalalle tasaisemmin.

Puomin rungon neliöprofiilin takia liukupalojen profiilina käytetään neliötä. Liukupalalle on siis neljä parametriä: paksuus, leveys, pituus ja materiaali. Paksuus ja leveys määrittyvät puomin rungon mittojen mukaisesti. Liukupalan materiaali ja pituus määrittyvät liukupalaan kohdistuvien voimien perusteella.

Taulukko 18. *Liukupalan materiaalien ominaisuuksia. Aineominaisuudet ovat peräisin Etran tuotodokumenteista (LIITE D) ja kustannusarvio Aikolon.fi sivuilta.*

	UHMW-PE	POM-C	PEEK
Puristuslujuus (MPa)	17	72	140
Lovi-iskulujuus (kJ/m ²)	130	3,5	8
Kitkakerroin	0,24	0,2–0,55	0,12–0,3
Hinta €/kg	3–7	8–25	50+

Liukupalalle on 3 päämateriaalivaihtoehtoa *UHMW-PE*, *POM* ja *PEEK*. Materiaaleja on vertailtu taulukossa 18. Kuten taulukosta huomataan, *POM* ja *PEEK* ovat puristuslujuudelta 5 % muodonmuutoksessa *ISO 179-1* mukaisessa testissä lujempia *UHMW-PE*:n verrattuna. Kuitenkin Awad et.al. (2019) puristuslujuustestien perusteella HPED kykenee suurempaan puristumaan ja 10 % muodonmuutoksen kohdalla materiaali kestää 30 MPa jännityksen.

Liukupalaan kohdistuvaksi reaktiiviseksi voimaksi on voimatasapainoyhtälön perusteella 19 kN. Eri materiaalien puristuslujuuden perusteella *HDPE* vaatisi voiman jakautuvan tasaisesti 6,3 cm² alalle 10 % puristamalla. *POM*:ille ja *PEEK*:ille vastaavat alat 5 % puristamalla ovat 2,6 cm² ja 1,4 cm². Mikäli liukupala on 7 cm leveä, jonka seurauksena *UHMW-PE* vaatisi kuorman jakautuvan 1 cm pituudelle, *POM* 0,4 cm ja *PEEK* 0,2 cm. Jokainen liukupaloista siis kestää tarpeeksi hyvin puristuslujuutta. Taulukon 6 perusteella *POM*:in ja *PEEK*:in iskunkestävyydet ovat heikkoja verrattuna *UHMW-PE*:n iskunkestävyyteen. Kallion louhiminen kohdistaa tärinää ja iskuja liukupaloihin, jonka seurauksena liukupala voi murentua. Tästä syystä liukupalan materiaaliksi on valittu *UHMW-PE*.

Puomin rungon tehtävä on pitää muotonsa, jotta liukupaloihin kohdistuisi mahdollisimman vähän muodonmuutoksista johtuvaa rasiutusta. Lisäksi rakenteen tulee kestää erikoisolosuhteita, eli tunnelin katosta irtoavien kivien sortumista työkaluun. Sortumisen kestämisen laskenta on monimutkaista. Ongelman yksinkertaistamiseksi työssä on valittu lujuuslaskennan taivutusmomentin käyttö ja varmuuslaskenta *FEM* laskennalla.

Rungon toinen tehtävä on olla kiinnitysalustana toimilaitteille. Tähän vaikuttavia parametrejä ovat rungon leveys, paksuus ja pituus. Rungon mittoja määritteleviä tekijöitä ovat vaihdelaatikon leveys ja korkeus. Tämän seurauksena rungon leveys on niin suuri,

että 6 mm paksu neliöpalkki on selvästi tarpeeksi luja. Rungon sisälle täytyy pystyä mah-
tumaan työkalun vaatimat osat ja kyetä työntämään työkalu kallion seinään. Rungon pi-
tuuteen vaikuttavista tekijöistä iskunpituus on ainut muuttuja ja loput esitetään paramet-
reinä.

Kolmantena vaatimuksena rungon tulee olla kasattava ja huollettava. Työkalu on ka-
sattavissa kolmessa osassa: ensin laakerointi kiinnitetään akseliin, sitten akseli kiinnite-
tään kytkin ja lopuksi kytkin kiinnitetään vaihteeseen. Näiden piirteiden asennettavaksi
runko tulee joko halkaista kyljestä kahtia tai jakaa pituussuunnassa kolmeen osaan.
runko on valittu jakaa kolmeen osaan pituussuunnassa ja osien kiinnitys toisiinsa teh-
dään pulteilla. Tällöin hiekkaisella testausalueella osien vaihtaminen ja korjaaminen vi-
kaantuessa on arvioitu olevan vähemmän työtä vaativaa. Lisäksi 3-osainen vaihtoehto
on valmistusmenetelmiltä yksinkertaisempi.

Neljäntenä vaatimuksena on rungon kyky pidentyä. Tätä varten runko vaatii neljän-
nen osan eli sisemmän rungon. Rungot tulevat liukumaan toisiaan vasten, joten väliin
vaaditaan laakerointia. Laakeroinnille annetaan tilaa 10–20 mm verran runkojen väliin.
Sisärungon valinta riippuu siis ulkorungon sisäleveydestä.

Rungon korvakkeiden tarkoitus on kiinnittää sylinteri puomiin. Korvakkeiden pitää
kestää sylintereiden tuottama voima ja varautua poikkeustilaan, eli kiven putoamiseen.
Lisäksi rungon korvakkeiden massan vaikutus on pieni suhteessa puomilta vaadittaviin
voimiin. Korvakkeet mitoitetaan mahdollisimman kestäviksi, mutta helposti valmistetta-
viksi. Mahdolliset parametrit ovat korvakkeen paksuus, korkeus ja pituus. Korvakkeen
on valittu 15 mm paksuus. Samalla ainevahvuudella tehdään tukiosat runkoon. Tällöin
käytettävän materiaalien määrä pysyy vähäisenä. Korvakkeen korkeus perustuu nivelten
kiinnityspisteiden korkeuteen ja korvakkeiden leveys rungon paksuuteen. Korvakkeen
pituus tulee olemaan mahdollisimman pitkä, jotta hitsausliitokset olisivat mahdollisimman
kestäviä. Korvakkeiden pituus riippuu nivelten sijoittelusta, joten korvakkeiden muodon
suunnittelu jää pois parametrisestä ratkaisijasta.

Fysikaalisten mallien yhteenveto on taulukossa 19. Taulukko yksinkertaistettu, eikä
kerro mallien kokonaislaajuutta. Yhtälö sisältää usean pieneksi pilkotun yhtälön.

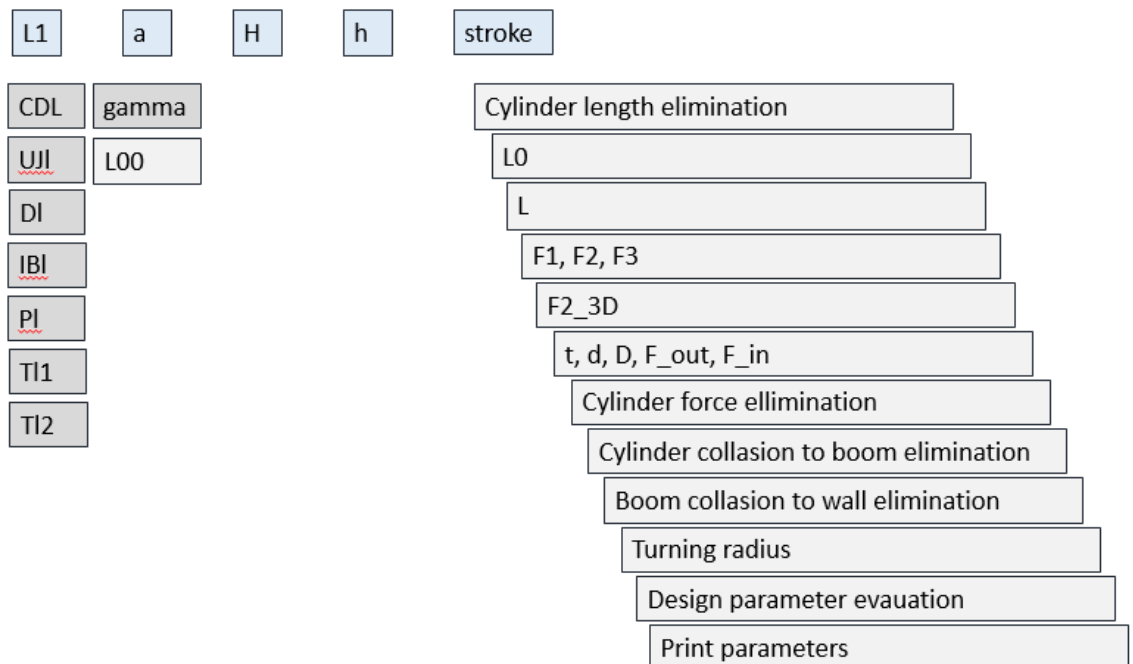
Taulukko 19. Yhteenveto toimitteiden vaatimuksista		
Ylettyvyys	Ratkaisijaan	Yhtälö
Puomin nivelen pituus kääntyessä	Ratkaisijaan	Yhtälö
Hydraulisylinterin pituuden sopivuuden tarkastelu	Ratkaisijaan	Epäyhtälö
Voimatasapainoyhtälöt	Ratkaisijaan	Yhtälöryhmä
Itseensä törmäystarkastelu	Ratkaisijaan	Epäyhtälö

Kääntyvyytarkastelu	Ratkaisijaan	Yhtälö
Sylinterilistan muodostus	Muodostetaan etukäteen	Listaus
Nivelten valinta	Valitaan etukäteen	Arvio
Liukupalan tarkastelu	Valitaan etukäteen	Arvio
Rungon tarkastelu	Valitaan etukäteen	Arvio + FEM
Korvakkeiden tarkastelu	Valitaan jälkikäteen	Arvio + FEM

Fysikaalisia malleja muodostui ratkaisijaan 6 kappaletta ja yksi lista, joissa on neljää erilaista ratkaisumenetelmää hyödynnetty. Ratkaisijan ulkopuolelle jätettäviä malleja on 5 kappaletta.

4.3 Parametrisen ratkaisijan laskentajärjestys ja käytetyt arvot

Tässä luvussa esitetään edellisen luvun parametrinen ratkaisijan mallit ohjelmointiin soveltuvammassa muodossa ja annetaan tarkat arvot parametreille ja muuttujille. Lisäksi mallit on jaettu yhtälöryhmiin, reunaehtoihin ja lisäehtoihin. Kuvassa 26 on esitetty ohjelman funktioiden laskentajärjestys vasemmalta oikealle. Parametrinen ratkaisijan funktioissa on samankaltaisuuksia, jonka takia ohjelmassa olevat funktiot kutsuvat apufunktioita ongelmiensa ratkaisemiseksi. Yksinkertaistamisen vuoksi nämä on jätetty pois. Ohjelman koodi on esitetty liitteessä A.



Kuva 26. Laskentajärjestys vasemmalta oikealle. Vaaleansinisellä on merkattu muuttujat, tummanharmaalla parametrit ja vaaleanharmaalla yhtälöt, jotka luovat uusia parametreja tai toiminnallisia ominaisuuksia.

Kuvaajassa ylimmällä tasolla on esitettyjä muuttujia: $L1$, joka on rungon ja sylinterin etäisyys rungon ja puomin nivelestä pituussuunnassa, a on puomin maksimikäntökulma, H , joka on rungon ja sylinterin etäisyys rungon ja puomin nivelestä säteissuunnassa, h on sylinterin ja puomin nivelen etäisyys rungon keskiviivasta säteissuunnassa ja $stroke$ on sylinterin iskunpituus.

Tummanharmaalla on esitetty suunnitteluparametreja. CDL (*cylinder death length*) on sylinterin kuollut pituus, UJI (*U-joint length*) on kardaninivelen haarukan pituus, DI (*death length*) on puomin sisäraiteen kuollut pituus eli kiinnitykseen kuuluva pituus, IBI (*in between length*) on väliin jäävä pituus eli liukupaloille varattu pituus sisäraiteesta, $T11$ (*tool length 1*) on työkalun moottorin ja vaihteen yhteispituus, $T12$ (*tool length 2*) on työkalun loppupituus ja γ on sylinterin nivellaakerien suurin sallittu kulma. $T11$ tulee puomin neliöputken sisälle ja $T12$ tulee sylinterinmuotoisen putken sisälle.

Funktiot on kuvaajaan merkitty vaalean harmaalla. $L00$ lasketaan puomin x-akselin pituus niveleen maksimikulmassa, *Cylinder length elimination*:issa varmistetaan sylinterin sopivan nivelväliin, $L0$ lasketaan puomin x-akselin pituus puomin ollessa suorassa, L lasketaan puomin pituus, $F1$ on lyhyempään sylinteriin kohdistava voima, $F2$ on pidemmän sylinterin kohdistama voima, $F3$ on niveleen kohdistuva säteensuuntainen voima, $F2_3D$ on maksimivoima kolmiulotteisessa tapauksessa, t on sylinterin paksuus, d on sylinterin varren halkaisija, D on sylinterin pään halkaisija, F_out on sylinterin työntävä voima, F_in on sylinterin vetävä voima, *Cylinder force elimination*:issa eliminoidaan liian suuri vaadittava voima, *Cylinder collision to boom elimination*:issa tarkastetaan osuuko puomin sylinteri puomiin itseensä, *Boom collision to wall* tarkastetaan osuuko puomin runko kääntyessä seinään, *turning* radiuksessa lasketaan robotin teoreettinen minimikäntymissäde, *design parameter evaluation*issa pisteytetään suunnitteluvaihtoehto.

Taulukossa 20 on esitetty suunnittelussa käytetyt muuttujat ja niiden arvot. Yhteensä läpikäytäviä suunnitteluvaihtoehtoja on 172 800 kpl. Muuttujia ovat nivelpisteiden sijainnit, sekä iskunpituus ja maksimikulma. Maksimikulmassa tarkastellaan vain kahta kulmaa, koska nivellaakerien 17 asteen rajoitteen vuoksi 34 astetta on maksimikulma, joka on mahdollista saavuttaa.

Taulukko 20. *Parametrisen ratkaisijan muuttujat*

muuttuja	minimi	maksimi	väli
$L1$	300	385	5
a	32	33	1
H	210	260	1
h	175	250	2
$stroke$	220	270	10

$L1$ muuttujan rajoitteina on nivellaakerin kulma. Maksimikulman saavuttamiseksi on kardaanimivelen oltava puolessa välissä nivellaakereita. Iskunpituus on arviolta 220–250 mm ja kardaanimivelen pituus 50 mm. Lisäksi nopeasti läpikäytyjen ajojen perusteella 300–385 vaikutti pitävän sisällä parhaat mahdolliset suunnitteluvaihtoehdot.

Maksimikulman tavoite on olla mahdollisimman suuri. Nivellaakerin maksimikulma on 17 astetta, joten kaksi niveltä kääntyy maksimissa 34 astetta. Tästä syystä 33 astetta on asetettu rajoitteeksi, jotta sylinterit olisivat ensimmäinen mekaaninen rajoite kääntymiselle. Ratkaisija kykeni löytämään hyviä ratkaisuja ja pienempi kulma ei lyhentänyt ajoissa merkittävästi muita ominaisuuksia, jonka vuoksi minimirajaksi on asetettu 32 astetta.

muuttuja H tarkoittaa kardaanimivelen ja nivellaakerien radiaalista pituuseroa. Nivellaakerissa oleva sylinteri ei saa ylettyä kiinnityslaipan ulkopuolelle, jotta sylinterien vaurioitumisriski pienentyisi. Lisäksi nivellaakeri ei saa osua keskellä olevaan neliöputkeen. Neliöputken leveys on 100 mm, kiinnityslaipan säde on 300 mm ja nivellaakerin säde on 40 mm. Tästä syystä H :n raja-arvot ovat 140 mm - 260 mm.

Muuttuja h tarkoittaa puomin nivellaakerin keskikohdan radiaalista etäisyyttä puomin keskipisteestä. Nivellaakerin ja puomin väliin on jätävä 20 mm rako, jotta nivel ei kii-laannu. Lisäksi puomin ulkokuoren leveys on 160 mm, nivellaakerin säde on 40 mm ja korvakkeen pohjalevyn paksuus on 10 mm. Maksimiarvo puolestaan riippuu kauluksen säteestä ja nivellaakerin säteestä, jotka ovat 300 mm ja 40 mm. Tämän perusteella h :n arvojen väli on 130–270 mm. Kuitenkin nopeiden läpiajojen perusteella välin kaventaminen 175–250 mm ei vaikuttanut tuloksiin.

Iskunpituudeksi on suositeltu työkalun pituus ja siihen hieman lisää louhimisen aloittamista varten. Tästä syystä muuttujan *stroke* väliksi on asetettu 220–270 mm.

Taulukossa 21 on esitetty parametrinen ratkaisijan parametrejä, eli arvoja, jotka pysyvät vakioina laskennan aikana.

Taulukko 21. *Parametrisen ratkaisijan parametrit*

Parametri	Kuvaus	Arvo
CDL	sylinterin kuollut pituus	0.306 m
UJI	kardiaalinivelen pituus	0.04 m
DI	puomin kuollut pituus	0.01 m
l _{bl}	puomin ja teleskoopin väliinjäävä pituus	0.1 m
PI	Hydraulimoottorin letkuille varattu pituus	0.05 m
TI1	työkalun pituus moottorista vaihdelaatikon kiinnitystasoon	0.318 m
TI2	työkalun pituus vaihdelaatikon kiinnitystasosta työkalun päähän	0.506 m
alfa_0	Voimien laskennassa käytetty kulma	0 deg
gamma	nivellaakerin suurin sallittu kulma	17 deg
m	puomin arvioitu massa	200 kg

g	gravitaatiokiihtyvyyys	9,82 m/s ²
F _{3y}	työkalun vaadittu voima	10 kN
t	synterinin seinän arvioitu paksuus	0.006 m
-	jalkojen pituus	0,035 m
max_mining_radius	robotin suurin halkaisija	0.47 m
h_tool	työkalun työstämishalkaisija työkalun kauim- massa piikissä	0.08 m
Hd	kaivettavan tunnelin säde	0.415 m
ICt	Puomin sisemmän kuoren etäisyys keskipis- teestä	0.12 m
OCt	Puomin ulomman kuoren etäisyys keskipis- teestä	0.16 m

Taulukossa 22 on esitetty sylinterien parametrit. Käytettävä hydraulisynterinin halkai-
sija on muuttuja, mutta jonka valinta riippuu funktionaalisesti muista tarkasteltavista
muuttujista.

Taulukko 22. Lista synterien parametreistä.

		Sy- linteri1	Sy- linteri2	Sy- linteri3	Sy- linteri4	Virhe
D_list	Männän halkaisija	0.05	0.06	0.063	0.08	9999
d_list	Männän varren halkaisija	0.028	0.03	0.036	0.045	9999
Fout_list	Voima + liikkeessä	31 400	45 200	49 900	80 400	999 999
Fin_list	Voima - liikkeessä	21 600	30 800	29 800	55 000	999 999

Taulukossa *D_list* tarkoittaa synterinin mäntien halkaisijoita, *d_list* tarkoittaa männän
varren halkaisijoita, *Fout_list* tarkoittaa voimia synterinin työntyessä ja *Fin_list* tarkoittaa
voimia synterinin supistuessa. Etäisyydet ja voimat on esitetty SI-yksiköissä.

Taulukossa 23 on jaettu parametrinen ratkaisijan fysikaaliset mallit jaettu yhtälöryh-
miin, reunaehtoihin ja lisäehtoihin. Yhtälöryhmiä ovat mallit, jotka kuvaavat puomin suo-
rituskykyä. Reunaehdot ovat yhtälöitä, jotka kertovat onko vaihtoehto käyvä. Lisäehdot
ovat ennalta laskettuja vaatimuksia parametriseissä ratkaisijassa.

Taulukko 23. Fysikaalisten mallien jaottelu yhtälöryhmiin, reunaehtoihin ja lisäehtoihin.

Yhtälöryhmät	Reunaehdot	Lisäehdot
Puomiin kohdiostuvat voi- mat (<i>F1</i> , <i>F2</i> , <i>F3</i>).	Hydraulisynterini ei osu puomin runkoon (<i>Cylinder collasion to boom elimi- nation</i>).	Hydraulisynterinin tuot- tama voima (<i>t</i> , <i>D</i> , <i>d</i> , <i>F_in</i> , <i>F_out</i>).
Ylettyvyys (<i>reach</i>)		Hydraulisynterinin nurjah- duksen tarkastelu (laskettu erikseen)
Kääntymissäde (<i>R</i>).	Synterinin pituuden sopi- vuus nivelten välille. (<i>cylinder length elimination</i>)	
Puomin pituus (<i>L</i>)	puomin rungoin seinään törmäämisen tarkastelu	

	(<i>Boom collision to wall elimination</i>)	
	L0 ja L00 välinen riippuvuus (L00)	

Taulukossa 24 on esitetty parametrisen ratkaisijan hintafunktion muuttujat, niiden tavoitteet, vaikutussuunta ja painokerroin. Suunnan miinus merkki tarkoittaa, että arvon halutaan olevan pieni ja plus tarkoittaa arvon haluttavan olevan suuri.

Taulukko 24. *Parametrisen ratkaisijan hintafunktio.*

muuttuja	kuvaus	tavoitearvo	suunta	painokerroin
reach_value	työkalun ylettyvyysoman halkaisijan ulkopuolelle	0.2 m	+	1
L_value	puomin pituus	1.4 m	-	1.2
stroke_value	sylinterin iskunpituus	0.27 m	-	0.6
D_value	ohjaussylinterien halkaisija	0.8 m	-	5
F_value	Hydraulisyylinterin suurin voima	50 kN	+	0.5
L1_value	rungon nivelten pituusero	0.3 m	-	2

Hintafunktion tärkeimpänä ominaisuutena on käyttää mahdollisimman pienivoimaista sylinteriä. Toiseksi tärkeintä on saada puomin kokonaispituus mahdollisimman lyhyeksi, johon vaikuttaa puomin pituus ja rungon nivelten etäisyys. Hydraulisyylinterin suurin voima on haluttu mahdollisimman suureksi, jotta laskelma vastaisi valitus sylinterin maksimivoimaa.

Parametrinen ratkaisija on toteutettu python kielellä helpon lähestyttävyyden vuoksi. Ohjelma ei sisällä iteraatiota ja laskennassa ratkaistaan vain lineaarisia ja epälineaarisia yhtälöitä, joten ratkaiseminen on nopeaa. Ohjelman suorittamista kelloitettiin *pythonin time* kirjaston *time.time* käskyn avulla. Ratkaisija pystyy käymään läpi keskimäärin noin 1,5 miljoona suunnitteluvaihtoehtoa minuutissa *Intel core i7-10610U* prosessorilla ja 32 GB hajasaantimuistilla, eli *RAM* muistilla. Tarkemmin tuloksia on esiteltyä liitteessä C.

Ratkaisija tulostaa muuttujien läpikäynnin jälkeen listan käyvistä vaihtoehdoista listaten konsoliin viimeiseksi parhaimman vaihtoehdon. Jokainen vaihtoehto sisältää suunnitteluparametrin ominaisuudet seuraavassa järjestyksessä: *hintafunktion pisteet, H, h, L00, F2_3d, D, d, L, R, L1, reach, stroke, F3, F1, L0.*

5. PUOMISSA SOVELLETUN SUUNNITTELUMENETELMÄN ANALYYSINTI

Diplomityön tavoitteena oli kehittää parametrinen ratkaisija autonomisen kaivosrobotin puomin suunnittelulle. Tarkoituksena oli luoda suunnittelumenetelmä, joka pystyy vaatimusten muuttuessa löytämään mahdollisimman nopeasti mahdollisimman hyvän ratkaisun suunnitteluongelmaan. Ongelman ratkaisemiseksi diplomityössä käytettiin vaihtoehtoja pääosin neljästä lähteestä: Myllärin (2012) konseptinkehitysmenetelmää, Frimannin (2020) ja Montgomery (2013) mallipohjaista systeemisuunnittelumenetelmää ja Lallan (2018) parametristä suunnittelumenetelmää. Kaikki kolme suunnittelumenetelmää ovat laaja-alaisia ja täysimääräisinä aikaa kuluttavia. Tästä syystä menetelmistä poimittiin määrätietoisesti suunnittelua edistäviä piirteitä, jotka ovat hyödyllisiä kaivosrobotin puomin tapaustutkimuksessa.

Konseptisuunnittelu integroitiin parametriseen suunnitteluun siten, että viimeisen luonnoksen yksityiskohtainen tarkastelu olisi helposti tehtävissä analyttisesti muuttujien avulla. Tämä mahdollisti parametrisen ratkaisijan läpikäymisen yhdellä python skriptillä. Tämän saavuttamiseksi malleja yksinkertaistettiin luvun 3 mukaisesti ja esimerkiksi *FEM* laskenta jätettiin ratkaisijan ulkopuolelle. Mallintaessa esiintyi suuri määrä geometrisia keskinäisriippuvuuksia, joiden yhteenliittyminen kävi intuitiivisesti monimutkaiseksi. Tämä johti virheisiin matemaattisia malleja tehdessä, joka hidasti ratkaisijan kehitystä. Parametrisen ratkaisijan yhtälöissä käytettiin seuraavia yksinkertaistuksia:

- Kriittisten pisteiden tarkastelu kokonaisuuden sijaan
- Ylimittotuksen avulla on välttytty ylimääräiseltä iteroinnilta ja hankalasti tutkittavissa osissa, jotka on helppo vaihtaa parempiin ja eivät ole kriittisiä toiminnan kannalta.
- epäyhtälön käyttö haastavassa geometrisessä tilanteessa. Esimerkiksi epäyhtälöitä on käytetty hydraulisylinlerin sovittamisessa.
- yhtälöryhmien ratkaiseminen valmiilla python kirjaston toiminnoilla, jotka nopeuttavat ohjelman läpiajtoa.
- Listojen käyttö uudelleenlaskemisen vähentämiseksi ja diskreettien muuttujien käsittelyssä. Esimerkiksi Hydraulisylinlerin männän ja männän varren halkaisijat muuttuvat standardien mukaisesti.

- Geometrinen yhtälöiden käyttö CAD sijaan. Ohjelma kykenee käymään eri tilanteita nopeasti, kun ylimääräisiä piirteitä ei generoida. Lisäksi analyttisessä tarkastelussa ei tule yllättäviä virheitä osien grafiikan generoimisessa, jotka voisivat keskeyttää laskennan.

Työn laajuus, rajoitteet, vaatimukset ja monimutkaisuus oli arvioitu projektin alussa liian vähäiseksi. Alkuperäinen yksinkertaisempi konsepti oli liian pitkä, kääntymiskulma oli liian pieni ja puomin tuottama voima ei ollut riittävä. Puomin suunnittelun aikana vaatimuksissa tapahtui muutoksia. Lisäksi nivelpisteiden muutoksella oli suuri merkitys puomin suorituskykyyn, erityisesti kääntymiseen. Tästä syystä parametrinen ratkaisijan käytöstä oli projektissa hyötyä. Ratkaisijan nopean laskennan takia ohjelma kykeni ratkaisemaan suuren määrän tapauksia, jonka vuoksi edistyneitä optimointimenetelmiä ei ole käytetty.

Työn jakaminen neljään osaan oli välttämättömyys työn avoimen lähtökohdan takia. Vaatimusanalyysi teki suunnittelusta tarkoituksenmukaista ja antoi parametrisessä suunnittelussa hyödynnetyille hintafunktiolle tavoitteet. Konseptisuunnittelu auttoi vähentämään ratkaisuvaihtoehtojen määrää ja antoi vaihtoehdon, jonka parametrinen mallintaminen on

Luvun 3.3 perusteella konseptivaihtoehtoista on valittu taulukon 25 mukaiset ratkaisut.

Taulukko 25. *Valitut konseptiratkaisut*

Laite	valittu konsepti	perustelut
Hydraulisylinlerin sijainti	jälkeen nivelen	Puomi ei väännä nivelestä poratessa epäkohtisuoraan. Vaatii vähemmän tarkkuutta ja toimintavarmempi.
puomin ohjauslaite	neljä hydraulisylinteriä	Pystyy tuottamaan paljon voimaa, ohjattavuus helpompi ja pidempi iskunpituus. Lisäksi mahdollistaa erillisen iskunpituuden työntölaitteen poistamisen. Nelisylinterisyys vähentää voimantarvetta. Symmetrisyys vähentää varaosien tarvetta ja vähentää osien epätasaista kulumista
Puomi-runko-kiinnitysniel	kilpa-autoon kardaninivel	Niveleen ei kohdistu valitulla työntölaitteella suuria voimia. Halpoja ja helposti saatava ratkaisu.
Hydraulisylinlerin nivelet	nivellaakeri	Helppo saatavuus ja asennettavuus. 17 asteen kulma on konseptin todistamisen tasolla tarpeeksi hyvä. Hydraulisylinterien kuollut pituus rajoittaa myös kääntyvyyttä.
Työkalun työntölaitte	ohjaussylinterit	Lyhentää puomia ja vähentää vaadittavien osien määrää. Vähentää hankalasti asennettavien hydraulien letkujen määrää.
Hydrailin letkujen vetäminen	puomin pidentäminen ja ulkokuoreen reikä	Yksinkertaisin ratkaisu konfiguroitavuuden näkökulmasta.

Luvun 3.5 arvoilla ja liitteen C skriptillä parametrinen ratkaisija on saanut taulukon 26 mukaiset tulokset muuttujille, parametreille ja suorituskyvyille.

Taulukko 26. Parametrisen ratkaisijan parhaan suunnitteluvaihtoehdon arvot.

pisteet	5,2067	-
puomin maksimikulma	33°	α
R-S nivelen säteensuuntainen etäisyys keskiakselilta	248 mm	H
S-P nivelen säteensuuntainen etäisyys keskiakselilta	173 mm	h
R-P ja S-P nivelenvälinen akselin suuntainen etäisyys puomin maksimikulmassa	345 mm	$L00$
Suurin työkalun vaadittava voima	-42 731 N	F_{3d}
sylinterin varren halkaisija	40 mm	d
Sylinterin halkaisija	80 mm	D
puomin pituus R-P nivelestä	1 254 mm	L
Kääntymissäde (teoreettinen)	1 686 mm	R
Rungon nivellaakerin ja kardaaninivelen välinen akselinsuuntainen etäisyys	325 mm	$L1$
ylettyvyys	280 mm	$reach$
iskunpituus	230 mm	$stroke$
Rungon ja puomin niveleen kohdistuva puomin säteensuuntainen voima	19 915 N	$F3$
työntävän sylinterin tuottama maksimivoima 2d tasossa	-38 912 N	$F1$
kardaaninivelen ja puomin nivellaakerin välinen lyhyin aksiaalinen etäisyys	437 mm	$L0$

Taulukon 26 arvoja on käytetty puomin osien tilaamisessa. Kuvassa 27 on esitetty tapaustutkimuksessa suunniteltu puomi. Puomi on asennettu kuvassa oikealle piilotettuun vesipumppuun ja takana olevaan ohjaustietokoneeseen. Puomi on kääntymässä sivulle ja puomin juuressa olevat venttiilit laskevat ulos veden ruiskute, joka on kuvassa havaittavissa.



Kuva 27. Tapaustutkimuksessa suunniteltu puomi kokoonpantuna testipenkkiin.

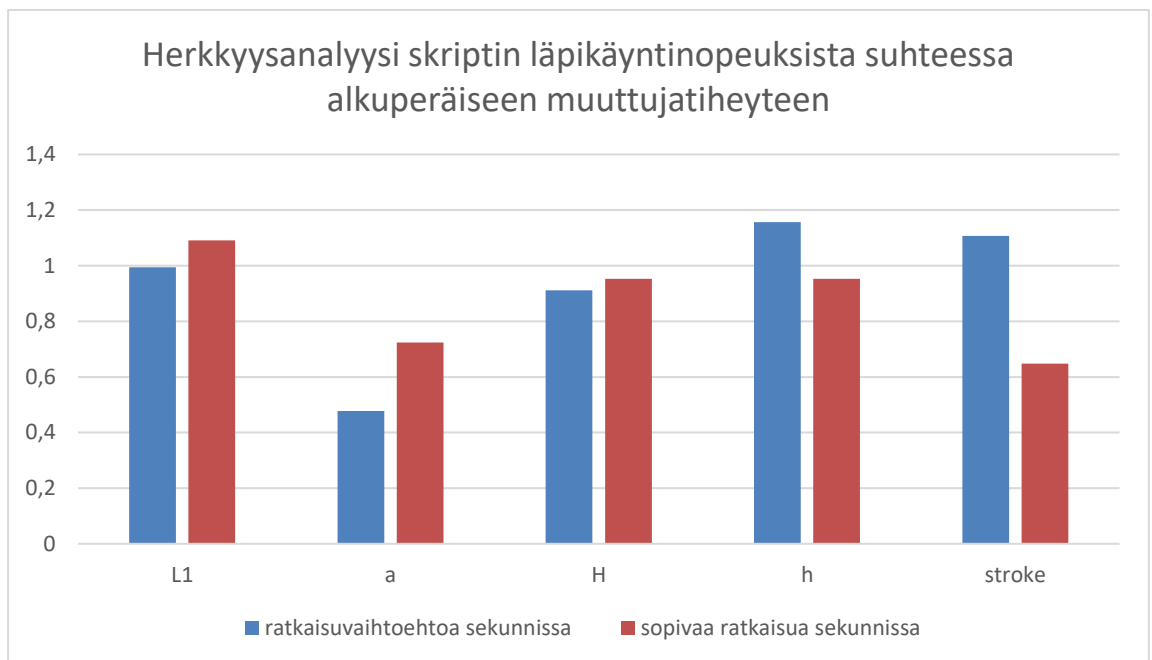
Kokoonpantu fyysinen puomi yllätti pituudella ja kääntymiskulman jyrkkyydellä verrattuna CAD mallin mittoihin. Puomi on osoittautunut kokoonpantavaksi ja ensimmäisten testien perusteella toimivaksi. Puomin testaaminen on tätä työtä palauttaessa vielä kesken.

Puomin alisysteemi on integroitavissa systeemitasolle, mutta rajoituksin. Alisysteemi ei kykene tarkastelemaan erilaisia konseptivaihtoehtoja. Lisäksi alisysteemin takaisinkytkennän vähentämiseksi on tehty oletuksia, jonka takia parametrinen ratkaisijan tulosteet on validoitava erikseen. Integroimisen näkökulmasta ongelmat ovat ratkaistavissa, mutta vaativat aikaa ja työtä. Parametrinen ratkaisijan kehittäminen oli tasapainottelua yleistettävyyden ja nopeuden välillä.

Ratkaisijan taloudellisen käyttö vaatii funktioiden uudelleenkäytettävyyttä. Käytännössä ratkaisija on 2D yksinkertaistus kolmen nivelpisteen sijoittaja tapauksessa, jossa

nivelten välissä on teleskooppi. Uudelleenkäyttö kuitenkin vaatii voimayhtälöiden muokkaamisen uuteen sovellukseen sopivaksi, sillä sylinterien asettaminen kaksipuolisesti on epätyypillinen suunnitteluratkaisu.

Parametrinen ratkaisija on tällä hetkellä suunniteltu tapauskohtaiseksi ja skaalautuvuus on rajoittunutta. Ratkaisijaa on kuitenkin mahdollista monimutkaistaa, sekä laajentaa ja yhdistää muihin osasysteemeihin, kuten rungon lujuuden laskentaan. Nykyinen ratkaisija pystyi käymään läpi keskimäärin noin 1,5 miljoona suunnitteluvaihtoehtoa minuutissa *Intel core i7-10610U* prosessorilla ja 32 GB hajasaantimuistilla, eli *RAM* muistilla. Ohjelma siis kykeni käymään suuren määrän vaihtoehtoja läpi, jonka vuoksi optimointimenetelmille ei ollut tarvetta. Kuvassa 27 on esitetty muuttujaverkon herkkyysanalyysi.



Kuva 28. Herkkyyshanalyysi skriptin läpikäyntinopeuksista suhteessa alkuperäiseen muuttujatiheyteen. Analyysissä on tihennetty yksitellen jokaisen muuttujan tarkastelutiheyttä ja laskettu kuinka paljon muutos vaikuttaa laskentanopeuteen.

Herkkyyshanalyysillä tarkastellaan, kuinka herkkä matemaattinen malli on suhteessa sen muuttujien muutoksille (oxfordreference.com). Kuvan 28 kuvaajassa herkkyyshanalyysi on tehty vertailemalla, kuinka monta ratkaisuvaihtoehtoa ja sopivaa ratkaisua löytyy sekunnissa suhteessa alkuperäiseen muuttujaverkkoon verrattuna muuttujakohtaisesti tihennettyyn muuttujaverkkoon. Kuvan 28 perusteella muuttujien tiheydellä on suuri merkitys skriptin laskentanopeuteen. Esimerkiksi puomin suurimman sallitun kulman tiheämpi tarkastelu johtaa vaihtoehtojen läpikäymisnopeuden ja ratkaisujen löytämisnopeuden hidastumiseen. Tämä voisi johtua esimerkiksi suunnitteluvaihtoehtojen hylkäämisen keskimääräistä myöhäisemmässä vaiheessa algoritmista. Iskunpituuden, eli

stroke muuttujan tihentäminen johtaa vaihtoehtojen nopeampaan läpikäymiseen, mutta hitaampaan ratkaisujen löytämiseen. Tämä voi johtua siitä, että skripti löytää suhteellisesti vähemmän ratkaisuja, mutta hylkää keskimäärin alkuperäistä muuttujaverkkoa aikaisemmin huonot vaihtoehdot.

Herkkyysanalyysin perusteella skriptin laskentanopeus on tilannekohtainen. Läpikäymisnopeuden ollessa 1,5 miljoonaa suunnitteluvaihtoehtoa ja 1100 ratkaisua minuutissa löytävä skripti on kuitenkin niin nopea, ettei laskentanopeuden kaksinkertaistumisella ole suunnitteluun kuluvan ajan kannalta merkitystä. Suunnittelua toteutettiin ennen parametrisen ratkaisijan käyttöönottoa laskentaan tarkoitettulla tietokoneohjelmalla, python ohjelmalla ja CAD ohjelmalla. Laskenta-arvoja siirrettiin aiemmin käsin ohjelmien välillä iteroidessa. Ratkaisun löytämiseen meni montaa ohjelmaa käyttämällä useampi tunti ja suunnittelussa tyydyttiin huonompaan ratkaisuun.

Todellisuudessa suunnittelu ei tapahtunut täysin suunnittelumenetelmän mukaisesti. Syynä tähän on se, ettei kaikki suunnitteluvaihtoehdot ja ongelmat ole heti tiedossa. Konseptisuunnitteluvaiheessa uusien vaihtoehtojen pohtimisen laukaisi usein ongelmien löytyminen aiemmin parhaaksi todetussa ratkaisussa. Lisäksi toimilaitteilla oli keskinäisvaikutuksia, jonka vuoksi konseptisuunnittelu oli iteratiivista. Esimerkiksi keinoitekoisten lihasten vaihtaminen sylintereihin mahdollisti työkalun vertikaalisen liikkeen ohjaussylintereillä ja vähensi suunniteltavien komponenttien määrää. Tapaustutkimuksen perusteella suunnittelussa oli parannettavaa seuraavissa asioissa:

- Työn alussa olisi pitänyt käydä tarkemmin ja systemaattisemmin läpi tunnetut ja tuntemattomat laskelmat ja arviot aiemmasta konseptista.
- Työn alussa olisi pitänyt laajemmin tutkia samankaltaisia laitteita ja niiden ratkaisuja, jotta olisi ollut parempi käsitys siitä, millaisiin ongelmiin suunnittelussa voi törmätä.
- Karkeita laskelmia olisi pitänyt hyödyntää enemmän. Työn alkuvaiheessa aikaa kului liikaa yksityiskohtien suunnitteluun, jotka myöhemmin osoittautuivat turhiksi. Esimerkiksi voimatasapainoyhtälöissä aikaa kului voimakomponenttien ratkaisemiseen, kun olisi voinut olettaa vipuvarren olevan puhtaasti nivelpisteen radiaalinen etäisyys.
- Tavoitteet olisi pitänyt selvittää tarkemmin ja niiden vaikutus suunnittelun osaluoksiin. Esimerkiksi suunnittelun alussa puomin 300 mm iskunpituus oli oletettu tiukaksi rajaksi, kun riittävä porautuma on 200 mm ja siihen lisäksi vara työkalun käynnistämiseksi, johon oli arvioitu reilusti tilaa. Suunnittelussa oman osakoko-

naisuuden kohdalla tuli helposti otettua varmuuskerrointa, jotta omat suunnitelmat toimisivat varmasti. Tämän takia vuorovaikutus eri toimilaitteiden suunnittelijoiden välillä oli tärkeää.

- Suunnittelua olisi pitänyt dokumentoida paremmin, jotta vaihtoehtojen perustelut olisivat paremmin muistissa.
- Ratkaisijaa tehdessä ei olisi pitänyt käyttää aikaa niin paljoa optimoijien tutkimiseen. Ohjelma kykeni laskemaan vaihtoehtoja niin nopeasti, ettei muuttujien läpikäymisjärjestystä ollut tarpeellista miettiä. Optimointia olisi pitänyt tutkia vain, jos ohjelman läpiajoaika olisi ollut pitkä.
- Ohjelmaa koodatessa muuttujille olisi pitänyt käyttää kuvaavampia nimiä ohjelmoimisen selkeyttämiseksi ja uudelleenkäytettävyyden lisäämiseksi.
- Ohjelman funktioiden apufunktioiden käyttöä olisi pitänyt välttää, sillä se muutti ohjelman toiminnan ymmärtämisestä haastavampaa.
- Mikäli aikaa olisi ollut enemmän ja muihin osakokonaisuuksiin olisi myös olemassa parametrinen ratkaisija, olisi tuojien ja viejien avulla voinut lisätä puomin toimivuuden tarkastamista. Esimerkiksi lisätä *FEM* ohjelma tarkastamaan korvakkeiden kestävyys ja tekemään erillisen törmäystarkastelun. Tai luomaan *CAD* malli parametrinen ratkaisijan antamien arvojen perusteella.

Parametrinen ratkaisijan kehitys vei huomattavan määrän aikaa. Yksittäisen toimivan ratkaisuja saa aikaiseksi ilman ratkaisijaa. Suunnittelun aikana tuli muutoksia, joiden takia suunnittelun iteroitavuus olisi ollut hidasta. Lisäksi samankaltaista suunnittelua olisi tullut paljon ja siten turhaan tehtyä työtä. Ratkaisijasta oli myös tilaamisvaiheessa hyötyä, sillä osien mitat muuttuivat alun perin arvioiduista arvoista. Kokonaisuutena parametrinen ratkaisijan käyttö yksittäiselle osakokonaisuudelle oli hyödyllinen. Tapaustutkimus vahvisti Lallan väitettä sille, että parametrisestä ratkaisijasta on hyötyä tilanteissa, jossa on monimutkainen kokonaisuus ja/tai vaatimukset muuttuvat suunnittelun aikana.

6. YHTEENVETO

Tapaustutkimuksen perusteella parametrinen suunnittelu soveltuu koneensuunnitteluun ja koneensuunnittelussa konseptintodistukseen. Parametrinen suunnittelu vähensi konseptitason tarkkojen laskujen tarvetta. Parametrinen ratkaisijan vaatimat yksinkertaistukset hankaloittivat ominaisuuksien algoritmista validointia ja siten heikensi puomin osasysteemin suunnittelun integroitavuutta robotin kokonaissuunnitteluun. Suunnittelu erillisenä kokonaisuutena kuitenkin onnistu, kun tavoitteet ja vaatimukset oli selkeästi tiedossa. Tapaustutkimus oli luonteeltaan monimutkainen ja vaatimukset muuttuivat suunnittelun aikana. Parametrinen ratkaisijan kehitykseen kului runsaasti aikaa, mutta lyhensi suunnittelu-aikaa projektin loppuvaiheessa.

Suunnittelun alussa ratkaisuvaihtoehtoja oli paljon ja oli haastavaa hahmottaa intuitiivisesti mitä vaihtoehtoja oli kannattavaa tutkia tarkemmin. Konseptin valitsemisen jälkeen suunnitteluparametrejä oli suuri määrä, jotka vaikuttivat toisiinsa. Tapaustutkimuksessa epälineaarisuutta pystyi välttämään ylimitoituksella ja yksinkertaistamisella. Parametrinen ongelman ratkaiseminen lineaarisesti viidellä muuttujalla ja 23 parametrilla onnistui nopeasti python skriptillä käyttäen *for*-silmukkaa muuttujien läpikäymisessä. Muut suunnittelussa käytetyt yksinkertaistukset olivat kriittisten pisteiden tarkastelu, python kirjastosta löytyneet valmiit ratkaisumenetelmät, lista tietorakenteiden käyttö uudelleenlaskemisen välttämiseksi.

Python skriptin käyttö ja epälineaarisuuden välttäminen yksinkertaistuksilla teki ratkaisujen etsimisestä nopeaa. Työssä käytetyt yksinkertaistukset mahdollistavat useamman muuttujan käyttämisen tiheämmällä välillä. Skriptin laskentanopeuden puolesta ratkaisija olisi voinut olla monimutkaisempi, mutta se olisi tehnyt ratkaisijan suunnittelusta ja ohjelmoinnista työläämpää. Tässä tapaustutkimuksessa yksinkertaistusten voimakas käyttö oli tarkoituksenmukaista ja vähensi suunnitteluun käytettyä työtä.

Tutkimuksen perusteella parametrinen suunnittelun hyödyntämisen esivaatimukset riippuvat suunnittelun kohteesta ja tavoitteista. Parametrinen suunnittelu vaatii konseptin, jonka ominaisuuksia on mahdollista kuvata, muokata ja arvioida numeraalisesti. Yksinkertaistukset rajoittavat ratkaisuja, mutta nopeuttaa suunnitteluprosessia. Puomin suunnittelussa puomin kääntyvyys oli herkästi muuttuja toimintaominaisuus, jonka takia tarpeeksi hyvän ratkaisun löytäminen ilman algoritmista läpikäyntiä oli hidasta. Konseptintodistuksen takia valmistettävien osien määrä oli vähäinen ja siksi ylimitoituksen hyödyntäminen oli mahdollista.

Parametrisen ratkaisijan vahvuutena on suunnittelun muutettavuus ja suunnittelu- vaihtoehtojen nopea läpikäyminen. Menetelmän heikkoutena on mallin tekemiseen vaadittava työmäärä ja mallintaessa tehdyt yksinkertaistukset. Tapaustutkimuksessa suunnittelu oli kokonaisvaltaista, jonka takia huomioon otettavia asioita oli paljon. Uusia ideoita syntyi suunnittelussa ongelmien konkretisoituessa, jonka takia suunnittelu ei onnistunut ideaalisti. Tapaustutkimus vahvisti yleisten suunnitteluperiaatteiden toimivuuden ja osoitti suunnittelumenetelmällä olevan keskenään yhtäläisyyksiä. Tapaustutkimuksen konseptintodistaminen asetti parametriselle suunnittelulle poikkeavia vaatimuksia, sillä menetelmä soveltuu tilanteisiin, jossa tunnetaan konsepti.

LÄHTEET

- [1] Bouma, W., Fudos, I., Hoffmann, C., Cai, J. & Paige, R. (1995). Geometric constraint solver, *Computer-Aided Design*, Vol. 27(6), s. 487-501.
- [2] Dépincé Philippe, Guédas Benoît, Picard Jérôme. (2007). Multidisciplinary and multiobjective optimization: Comparison of several methods. HAL Open science.
- [3] Friman, Eetu. (2020). Building and Adapting SysML Based System Architecture Framework for Mechatronic Systems. Diplomityö. Tampereen yliopisto.
- [4] Hoffmann, C.M. & Joan-Arinyo, R. (2005). A brief on constraint solving, *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 2(5), s. 655-663.
- [5] Korneeva, Elena et al. "Operational Characteristics of Limestone and Methods to Increase Its Strength." *E3S Web of Conferences* 91 (2019).
- [6] Jalkanen, J. (2007). Tubular truss optimization using heuristic algorithms, Tampere University of Technology.
- [7] Jodei, Jahangir, Masoud Ebrahimi, and Jafar Roshanian. (2009) Multidisciplinary Design Optimization of a Small Solid Propellant Launch Vehicle Using System Sensitivity Analysis. *Structural and multidisciplinary optimization* 38.1, s. 93–100.
- [8] Lalla, Alex. (2018). Kantavien rakenteiden parametrinen suunnittelu ja mallintaminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- [9] Lamberti, L. (2008), An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures, *Computers and Structures*, vol. 86, no. 19, s. 1936-1953.
- [10] Lamm, J. G. & Weilkens T. (2010). "Funktionale Architekturen in SysML," in Gesellschaft für Systems Engineering“, München.
- [11] Mela, K. (2013). Mixed Variable Formulations for Truss Topology Optimization. (Tampere University of Technology. Publication; No. 1134). Tampere: Tampere University of Technology.
- [12] Montgomery, Paul R. (2013) "Model-Based System Integration (MBSI) – Key Attributes of MBSE from the System Integrator’s Perspective." *Procedia computer science* 16, s. 313–322.
- [13] Mylläri, Aino-Maija. (2012) Concept Development of a Front Frame for Production Drill Rigs.
- [14] Myung, S. & Han, S. (2001). Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method, *Expert Systems with Applications*, Vol. 21(2), s. 99-107.
- [15] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*. 3rd edition. London.

- [16] R. J. Bailing, J. Sobieszczanski-Sobieski. (1994) OPTIMIZATION OF COUPLED SYSTEMS: ACRITICAL OVERVIEW OF APPROACHES. ICASE Report No. 94-100.
- [17] Ulrich, K. T. & Eppinger, S. D. (2008). Product Design and Development. 4th edition. The McGraw-Hill Companies. Singapore.
- [18] Vesa Tynys (2014). TULEVAISUUDEN TYÖKONEPUOMIN GLOBAALI OPTIMOINTI – ESISELVITYS, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- [19] Vougt, D. (2016). A review of rock cutting for underground mining: past, present, and future. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- [20] Yang, Yang, Guowei Li, Aihui Yuang. (2017). Performance Analysis of a Hybrid Power Cutting System for Roadheader. Mathematical Problems in Engineering.
- [21] Yi, S.I., Shin, J.K. & Park, G.J. (2008). Comparison of MDO methods with mathematical examples. *Struct Multidisc Optim* 35, s. 391–402.
- [22] ISO 604-1, Plastics — Determination of compressive properties.
- [23] Aikolon. Muovimateriaalien hintaluokitus. Saatavilla (viitattu 23.5.2023) <https://www.aikolon.fi/tuotteet>.
- [24] Etra. Muovien aineominaisuudet. Saatavilla (viitattu 23.5.2023). <https://www.etra.fi/fi/tekniset-muovit-e540/koneenrakennusmuovit-e5401>.
- [25] Euroopan komissio. rahoitussopimus. Saatavilla (viitattu 23.5.2023). <https://cordis.europa.eu/project/id/820971>.
- [26] India local shop. kuva nivellaakerista. Saatavilla (viitattu 23.5.2023). [PHS 30 Right, Bore 30mm, Female Left Hand Metric Threaded Rod End Joint Bearing : People at Right Place \(indialocalshop.com\)](https://indialocalshop.com).
- [27] NORTH HEAVY GRYPES EQUIPMENT AND ENGINEERING CO.,LTD. Tuotetiedot roadheader-tyyppisestä louhijasta. Saatavilla (viitattu 23.5.2023). <https://www.nhgtunnel.com/mining-roadheader/58310912.html>.
- [28] Oxford Reference, Sanakirja. Saatavilla (viitattu 20.6.2023). <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/oi/authority.20110803100454863;jsessionid=7B912FCDD5B36E07F0CAE3A5863A75E1>
- [29] Robominers, tietoa projektista. Saatavilla (viitattu 23.5.2023). <https://robominers.eu/>.
- [30] Wikipedia. Kuva kardaanimivelestä. Saatavilla (viitattu 23.5.2023). https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_joint.

LIITE A: PARAMETRISEN RATKAISIJAN PYTHON SKRIPTI

```

import numpy as np
import time

"""
Calculates distance between Hull-Boom joint and Cylinder-Boom joint
along booms length
Parameters: gamma = max angle of the cylinder joints
           alfa = max angle of the boom
           L1 = length between Hull-Cylinder and Hull_boom joints
Returns: distance between Hull-Boom joint and Cylinder-Boom joint
"""
def L00_calc(gamma, alfa, L1):
    L00 = -L1 * np.tan(gamma) / (np.cos(alfa)*np.tan(gamma) -
np.sin(alfa))
    return L00

def L0_calc(CDl, stroke, H, h, L1):
    Smax = CDl + 2*stroke
    a = H - h
    return np.sqrt(Smax**2 - a**2) - L1

"""
Calculates hydraulic cylinder joints length and height
Parameters: L1 = length between Hull-Cylinder and Hull-Boom joints
           alfa = max angle of the boom
           L00 = Hull-Boom and cylinder-Boom distance
           H = height between Hull-Cylinder and Hull_boom joints
           h = thickness of the boom at the Cylinder-Bom joint
Returns: Xl = length of the extended cylinder in global coordinates
        Yl = Height ...
        Xp = length of the contracted cylinder in global coordinates
        Yp = height ...
"""
def cylinder_components_len(L1, alfa, L00, H, h):
    Xl = L1 + np.cos(alfa) * L00 - np.sin(alfa) * h
    Yl = np.sin(alfa) * L00 + np.cos(alfa) * h - H

    Xp = L1 + np.cos(alfa) * L00 + np.sin(alfa) * h
    Yp = np.sin(alfa) * L00 + H - np.cos(alfa) * h

    return Xl, Yl, Xp, Yp

"""
Checks if the Hull-Boom and cylinder-Boom distance is limited by the
extended cylinder within 1 mm range
Parameters: L1 = length between Hull-Cylinder and Hull-Boom joints
           alfa = max angle of the boom
           L00 = Hull-Boom and cylinder-Boom distance
           H = height between Hull-Cylinder and Hull_boom joints
           h = thickness of the boom at the Cylinder-Bom joint
           stoke = stroke of the hydraulic cylinder
           CDL = Cylinder death length
Returns: bool if the Hull-Boom and cylinder-Boom distance is limited
by the extended cylinder within 1 mm range

```



```

#41_500, 61_600, 0.04, 0.07

i = 0
while Fin_list[i] < Fc2:
    i += 1
    if i == 4:
        check = False
        continue
    D_cyl = D_list[i]
    d_cyl = d_list[i]
    Fout = Fout_list[i]
    Fin = Fin_list[i]

    t = D_cyl / 2 + 0.01
    return t, D_cyl, d_cyl, Fout, Fin, check

"""
transforms booms length, width and angle into global cartesian coordi-
nates
Parameters: a = length from Hull-Boom joint to critical point along
boom
            b = height of the critical from the middle axis of the
boom
            alfa = the maximum angle of the boom
Returns: critical points cartesian coordinates
"""
def cordinants(a, b, alfa):
    x = a * np.cos(alfa) - b * np.sin(alfa)
    y = a * np.sin(alfa) + b * np.cos(alfa)
    return x, y

"""
calculates distance between cylinder wall and boom-hull joint when
turning
Parameters: L1 = length before boom-hull joint
            L2 = length after boom-hull joint
            beta = angle of the extended cylinder
            t = thickness of the cylinder
Returns: the distance to centre axis from critical point
"""
def flange_check(L1, L2, beta, t):
    x = L1 + L2
    S = (x + t * np.sin(beta))
    y_new = S * np.tan(beta)
    return y_new # the y space from t to centre axis at x = L1+L2

"""
calculates turning radius with 2 points and tangential for vertical
direction at the horizontally lower point
Parameters: horizontal and vertical distance between two points
Returns: turning radius
"""
def circle_fit(x, y):
    R = (x ** 2 + y ** 2) / (2 * y)
    return R

"""
includes sub functions that checks collisions
Parameters: L1 = length between Hull-Cylinder joint and Hull-Boom
joint

```

```

        H1 = height ...
        L2 - L6 = length critical points from Hull-Boom joint
        H2 - H6 = height ...
        t = radius of the hydraulic cylinder
        gamma = angle of the hydraulic cylinder
        alfa = angle of the boom
        Hd = robominers legs max radius
Returns: Bool if no collision, turning radius
"""
def turning_check(H1, L1, H2, L2, H3, L3, H4, L4, H5, L5, H6, L6, t,
gamma, alfa, Hd):
    Cx, Cy = cordinants(L3, -H3, alfa)

    flange1 = flange_check(L1, L2, gamma, t)
    flange2 = flange_check(L1, Cx, gamma, t)
    space1 = (-H2 + H1 - flange1)
    space2 = (Cy + H1 - flange2)

    #checks is cylinder wall does not hit boom.hull joint when turning
    if (space1 <= 0):
        return False, 1
    elif (space2 <= 0):
        return False, 1

    Dx2, Dy2 = cordinants(L4, H4 + 0.035, alfa)
    Ex, Ey = cordinants(L5, H5, alfa)
    Fx, Fy = cordinants(L6, H6, alfa)

    #Removes dungeon walls radius from cartesian coordinates
    Dy2 -= Hd
    Ey -= Hd
    Fy -= Hd

    Dr = circle_fit(Dx2, Dy2)
    Er = circle_fit(Ex, Ey)
    Fr = circle_fit(Fx, Fy)

    #checks if tools head turning radius is lower than critical points
turning radius
    if (Dr > 0 and Fr > Dr):
        return False, 1
    elif (Er > 0 and Fr > Er):
        return False, 1
    else:
        return True, Fr
"""
Calculates tools furthest angle reach at booms maximum angle
Parameters: L = length of the boom from Hull-Boom joint when max angle
reached
        alfa = max angle of the boom
Returns: reach
"""
def reatch_calc(L, alfa):
    max_mining_radius = 0.47
    mid_leng_of_leg = 0.00
    h_tool = 0.08 #tools spikes max radius
    return np.sin(alfa)*L + np.cos(alfa)*h_tool - max_mining_radius +
mid_leng_of_leg

def design_value(L, alfa, stroke, d, F2_3d, L1):

```

```

    reach_value = reach_calc(L, alfa) / 0.2 * 1
    L_value = 1.4 / L * 1.2
    stroke_value = 0.27 / stroke * 0.6
    D_value = (0.08 / d) * 5
    F_value = (F2_3d / 50_000) * 0.5
    L1_value = (0.30 / L1) * 2
    return reach_value * stroke_value * D_value * F_value * L_value *
L1_value

def print_parameters(parameter_set_list):
    num_of_solution = 0
    for set in sorted(parameter_set_list):
        num_of_solution = num_of_solution + 1
        print("{:0.4f} points".format(set[0]), "{:0.2f} alfa".for-
mat(set[1]), "{:0.3f} H".format(set[2]), "{:0.3f} h".format(set[3]),
        "{:0.3f} L00".format(set[4]), "{:0.0f} F".for-
mat(set[5]), "{:0.2f} d".format(set[6]), "{:0.2f} D".format(set[7]),
        "{:0.3f} L".format(set[8]), "{:0.3f} R".format(set[9]),
        "{:0.3f} L1".format(set[10]),
        "{:0.3f} reach".format(set[11]), "{:0.3f} stroke".for-
mat(set[12]), "{:0.3f} F3".format(set[13]),
        "{:0.3f} F1".format(set[14]), "{:0.3f} F2".for-
mat(set[15]), "{:0.3f} L0".format(set[16]))
        print(num_of_solution)

def main():

    st = time.time()
    CD1 = 0.300

    UJ1 = 0.04
    D1 = 0.01
    IB1 = 0.100 # in between, te laskuri
    P1 = 0.05 # piping length
    T11 = 0.318 # tool length 1, motor back to outer cover end end
    T12 = 0.506 # tool length 2, outer cover end to tool end

    parameter_set_list = []
    alfa_0 = 0.0

    for L1 in range(300, 390, 5):
        L1 = L1 * 1 / 1000
        for a in range(32, 34, 1):
            gamma = 17 * 3.14 / 180
            alfa = a * 3.14 / 180
            L00 = L00_calc(gamma, alfa, L1)
            for H in range(210, 270, 1):
                H = H / 1000
                for h in range(175, 250, 2):
                    h = h / 1000
                    for stroke in range(230, 273, 50):
                        stroke = stroke / 1000
                        if length_calc(L1, alfa, L00, H, h, stroke,
CD1) == False:
                            continue
                            L0 = L0_calc(CD1, stroke, H, h, L1) #C-B con-
nector len when zero angle
                            L = UJ1 + D1 + IB1 + P1 + T11 + T12 + stroke
                            F1, F2, F3 = linear_solution(alfa_0, L0, h, L,
H, L1)

```

```

F2_3d = side_way_force(F2, alfa, L0, L1)
t, d, D, F_out, F_in, check = cylinder_se-
lector(F2_3d)

    if check is False:
        continue
    ICt = 0.120 # inner cover thicness
    OCT = 0.160 # outer cover thicness

    Hd = 0.450 - 0.035 # dungeon wall

    # coodrдинant1, hull connection
    H1 = H
    L1 = L1

    # coodrдинant2, root circle
    L2 = -UJ1
    H2 = ICt

    # coodrдинant3, end of outer rectange
    L3 = L00 - UJ1 - D1
    H3 = OCT

    # coodrдинant4, boom connection
    L4 = L00
    H4 = h

    # coodrдинant5, rectangle further edge
    L5 = UJ1 + D1 + stroke + IB1 + P1 + T11
    H5 = OCT / 2

    # coodrдинant6, tool back
    L6 = UJ1 + D1 + stroke + IB1 + P1 + T11 + T12
    H6 = OCT / 2

    check2, R = turning_check(H1, L1, H2, L2, H3,
L3, H4, L4, H5, L5, H6, L6, t, gamma, alfa, Hd)
    if check2 is False:
        continue

    design_value_parameter = design_value(L, alfa,
stroke, d, F2_3d, L1)
    parameter_list = [design_value_parameter, alfa
* 180/3.14, H, h, L00, F2_3d, D, d, L, R, L1,
reatch_calc(L, alfa),
stroke, F3, F1, F2, L0]
    parameter_set_list.append(parameter_list)

    et = time.time()
    ellapse_time = et - st
    print_parameters(parameter_set_list)
    print("run in", ellapse_time, "seconds")

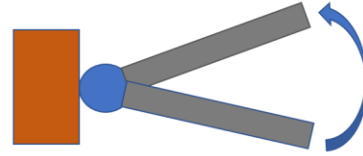
main()

```

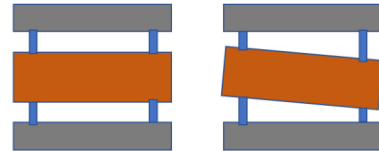
LIITE B: KÄÄNTYMISEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Turning mechanisms

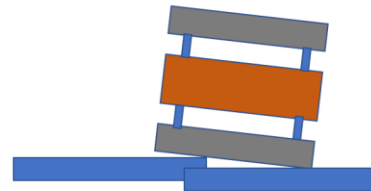
1. Booms angle (about 17 degree)



2. Hull-screw cylinders

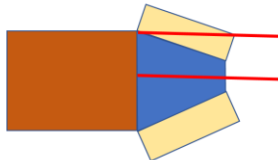


3. Turning from the steps

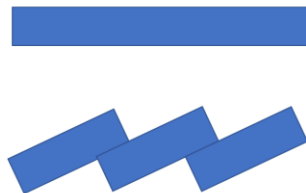


The shape of the tool and slice

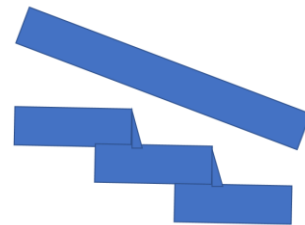
1. The shape of the tool
-Booms angle and the tools cutting corners are parallel



2. The idealised vs true shape of the slices while going straight forward



3. The idealised vs true shape of the slices while going downhill



Kääntyminen

- Kääntyminen hankalaa
 - Tunneli rajoittaa puomin tilavuutta
 - Työkalu ei ole tasaisen muotoinen, aiheuttaa pienen kynnyksen
 - Työkalu louhii 200mm palasen kerralla, matka jolloin kääntyminen tapahtuu
 - Kääntyminen tulee rungon kääntymisestä
 - 5 osainen kääntymisstrategia
 - Todellisuudessa ei osata
 - Vaikuttaa nivelen kiinnityspisteeseen, jolla on suuri vaikutus työkalun voimaan
 - Puomin pituus aiheuttaa kääntävyyteen ongelmia ja lisää voimantarvetta, mutta lisää ulottuvuutta
 - Kääntävyyttä rajoittaa nivellaakerit, periaatteessa mahdollista hankkia paremmat, jolloin kääntyisi jyrkemmin. Toisena ottaa kiinni nivellaakerin reuna seinään

Five phases:

- Preperation
 - Straight forward
 - Greater diameter upwards
- Stepping
 - Enlarging steps downwards
 - Step size increases incrementally
 - Steps are vertical
- Transitioning
 - Starts when the hull begins to turn
 - New step size is from booms increased angle + turning hull > previous step
- Full turning
 - Usage of full angle of the boom and the hull
- Counter steering
 - Mining straight forward
 - Countering hull turning with the boom

LIITE C: PYTHON skriptin läpiajonopeudet ja TArkatarkasteluavaruudet

runtime function		tehty import runtimen time-time() funktiolla					
muuttujat min	max	väli	määrä				
L1	190	340	5	9		määrä/aika	32266,48
a	29	35	1	5		solution/aika	20
H	236	242	2	3		määrä/solution	1677,857
h	190	250	2	29			
stroke	250	274	10	3			
				11745			
solution	7						
runtime	0,35	0,38	0,41	0,35	0,33	0,364	
muuttujat min	max	väli	määrä				
L1	190	340	2	24		määrä/aika	32090,16
a	29	35	1	5		solution/aika	21,81818
H	236	242	2	3		määrä/solution	1305
h	190	250	2	29			
stroke	250	274	10	3			
				31320			
solution	24						
runtime	0,9	0,91	0,88	1,1	1,09	0,976	
muuttujat min	max	väli	määrä				
L1	190	340	5	9		määrä/aika	15403,28
a	29	35	1	5		solution/aika	14,47368
H	236	242	2	3		määrä/solution	1067,727
h	190	250	2	29			
stroke	250	274	10	3			
				11745			
solution	11						
runtime	0,82	0,75	0,76	0,76	0,78	0,7625	
muuttujat min	max	väli	määrä				
L1	190	340	5	9		määrä/aika	29391,89
a	29	35	1	5		solution/aika	19,04762
H	236	242	1	5		määrä/solution	1631,25
h	190	250	2	29			
stroke	250	274	10	3			
				19575			
solution	12						
runtime	0,65	0,68	0,66	0,63	0,71	0,666	

muuttujat min	max	väli	määrä				
L1	190	340	5	9		määrä/aika	37335,94
a	29	35	1	5		solution/aika	19,04762
H	236	242	1	3		määrä/solution	1991,25
h	190	250	1	59			
stroke	250	274	10	3			
				23895			
solution	12						
runtime	0,65	0,64	0,66	0,63	0,62	0,64	
muuttujat min	max	väli	määrä				
L1	190	340	5	9		määrä/aika	35720,8
a	29	35	1	5		solution/aika	12,96296
H	236	242	2	3		määrä/solution	2796,429
h	190	250	2	29			
stroke	250	274	5	5			
				19575			
solution	7						
runtime	0,55	0,55	0,55	0,54	0,55	0,548	
muuttujat min	max	väli	määrä				
L1	190	340	5	9		määrä/aika	21256,91
a	29	35	1	5		solution/aika	14,28571
H	236	242	1	3		määrä/solution	1539
h	190	250	3	19			
stroke	250	274	10	3			
				7695			
solution	5						
runtime	0,37	0,36	0,37	0,35	0,36	0,362	

muuttujat min	max	väli	määrä						
L1	190	340	1	49		määrä/aika	23965,47		
a	29	35	1	5		solution/aika	18,38147		
H	236	242	1	5		määrä/solution	1303,784		
h	190	250	1	59					
stroke	250	274	1	23					
				1662325					
solution	1275								
runtime	56,45	63,63	88,01	69,36333		ensimmäiset 3 läpiajoa			
muuttujat min	max	väli	määrä						
L1	190	340	2	24		määrä/aika	31192,52		
a	29	35	1	5		solution/aika	25,25331		
H	236	242	1	5		määrä/solution	1235,185		
h	190	250	2	29					
stroke	250	274	1	23					
				400200					
solution	324								
runtime	12,87	12,86	12,76	12,83		ensimmäiset 3 läpiajoa			
muuttujat min	max	väli	määrä						
L1	190	340	1	49		määrä/aika	30529,64		
a	29	35	1	5		solution/aika	24,47378		
H	236	242	1	5		määrä/solution	1247,443		
h	190	250	2	29					
stroke	250	274	1	23					
				817075					
solution	655								
runtime	25,94	26,12	28,23	26,76333		ensimmäiset 3 läpiajoa			
muuttujat min	max	väli	määrä						
L1	190	340	1	49		määrä/aika	27605,03		
a	29	35	1	5		solution/aika	23,26389		
H	236	242	1	5		määrä/solution	1186,604		
h	190	250	1	59					
stroke	250	274	2	11					
				795025					
solution	670								
runtime	32,8	26,61	26,99	28,8	print	ensimmäiset 3 läpiajoa			
	26,31	28,11	27,01	27,14333	ennen print				

LIITE D: AINEOMINAISUUDET LIUKUPALOILLE

POM-C	Yksiköt	Arvo	Testausmenetelmä
OMINAISUUDET			
Tiheys	g/cm ³	1,41	ISO 1183-1
Veden imeytyminen: 24/96 tunnin 23°C -asteiseen veteen upotuksen jälkeen	mg %	20 / 37 0,24 / 0,45	ISO 62 ISO 62
Vedenimeytyminen ilmassa 23°C / 50% RH	%	0,2	
Vedenimeytyminen vedessä 23°C	%	0,8	
LÄMPÖOMINAISUUDET			
Sulamislämpötila	°C	165	ISO 11357-1/-3
Lämmönjohtavuus 23°C -asteessa	W/(K.m)	0,31	
Lämpölaajenemiskerroin:			
Keskimääräinen arvo 23 ja 60°C -asteen välillä	m/(m.K)	110 x 10 ⁻⁶	
Keskimääräinen arvo 23 ja 100°C -asteen välillä	m/(m.K)	125 x 10 ⁻⁶	
Suurin sallittu käyttölämpötila ilmassa: Lyhyillä aikajaksoilla (=muutama tunti jolloin materiaaliin kohdistuu kuormaa erittäin vähän tai ei ollenkaan)	°C	140	
Jatkuvasti: 5000/20000 h	°C	115 / 100	
Minimi käyttölämpötila	°C	-50	
Paloluokitus UL 94 (3/6mm paksuus)		HB/HB	
MEKAANISET OMINAISUUDET LÄMPÖTILASSA 23 °C			
Vetomyötölujuus/ vetomurtolujuus:			
Kuiva koekappale	MPa	66/-	ISO 527-1/-2
Koekappale tasapainossa standardi-ilmakehän 23°C/50% RH kanssa	MPa	66/-	ISO 527-1/-2
Vetolujuus (kuiva koekappale)	MPa	66	ISO 527-1/-2
Murtovenymä (kuiva koekappale)	%	20	ISO 527-1/-2
Murtovenymä (23°C / 50% RH)	%	50	ISO 527-1/-2
Kimmomoduuli (kuiva koekappale)	MPa	2800	ISO 527-1/-2
Kimmomoduuli (23°C / 50% RH)	MPa	2800	ISO 527-1/-2
Puristuslujuus 1 / 2 / 5 % muodonmuutokset (kuiva koekappale)	MPa	23 / 40 / 72	ISO 604
Iskulujuus - Charpy (kuiva koekappale)	kJ/m ²	ei murru	ISO 179-1/1eU
Lovi-iskulujuus - Charpy (kuiva koekappale)	kJ/m ²	8	ISO 179-1/1eA
Rockwell kovuus (kuiva koekappale)		M 84	ISO 2039-2

Etra. <https://www.etra.fi/fi/tekniset-muovit-e540/koneenrakennusmuovit-e5401/polyasetali-pom-c-e540109/levyt-pom-c-e54010905>

PE 1000 (PE-UHMW)	Yksiköt	Arvo	Testausmenetelmä
OMINAISUUDET			
Tiheys	g/cm ³	0,93	ISO 1183-1
Molekyylipaino (keskiarvo)	10 ⁶ g/mol	5	
Vedenimeytyminen vedessä 23°C	%	<0,1	
LÄMPÖOMINAISUUDET			
Sulamislämpötila	°C	135	ISO 11357-1/-3
Lämmönjohtavuus 23°C -asteessa	W/(K.m)	0,4	
Lämpölaajenemiskerroin:			
Keskimääräinen arvo 23 ja 100°C -asteen välillä	m/(m.K)	200 x 10 ⁻⁶	
Suurin sallittu käyttölämpötila ilmassa: Lyhyillä aikajaksoilla (=muutama tunti jolloin materiaaliin kohdistuu kuormaa erittäin vähän tai ei ollenkaan)	°C	120	
Jatkuvasti: 20000 h	°C	80	
Minimi käyttölämpötila	°C	-200	
Paloluokitus UL 94 (6mm paksuus)		HB	
MEKAANISET OMINAISUUDET LÄMPÖTILASSA 23 °C			
Vetomyötölujuus	MPa	19	ISO 527-1/-2
Myötövenymä	%	15	ISO 527-1/-2
Murtovenymä	%	>50	ISO 527-1/-2
Kimmomoduuli	MPa	750	ISO 527-1/-2
Puristuslujuus 1 / 2 / 5 % muodonmuutokset (kuiva koekappale)	MPa	6,5 / 10,5 / 17	ISO 604
Iskulujuus - Charpy	kJ/m ²	ei murru	ISO 179-1/1eU
Lovi-iskulujuus - Charpy	kJ/m ²	115P	ISO 179-1/1eA
Shore kovuus D		60	ISO 2039-2

Etra. <https://www.etra.fi/fi/levyt-pe-1000-pe-uhmw-e54013520>

Ketron® 1000 PEEK



Ketron 1000 PEEK stock shapes are produced from virgin polyetheretherketone resin and offer the highest toughness and impact strength of all Ketron PEEK grades. Both Ketron 1000 PEEK natural & black can be sterilised by all conventional sterilisation methods (steam, dry heat, ethylene oxide and gamma irradiation).

Physical properties (indicative values ¹⁾)

PROPERTIES	Test methods	Units	VALUES
Colour	-	-	natural (brownish grey) / black
Density	ISO 1183-1	g/cm ³	1.31
Water absorption:			
- after 24/96 h immersion in water of 23 °C (1)	ISO 62	mg	5 / 10
- at saturation in air of 23 °C / 50 % RH	ISO 62	%	0.06 / 0.12
- at saturation in water of 23 °C	-	%	0.20
- at saturation in water of 150 °C	-	%	0.45
Thermal Properties (2)			
Melting temperature (DSC, 10 °C/min)	ISO 11357-1/-3	°C	340
Glass transition temperature (DSC, 20 °C/min) - (3)	ISO 11357-1/-2	°C	-
Thermal conductivity at 23 °C	-	W/(K.m)	0.25
Coefficient of linear thermal expansion:			
- average value between 23 and 100 °C	-	m/(m.K)	50 x 10 ⁻⁶
- average value between 23 and 150 °C	-	m/(m.K)	55 x 10 ⁻⁶
- average value above 150 °C	-	m/(m.K)	130 x 10 ⁻⁶
Temperature of deflection under load:			
- method A: 1.8 MPa	ISO 75-1/-2	°C	160
Max. allowable service temperature in air:			
- for short periods (4)	-	°C	310
- continuously : for min. 20,000 h (5)	-	°C	250
Min. service temperature (6)	-	°C	-50
Flammability (7):			
- "Oxygen Index"	ISO 4589-1/-2	%	35
- according to UL 94 (1.5 / 3 mm thickness)	-	-	V-0 / V-0
Mechanical Properties at 23 °C (8)			
Tension test (9):			
- tensile stress at yield / tensile stress at break (10)	ISO 527-1/-2	MPa	115 / -
- tensile strength (10)	ISO 527-1/-2	MPa	115
- tensile strain at yield (10)	ISO 527-1/-2	%	5
- tensile strain at break (10)	ISO 527-1/-2	%	17
- tensile modulus of elasticity (11)	ISO 527-1/-2	MPa	4300
Compression test (12):			
- compressive stress at 1 / 2 / 5 % nominal strain (11)	ISO 604	MPa	38 / 75 / 140
Charpy impact strength - unnotched (13)	ISO 179-1/1eU	kJ/m ²	no break
Charpy impact strength - notched	ISO 179-1/1eA	kJ/m ²	3.5
Ball indentation hardness (14)	ISO 2039-1	N/mm ²	210
Rockwell hardness (14)	ISO 2039-2	-	M 105
Electrical Properties at 23 °C			
Electric strength (15)	IEC 60243-1	kV/mm	24
Volume resistivity	IEC 60093	Ohm.cm	> 10 ¹⁴
Surface resistivity	ANSI/ESD STM 11.11	Ohm/sq.	> 10 ¹³
Relative permittivity ϵ_r :- at 100 Hz	IEC 60250	-	3.2
- at 1 MHz	IEC 60250	-	3.2
Dielectric dissipation factor tan δ :- at 100 Hz	IEC 60250	-	0.001
- at 1 MHz	IEC 60250	-	0.002
Comparative tracking index (CTI)	IEC 60112	-	150

Note: 1 g/cm³ = 1,000 kg/m³; 1 MPa = 1 N/mm²; 1 kV/mm = 1 MV/m.

Legend:

- (1) According to method 1 of ISO 62 and done on discs Ø 50 mm x 3 mm.
 - (2) The figures given for these properties are for the most part derived from raw material supplier data and other publications.
 - (3) Values for this property are only given here for amorphous materials and for materials that do not show a melting temperature (PBI & PI).
 - (4) Only for short time exposure (a few hours) in applications where no or only a very low load is applied to the material.
 - (5) Temperature resistance over a period of min. 20,000 hours. After this period of time, there is a decrease in tensile strength – measured at 23 °C – of about 50 % as compared with the original value.
The temperature value given here is thus based on the thermal-oxidative degradation which takes place and causes a reduction in properties. Note, however, that the maximum allowable service temperature depends in many cases essentially on the duration and the magnitude of the mechanical stresses to which the material is subjected.
 - (6) Impact strength decreasing with decreasing temperature, the minimum allowable service temperature is practically mainly determined by the extent to which the material is subjected to impact. The value given here is based on unfavourable impact conditions and may consequently not be considered as being the absolute practical limit.
 - (7) These estimated ratings, derived from raw material supplier data and other publications, are not intended to reflect hazards presented by the material under actual fire conditions. There is no UL File Number available for Ketron 1000 PEEK stock shapes.
 - (8) Most of the figures given for the mechanical properties are average values of tests run on test specimens machined out of rod Ø 40 - 60 mm. Except for the hardness tests, the test specimens were then taken from an area mid between centre and outside diameter, with their length in longitudinal direction (parallel to the extrusion direction).
 - (9) Test specimens: Type 1 B
 - (10) Test speed: 50 mm/min [chosen acc. to ISO 10350-1 as a function of the ductile behaviour of the material (tough or brittle)]
 - (11) Test speed: 1 mm/min.
 - (12) Test specimens: cylinders Ø 8 mm x 16 mm
 - (13) Pendulum used: 4 J.
 - (14) Measured on 10 mm thick test specimens (discs), mid between centre and outside diameter.
 - (15) Electrode configuration: Ø 25 mm / Ø 75 mm coaxial cylinders ; in transformer oil according to IEC 60296 ; 1 mm thick test specimens. Please note that the electric strength of Ketron PEEK-1000 black can be somewhat lower than the figure listed in the table which refers to natural material.
- This table, mainly to be used for comparison purposes, is a valuable help in the choice of a material. The data listed here fall within the normal range of product properties. However, they are not guaranteed and they should not be used to establish material specification limits nor used alone as the basis of design.

Etra. <https://www.etra.fi/fi/tekniset-muovit-e540/koneenrakennusmuovit-e5401/erikoismuovit-pps-peek-psu-pef-pai-pbi-e540160/levyt-ketron-peek-1000-e54016025>