



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma
BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

VOIMAHARJOITTELUUN TARKOITETUN KÖYDENVETOLAITTEEN TOIMINNALLISEN PROTOTYYPIN SUUNNITTELU

**Designing a working prototype of a rope pulling device for
strength exercise**

Työn tarkastaja: Yliopisto-opettaja, TkT Kimmo Kerkkänen
Työn teettäjä: Voimamies, Ins. (AMK) Ville Kekkonen

Lappeenrannassa 15.12.2012
Lauri Pentikäinen

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|----|
| SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO | 1 |
| 1 JOHDANTO | 1 |
| 1.1 Työn tausta | 1 |
| 1.2 Työn tavoitteet | 2 |
| 1.3 Työn toteutus ja rajaus | 2 |
| 2 KONEENSUUNNITTELUN MENETELMÄT | 3 |
| 2.1 Järjestelmällinen koneensuunnittelu | 4 |
| 2.1.1 Vaatimuslista | 6 |
| 2.1.2 Abstrahointi | 8 |
| 2.1.3 Toimintorakenne | 9 |
| 2.1.4 Ideointi | 9 |
| 2.1.4.1 Tavanomaiset ideointimenetelmät | 10 |
| 2.1.4.2 Intuitiiviset ideointimenetelmät | 11 |
| 2.1.4.3 Diskursiiviset ideointimenetelmät | 12 |
| 2.1.5 Ratkaisuvaihtoehdon valinta | 12 |
| 2.1.5.1 Ratkaisumuunnelmien pistearviointi | 13 |
| 2.2 Valitun ratkaisun kehittäminen | 17 |
| 2.2.1 Valmistus- ja asennusystävällinen koneensuunnittelu | 19 |
| 2.2.2 Käyttövarmuuden huomioiminen | 21 |
| 2.2.3 Ympäristönäkökulmat | 26 |
| 2.2.4 Materiaalien valinta | 29 |
| 2.2.5 Turvallisuusnäkökulmat ja -määräykset | 31 |
| 3 TULOKSET | 34 |
| 3.1 Esisuunnitteluvaihe | 34 |
| 3.1.1 Suunnittelutehtävän määrittely | 34 |
| 3.1.2 Toimintojen määrittely | 36 |
| 3.1.3 Ratkaisuvaihtoehtojen ideointi | 37 |
| 3.1.4 Ratkaisumuunnelmien muodostaminen | 38 |
| 3.2 Ratkaisumuunnelmien kehittäminen | 42 |
| 3.2.1 Muunnelma 2 | 43 |
| 3.2.2 Muunnelma 4 | 45 |
| 3.3 Lopullinen valinta | 49 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.3.1 | Tärkeimpien komponenttien mitoitukset..... | 49 |
| 3.3.1.1 | Jarrun jousi | 50 |
| 3.3.1.2 | Laippalaakeriyksiköt | 51 |
| 3.3.1.3 | Muu rakenne | 52 |
| 3.3.2 | Valitut materiaalit | 53 |
| 3.3.3 | Valmistus ja valmistusystävällisyys | 55 |
| 3.3.4 | Vika- ja vaikutusanalyysi | 57 |
| 3.4 | Kustannusarvio | 59 |
| 4 | TULOSTEN TARKASTELU | 60 |
| 4.1 | Rakenne | 61 |
| 4.2 | Turvallisuus | 62 |
| 4.3 | Käyttö | 63 |
| 4.4 | Valmistus | 63 |
| 5 | JOHTOPÄÄTÖKSET | 64 |
| 5.1 | Kehitysehdotukset laitteen tuotteistamiseksi..... | 65 |
| | LÄHTEET | 67 |
| | LIITTEET | |

Liite I. Markkinoilla saatavilla olevat köydenvetolaitteet

Liite II. Ohjelista ratkaisumuunnelmien pistearvioinnin arviointikriteerien laatimiseksi

Liite III. Kehittelyn työaskeleet

Liite IV. Ohjeita koneistettavan kappaleen valmistusystävälliseen suunnitteluun

Liite V. Suunnitteluohjeita asennusystävällisyyden parantamiseksi

Liite VI. Ympäristöystävällistä tuotesuunnittelua ohjaavia kysymyksiä ja ohjesääntöjä

Liite VII. Joidenkin metallien ja muovien valmistukseen tarvittavan energian ja valmistuksessa syntyvien päästöjen vertailua

Liite VIII. Vaatimuslistan laatimisen tukena käytetty taulukko

Liite IX. Vaatimuslistan pohjalta tehty abstrahointi oleellisten ongelmien tunnistamiseksi

Liite X. Ideointivaiheen tuloksena syntynyt morfologinen kaavio ratkaisuvaihtoehdoista

Liite XI. Osatoimintojen taustatietotaulukko ja ratkaisumuunnelmien 1-3 pisteytys

Liite XII. Ratkaisumuunnelmien 1 ja 3 arvoprofiilit ja osatoimintojen vertailutaulukko

Liite XIII. Jatkokehitykseen valittujen ratkaisumuunnelmien pistearviointi, taustatietotaulukko ja arvoprofiilit

Liite XIV. Jousenmitoituslaskut

Liite XV. Laippalaakeriyksikön tiedot

Liite XVI. Laakerien kiinnitysten lujuuslaskenta

Liite XVII. Köydenvetolaitteen vika- ja vaikutusanalyysi

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | |
|--------------|--|
| α | Ruuvien nousukulma [°] |
| γ | Ruuvien kitkakulma [°] |
| μ | Jarrupalan ja jarrulaikan välinen kitkakerroin |
| μ_k | Laakerin kiristysruuvien kierteissä vaikuttava kitkakerroin |
| μ_p | Laakerin kiristysruuvien pään ja akselin välinen kitkakerroin |
| σ | Ruuvien puristusjännitys [N/mm ²] |
| D_k | Ruuvien nimellinen halkaisija [mm] |
| $F_{\mu p}$ | Ruuvien pään ja akselin välinen kitkavoima [N] |
| $F_{\mu k}$ | Ruuvien kierteessä ruuvia kiristettäessä vaikuttava kitkavoima [N] |
| F_a | Ruuvien aksiaalivoima [N] |
| F_j | Jarrutusvoima [N] |
| F_N | Jarrupalan puristusvoima [N] |
| F_v | Köydenvetovoima [N] |
| l_j | Jarrupalan kontaktipinnan etäisyys rummun keskilinjasta [mm] |
| l_v | Köydenvetolinjan etäisyys rummun keskilinjasta [mm] |
| T | Ruuvien kiristysmomentti [Nmm] |
| <i>DFD</i> | Purkamisystävällinen suunnittelu |
| <i>DFE</i> | Ympäristöystävällinen suunnittelu |
| <i>DFR</i> | Kierrätysystävällinen suunnittelu |
| <i>DFMA</i> | Valmistus- ja asennusystävällinen suunnittelu |
| <i>FMEA</i> | Vika- ja vaikutusanalyysi |
| <i>FMECA</i> | Todennäköisyyden huomioiva vika- ja vaikutusanalyysi |
| <i>OTM</i> | Tavoitepuumenetelmä |
| <i>PSM</i> | Suorituskyvyn määrittelymenetelmä |
| <i>QFD</i> | Laatutoimintojen kehittämismenetelmä |

1 JOHDANTO

Voimaharjoitteluun käytettävät köydenvetolaitteet ovat suhteellisen uusia kuntosalilaitteita, jotka ovat pikku hiljaa alkaneet saavuttaa suosiota Pohjois-Amerikassa. Laittevalmistajia on kuitenkin vähän, ja kysyntä markkinoilla marginaalista, minkä vuoksi laitteiden saatavuus ja hintataso eivät ole yksittäiselle suomalaiselle kuluttajalle suotuisia. Suomalaisen kuluttajan kannalta tilannetta vaikeuttaa entisestään, että laitteilla ei ole Suomessa maahantuojaa.

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on suunnitella mekaanisesti toimiva voimaharjoitteluun tarkoitettu köydenvetolaite yksityiskäyttöön. Kuntoharjoitteluun käytettävän laitteen suunnittelussa on huomioitava etenkin turvallisuusnäkökohdat. Lisäksi yksityiskäyttöön suunniteltavan laitteen materiaali- ja valmistuskustannukset eivät saa nousta liian korkeiksi, jonka vuoksi valmistusmenetelmät ja käytettävät materiaalit on otettava huomioon suunnitteluvaiheessa.

1.1 Työn tausta

Tällä hetkellä markkinoilta on saatavilla kahden amerikkalaisen valmistajan valmistamia voimaharjoitteluun tarkoitettuja köydenvetolaitteita. Marpo Kinetics Inc. tarjoaa neljää variaatiota omasta laitteestaan, ja HiPEQ LLC kymmentä variaatiota omasta Ropeflex-laitteestaan (Hipeq, 2012; Marpo Kinetics, 2012). Marpo Kineticsin köydenvetolaitteen perusmallin toimintaa on esitelty kuvassa 1.



Kuva 1. Marpo Kineticsin Vector Rope Trainer -köydenvetolaite (Marpo Kinetics, 2012).

Laitteiden verottomat hinnat alkavat noin tuhannesta eurosta kalliimpien laitteiden maksaessa yli neljätuhatta euroa (Hipeq, 2012; HealthStyles Exercise Equipment, 2012). Kun otetaan huomioon, että Suomeen toimitettaessa hintaan täytyy lisätä toimituskulut ja tullausmaksut, tulisi halvimmallekin laitteelle hintaa reilusti yli tuhat euroa. Markkinoilla saatavilla olevat laitteistot hintatietoineen on esitelty tarkemmin liitteessä I.

1.2 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on suunnitella kaupallisiin vaihtoehtoihin verrattuna edullinen ja yksinkertaisilla valmistusmenetelmillä toteutettavissa oleva voimaharjoitteluun tarkoitettun köydenvetolaitteen prototyyppi. Suunnittelun pohjalta toimiva prototyyppi on myöhemmin myös tarkoitus valmistaa. Laitteella on oltava vähintään kilpailevia laitteita vastaavat käyttöominaisuudet kuormitettavuuden ja huollettavuuden osalta. Lisäksi laitteen on oltava riittävän kompakti ja modulaarinen, jotta sen kuljettaminen ja käyttäminen onnistuu erilaisissa olosuhteissa. Lisäksi laitteen on täytettävä Suomen lainsäädännössä ja Suomessa voimassa olevissa standardeissa määritellyt turvallisuusvaatimukset mahdollisuuksien mukaan.

1.3 Työn toteutus ja rajaus

Työn pääpaino on tuotteen suunnittelussa järjestelmällisen koneensuunnittelun menetelmän vaiheiden mukaisesti. Menetelmä keskittyy tuotesuunnittelun teknisiin työvaiheisiin. Työssä menetelmää käsitellään uuden tuotteen prototyypin suunnittelun näkökulmasta. Samalla otetaan huomioon laitteen valmistettavuus, turvallisuus- ja ympäristötekijät sekä käyttövarmuus.

Kuntosalilaitteilta vaadittavaa käyttöopasta ei tässä työssä käsitellä, sillä laite ei ole tarkoitettu yleiseen tai kaupalliseen käyttöön. Tästä syystä myöskään markkinatutkimuksia, tai muita tuotteistamiseen liittyviä analyyskejä ei laitteelle tehdä. Suunnittelulle rakenteelle lasketaan kustannusarvio ja tehdään vika- ja vaikutusanalyysi. Koska laite valmistetaan itse, ja kyseessä on testikäyttöön tarkoitettu prototyyppi, huomioidaan kustannusarviossa vain materiaalikustannukset. Vaikka valmistusystävällisyys ja valmistusmenetelmät huomioidaan laitetta suunniteltaessa, ei itse valmistuksen työvaiheita ja järjestystä suunnitella tässä työssä tarkemmin. Valmistamista varten tarvittavia osaluetteloita, sekä koneistus-, hitsaus-, ja asennuspiirustuksia ei myöskään käsitellä. Samoin ympäristönäkökulmat huomioidaan osana suunnitteluprosessia, mutta tarkempaa analyysiä tuotteen ympäristövaikutuksista, kuten hiili-

tai vesijalanjälkilaskentoja ei tehdä. Myöskään turvallisuusvaatimusten täyttämiseksi vaadittavia testejä ei laitteelle tehdä, vaan turvallisuus huomioidaan vika- ja vaikutusanalyysin avulla. Tarkempia lujuuslaskentoja rakenteelle ei tehdä, sillä kuormitustietoja ei ole saatavilla ennen prototyypin valmistusta ja testausta. Prototyyppien suunnittelussa usein käytettävää simulointimallia ei myöskään pystytä samoista syistä toteuttamaan. Laitteen huollettavuus varmistetaan suunnitteluvaiheessa teknisillä ratkaisulla, mutta myöskään huollettavuutta ei ryhdytä analysoimaan tai suunnittelemaan tarkemmin.

2 KONEENSUUNNITTELUN MENETELMÄT

Koneensuunnitteluun on olemassa monia erilaisia yleisesti käytössä olevia menetelmiä, joista kullakin on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Suunnittelumenetelmän valintaan vaikuttavat muun muassa suunniteltavan tuotteen käyttötarkoitus, suunnitteluun osallistuvien asiantuntijoiden osaamisalueet, tuotteen valmistusmäärä, ja mahdollinen aikaisempi tietämys tuotealueesta. Usein monimutkaisempia tuotekokonaisuuksia suunniteltaessa pelkkä mekaniikkasuunnittelun tietämys ei riitä, vaan tarvitaan asiantuntemusta muun muassa sähkötekniikan, mekatroniikan, virtaustekniikan ja kemiantekniikan aloilta. Tällöin suunnittelussa on syytä harkita, mikä tunnetuista menetelmistä tai niiden yhdistelmistä soveltuu suunnitteluryhmälle ja suunniteltavalle tuotteelle parhaiten.

Jo vuosikymmeniä suunnittelumenetelmistä kenties eniten käytetty näkökulma on ollut Saksasta lähtöisin oleva järjestelmällisen koneensuunnittelun menetelmä. Tämän rinnalla, usein samanaikaisesti, käytössä olevia suunnittelumenetelmiä ovat muun muassa takaisinmallinnus (*Reverse Engineering*), rinnakkaissuunnittelu (*Concurrent Engineering*), poikkitieteellinen lähestymistapa (*Cross-Technological Approach*) ja virtuaalisuunnittelu (*Virtual Engineering*). Eskelisen ja Eskelisen (2003) mukaan takaisinmallinnus on suunnittelutapa, jossa käytetään hyväksi olemassa olevaa osaa. Osasta luodaan tarkka 3D-malli, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi parannellessa vanhaa tuotetta, josta ei vastaavaa dataa ole saatavilla. Rinnakkaissuunnittelu on menetelmä, jossa teknisen tuotesuunnittelun kanssa samanaikaisesti otetaan huomioon prosessin ja valmistuksen suunnittelu, ja liiketoiminnalliset näkökulmat. Poikkitieteellisessä lähestymistavassa tuotteen suunnitteluun osallistuu usean eri tieteenalalan asiantuntijoita monimutkaisten ja innovatiivisten tuotteiden

kehittämiseksi. Virtuaalisuunnittelussa suunniteltavasta laitteesta valmistetaan simulointimalli. Simulointimallin avulla tuote saadaan suunniteltua mahdollisimman lähelle haluttua lopputulosta, ja vältetään useampien prototyyppien valmistus ja testaus. (Eskelinen & Eskelinen, 2003, s. 127–132.)

Varsinaisten suunnittelumenetelmien lisäksi on olemassa erilaisia suunnittelussa huomioitavia täydentäviä näkökulmia, kuten valmistus- ja asennusystävällisyyden huomioiminen (*Design for Manufacture and Assembly, DFMA*), käyttövarmuuden huomioiminen (*Reliability Engineering*) ja erilaiset ympäristön huomioivat suunnittelunäkökulmat. Näiden näkökulmien tarkoituksena on säästää aikaa ja rahaa tuotteen valmistus- ja asennusvaiheissa, sekä parantaa tuotteen turvallisuutta, luotettavuutta, huollettavuutta ja ympäristöystävällisyyttä.

Koska tässä työssä suunniteltavaan köydenvetolaitteeseen ei ole tarkoitus liittää näyttölaitetta, on kyseessä puhtaasti mekaaninen laite. Lisäksi varsinaista suunnitteluryhmää ei ole olemassa ja tuote suunnitellaan puhtaalta pöydältä, joten tuotteen suunnitteluun käytetään järjestelmällisen koneensuunnittelun menetelmää. Edellä mainittuja suunnittelua täydentäviä näkökulmia pyritään soveltamaan mahdollisuuksien mukaan kokonaiskustannusten minimoimiseksi, laitteen valmistuksen helpottamiseksi ja käyttöturvallisuuden takaamiseksi. Käytettäviin menetelmiin syvennyttään tarkemmin seuraavissa kappaleissa.

2.1 Järjestelmällinen koneensuunnittelu

Tässä kappaleessa perehdytään järjestelmällisen koneensuunnittelun etenemisvaiheisiin. Suunnittelutyön kannalta tärkeimpiä vaiheita on käsitelty tarkemmin omina alaotsikoinaan kappaleissa 2.1.1–2.1.4, pois lukien ratkaisun kehittelyvaihe, jota käsitellään vielä muita vaiheitakin tarkemmin kappaleessa 2.2. Samassa yhteydessä perehdytään tarkemmin myös aiemmin mainittuihin suunnittelua täydentäviin näkökulmiin. Vähemmän syventymistä vaativat vaiheet on esitelty lyhyesti tämän otsikon alla.

Tuotekehitysprosessi voidaan jakaa karkeasti kolmeen toistuvaan vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe koostuu analyttisestä ongelman selvittelystä, jota seuraa alustava periaatteellisen tason suunnittelu. Kolmannessa vaiheessa periaatteellisen suunnittelun tulokset analysoidaan, ja parhailta vaikuttavat periaatteelliset ratkaisut valitaan jatkokehittelyyn. Tyypillisesti jatkokehittelyssä ilmenee uusia selvitettäviä ongelmia, jolloin joudutaan palaamaan ongelman

selvittelyyn. Näitä kolmea vaihetta toistetaan, kunnes tuote toteuttaa sille asetetut tavoitteet ja vaatimukset. (Luttrupp, 2002, s. 146.)

Järjestelmällinen koneensuunnittelu noudattaa samoja tuotekehityksen vaiheita muun tuotekehityksen kanssa. Järjestelmällisen koneensuunnittelun vaiheet voidaan jakaa etenemisaskeliin yhdistämällä Pahlin ja Beitzin (1990, s. 14–15), Nortonin (2004, s. 8–14) ja Crossin (2008, s. 198) esittämät vaiheet. Järjestelmällisen koneensuunnittelun etenemisaskeleita ovat:

- 1) Tarpeen tunnistaminen
- 2) Taustatutkimus
- 3) Tavoitteen asettelu
- 4) Vaatimusten määrittely
- 5) Toimintorakenteen luominen
- 6) Ideoiden tuottaminen
- 7) Ratkaisuvaihtoehtojen analysointi
- 8) Ratkaisuvaihtoehdon valinta
- 9) Valitun ratkaisun kehittäminen
- 10) Prototyypin valmistus ja testaus
- 11) Tuotanto

Vaikka vaiheet voidaan järjestää numerojärjestykseen, on suunnitteluprosessi iteratiivinen, ja listassa joudutaan usein palaamaan taaksepäin muokkaamaan edellisen vaiheen tuloksia (Norton, 2004, s. 8). Tämä johtuu osittain siitä, että suunnittelun loppuvaiheessa ilmenee asioita, joita alkuvaiheessa ei ole osattu ottaa huomioon. Nortonin (2006) mukaan toisinaan jo suunnitteluprosessin alkuvaiheista lähtien on tiedossa, että esimerkiksi kuormitustiedot ovat suunnitteluvaiheessa epätarkkoja ja niiden selvittämiseksi tarvitaan testejä ja mittauksia. Tällaisissa tapauksissa on yleistä, että ensimmäinen prototyyppi ei kestä käytöstä aiheutuvia kuormituksia, ja alkuperäiseen suunnitelmaan joudutaan tekemään muutoksia muotojen, kokojen, materiaalien ja valmistusmenetelmien osalta. (Norton, 2006, s. 5.) Myös tässä työssä tarkoitus on mitoittaa laite kestävästi tietyt voimat, mutta tarkkoja kuormitustietoja ei ole saatavilla kaupallisista laitteista.

Ensimmäinen askel joka käynnistää suunnitteluprosessin on tarpeen tunnistaminen. Tarpeen ilmoittaa usein asiakas tai yrityksen johtohenkilö, joka ei pysty määrittelemään tarvetta tai ongelmaa kovinkaan tarkasti (Cross, 2008, s. 77). Tässä vaiheessa tehtävästä tai ongelmasta ei saada kunnollista määritelmää, vaan lyhyt toteamus (Norton, 2004, s. 8). Tämän työn osalta tarpeen tunnistaminen oli työn teettäjän toteamus ”Tarvitsen köydenvetokoneen.”

Tarpeen tunnistaminen käynnistää taustatutkimusprosessin, jossa perehdytään ongelmaan liittyviin aihealueisiin ja kerätään tietoa sen ratkaisemiseksi. Tärkeintä on selvittää, onko ongelmaan olemassa valmista ratkaisua, ettei päädytä keksimään pyörää uudelleen. Kattavan taustatutkimuksen avulla ongelma saadaan määriteltyä tarkasti, jolloin vältetään ikäviltä yllätyksiltä myöhemmissä suunnitteluvaiheissa. (Norton, 2004, s. 9.) Tämän työn osalta taustatutkimus sisälsi muun muassa markkinoilla olevien laitteiden selvittämistä sekä turvallisuusmääräyksiin, -lakeihin ja -standardeihin perehtymistä.

Taustatutkimuksen pohjalta voidaan laatia tavoite varsinaiselle suunnittelulle. Nortonin (2004) mukaan tavoitteen tulee olla esitetty yleisellä tasolla, selkeästi ja ytimekkäästi. Asetettu tavoite ei saa ohjata suunnittelua tietynlaista ratkaisua kohti, vaan se täytyy määrittellä mahdollisimman yleisellä tasolla. (Norton, 2004, s. 10.) Nortonin esittämä tavoitelausahdus on verrattavissa Pahlin ja Beitzin (1990, s. 72–74) esittämälle abstrahointilauseelle. Erona on, että abstrahointilause muodostetaan vasta tuotteelle laadittujen vaatimusten määrittelyn jälkeen, kun tavoitelausahdus muodostetaan ongelman määrittämisen jälkeen. Tällöin abstrahointilause on esittämää tavoitelausahdusta tarkemmin määritelty, sillä suunnittelutehtävä on rajattu tarkemmin alustavan vaatimuslistan avulla. Tässä työssä tavoitteen asettaminen on korvattu abstrahointilauseella, joka on esitelty tarkemmin seuraavan kappaleen jälkeen.

2.1.1 Vaatimuslista

Ennen varsinaisen ideoinnin aloittamista on syytä tarkentaa suunnittelun päämäärää. Tätä työvaihetta kutsutaan myös tehtävän määrittelyksi. Löyhästi asetellulle tavoitteelle laaditaan nyt tarkemmat tekniset vaatimukset ja toivomukset, jotka listataan vaatimuslistaksi. Vaatimuslistan tarkoituksena on määrittellä tuotteen suorituskyky ja ominaisuudet. (Norton, 2007, s. 10.) Tuotteelle asetettujen vaatimusten määrittämisen taustalla tulee aina olla asiakkaiden tarpeet ja vaatimukset, sekä odotetut parannukset kilpaileviin tuotteisiin

verrattuna (Hundal, 2002, s. 13–14). Lopullisen tuotteen suunnittelun ja valmistuksen onnistuneisuutta voidaan arvioida vertaamalla tuotteen toimintaa sille laadittuun vaatimuslistaan (Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote, 2007, s. 145). Vaatimuslistan ei tule määrittellä, miten halutut tavoitteet saavutetaan, eikä ohjata suunnittelua mitään tiettyä ratkaisua kohti (Norton, 2004, s. 10). Keinoja tavoitteiden saavuttamiseksi aletaan ideoida vasta seuraavassa vaiheessa, jota on käsitelty kappaleessa 2.1.3.

Vaatimusten laatimiseksi on olemassa joitakin työkaluja ja menetelmiä, jotka helpottavat kaikkien tarvittavien vaatimusten huomioon ottamista. Näitä ovat muassa laatutoimintojen kehittämismenetelmä (*Quality function deployment method*, QFD), suorituskyvyn määrittelymenetelmä (*Performance Specification Method*, PSM) ja tavoitepuumenetelmä (*Objectives Tree Method*, OTM). Pahlin ym. (2007) mukaan ensimmäisenä mainittua menetelmää käytetään asiakkaan toiveiden huomioimiseksi tuotesuunnittelussa. Asiakkaan toivomista tuotteen ominaisuuksista valitaan tärkeimmät, jotka muutetaan teknisiksi vaatimuksiksi. (Pahl ym. 2007, s. 145.) Keskimmäisen menetelmän tarkoituksena on helpottaa suunnittelua rajaamalla mahdollisia ratkaisuja teknisten vaatimusten avulla jättäen kuitenkin mahdollisuuksia eri ratkaisuvaihtoehdoille. Jälkimmäistä menetelmää käytetään toiminnallisten vaatimusten määrittämiseen. (Cross, 2008, s. 106, 122–123.)

Cross (2008) esittää, että tekniset ja toiminnalliset vaatimukset tulisi listata erikseen (Cross, 2008, s. 105). Tällöin vaatimuslistan pitäisi sisältää vain suorituskykyä määritteleviä teknisiä ominaisuuksia. Tässä työssä tekniset ja toiminnalliset vaatimukset on listattu samaan taulukkoon selkeyden ja tuotteen onnistumisen arvioinnin helpottamisen vuoksi. QFD vaatii asiakkaan - tai tämän työn osalta työn teettäjän - perehtymistä kilpaileviin tuotteisiin, mikä ei ole tässä tapauksessa mahdollista. Siksi kyseiseen menetelmään ei perehdytä tarkemmin. Myös PSM ja OTM jätetään käsittelemättä tarkemmin, sillä suunniteltavan laitteen ominaisuudet ovat jo suhteellisen tarkasti rajatut: tuotetta ei suunnitella esimerkiksi tiettyjen lihasryhmien kehittämistä varten, vaan on tarkoituksena suunnitella köydenvetolaite.

Tuotteelta vaaditut ominaisuudet merkitään vaatimuslistaan joko vaatimuksina tai toiveina. Erona on se, että vaatimukset ovat niitä ominaisuuksia, jotka tuotteen on ehdottomasti täytettävä. Toivomukset puolestaan ovat sellaisia ominaisuuksia, jotka otetaan

mahdollisuuksien mukaan huomioon, mikäli niistä ei aiheudu kohtuuttomia hankaluuksia esimerkiksi kustannusten suhteen. Vaatimuksiin ja toivomuksiin on aina liitettävä tieto määrästä: mitat, lukumäärät, painot, teho jne. ja laadusta: toleranssit, ympäristön olosuhteiden kestävyys jne. Määrät ja laadut on pyrittävä määrittämään mahdollisimman tarkasti, mieluiten lukuarvoina. Lähes poikkeuksetta, vaatimuslistaa joudutaan päivittämään työn edetessä. Listan pitäminen ajan tasalla on tärkeää, jotta kaikki tuotteelta vaadittavat vaatimukset tulee otettua huomioon tuotetta suunnitellessa. Listasta työn teettäjän on myös helppo tarkastaa, ollaanko tuotteesta suunnittelemassa halutunlainen. (Pahl ym. 2007, s. 146–147.)

2.1.2 Abstrahointi

Vaatimuslistan tekoon päättyy varsinainen tuotesuunnittelun tehtävänselvittelyvaihe. Ennen siirtymistä luonnosteluvaiheeseen muodostetaan kuitenkin edellisessä kappaleessa mainittu abstrahoinnin tuloksena saatava abstrahointilause. Pahl ym (2007) mukaan abstrahoinnin tarkoituksena on varmistaa, etteivät tehtävään ja ongelmaan perehtyessä ja vaatimuslistaa laatiessa mahdollisesti muodostuneet ajatukset rajoita suunnitteluvaiheessa syntyviä ideoita ja ratkaisuja. Yleistämällä ongelmaa ja korostamalla olennaisimpia asioita, saadaan suunnittelu johtamaan paremmin optimaaliseen kokonaisratkaisuun. Samalla mahdollistetaan uudenlaisten ratkaisujen syntyminen perinteisten rinnalle. (Pahl ym. 2007, s. 161–162.)

Abstrahointi tehdään analysoimalla vaatimuslistassa esitetyt toiminnot ja poimimalla niistä olennaisimmat. Abstrahointi etenee seuraavien askeleiden mukaisesti (Pahl ym. 2007, s. 165):

- 1) Jätetään pois henkilökohtaiset mieltymykset
- 2) Jätetään pois vaatimukset, jotka eivät ole tärkeitä toiminnallisuuden ja muiden oleellisten ehtojen kannalta
- 3) Muutetaan määrälliset vaatimukset laadullisiksi ja muokataan ne käsittämään vain olennaisimmat asiat
- 4) Muokataan jäljellä olevat vaatimukset yleisempään muotoon, mikäli se on tarkoituksen mukaista
- 5) Muotoillaan ongelma ratkaisun kannalta neutraaliksi abstrahointilauseeksi

Usein ongelman ydinolemuksen selvittämisen jälkeen on syytä tarkastella, olisiko tehtävänäsettelua syytä laajentaa ja muuttaa. Ongelman laajentaminen on

abstrahointiprosessin osa, jolla pyritään etsimään uusia ratkaisuja laajemmalla alueella. (Pahl ym. 2007, s. 162–165.) Kuten aiemmin mainittiin, toimeksiantona on suunnitella nimenomaan köydenvetolaite, eikä voimaharjoittelulaitetta tietyille lihasryhmille. Siksi ongelmaa ei ole syytä laajentaa abstrahointilauseesta.

2.1.3 Toimintorakenne

Vaatimuslistan sisältö määrää mitä suunnitellun järjestelmän sisällä tapahtuu järjestelmän tulo- ja lähtösuureiden välillä (Pahl ym. 2007, s. 169). Listamuodossa olevista vaatimuksista järjestelmän eri osien eri toiminnot eivät kuitenkaan käy selvästi ilmi. Järjestelmän toiminnot puolestaan määrittävät, miten listatut vaatimukset tullaan toteuttamaan. Toimintojen selvittämiseksi ja tulevaa suunnittelutyötä helpottamaan suunniteltavalle laitteelle muodostetaan toimintorakenne. Pahl ym. (2007) esittämän toimintorakenteen ylimmällä tasolla on tehtävän ydinolemusta vastaava järjestelmän kokonaistoiminto. Kokonaistoiminto koostuu yhdestä tai useammasta päätoiminnoista, jotka jakaantuvat edelleen osatoimintoihin. Myös osatoiminnot voidaan tarvittaessa pilkkoa edelleen osiin. Lopputuloksena saatavien osatoimintojen ryhmä toteuttaa niitä vastaavan päätoiminnon. Suunniteltavan järjestelmän eri toiminnot voidaan nähdä helposti toimintorakenteesta, jonka avulla rakenne voidaan jakaa erillään suunniteltaviin osa-alueisiin. Kun toiminnot on jaettu niitä vastaaviin osa-alueisiin, voidaan ideointivaiheessa kehittää ratkaisuja jokaiselle osatoiminnoille erikseen. Luotuja osa-alueita voidaan käyttää yleensä suoraan myös modulaarisen rakenteen moduuleina. (Pahl ym. 2007, s. 31, 169–171.)

2.1.4 Ideointi

Ideointivaihe on kenties suunnitteluprosessin luovuutta vaativin vaihe. Siinä ideoidaan toimintorakenteessa määritellyille osatoiminnoille erilaisia teknisiä ratkaisuperiaatteita. Norton (2007) esittää tässä vaiheessa olevan tärkeää, että erilaisia ratkaisuperiaatteita luodaan niin paljon kuin mahdollista, jotta uudentyyppisillä periaatteilla on mahdollisuus nousta esiin (Norton, 2007, s. 11). Ideoiden laatu ja vaatimuslistassa asetetut vaatimukset esimerkiksi kustannusten tai valmistusmenetelmien suhteen pyritään tässä vaiheessa jättämään huomiotta. Ideoiden toteuttamiskelpoisuus arvioidaan vasta seuraavassa vaiheessa ratkaisuvaihtoehtoa valittaessa. Ideointivaiheen tuloksena saadaan jokaista osatoimintoa kohtaan useita vaihtoehtoisia toteutustapoja. Cross (2008) muistuttaa, että jo suhteellisen pienestä määrästä osatoimintojen toteutusperiaatteita saadaan yhdisteltyä suuri määrä erilaisia

ratkaisuvaihtoehtoja kokonaistoiminnon toteuttamiseksi. Uudetkin ratkaisut muodostuvat usein tunnettujen ratkaisujen yhdistelemisestä uudella tavalla, joten mullistavien yksittäisten ideoiden keksiminen ei ole välttämätöntä. (Cross, 2008, s. 137–138.) Ideointivaiheessa kehiteltävät osatoimintojen ratkaisuvaihtoehdot kootaan Pahlin ym. (2007, s. 182) esittämän taulukon kaltaisesti. Taulukossa on esitettyä jokaista osatoimintoa kohden kehitellyt ratkaisuvaihtoehdot. Tällaista taulukkoa kutsutaan myös morfologiseksi kaavioksi (Cross, 2008, s. 138).

Ratkaisuvaihtoehtojen tuottamiseksi on olemassa joukko erilaisia menetelmiä. Jälleen menetelmän valinta tehdään suunnitteluryhmän koon, ryhmän jäsenien osaamisalueiden, suunniteltavan kohteen ja henkilökohtaisten mieltymysten mukaan. Ideoiden luomista tehostaa edelleen vaihtelu eri menetelmien ja ajattelutapojen, esimerkiksi abstraktin ja konkreettisen, välillä (Pahl & Beitz, 1990, s. 99). Pahl ym. (2007, s. 78–103) jaottelee ideointiin käytettävät menetelmät tavanomaisiin, intuitiivisiin ja diskursiivisiin menetelmiin.

2.1.4.1 Tavanomaiset ideointimenetelmät

Tavanomaisiin menetelmiin kuuluvat informaation keräys, luonnon järjestelmien tutkiminen, tunnettujen teknisten järjestelmien tutkiminen, analogiatarkastelut, sekä mittaukset ja mallikokeet (Pahl ym. 2007, s. 78–82). Tavanomaisista menetelmistä mittaukset ja mallikokeet eivät ole mahdollisia ennen kuin on olemassa mitattava laite. Myöskään luonnonjärjestelmien analyysit ja analogiatarkastelut eivät ole toteuttamiskelpoisia, mikäli konstruktion sopivaa vertailukohtaa ei löydy. Tässä tapauksessa vertailukohtien pohdintaan ei ole hyödyllistä ryhtyä, sillä se vaatisi käytännössä ylimääräisen ideointivaiheen vertailukohtien löytämiseksi. Tunnettujen teknisten järjestelmien tarkka analyysi vaatisi myös kohtuuttoman paljon aikaa suhteessa suunniteltavan laitteen yksinkertaisuuteen. Tavanomaisista menetelmistä tämän työn osalta toteuttamiskelpoisin on informaation keruu.

Käytettävistä tavanomaisista ideointimenetelmistä informaation keruu koostuu nykytekniikan tutkimiseen kirjallisuuden, aiheeseen liittyvien julkaisuiden kuten tieteellisten ja kaupallisten artikkelien, patenttien ja tuoteluetteloiden avulla (Pahl ym. 2007, s. 78–79). Vaikka tunnettujen teknisten järjestelmien analyysiä ei varsinaisesti käytetä, tutustutaan erilaisiin systeemeihin informaatiota kerätessä. Informaation keruuksi voidaan ajatella myös konstruktioluetteloiden tutkiminen, vaikka se voidaan luokitella myös diskursiivisiin

menetelmiin. (Pahl ym. 2007, s. 98.) Nykyaikana useimmiten tärkein informaation keruun lähde on internet.

2.1.4.2 Intuitiiviset ideointimenetelmät

Intuitiivisia ideointimenetelmiä ovat aivoriihi ja siitä kehitelty metodi 635, galleriametodi, Delfi-metodi, synektiikka ja näiden yhdistelemät (Pahl ym. 2007, s. 83–88). Intuitiiviset menetelmät perustuvat alitajunnasta kumpuaviin oivalluksiin. Yleensä oivallusten perustana on aikaisempi kokemus. Intuitiivisten menetelmien tarkoituksena on koota mahdollisimman suuri määrä ideoita, ja käydä niitä läpi ryhmässä. Vaihtamalla ajatuksia ryhmän kesken ruokitaan luovuutta, joka auttaa johtamaan uudenlaisiin ratkaisuihin ja oivalluksiin. (Pahl ym. 2007, s. 82–83.)

Intuitiivisista menetelmistä kenties tunnetuin on aivoriihi. Aivoriihi on ryhmätyömenetelmä, jossa 6-15 mieluiten taustoiltaan erilaista henkeä kokoontuu keräämään ideoita. Ilmapiiiriltään avoimen ja vapautuneen kokouksen tarkoituksena on kehittää luovia ja ennakkoluulottomia ratkaisuja, ilman kritiikkiä ja toteuttamismahdollisuuksien huomioimista. (Pahl ym. 2007, s. 84.) Myös naurettavilta tuntuvat ideat kirjataan ylös, sillä ne voivat poikia myöhemmin luovia toteuttamiskelpoisia ratkaisuja (Norton, 2007, s. 11). Ryhmästä yksi valitaan johtajaksi, joka esittelee ongelman aivoriihen alussa, huolehtii vapautuneesta ilmapiiiristä ja pelisääntöjen noudattamisesta. Kaikki ryhmän esittämät ideat jatkokehittelmiseen kirjataan ylös myöhempää analysointia varten. Analysoinnin suorittaa alan asiantuntijat, poimien niistä toteuttamiskelpoisimmat ja kehittäen niitä edelleen tarvittaessa uuden kokouksen yhteydessä. Aivoriihestä on hyötyä etenkin kun käytännön ratkaisukehittämää ei vielä ole olemassa, ratkaisun haussa on pysähtytty paikalleen, tai halutaan kehittää kokonaan uudenlainen ratkaisuperiaate. (Pahl ym. 2007, s. 84–85.)

Delfi-metodi on kolmesta kierroksesta koostuva prosessi, jossa suunnittelun apuna käytetään ulkopuolisia alan asiantuntijoita. Ensimmäisellä kierroksella asiantuntijoilta pyydetään ensimmäisenä mieleen tulevia ratkaisuja ongelman ratkaisemiseksi. Ensimmäisen kierroksen ratkaisuvaihtoehdot kootaan yhteen, jonka jälkeen ne lähetetään takaisin asiantuntijoille toiselle kierrokselle. Nyt heitä pyydetään lukemaan ratkaisujoukko läpi ja lisäämään siihen edellisen vaiheen ja listan lukemisen jälkeen mieleen tulevat uudet ratkaisuvaihtoehdot. Vastaukset kootaan jälleen yhteen, jonka jälkeen ratkaisujoukko lähetetään takaisin

asiantuntijoille kolmannelle kierrokselle. Tällä kertaa heitä pyydetään arvioimaan millä ratkaisulla on parhaat toteutumismahdollisuudet. (Pahl ym. 2007, s. 87.)

Tässä tapauksessa työryhmässä on vain yksi suunnittelija, mikä hankaloittaa ryhmätyötä vaativien ideointimenetelmien käyttöä. Intuitiivisuuteen perustuvista menetelmistä ainut ilman työryhmää toteutettavissa oleva on Delfi-metodi. Pahl ja Beitz (1990) tosin väittävät, että Delfi-metodista on hyötyä teknisissä konstruktioissa lähinnä pitkäaikaisten tuotekehitystöiden periaatekeskusteluissa (Pahl & Beitz, 1990, s. 107). Tässä tapauksessa kuitenkin suunnitteluryhmän rajoittuessa yhteen suhteellisen kokemattomaan suunnittelijaan, on hyödyllistä käyttää apuna myös kokeneempia ulkopuolisia asiantuntijoita. Ulkopuolisten asiantuntijoiden avustuksella on toisaalta myös mahdollista pitää aivoriihi ratkaisumuunnelmien ideoimiseksi.

2.1.4.3 Diskursiiviset ideointimenetelmät

Diskursiivisiin menetelmiin kuuluvat sovellettavien fysikaalisten ilmiöiden järjestelmällinen tutkiminen, järjestelmällinen etsintä jäsentelykaavioiden avulla ja konstruktio luetteloiden käyttö (Pahl ym. 2007, s. 89–98). Diskursiivisissa menetelmissä ratkaisuja etsitään etenemällä tarkoituksellisesti askelittain, jolloin etenemiseen pystytään vaikuttamaan. Diskursiiviset menetelmät eivät sulje pois intuitiota, mutta se pyritään rajoittamaan käytettäväksi yhteen askeleen kerrallaan koko ongelman ratkaisun sijaan. (Pahl ym. 2007, s. 89.) Diskursiivisista menetelmistä fysikaalisten ilmiöiden järjestelmällinen tutkiminen tuskin tuottaisi merkittäviä tuloksia, sillä laitteesta halutaan täysin mekaaninen, ja tutkittavat fysikaaliset suureet jäisivät siten suppealle alueelle. Konstruktio luettelot sen sijaan sisältävät paljon tietoa mekaanisista ratkaisuista kuten osatoimintojen valmiista ratkaisuvaihtoehdoista, koneen- ja standardiosista, joita voidaan edelleen kehittää jäsentelykaavion avulla.

2.1.5 Ratkaisuvaihtoehdon valinta

Kuten aikaisemmin mainittiin, voidaan ideoinnin tuloksena syntyneestä morfologisesta kaaviosta muodostaa vaihtoehtoisia ratkaisukombinaatioita hyvin suuri määrä. Ideoinnissa ei kuitenkaan ole suhtauduttu kriittisesti eri vaihtoehtoihin, minkä vuoksi mitä tahansa variaatiota ei ole järkevää lähteä toteuttamaan. Pahl ym. (2007) mukaan vaihtoehtojen valinnan ensimmäisenä vaiheena on karsia pois morfologisesta kaaviosta tehtävän ja toisten ratkaisujen kanssa yhteensopimattomat vaihtoehdot. Mikäli ratkaisuvaihtoehtoja on edelleen

liikaa, tulee jatkotarkastelua varten valita jäljellä olevista vain parhaat vaihtoehdot. Valinta tehdään sillä perusteella, minkä vaihtoehtojen uskotaan parhaiten toteuttavan vaatimuslistassa määritellyt ominaisuudet. Tarvittaessa valintakriteereiksi voidaan lisätä muita näkökulmia, kuten suotuisat raaka-aineet, patenttitilanne tai jonkin tietyn alan parempi tuntemus. (Pahl ym. 2007, s. 107.)

Kun osatoimintojen ratkaisuvaihtoehdoista on saatu rajattua ne vaihtoehdot, joilla on mahdollisuus täyttää vaaditut kriteerit, muodostetaan muutama ratkaisumuunnelma jatkokehitystä varten. Kukin ratkaisumuunnelma koostuu nyt lupaavien osatoimintojen ratkaisuvaihtoehtojen erilaisista variaatioista. Seuraavaksi Pahlin ym. (2007) mukaan valittujen ratkaisumuunnelmien toimivuutta pyritään selvittämään konkreettisesti hankkimalla lisää tietoa rakenteesta ja sen valmistukseen liittyvistä näkökohdista. Ratkaisumuunnelmille tehdään suuntaa antavia laskelmia kustannusten ja lujuuden selvittämiseksi. Lisäksi hankitaan tietoa eri komponenttien ja raaka-aineiden saatavuudesta, sekä mahdollisista alihankkijoista. Myös tilantarvetta ja muotoa on syytä arvioida luonnostelemalla. Kun ratkaisumuunnelmista on saatu kerättyä riittävästi tietoa, voidaan niistä valita jatkokehittelyyn paras vaihtoehto. (Pahl ym. 2007, s. 190–191.) Vaihtoehdon valintaan käytetään pistearviointimenetelmää.

2.1.5.1 Ratkaisumuunnelmien pistearviointi

Pistearviointimenetelmää voidaan käyttää ratkaisumuunnelmien valinnan lisäksi missä tahansa muussa suunnittelun vaiheessa ratkaisuvaihtoehtoja valittaessa. Sen tarkoituksena on toimia objektiivisena työkaluna parhaan ratkaisumuunnelman valinnassa varsinaista suunnittelua varten. Pahl ja Beitz (1990, s. 140) sekä Cross (2008, s. 152) ovat esitelleet pistearviointimenetelmiä, jotka kaikki toimivat samalla periaatteella edeten pääosin samoilla etenemisaskelilla. Pistearviointimenetelmän etenemisaskelilla ovat:

- 1) Arviointikriteerien muodostaminen
- 2) Arviointikriteerien painotuskertoimien ja pisteytyskaalan määrittäminen
- 3) Ominaisuuksien määrittäminen
- 4) Vaihtoehtojen pisteytys
- 5) Ratkaisujen kokonaispistearvon laskenta
- 6) Ratkaisumuunnelmien vertailu

Näiden kohtien lisäksi Pahl ja Beitz (1990, s. 152–153) listaavat myös arvostelun epätarkkuuden arvioinnin ja heikkojen kohtien etsinnän. Molemmat ovat toki tärkeitä vaiheita, mutta tässä tapauksessa suunnitteilla on prototyyppi ja suunnittelun lähtötiedot ovat karkeita arvioita. Kuten Nortonkin (2004, s. 13) toteaa, ei pistearviointimenetelmällä saatuja alustavasti suunnitellun tuotteen arviointeja voida pitää täysin luotettavina. Koska arvioinnin tiedetään olevan suuntaa-antava, tyydytään pistearvioinnin antamien tulosten kriittiseen tarkasteluun arvostelun epätarkkuuteen perehtymisen sijaan. Heikkojen kohtien etsintä puolestaan voidaan yhdistää ratkaisumuunnelmien vertailuun, missä yhteydessä sitä myös tässä tapauksessa käsitellään.

Arviointikriteerit muodostetaan pääasiassa vaatimuslistan pohjalta (Pahl ym. 2007, s. 192). Tukena on syytä käyttää yleisiä ohjeita arviointikriteerien määrittämistä varten, joita on esitelty tarkemmin liitteessä II. Pahlin ym. (2007) mukaan arviointikriteerien tulee kattaa kaikki tuotteelle asetetut vaatimukset ollen samalla riippumattomia toisistaan ja mitaten mieluiten numeerisesti määriteltävissä olevia ominaisuuksia. Mikäli tällaiset kriteerit pystytään määrittämään, muodostuu arvioinnista huomattavasti tarkempi. (Pahl ym. 2007, s. 193–194.) Suunnittelun luonnosteluvaiheessa on hyvä käyttää vähintään 8 arviointikriteeriä, muttei kuitenkaan 15–30 enempää (Pahl ym. 2007, s. 194; Pahl & Beitz, 1990, s. 158).

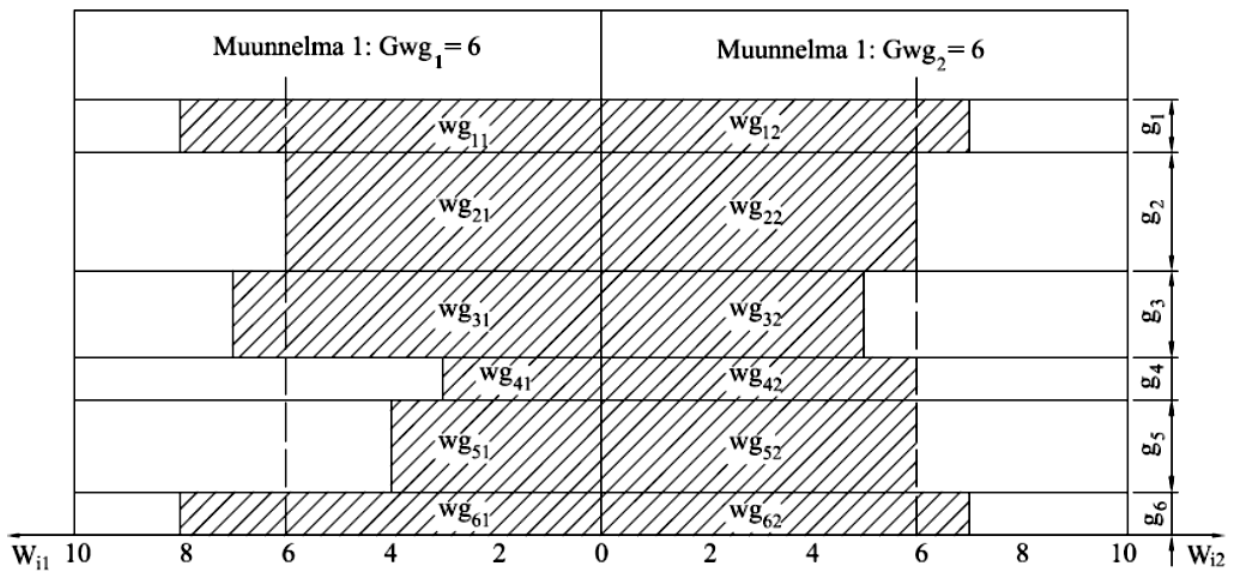
Arviointikriteerit harvoin ovat tuotteen kannalta kaikki yhtä tärkeitä. Tästä syystä on useimmiten tärkeää määrittää arviointikriteereille painotuskertoimet, joiden avulla korostetaan tärkeimpien tekijöiden vaikutusta kokonaispistemäärään. Painokertoimien jakamiseksi on aluksi päätettävä, minkälaisia numeroarvoja käytetään. Havainnollisinta on käyttää arviointikriteerien yhteenlaskettuna summana arvoa 1 tai 100, koska silloin nähdään helposti kunkin kriteerin prosentuaalinen osuus kokonaispistemäärästä. (Pahl & Beitz, 1990, s. 142–143.) Asiakkaan näkökulma voidaan ottaa tässä vaiheessa helposti huomioon pyytämällä tätä asettamaan arviointikriteerit tärkeysjärjestykseen, tai jakamalla kokonaispistemäärä arviointikriteerien kesken (Cross, 2008, s. 153). Mikäli arviointikriteerit ovat vaikeasti verrattavissa keskenään, voi olla syytä jakaa kriteerit eri kategorioihin. Kategorioille voidaan jakaa pisteet alustavasti, jonka jälkeen pisteet jaetaan edelleen kategorian alla oleville kriteereille. (Pahl & Beitz, 1990, s. 142–143.)

Taulukosta selviää arviointikriteerit painokertoimiseen, arviointikriteerejä vastaavat ominaisuudet, sekä vertailtavat ratkaisumuunnelmat. Taulukossa ratkaisumuunnelmien arvosarake sisältää kriteeririvejä vastaavien kriteerien pistearvon. Arvosarakkeen oikealle puolelle merkitään painokertoimella kerrottu pistearvo. Tästä sarakkeesta summataan taulukon alimmalle riville ratkaisumuunnelman kokonaispistearvo.

Annettaessa pisteitä eri arviointikriteerien mukaan on hyvä huomioida, että vaikka arvosteluasteikko on lineaarinen, voi olla arvokkaampaa kehittää ratkaisua asteikon toisessa päässä (Cross, 2008, s. 158). Esimerkkinä polttomoottoriratkaisujen tapauksessa pisteiden 1 ja 2 välille voidaan määritellä suurempi absoluuttinen ero polttoaineenkulutuksessa, verrattuna pisteiden 4 ja 5 erotukseen.

Periaatteessa kokonaispistearvon perusteella voidaan valita suurimman pistemäärän saanut vaihtoehto parhaaksi vaihtoehdoksi. Koska käytännössä saatua tulosta ei voida pitää täysin luotettavana, on syytä myös tarkastella ja vertailla tuloksia hieman tarkemmin. Vertaamalla saatua kokonaispistemäärää maksimipistemäärään saadaan selville karkeasti, kuinka lähellä ollaan ideaalista ratkaisua. Alle 60 % maksimipisteistä saavat muunnelmat vaatisivat liikaa parannuksia, kun taas yli 80 % saavat voivat hyvinkin toimia varsinaisen ratkaisun kehittelyn pohjana, mikäli suurempia yksittäisiä heikkouksia ei esiinny (Pahl & Beitz, 1990, s. 160). Ratkaisumuunnelmille voidaan tehdä myös erillinen taloudellisen arvostuksen arvio, mutta tässä tapauksessa taloudellisuus otetaan huomioon suoraan arviointikriteereissä.

Mikäli ratkaisumuunnelmien pistemäärät ovat lähellä toisiaan, on syytä vertailla ratkaisujen pisteiden jakautumista mahdollisten heikkojen kohtien tunnistamiseksi. Etenkin luonnosteluvaiheessa on tärkeää tarkistaa, ettei ratkaisumuunnelmassa ole joitakin selvästi heikkoja kohtia (Pahl & Beitz, 1990, s. 161). Tämä onnistuu havainnollisesti arvoprofiilia käyttämällä. Kuvassa 3 esitellyn arvoprofiilin palkit vastaavat arviointikriteerejä. Palkkien paksuudet kuvaavat kriteerien tärkeyttä, ja ne muodostetaan painotuskertoimien perusteella. Palkkien pituudet puolestaan kuvaavat ratkaisumuunnelman saamia pistearvoja kyseisestä arviointikriteeristä. Palkkien määrittämä kokonaispinta-ala kuvaa ratkaisumuunnelman saamaa kokonaispistearvoa. (Pahl & Beitz, 1990, s. 153.)



Kuva 2. Ratkaisumuunnelmien vertailuun ja heikkojen kohtien etsintään käytettävä arvoprofiili (Pahl & Beitz, 1990, s. 154).

Kuvasta nähdään, että vaikka ratkaisumuunnelmilla on sama kokonaispistearvo, löytyy muunnelmalta 1 enemmän heikkoja kohtia. Lisäksi muunnelman 2 arvoprofiili on kauttaaltaan tasaisempi. Näistä vaihtoehdoista siis muunnelma 2 olisi suotuisampi vaihtoehto. Toisaalta joissain tapauksissa yksittäisiä heikkoja kohtia voidaan parantaa vaihtamalla kyseiseen arviointikriteeriin vaikuttavan osatoiminnon toteuttamisperiaatteen tilalle vahvempi ratkaisu (Pahl & Beitz, 1990, s. 161). Kun ratkaisumuunnelman heikot kohdat on pystytty mahdollisuuksien mukaan välttämään, ja tyydyttävä kokonaispistemäärä sekä arvoprofiili on saavutettu, voidaan siirtyä valitun ratkaisun kehittelyyn.

2.2 Valitun ratkaisun kehittäminen

Cross (2008) muistuttaa, että tuotekehityksen taustalla on aina tuotteen arvon lisääminen suhteessa kustannuksiin. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kehittelyn perimmäisenä tarkoituksena on joko lisätä tuotteen arvoa asiakkaalle tai alentaa tuotteen valmistuskustannuksia. Tuotteen arvoa voidaan lisätä esimerkiksi toimintoja lisäämällä tai parantamalla ilman kustannusten kasvattamista. Kustannuksia alentaessa esimerkiksi materiaaleja tai valmistusmenetelmiä vaihtamalla on puolestaan huolehdittava, etteivät tuotteen toiminnot kärsi ja tuotteen arvo alene kustannussäästöjen mukana. (Cross, 2008, s. 173–174.) Nämä periaatteet pätevät etenkin olemassa olevan tuotteen tuotekehitystyössä, mutta ne on syytä pitää mielessä myös uutta tuotetta suunniteltaessa.

Kehittelyvaiheelle on ominaista, että suuri määrä tietoa tuotteesta on jo saatavilla, mutta suurten muutosten ja päätösten teko on yhä mahdollista. Tämä tarkoittaa, että kehittelyvaiheessa tehdyillä valinnoilla voidaan vaikuttaa suuresti lopullisen tuotteen kustannuksiin, ympäristön kuormittavuuteen, materiaaleihin, ja muihin ominaisuuksiin. (Luttrupp, 2002, s. 147.) Nyt periaatteellisesta ratkaisusta kehitetään lopullinen valmistettavissa oleva konkreettinen rakenne. Kehittelyn lopussa rakenteesta tulee olla tarkat valmistus- ja asennuspiirustukset, osaluettelot ja käyttöohjeet. (Pahl ym. 2007, s. 227.) Kehittelyvaiheessa tuotetun tiedon pohjalta pystytään valmistamaan toimiva prototyyppi, jota testaamalla voidaan selvittää suunnitellun rakenteen toimivuus käytännössä (Norton, 2004, s. 13). Kehittelyvaiheesta voidaan erottaa myös viimeistelyvaihe, mikä on tässä työssä käsitelty samassa yhteydessä. Viimeistelyvaiheesta ei tämän työn osalta toteuteta kuin osa työvaiheista, joten erillistä tarkastelua ei ole syytä tehdä. Varsinaisten kehittelyn työvaiheiden lisäksi suunnittelussa huomioonotettavia näkökulmia on käsitelty kappaleissa 2.2.1 – 2.2.5.

Pahl ja Beitz (1990) esittelevät kehittelylle periaatteelliset työaskeleet, joita voidaan seurata soveltuvin osin tuotetta suunniteltaessa. Kehittelyvaiheessa työskentely on lähes poikkeuksetta vielä ideointivaiheita iteratiivisempaa. Uutta informaatiota saadaan suunnittelun edetessä, ja joudutaan usein palaamaan taaksepäin aikaisempiin suunnitteluvaiheisiin. Kehittelyvaiheessa nousee esiin myös uusia kohteita ideoinnille, kuten lisää toimintoja tai tarve aikaisemmin määriteltyjen toimintojen yhdistämisestä. Iteratiivisesta etenemisestä huolimatta kehittäessä on pyrittävä etenemään abstraktimmasta lähtökohdasta kohti tarkkaa konkreettista lopputulosta. (Pahl & Beitz, 1990, s. 177–178.) Kehittelyn työaskeleet on esitelty tarkemmin liitteessä III. Myös kehittelyvaiheessa ilmeneviin tapauksiin voidaan soveltaa luonnosteluvaiheessa käytettäviä ratkaisuvaihtoehtojen tuottamiseen ja valintaan käytettäviä menetelmiä.

Liitteessä esitellyn mallin mukaan kehittäminen alkaa laitteen ja sen osakokoonpanojen päämittoihin, yleiseen järjestelyyn ja materiaalivalintoihin vaikuttavien vaatimusten tunnistamisesta. Vaatimusten selvittämisen jälkeen selvitetään laitteen tilan tarve, ja luodaan laitteelle alustava kokoonpanorakenne. Kokoonpanorakenteen luomisessa voidaan käyttää hyväksi toimintorakenteesta määriteltyjä päätoimintoja: Laitteen päätason kokoonpanot ovat usein toimintorakenteen päätoimintojen toteuttajia. Määritellyt kokoonpanot suunnitellaan alustavasti muodon, mittojen ja materiaalin osalta määritetyn tilantarpeen mukaisesti.

Kokoonpanojen suunnittelussa on usein aiheellista muodostaa useampi muunnelma, ainakin kriittisimpien toimintojen toteuttamista. Kun vaihtoehtoisista muunnelmista on kehitelty alustavasti toteuttamiskelpoiset kokoonpanot, valitaan jatkokehittelyä varten parhaalta vaikuttava muunnelma. Seuraavaksi suunnitellaan alustavasti loput päätoiminnon toteuttajat, jotka eivät ole määränneet rakenteen päämittoja, tai ovat riippuvaisia muiden kokoonpanojen rakenteesta. Viimeisenä karkean suunnittelun vaiheena suunnitellaan alustavasti ne sivutoiminnon toteuttajat, joita ei vielä ole suunniteltu. (Pahl ym. 2007, s. 228–230.) Tämän työn osalta eniten kehittelyä vaativa osuus on köyden liikettä vastustavan mekanismin suunnittelu. Muut osuudet eivät vaadi yhtä perusteellista suunnittelua, joten niistä ei tehdä useampia kehitelmiä vertailtavaksi. Näistä kokoonpanoista tehdään ainoastaan yksi kehitelmä, jota parannellaan kehittälyvaiheen etenemisaskelia soveltaen.

Karkeasuunnittelun jälkeen siirrytään suunnittelemaan rakennetta tarkemmin, aloittaen tärkeimmistä päätoiminnon toteuttajista, ottaen huomioon muiden pää- ja sivutoimintojen toteuttajien vaikutukset. Kun koko rakenne on suunniteltu yksityiskohtaisesti, voidaan se arvioida pistearviointimenetelmällä mahdollisten kehittämistä tai muutoksia vaativien osaluokkien osoittamiseksi. Vaihtoehtoisesti pistearviointi voidaan tehdä jo karkeasuunnittelun jälkeen, mikäli rakenteesta on riittävästi tietoa saatavilla. Pistearvioinnin perusteella vaihdetaan tarvittaessa heikkojen osaratkaisujen tilalle uudet ratkaisut, kunnes laitteen rakenteeseen ollaan tyytyväisiä. Lopullinen rakenne käydään vielä läpi, ja tehdään viimeiset muutokset muotoilun ja rakenteen optimoinnin suhteen, sekä tarkastetaan rakenne virheiden varalta. Kun rakenteen on todettu täyttävän sille asetetut tavoitteet, voidaan sille muodostaa alustavat osaluettelot, sekä valmistus- ja asennusohjeet, ja aloittaa rakenteen viimeistely. (Pahl & Beitz, 1990, s. 179–180.)

2.2.1 Valmistus- ja asennusystävällinen koneensuunnittelu

Huomioimalla tuotteen valmistettavuus ja asennettavuus suunnitteluvaiheessa, voidaan valmistuksen kustannusten ja ajan säästämisen lisäksi nopeuttaa tuotekehitysprosessia ja parantaa tuotteen luotettavuutta ja laatua (Boothroyd, Dewhurst & Knight, 2002, s. 21, 35, 138). Valmistus- ja asennusystävällisen suunnittelun (*Design for Manufacture and Assembly*, DFMA) periaatteita tulisi noudattaa mahdollisimman aikaisessa vaiheessa tuotteen suunnittelua. Niiden avulla pystytään välttämään valmistusvaiheessa esiin nousevia ongelmia, jotka vaativat muutoksia valmiina pidettyyn tuoterakenteeseen. Samalla vältetään myös

muutosvastarinnalta, jota ilmenee usein, mikäli DFMA:ta aletaan soveltaa suunnittelun loppuvaiheessa rakenteen ollessa viimeistelyä vaille valmis. (Boothroyd ym. 2002, s. 5, 643.)

DFMA:n soveltamista pieniin tuotantoeriin ja prototyyppisiin ei usein pidetä tärkeänä, sillä asennuksen kustannukset eivät ole olennainen osa pientuotannon kustannuksista. Osien vähentämisestä syntyvät säästöt muodostuvat kuitenkin suuremmalta osin osien hinnasta, kuin niiden asennuksesta (Boothroyd ym. 2002, s. 129). Monesti DFMA:n avulla voidaan myös säästää muun muassa materiaali- ja koneistuskustannuksissa, jotka voivat nekin muodostaa suuren osan tuotteen hinnasta. Usein myös toimivaksi havaitusta prototyypistä tuleekin suoraan tuotantomalli, tai pientuotannon tuotantoerä kasvaa, jolloin asennuskustannuksien merkitys lisääntyy. (Boothroyd ym. 2002, s. 17–18.) Tällöin muutosten tekeminen tuotteen rakenteeseen vie aikaa, ja vanhasta rakenteesta aiheutuu ylimääräisiä valmistuskustannuksia kunnes muutokset on saatu tehtyä.

Boothroydin ym. (2002, s. 9) mukaan DFMA:n peruseriaatteena on yksinkertaistaa tuotetta vähentämällä osien määrää kokoonpanossa. Yksinkertaistettuna osien määrän vähentämiseksi on muodostettu kolme kriteeriä, jotka jokaisen kokoonpanon osan tulisi ideaalitapauksessa täyttää (Boothroyd ym. 2002, s. 9, 94):

- 1) Kyseinen osa liikkuu suhteessa muihin sitä ennen asennettuihin osiin laitteen normaalin toiminnan aikana. Pieniä liikkeitä, jotka voidaan saada aikaan materiaalin jouston avulla, ei lasketa.
- 2) Osan tulee olla eri materiaalia kuin muut sitä ennen asennetut osat, tai osan tulee olla eristettynä muista osista.
- 3) Osan tulee olla erillään muista sitä ennen asennetuista osista, sillä muuten asennus tai purkaminen ei ole mahdollista.

Käytännössä kuitenkin tuskin koskaan osien teoreettiseen minimimäärään päästään, sillä muun muassa kiinnitystarvikkeet kuten ruuvit eivät täytä kriteereitä. Boothroyd ym. (2002, s. 13–14) esittävät, että muun muassa pienehköinä erinä valmistettavilla pienillä sähkömekaanisilla kokoonpanoilla hyvänä pidettävä asennusaika on noin nelinkertainen suhteessa teoreettiseen minima aikaan. Eskelinen ja Eskelinen (2003, s. 114–115) tarkentavat, että aina ei voida noudattaa DFMA:n periaatteita muun muassa laitteen suorituskyvyn tai

laadun kärsimättä. Pahl ja Beitz (1990) puolestaan muistuttavat, että joissakin tapauksissa asennusystävällisyydestä on syytä tinkiä valmistusystävällisyyden parantamiseksi. Joissakin tapauksissa etenkin suurehkojen kappaleiden valmistaminen yhtenä kappaleena on kalliimpaa, kuin saman kappaleen valmistaminen osissa, kokoonpanovaiheen kustannuksista huolimatta. (Pahl & Beitz, 1990, s. 300–302.) Boothroydin ym. (2002, s. 311–313) listaamia etenkin koneistamalla valmistettävien komponenttien valmistusystävällisyyteen liittyviä suunnitteluohjeita on tarkemmin esitelty liitteessä IV.

Tuotteen kokoonpanon helppouden huomioonottamisessa merkittävänä tekijänä vaikuttavat käytössä olevat asennusmenetelmät. Manuaalisen ja automaattisen asennuksen välillä suunnittelukriteereissä on suuriakin eroja. Esimerkiksi kriteerit robotin suorittamalle kappaleen käsittelylle ovat huomattavasti tiukemmat verrattuna manuaaliseen asennukseen. (Boothroyd ym. 2002, s. 86.) Tämän laitteen osalta prototyypin asennus tehdään kokonaisuudessaan käsin, joten tässä työssä ei ole tarvetta käsitellä automaattiseen asennukseen liittyviä kriteerejä.

Manuaalinen asennusprosessi voidaan jakaa kahteen eri osa-alueeseen: käsittelyyn (tarttuminen, liikuttaminen ja asemointi) ja kiinnitykseen (osan liittäminen toiseen tai useampaan osaan) (Boothroyd ym. 2002, s. 86). Molemmille osa-alueille sekä asennuksen helpottamiseksi yleisesti on olemassa suunnitteluohjeita, joita on tarkemmin esitelty liitteessä V. Boothroyd ym. (2002) muistuttaa, että vaikka asentamisen huomioonottamiselle on olemassa tarkkoja ohjeita, on niiden noudattamisesta saatu hyöty toisiinsa verrattuna tapauskohtaista. Ohjesääntöjä ei siis voida laittaa tärkeysjärjestykseen, ja eri tapauksissa eri ohjeet ovat toisia hyödyllisempiä. (Boothroyd ym. 2002, s. 90, 92.) Liitteissä IV ja V esitellyt ohjesäännöt kokonaisuutena muodostavat kuitenkin ”työkalupakin”, jota soveltamalla saadaan kokoonpanon asennettavuutta parannettua.

2.2.2 Käyttövarmuuden huomioiminen

Käyttövarmuuden arvioiminen tuotteen suunnittelu- ja valmistusvaiheissa on tärkeää varhaisesta tuotekehityksestä lähtien laitteen luotettavuuden takaamiseksi (Biolini, 1999, s. 27). Toisaalta on muistettava että täydellisen luotettavan laitteen suunnittelu on käytännössä mahdotonta. Täydellisen luotettavalla laitteella tarkoitetaan laitetta, joka on poikkeuksetta toimintakunnossa ja täyttää toimintonsa moitteettomasti vikaantumatta koko ennalta

määrittelyyn elinaikansa. Vaikka täydellisen luotettava laite voitaisiin joissain tapauksissa suunnitella, on se taloudellisesti kannattamatonta. Materiaalien, suunnittelutyön ja valmistuksen kustannukset nousevat täydellisen luotettavaa laitetta luotaessa liian suuriksi, minkä takia hyväksytään alhaisempi luotettavuus. Koska laitteiden hajoaminen käytössä ei myöskään ole suotavaa, pyritään käyttövarmuutta kuitenkin hallitsemaan. Käytännössä käyttövarmuuden hallitseminen tarkoittaa laitteen ja sen komponenttien rikkoontumisen mekanismien ja todennäköisyyksien arviointia ja ennakoitua. (Modarres, Kaminsky & Krivtsov, 1999, s. 1.)

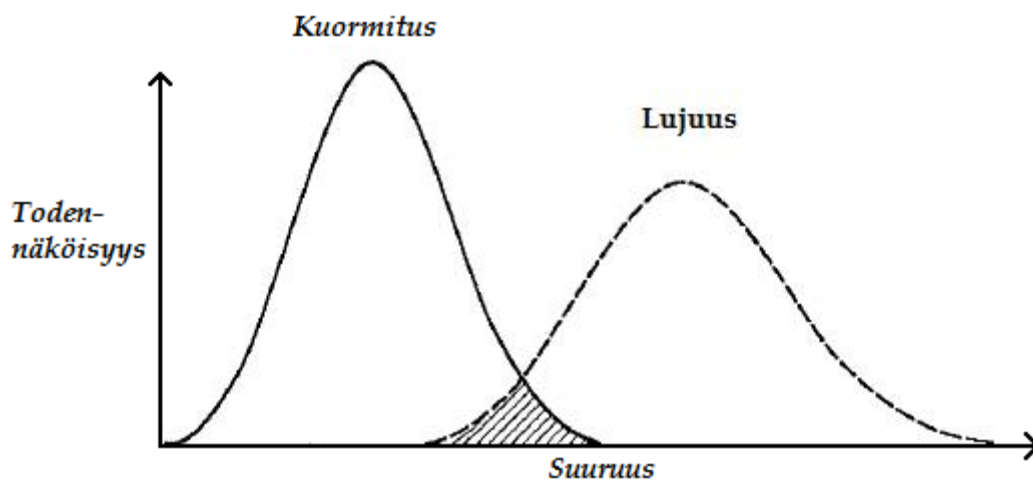
Itse luotettavuus muodostuu kolmesta osasta. Birolini (1999) määrittelee laitteen luotettavuuden kykyä suoriutua toiminnoistaan määrättyissä olosuhteissa määrätyn ajan tietyllä todennäköisyydellä. Luotettavuuden ensimmäinen osa, toiminto tai toiminnot, määritellään, jotta tiedetään milloin laite on vioittunut. Olosuhteet on määriteltävä puolestaan siksi, että ne vaikuttavat laitteen ja sen komponenttien luotettavuuteen joskus hyvinkin merkittävästi. Myös toiminta-ajalla on usein merkittävä vaikutus laitteen luotettavuuteen. Luotettavuutta arvioidaan usein ajan funktiona. (Birolini, 1999, s. 2–3.)

Luotettavuuden tutkiminen voidaan jakaa karkeasti kahteen näkökulmaan. Näitä ovat deterministinen näkökulma ja tilastomatemattinen näkökulma. Deterministisessä analyysissä pyritään selvittämään miten ja miksi laite vikaantuu, kun taas tilastomatemattinen analysointi keskittyy selvittämään mikä on vikaantumisen todennäköisyys (Modarres ym. 1999, s. 14–15). Koska suunniteltava köydenvetolaite on vasta ensimmäisellä prototyyppiasteella eikä laitteen kuormituksesta ole tarkkoja tietoja saatavilla, on luotettavuuslaskelmien tekeminen hankalaa. Koska luotettavuuden parantamisella on myös positiivinen vaikutus laitteen turvallisuuteen, halutaan luotettavuuteen kuitenkin panostaa laitteen suunnittelussa. Tilastomatemattinen luotettavuusanalyysi sen sijaan voidaan ajatella osaksi rakenteen optimointia, joka on päätetty jättää pois tästä suunnitteluvaiheesta. Tämän takia tässä työssä keskitytään luotettavuuden deterministiseen näkökulmaan.

Laitteen vikaantumisen voidaan ajatella syntyvän tilanteessa, jossa laitteeseen kohdistuvat rasitukset ylittävät laitteen rasituksenkestokyvyn. Tähän periaatteeseen perustuvia suunniteltavan köydenvetolaitteen yhteydessä olennaisimpia vikaantumismalleja ovat kuormitus-lujuus -malli (*Stress-Strength Model*) ja vaurio-kestävyys -malli (*Damage-*

Endurance Model). Ensimmäinen keskittyy lähinnä hetkellisiin kuormituksiin, jolloin ajalla ei ole merkitystä laitteen vikaantumisen kannalta. Jälkimmäinen malli perustuu ajan myötä kumuloituvien vaurioiden aiheuttamaan kestävyuden heikkenemiseen. Kumuloituvat vauriot voivat syntyä muun muassa kulumisesta, korroosiosta, väsymisestä, haurastumisesta ja näiden yhdistelmistä. (Modarres ym. 1999, s. 2.) Kuormitus-lujuus -mallia käytetään muun muassa staattisten lujuuslaskujen ja vaurio-kestävyys -mallia väsymiskestävyyslaskujen perustana.

Kuten aikaisemmin todettiin, on täydellisen laitteen suunnittelu miltei mahdotonta. Kenties suurin syy siihen on, että laitteen kuormituksen ja lujuuden tarkka määrittäminen ei käytännössä onnistu. Tämä johtuu siitä, että käytettävät materiaalit, olosuhteet ja kuormitukset vaihtelevat aina jonkin verran. Muun muassa itsenäiset muuttujat, kuten akselin halkaisijan suuruus, vaihtelevat toleranssien sisällä normaalijakauman mukaisesti (Modarres ym. 1999, s. 120). Kuormituksen ja lujuuden vaihtelua havainnollistaa kuva 4. Kuva havainnollistaa myös laitteen vikaantumisen todennäköisyyttä. Koska vikaantuminen tapahtuu kuormituksen ylittäessä lujuuden, on todennäköisyys laskettavissa kuormituksen ja lujuuden kuvaajien päällekkäisen pinta-alan avulla.



Kuva 3. Erään rakenteen lujuus- ja kuormituskuvaajat (Modarres et al. 1990, s. 334).

Kuvan perusteella voidaan päätellä, että rakenteen luotettavuutta voidaan parantaa parantamalla rakenteen lujuutta, vähentämällä kuormitusta, poistamalla vaihteluita lujuudessa tai kuormituksessa, sekä muuttamalla lujuuden tai kuormituksen vaihteluita siten että niitä kuvaavien kuvaajien tyyppi muuttuu. Kuvaajasta nähdään, että ajalla ei näyttäisi olevan merkitystä rakenteen kestävyteen. Käytännössä ajan myötä olosuhteet ja kuormitukset

kuitenkin muuttuvat, ja rakenteen lujuus heikkenee vaurioiden kumuloitumisen seurauksena. Siten myös rakenteen luotettavuus vaihtelee.

Perinteinen tapa koneenrakennuksessa huomioida rakenteen lujuuden ja kuormituksen vaihtelut on käyttää laskennoissa varmuuskertoimia (Modarres ym. 1999, s. 334). Tyypillisesti varmuuskerroin on kahden saman yksikön omaavan ominaisuuden suhde, kuten lujuus/jännitys tai suurin sallittu kuormanvaihtelu/toteutuva kuormanvaihtelu. Yleensä jokaista kappaleen vaurioitumismekanismia kohden lasketaan oma varmuuskerroin. Usein pienimmän varmuuskertoimen saaneella vaurioitumismekanismilla on suurin todennäköisyys vikaantua. (Norton, 2006, s. 17–18.) Modarres ym. (1999, s. 334) muistuttavat, että varmuuskertoimien käyttö voi johtaa yli- tai alimitoitukseen, mikäli kertoimet valitaan väärin. Tämän työn osalta voidaan käyttää hieman matalampia varmuuskertoimia, sillä on kyse prototyyppistä, joka on tarkoitettu testikäyttöön. Joissakin tapauksissa testilaitteen lujuudesta saatetaan joutua tarkoituksella tinkimään. Esimerkiksi venymäliuskoja käytettäessä rakenteen kuormitusten selvittämiseksi, on rakenteeseen synnyttävä joustoa jotta kuormitustiedot saadaan selvitettyä. Tämän laitteen osalta varmuuskertoimien valinnoissa otetaan huomioon myös mahdollisesta vikaantumisesta aiheutuvat vaaratilanteet. Suurempien haittojen, kuten henkilövahinkojen, mahdollistavien vikaantumisten tapauksissa käytetään siis suurempia varmuuskertoimia. Vastaavasti muodonmuutoksia tai yksittäisten komponenttien hajoamisia aiheuttavat vikaantumiset mitoitetaan pienemmillä varmuuskertoimilla. Tarkemmat rakenteen luotettavuuslaskelmat matemaattisten mallien avulla on mahdollista tehdä vasta, kun testikäytöstä on saatu tarkempia tietoja kuormituksen suuruuksista ja vaihteluista, sekä olosuhteista muutoksineen.

Vikaantumistapoja ja vikaantumisen aiheuttamien haittojen tunnistamista ja välttämistä varten laite analysoidaan vika- ja vaikutusanalyysin (*Failure Mode and Effect Analysis*, FMEA) avulla. Vika- ja vaikutusanalyysi on alun perin Yhdysvalloissa 60-luvulla avaruusteollisuuden kehittämä menetelmä, jota voidaan käyttää luotettavuuden arviointiin sekä tuotteen suunnittelu että tuotantovaiheessa (Modarres ym. 1999, s. 249). Tuotantovaiheessa vika- ja vaikutusanalyysin tarkoituksena on varmistaa, että tuotteelle pystytään tuottamaan vaadittavat ominaisuudet vaaditulla tarkkuudella (Pahl ym. 2007, s. 529). Tässä työssä sovellettavan suunnitteluvaiheen vika- ja vaikutusanalyysin perimmäisenä tarkoituksena on varmistaa, että

tuote täyttää vaatimuslistassa määritellyt vaatimukset. Tarkemmin ottaen suunnitteluvaiheen vika- ja vaikutusanalyysin tarkoituksena on Modarresin ym. (1999, s. 249) mukaan

- tunnistaa vaurioitumistavat ja -mekanismit, ja luokitella ne tärkeysjärjestykseen jatkokehitystä varten.
- tunnistaa suunnittelutoimenpiteet mahdollisten vaurioitumisten poistamiseksi tai vähentämiseksi.
- dokumentoida tehtyjen muutosten syyt, ja tuottaa informaatiota tulevia analyysijä, muutoksia ja jatkokehitystä varten.

Lisäksi valmistusystävällisellä suunnittelulla voidaan vähentää valmistusvaiheessa tuotteeseen syntyviä vaihteluita, mikä lisää tuotteen laatua ja luotettavuutta. Yhdistämällä Birolinin (1999) ja Modarresin ym. (1999) esittämät vika- ja vaikutusanalyysin vaiheet, voidaan muodostaa taulukon 2 mukaiset etenemisaskeleet.

Taulukko 2. Vika- ja vaikutusanalyysin etenemisaskeleet (Birolini, 1999, s. 74; Modarres ym. 1999, s. 250)

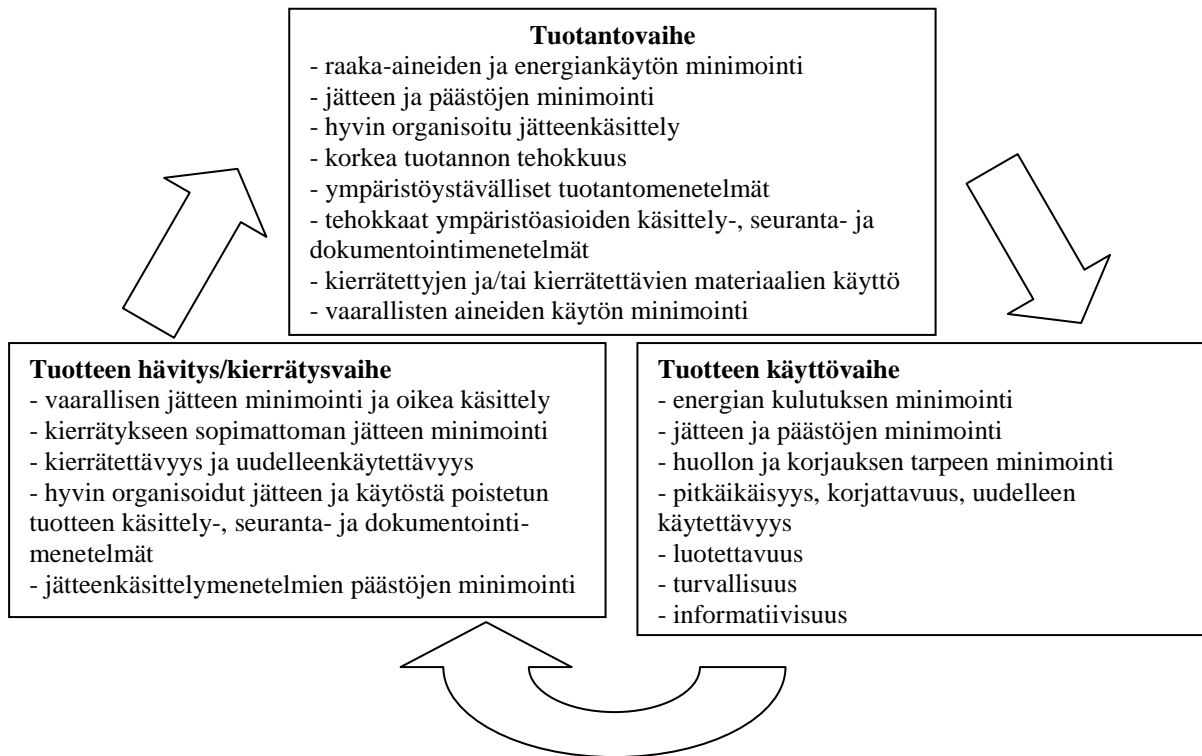
| | |
|---|---|
| 1 | Analysoitavan järjestelmän ja sen osien määrittely. Osien liityntäpintojen ja osatoimintojen välisten yhteyksien tunnistaminen. (Yhteyksistä voidaan muodostaa kaavio esimerkiksi mekaanisen rakenteen tai toimintorakenteen avulla.) |
| 2 | Analysoitavien osien kaikkien mahdollisten vikaantumistapojen tunnistaminen. |
| 3 | Vikaantumisten mahdollisten syiden ja oireiden tunnistaminen. |
| 4 | Vikaantumisten vaikutusten arviointi paikallisesti osaan ja sen toimintoon. |
| 5 | Vikaantumisten vaikutusten arviointi osaan liittyviin kokonaisuuksiin ja osatoimintoihin, sekä koko laitteeseen ja sen toimintaan. |
| 6 | Vikaantumisten aiheuttamien seurauksien vakavuuden arviointi ja luokittelu. |
| 7 | Korjausehdotusten laadinta vikaantumisten todennäköisyyksien pienentämiseksi, seurausten vakavuuden lieventämiseksi, ja rinnakkaisten varatoimintojen luomiseksi. |
| 8 | Analyysin dokumentointi, sekä jäljelle jääneiden riskien tunnistaminen ja kirjaaminen. |

Analyysiin voidaan ottaa mukaan myös vikojen todennäköisyyslaskenta. Tällöin puhutaan FMECA-analyysistä (*Failure Mode and Effect Criticality Analysis*), jonka avulla voidaan tehdä tarkempi numeerinen arvio riskien suuruudesta (Modarres ym. 1999, s. 249). FMECA on kuitenkin tavallista vika- ja vaikutusanalyysiä työläämpää tehdä, minkä vuoksi sitä ei välttämättä kannata tehdä ennen laitteen rakenteen viimeistelyä ja prototyypin testausta.

2.2.3 Ympäristönäkökulmat

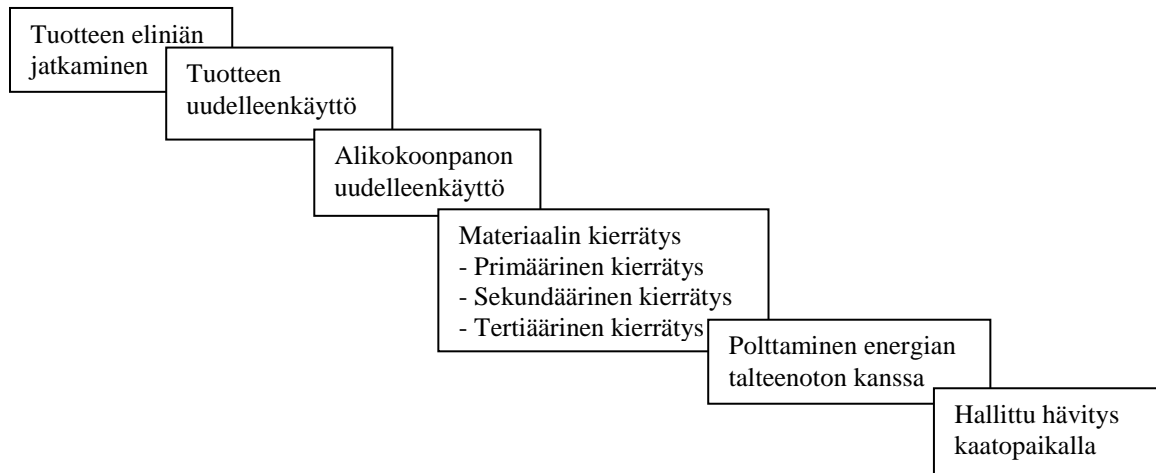
Tuotteen ympäristövaikutuksiin kiinnitetään huomiota yhä enemmän, minkä vuoksi ympäristöystävällisistä tuotteista ollaan myös valmiita maksamaan enemmän (Hundal, 2002, s. 1). Joissain tapauksissa on myös mahdollista vähentää tuotteen kustannuksia esimerkiksi kierrätettyjä materiaaleja käyttämällä. Haasteena ympäristöystävällisessä suunnittelussa (*Design for Environment*, DFE) on myös se, että tuotteen laatuvaikutelma ei saisi kärsiä esimerkiksi materiaalin vaihtamisesta (Luttrupp, 2002, s. 147, 149). Muutoin vaarana on, että ympäristöystävällisyydellä saavutettu arvon kasvattaminen hävitään laadussa, vaikka varsinaista toiminnallista haittaa ei syntyisikään.

Huomioimalla ympäristönäkökulmat tuotesuunnittelun alusta lähtien pyritään vähentämään tuotteen ympäristölle aiheuttamia haittavaikutuksia tuotteen koko elinkaaren aikana. Suunnitteluvaiheessa tehdyt päätökset vaikuttavat materiaalien käyttöön ja prosessointiin sekä tuotteen valmistukseen, kuljetukseen, käyttöön ja hävitykseen käytön jälkeen. Hundalin (2002) mukaan DFE:n perimmäisinä lähtökohtina ovat päästöjen minimointi ja materiaalin käytön optimointi. Päästöjen minimoinnilla tarkoitetaan tuotantojätteen, haitallisten aineiden käytön ja energian kulutuksen minimointia. Käyttämällä materiaaliltaan ja aihokooltaan optimaalisia raaka-aineita vähennetään kustannusten lisäksi samalla myös päästöjä. (Hundal, 2002, s. 15.) Nämä periaatteet tukevat myös Boothroydin (2002, s. 294) esittelemää DFMA:n mukaista aihionvalintaa. DFE asettaa kaikille tuotteen elinkaaren vaiheille tavoitteita, joita on esitelty tarkemmin kuvassa 4. Tavoitteiden saavuttamiseksi tuotesuunnittelussa pohdittavia kysymyksiä ja suunnittelua ohjaavia ohjesääntöjä on esitelty tarkemmin liitteessä VI.



Kuva 4. Ympäristöystävällisen suunnittelun tavoitteet tuotteen elinkaaren vaiheille (Vaajoensuu, Dammert, Kuuva & Airila, 2002, s. 431).

DFE voidaan jaotella edelleen tuotteen elinkaaren eri vaiheiden, kuten materiaalien valinnan, valmistuksen ja kierrätyksen tavoitteita tukeviin menetelmiin. Ympäristöystävällisen suunnittelun tärkeimpiä menetelmiä tässä työssä suunniteltavan laitteen kannalta ovat läheisesti toisiinsa liittyvät näkökulmat: kierrätysystävällinen suunnittelu (*Design for recycling*, DFR) ja purkamisystävällinen suunnittelu (*Design for disassembly*, DFD). Hundalin mukaan (2002) DFR:n päämääränä on, että tuotteen elinkaaren lopussa tuote voidaan purkaa kierrätettävissä oleviin osiin. DFD puolestaan pyrkii helpottamaan tuotteen purkamista. (Billatos, 2002, s. 83.) Kierrättäminen voidaan suorittaa jalostamalla osan materiaali uudelleen tai ottamalla kierrätettävä osa uusiokäyttöön. Erona menetelmien välillä on se, ettei uusiokäyttö vaadi merkittäviä toimenpiteitä kierrätetylle osalle. Uudelleenjalostus puolestaan vaatii yleensä materiaalin sulatusta tai tiivistämistä uuden raaka-aineen valmistamiseksi. Seurauksena uudelleenjalostus vaatii uusiokäyttöön verrattuna huomattavasti enemmän energiaa, tuottaa merkittävästi enemmän päästöjä ja on uusiokäyttöä kalliimpaa. (Stevens & Boks, 2002, s. 557–558; Pahl & Beitz, 1990, s. 339.) Kuvassa 5 on esitelty tarkemmin tuotteen eliniän jatkamisvaihtoehdot käytön jälkeen ympäristövaikutusten kannalta paremmuusjärjestykseen asetettuna.



Kuva 5. Tuotteen eliniän jatkamisvaihtoehdot käytön jälkeen ympäristövaikutusten kannalta paremmuusjärjestyksessä ylhäältä alaspäin (Stevens & Boks, 2002, s. 557).

Primäärisellä kierrätyksellä tarkoitetaan komponentin käyttöä alkuperäisessä käyttötarkoituksessaan. Sekundäärinen kierrätys tarkoittaa komponentin uusiokäyttöä jossakin toisessa käyttötarkoituksessa, sen laadun heikettyä alkuperäiseen käyttötarkoitukseen kelpaamattomalle tasolle. Tertiäärisellä kierrätyksellä puolestaan tarkoitetaan komponenttien raaka-aineiden talteenottoa ja kierrättämistä uudelleenjalostamista varten. Myös perinteisesti kierrätykseksi mielletyllä tertiäärisellä kierrätyksellä voidaan pienentää materiaalin valmistuksen ympäristövaikutuksia joillakin materiaaleilla merkittävästi. (Stevens & Boks, 2002, s. 557–558.) Joidenkin tertiäärisen kierrätyksen kautta tuotettavien materiaalien valmistuksen ympäristövaikutuksia suhteessa kierrättämättömien materiaalien valmistukseen on esitelty taulukossa 3.

Taulukko 3. Joidenkin tertiäärisen kierrätyksen kautta tuotettujen materiaalien valmistuksen ympäristövaikutuksia suhteessa materiaalin valmistukseen kierrättämättömistä raaka-aineista (Stevens & Boks, 2002, s. 579).

| Kierrätetty valmistusmateriaali (100 % raaka-aineesta) | Ympäristövaikutukset suhteessa kierrättämättömistä raaka-aineista valmistettuun materiaaliin |
|---|---|
| Lasi | 80 % |
| Rauta | 40 % |
| Muovi/paperi/pahvi | 40 % |
| Kupari | 25 % |
| Alumiini | 10 % |

Taulukon ympäristövaikutukset perustuvat ekoindikaattori 95:een, joka huomioi tuotannosta aiheutuvia haitallisia päästöjä muun muassa ilmastolle ja muulle ympäristölle, sekä ihmisten terveydelle. Päästöt puolestaan lasketaan energiankulutuksen avulla, joten energiankulutus korreloi syntyneiden päästöjen määrää. Liitteessä VII on vertailtu tarkemmin joidenkin muovien ja metallien valmistukseen vaadittavaa energiaa ja valmistuksesta syntyviä päästöjä ja jätettä. (Stevens & Boks, 2002, s. 578–579; Soukka, 2011, s. 53.)

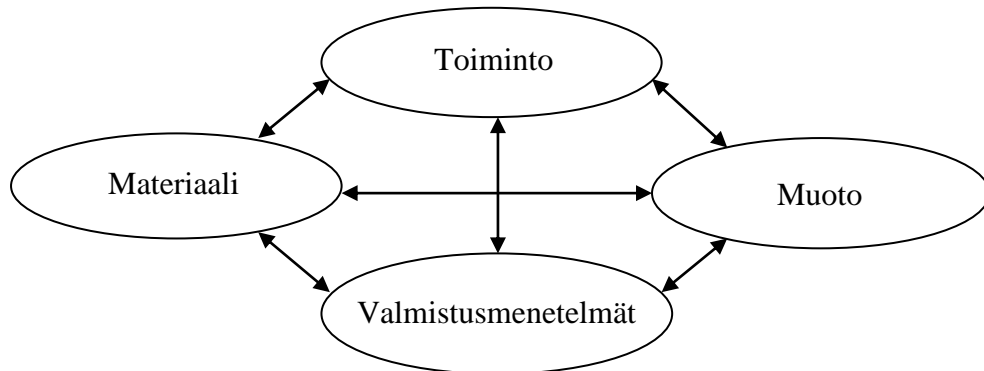
Ashbyn (2005) mukaan jokin neljästä elinkaaren vaiheesta - materiaalin tuotanto, tuotteen valmistus, käyttö tai käytöstä poistaminen - muodostaa lähes aina vähintään 80 % tuotteen energiankulutuksesta. Usein yhden elinkaaren vaiheen energian kulutuksen, ja sitä kautta myös muun ympäristön kuormituksen osuus, on jopa selvästi yli 80 %. Siksi olennaisinta olisi tunnistaa mikä vaihe tuotteen elinkaaresta kuormittaa ympäristöä eniten, jotta merkittäviä muutoksia olisi mahdollista saada aikaan. (Ashby, 2005, s. 421.)

Suunniteltavan köydenvetolaitteen elinkaaren energiankulutusprofiilin voidaan ajatella vastaavan Ashbyn (2005, s. 422) esittelemää polkupyörän energiankulutusta, koska molemmat ovat täysin käyttäjän tekemällä työllä toimivia kuntoilulaitteita. Energiaprofiilin mukaan noin 80 % osuus energiankulutuksesta syntyy raaka-aineiden tuotannosta, tuotannon osuuden ollessa noin 10 %, ja muiden elinkaaren vaiheiden sitä vähemmän. Kun otetaan huomioon myös suunniteltavan laitteen pieni koko ja se, että kyseessä on yksittäinen prototyyppi, voidaan todeta, ettei tuotteella ole merkittäviä ympäristövaikutuksia. Tästä syystä ympäristövaikutuksia ei ole otettu huomioon ennen tuotteen kehittelyvaihetta, eikä laajempaa ja yksityiskohtaista ympäristövaikutusten arviointia ja minimoimista ole syytä tehdä. Ympäristönäkökulmat pyritään ottamaan huomioon materiaalien valinnassa valitsemalla mahdollisuuksien mukaan kierrätettyjä tai vähän energiaa valmistusvaiheessa tarvitsevia materiaaleja. Lisäksi laitteesta pyritään suunnittelemaan kierrätettävä, mikä antaa myös lisäarvoa asiakkaalle.

2.2.4 Materiaalien valinta

Konstruktiomateriaalien valinta on yksi olennaisimpia vaiheita laitteiden suunnittelussa. Ashbyn (2005) mukaan materiaalien valintaan vaikuttaa laitteelta vaadittujen toimintojen, muotojen, valmistusmenetelmien ja itse materiaalien väliset vaikutussuhteet, joita on demonstroitu kuvassa 6. Toiminnot määrittelevät, mitä ominaisuuksia materiaalilta vaaditaan.

Materiaalin ominaisuudet puolestaan vaikuttavat siihen soveltuviin valmistusmenetelmin. Valmistusmenetelmät puolestaan määräävät, minkälaisia muotoja työkappaleeseen voidaan saada aikaan. Muuttamalla jotakin näistä neljästä osa-alueesta, vaikuttaa samalla muihinkin. (Ashby, 2005, s. 19–20.) Tämä korostaa jälleen tuotesuunnittelun iteratiivista luonnetta.



Kuva 6. Materiaalin valinnan keskeinen ongelma: toimintojen, materiaalin, muodon ja valmistusprosessien vuorovaikutus (Ashby, 2005, s. 19).

Materiaalin valinnassa ei varsinaisesti etsitä rakennusmateriaalia, vaan ominaisuusprofiilia, joka toteuttaa kappaleelle asetetut vaatimukset (Ashby, 2005, s. 28). Materiaalin valinta lähtee liikkeelle kappaleelle asetetun ominaisuusprofiilin määrittämisestä. Ominaisuusprofiili muodostetaan suunnittelukriteerien perusteella. (Ashby, 2005, s. 80.) Apuna voidaan siis käyttää suunnittelun alkuvaiheessa tehtyä vaatimuslistaa, jota sovelletaan kullekin osalle erikseen. DFMA:n soveltaminen vaikuttaa osaltaan yksittäisen osan materiaalin valintaan: kappaleiden ja eri materiaalien määrä pyritään rajaamaan muun muassa yhdistämällä mahdollisimman monta toimintoa samaan osaan.

Ominaisuusprofiilin avulla voidaan rajata joukko käyttötarkoitukseen sopivia materiaaleja, sekä asettaa ne paremmuusjärjestykseen suorituskyvyn perusteella. Jäljelle jäävät paremmuusjärjestykseen järjestetyt materiaalit on vielä tutkittava mahdollisten heikkouksien, vahvuuksien, ja muiden tässä vaiheessa tuntemattomien ominaispiirteiden selvittämiseksi. (Ashby, 2005, s.80, 84.) Tämä vaihe on erityisen tärkeä, sillä kaikista materiaaliominaisuuksista ei ole tietoa saatavilla, tai niitä ei pystytä vertailemaan keskenään. Tällaisia tietoja ovat muun muassa jotkin valmistettavuuteen ja materiaalin käyttäytymiseen erilaisissa toimintaympäristöissä liittyvät ominaisuudet. Potentiaalsiin materiaaleihin

tutustuessa tulee usein esille myös ominaisuuksia, joita alkuperäisessä ominaisuusprofiilissa ei ole osattu vaatia. (Ashby, 2005, s. 99.)

Samoja perusaskelia – ominaisuusprofiilin määrittelemistä, rajausta ja paremmuusjärjestykseen asettamista, sekä tarkempaa tarkastelua – voidaan soveltaa myös itse valmistusmenetelmien valintaan (Ashby, 2005, s. 195). Tämän työn osalta valmistusmenetelmiä ei tarkemmin tarkastella, mutta suunnitteluvaiheessa huomioidaan, että suunniteltava laite on oltava valmistettavissa tavanomaisilla yleisesti käytössä olevilla menetelmillä ja laitteistoilla.

2.2.5 Turvallisuusnäkökulmat ja -määräykset

Kuluttajaturvallisuuslain mukaan ”kulutustavaraa tai kuluttajapalvelua ei pidetä terveydelle tai omaisuudelle vaarallisena siltä osin kuin se on sellaisten yhdenmukaistettujen standardien mukainen, joita koskeva viittaus on julkaistu Euroopan unionin virallisessa lehdessä” (L 22.07.2011/920). Käytännössä kuntosalilaitteiden tarkastuksessa sovelletaan eurooppalaisia standardeja, joista voimaharjoittelulaitteita koskevat SFS-EN 957-1 ja SFS-EN 957-2. Valitettavasti kyseisiin standardeihin ei päästy tutustumaan, eikä oikeuksien ostamiseen haluttu ryhtyä, minkä vuoksi tässä työssä turvallisuusnäkökulmat huomioidaan yleisten suunnitteluohjeiden avulla.

Varsinaisesti kuluttajaturvallisuuslaki ei koske tätä yksittäistä prototyyppiä, koska se luovutetaan kuluttajalle muussa kuin elinkeinotoiminnassa (L 22.07.2011/920). Mikäli laitetta alettaisiin myydä, olisi kuitenkin otettava huomioon, että mainittujen standardien lisäksi kuluttajaturvallisuuslain mukaan kulutustavaran on täytettävä muitakin standardeja, sääntöjä ja suosituksia, joihin olisi syytä perehtyä tarkemmin. Lisäksi viranomaisilla on oikeus rajoittaa valmistajan toimintaa erilaisin kielloin ja määräyksin, mikäli turvallisuusongelmia esiintyy. Kuten aikaisemmin on mainittu, yksittäinen prototyyppi päättyy usein suoraan tuotantomalliksi, minkä takia kuluttajaturvallisuuslakiin kannattaa tutustua jo suunnittelun alkuvaiheessa. Lisäksi lain ensimmäisessä luvussa käsiteltävät asiat mukailevat koneensuunnittelussa noudatettavia periaatteita, jotka huomioivat laitteen turvallisuuden.

Ensisijaisesti laite tulisi suunnitella välittömästi turvalliseksi. Käytännössä tämä tarkoittaa, että laitteen rakenne ja toiminta eivät mahdollista vaaratilanteen syntyä. Mikäli välitön

turvallisuustekniikka ei takaa riittävää turvallisuutta tai sitä ei pystytä soveltamaan, tukeudutaan välilliseen turvallisuuteen. Välillisessä turvallisuustekniikassa vaaratilanteet pyritään estämään erillisillä suojarakenteilla ja -järjestelmillä. Mikäli välillinen turvallisuustekniikkakaan ei pysty täysin estämään vaarojen syntyä, sovelletaan viimeisenä ratkaisuna opastavaa turvallisuustekniikkaa. Siinä käyttäjää varoitetaan vaaroista ja osoitetaan vaaralliset alueet. Opastavaa turvallisuustekniikkaa ei kuitenkaan missään tapauksessa tule käyttää ainoastaan välittömän ja välillisen turvallisuustekniikan välttämiseksi. (Pahl & Beitz, 1990, s.194.)

Välitöntä turvallisuustekniikkaa voidaan toteuttaa kolmea eri periaatetta – varman kestämisen periaatetta, rajoitetun vahingon periaatetta tai varajärjestelmän periaatetta – noudattamalla. Varman kestämisen periaatteen mukaan rakenteen kaikki komponentit, sekä niiden muodostama kokonaisuus on suunniteltu siten, että rakenne kestää kaikki siihen mahdollisesti kohdistuvat rasitukset ilman vahingoittumista tai häiriötä. Tämä vaatii hyvin perusteellisia selvityksiä suunnitteluvaiheessa, sekä tarkkaa valmistusvaiheiden laadunvalvontaa. (Pahl & Beitz, 1990, s. 196–197.) Käytännössä varman kestämisen periaatteen toteuttaminen vaatii siis paljon aikaa ja rahaa.

Rajoitetun vahingon periaate sen sijaan sallii rakenteellisen vahingoittumisen tai toimintahäiriön ääritilanteessa käytön aikana siten, ettei vaaratilannetta synny. Vaaratilanne voidaan välttää, mikäli rakenne pystyy ylläpitämään toimintaansa vähintään rajoitetusti, kunnes laite voidaan turvallisesti pysäyttää. Häiriötilanne voi varoittaa tulevasta vaarasta muun muassa käynnin epätasaisuutena, nestevuotona tai tehon pienentymisenä. (Pahl & Beitz, 1990, s. 197.)

Varajärjestelmä voi käytännössä tarkoittaa esimerkiksi rinnakkain kytkettyjä komponentteja, joista yhden pettäminen ei pysäytä laitteen toimintaa toisen suorittaessa vaaditun toiminnon. Tämä parantaa turvallisuuden lisäksi laitteen luotettavuutta, mikä on ominaista varajärjestelmille. Varajärjestelmä voi olla joko aktiivinen, kuten lentokoneissa olevat useat moottorit, tai passiivinen, kuten sairaalassa käytettävä varasähkögeneraattori. Aktiivinen varajärjestelmä toimii normaalitilanteessa varsinaisen järjestelmän rinnalla, jolloin yhden yksikön pettäessä aiheutuu toimintaan sitä vastaava tehon pienentyminen. Passiivinen

järjestelmä puolestaan kytketään päälle vasta, kun varsinaisen järjestelmän teho ei riitä. (Pahl & Beitz, 1990, s. 199–200.)

Välillinen turvallisuustekniikka voidaan myös jakaa kolmeen eri osa-alueeseen: suojajärjestelmiin, suojaelimiin ja suojalaitteisiin. Suojajärjestelmät ovat nimensä mukaan järjestelmiä, jotka on ohjelmoitu laukaisemaan vaaratilanteessa suojareaktio vahinkojen estämiseksi. Suojajärjestelmien toiminta sisältää vaaran tunnistavan komponentin, joka lähettää järjestelmälle signaalin vaaran tunnistessaan ja vaaran poistuessa. Esimerkkeinä ovat koneistuskeskuksien suoja-aidat ja -ovet. Suojaelimet ovat teknisiä rakennelmia, jotka saavat aikaan suojatoiminnon ilman erillistä signaalinkäsittelyä esimerkiksi mekaanisesti. Esimerkkeinä ovat ylipaineventtiilit ja auton turvavyöt. Suojalaitteet tuottavat suojatoiminnon ilman erillistä suojareaktiota. Käytännössä ne ovat kiinteitä rakenteita, kuten verhoiluja tai muita esteitä. (Pahl & Beitz, 1990, s. 202.)

Välillisen turvallisuustekniikan teknisille ratkaisuille on yhteistä luotettavan toiminnan, pakonomaisen vaikuttamisen, ja kiertämisen mahdollisuuden estämisen perusvaatimukset. Luotettava toiminta vaatii, että suojalaitteiston osat ja niiden muodostama kokonaisuus on suunniteltu varman kestämisen tai rajoitetun vahingon periaatteiden mukaisesti. Pakonomainen vaikuttaminen tarkoittaa, että suojavaikutus on olemassa ennen vaaratilanteen syntymistä sekä sen aikana. Mikäli suojalaitteisto poistetaan tai suojatoimenpiteet kumotaan, poistuu pakonomaisesti myös vaaralle altistava tilanne. Kiertämisen mahdollisuuden estäminen puolestaan tarkoittaa, että suojavaikutusta ei voida poistaa tai kiertää tarkoituksella tai vahingossa. Käytännössä tämä voi tarkoittaa esimerkiksi rajakytkimen kotelointia siten, ettei sitä pystytä muokkaamaan pysäyttämättä konetta. (Pahl & Beitz, 1990, s. 202–203.)

Mikäli opastavaa turvallisuustekniikkaa joudutaan soveltamaan, on sen kuluttajaturvallisuuslain mukaan annettava käyttäjälle riittävät ja selkeät tiedot, jotta hän ymmärtäisi laitteeseen ja sen käyttöön liittyvät vaarat. Viranomainen voi myös tarvittaessa vaatia vaaran torjumisen tai ennalta ehkäisemisen kannalta tarpeellisia käyttö- ja toimintaohjeita, varoituksia tai muuta tietoa. Viime kädessä vastuu siitä, ettei laitteesta aiheudu vaaraa kenenkään terveydelle tai omaisuudelle, on sillä henkilöllä tai yrityksellä joka luovuttaa tavaran kuluttajalle. (L 22.07.2011/920.)

3 TULOKSET

Tässä kappaleessa on sovellettu kappaleessa 2 käsiteltyjen menetelmien käyttöä köydenvetolaitteen prototyypin suunnittelussa. Suunnittelussa on keskitytty uuden tuotteen suunnittelun vaiheisiin, joita käsitellään kappaleissa 3.1 ja 3.2. Kappaleessa 3.3 perehdytään suunnittelun lopputuloksena saatuun laitteen konkreettiseen rakenteeseen. Rakenteelle on määritelty päämitat, ja toiminnan kannalta olennaisimmat mekanismin osat on mitoitettu. Lisäksi lopulliselle rakenteelle on valittu materiaalit ja tehty vika- ja vaikutusanalyysi heikkojen kohtien tunnistamiseksi sekä turvallisuuden ja luotettavuuden parantamiseksi. Koska valmistusmenetelmät ja -ystävällisyys otettiin huomioon suunnittelussa, on valmistusvaiheita aihetta käsitelty lyhyesti. Laitteelle tehtyä rakennusmateriaalien kustannusarviota on käsitelty kappaleessa 3.4.

Taulukoiden, kuvaajien ja esisuunnitteluvaiheen laskentojen tekoon käytettiin Microsoft® Office Excel® 2007 SP3 -ohjelmaa. Varsinainen mekaniikkasuunnittelu tehtiin SolidWorks® 2011 x64 Edition SP1.0 -ohjelman avulla. Laakerin kiinnityksen ja jousen mitoituslaskuihin käytettiin Mathcad 14.0 M020 -ohjelmaa. Tulokset on esitelty seuraavissa kappaleissa suunnittelun etenemisjärjestyksessä.

3.1 Esisuunnitteluvaihe

Esisuunnitteluvaiheessa selvitettiin tarkemmin varsinaisen suunnittelutehtävän sisältö ja tavoitteet. Toiminnot tavoitteiden saavuttamiseksi määriteltiin, ja ideoitiin periaatteellisia ratkaisuja toimintojen toteuttamiseksi. Lopuksi ideoista valittiin toteutumiskelpoisimmat ideat, joiden ajateltiin parhaiten täyttävän suunnittelutehtävälle asetetut tavoitteet. Esisuunnitteluvaiheen lopputuloksena saatiin kaksi alustavaa periaatteellista ratkaisua, joita lähdettiin kehittämään eteenpäin seuraavissa suunnitteluvaiheissa. Tarkemmat komponenttien mitoituslaskentoinen tehdään vasta kun lopullinen toimintaperiaate on valittu.

3.1.1 Suunnittelutehtävän määrittely

Köydenvetolaitteelle laadittu vaatimus- ja toivomuslista on esitelty tarkemmin taulukossa 4. Listaa laadittaessa on otettu huomioon, että kyseessä on yksittäistuote, mikä näkyy muun muassa valmistukseen liittyvissä toivomuksissa. Toisaalta koska tuote on tarkoitus voida ottaa

päivittäiseen käyttöön, on tuotteelle asetettu myös vaatimuksia luotettavuuden, ulkonäön ja etenkin käytettävyyden suhteen.

Listan selkeyttämiseksi vaatimukset ja toivomukset on jaoteltu eri kategorioihin. Liitteessä VIII on esitelty vaatimuslistan laadinnan tukena käytetty taulukko, jossa esitellään yleisimpiä vaatimuslistassa käytettäviä kategorioita sisältöesimerkkeineen. Tässä työssä kaikkia liitteessä esiteltyjä kategorioita ei ollut syytä käyttää, sillä suunniteltavan laitteen yksinkertaisuuden vuoksi vaatimuslista jää lyhyeksi suhteessa teollisiin projekteihin. Siksi osa liitteessä esitellyistä kategorioista on jätetty pois, ja toisia on yhdistelty omiksi kategorioikseen.

Taulukko 4. Köydenvetolaitteen vaatimus- ja toivomuslista

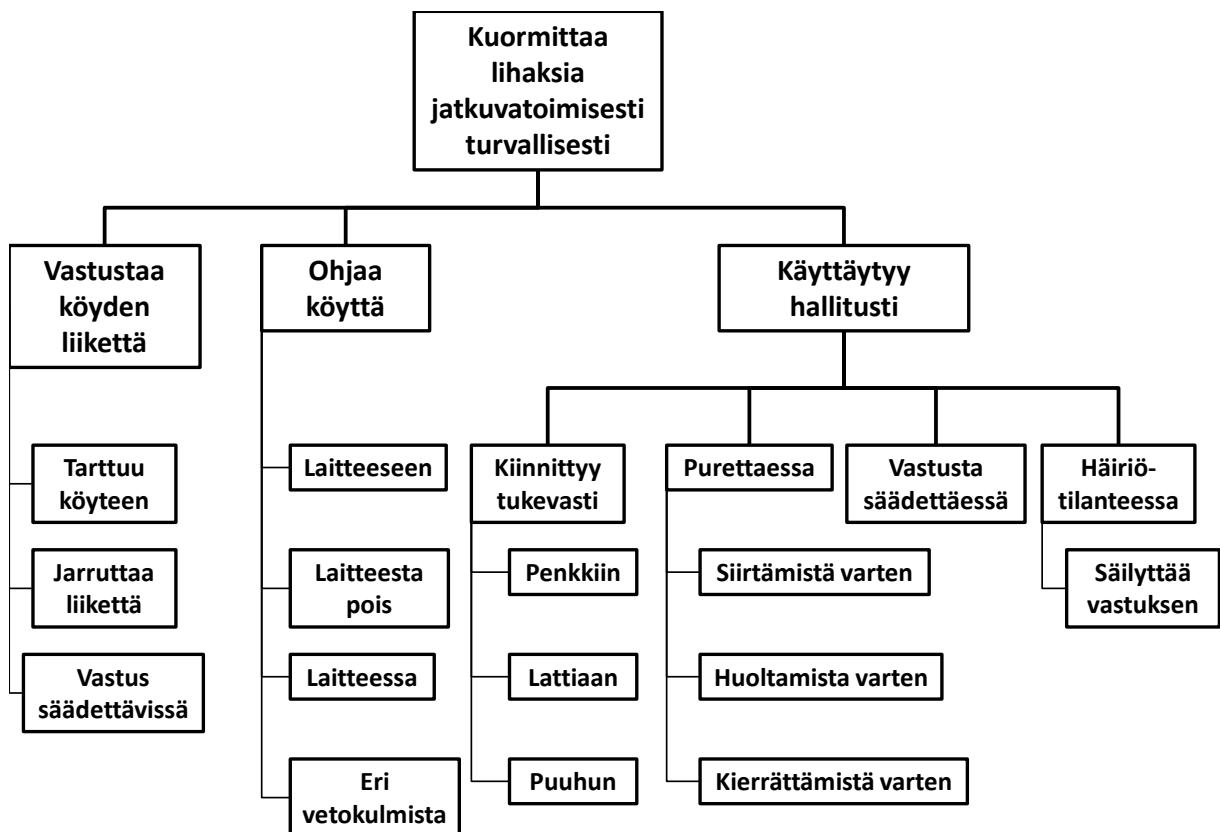
| Vaatimus- ja toivomuslista | |
|----------------------------|---|
| T/V | Rakenne |
| V | Enimmäismitat: Korkeus x Leveys x Syvyys: 800x400x300 mm |
| V | Enimmäispaino 20 kg + irrotettavat osat (penkki & runko?) |
| V | Säädettävä vastus enintään 100 kg |
| V | Vetokulma -45°...+45° |
| T | Kestettävä 2 vuotta käyttöä 95% todennäköisyydellä |
| Turvallisuus | |
| V | Laitteen on oltava turvallinen ja ergonominen käyttää |
| T | Täytettävä turvallisuussäädökset, lait, standardit, direktiivit yms. Kuluttajaturvallisuuslaki 920/2011 Kuntosalilaitteiden tarkastusstandardit: SFS-EN 957-1, SFS-EN 957-2 |
| Käyttö | |
| V | Laitteen on oltava jatkuvatoiminen |
| V | Käytöstä aiheutuva melutaso oltava mahdollisimman alhainen (≤50 dB) |
| V | Laitteen on oltava helposti siirrettävissä ja purettavissa siirtämistä varten |
| V | Kiinnityksen tulee onnistua penkkiin, seinään, lattiaan ja puuhun |
| V | Penkkiin kiinnitettäessä muuta kiinnitystä ei tarvita |
| V | Kestettävä käyttö sisätiloissa, ja kuivissa ulkotiloissa |
| T | Laitteen tulee olla mahdollisimman huoltovapaa |
| T | Laitteen käytöstä ei aiheudu kustannuksia (ei kulutusosia) |
| Valmistus | |
| V | Laitteen on oltava ulkonäöltään siisti |
| T | Materiaalikustannukset oltava alle 200 € |
| T | Vältettävä osia, joita ei pystytä valmistamaan käytössä olevilla laitteilla (Käytössä olevat laitteet: Sorvi, MIG/MAG -hitsauskone, pylväsporakone) |
| T | Käytettävä ympäristöystävällisiä valmistusmenetelmiä ja materiaaleja |
| T | 100% materiaaleista kierrätettävissä |

Vaatimuslistan pohjalta tehty abstrahointi oleellisten ongelmien tunnistamiseksi on esitelty tarkemmin liitteessä IX. Kuten aiemmin todettiin, abstrahointilause toimii myös suunnittelutehtävän tavoitteena. Abstrahoinnin tuloksena syntyi abstrahointilause:

”Edullinen sisäkäyttöön soveltuva jatkuvatoiminen säädettävävästuksinen kuntoharjoittelulaite, joka ei aiheuta vahinkoa käyttäjälle tai ympäristölle.”

3.1.2 Toimintojen määrittely

Vaatimuslistan pohjalta luotiin laitteelle toimintorakenne, joka on esitelty tarkemmin kuvassa 7. Toimintorakenne selventää, minkä toimintojen kautta vaatimuslistassa määritellyt vaatimukset toteutetaan. Toimintorakennekaavion ylimmällä tasolla oleva kokonaistoiminto koostuu kolmesta päätoiminnosta, jotka jakautuvat edelleen osatoiminnoiksi.



Kuva 7. Köydenvetolaitteen toimintorakenne.

3.1.3 Ratkaisuvaihtoehtojen ideointi

Ideointivaihe suoritettiin tässä työssä edellä mainittujen toteuttamiskelpoisten menetelmien avulla. Aluksi kerättiin kustakin toiminnosta intuitiivisesti esiin nousevat ratkaisuehdotukset. Laadittua ratkaisujoukkoa täydennettiin informaatiota keräämällä, konstruktio luetteloita tutkimalla ja aivorihtä ja Delfi-metodia soveltamalla. Aivorihtä käytettiin ideoinnin alussa, sillä se on nopea toteuttaa, ja tuottaa tehokkaasti paljon ideoita uuden tuotteen konstruktion. Aivorihtien jälkeen ideat pilkottiin toimintorakenteen avulla osatoimintoja vastaaviksi ratkaisuvaihtoehtoiksi, joihin lisättiin tavanomaisilla menetelmillä saadut ideat. Seuraavaksi sovellettiin Delfi-metodin toista ja kolmatta kierrosta, millä pyrittiin varmistamaan että kaikki aivorihtiryhmän ideat ovat tulleet kirjatuiksi. Tämä tehtiin pyytämällä työryhmän jäseniltä mahdollisia lisäehdotuksia aivorihtien jälkeen koottuun idearyhmään, sekä mielipiteitä toteuttamiskelpoisimmista vaihtoehtoista. Samalla saatiin asiantuntijoilta ajatuksia myös ratkaisuvaihtoehdon valintaa varten. Lopputuloksena saatiin suuri määrä ideoita, joista vain pieni osa valittiin käyttökelpoisena jatkokehitykseen. Tästä syystä taulukko on esitelty tarkemmin liitteessä X, eikä sitä tarkastella tässä yhteydessä enempää.

Aivorihtissä ja Delfi-metodissa käytetty työryhmä koostui Etteplan Design Center Oy:n Lappeenrannan toimipisteen mekaniikkasuunnitteluosaston työntekijöistä. Ryhmän jäsenet ovat taustoiltaan erilaisia koneensuunnittelun ammattilaisia. Ryhmään kuuluivat:

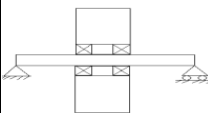
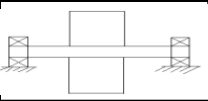

- Projektipäällikkö, Insinööri, Petri Kallioinen
- Mekaniikkasuunnittelija, Diplomi-insinööri, Jussi Hopia
- Vanhempi suunnittelija, Koneteknikko, Vesa Kattelus
- Vanhempi suunnittelija, Ins. (AMK), Mikko Käätä
- Mekaniikkasuunnittelija, Ins. (AMK), Jonne Härkänen
- Mekaniikkasuunnittelija, Tekn. yo, Lauri Pentikäinen

Laitteen runko ja penkki jätettiin ideoinnista pois, sillä ne voidaan toteuttaa samantyyppisillä periaatteilla, oli mekanismin rakenne mikä tahansa vaihtoehtoista. Suojarakenteita taas ei kannata suunnitella ennen kuin muu rakenne saadaan hahmoteltua. Parhaassa tapauksessa rakenne saadaan suunniteltua välittömästi turvalliseksi, jolloin erillisiä suojarakenteita ei tarvita.

3.1.4 Ratkaisumuunnelmien muodostaminen

Alkuperäisistä ratkaisuvaihtoehdoista karsittiin pois vaihtoehdot, joita syystä tai toisesta ei ole järkevää toteuttaa. Toteutettavissa olevat osatoimintojen ratkaisuvaihtoehdot koottiin uudelleen taulukkoon 5, joka on esitelty edellä.

Taulukko 5. Toteutettavissa olevat osatoimintojen ratkaisuvaihtoehdot

| | | Ratkaisu | 1 | 2 | 3 |
|--|-------------------------------|---|--|--|----------------------------------|
| Toiminto | | | | | |
| Ohjaa köyttä (eri vetokulmista) | Laitteen sisällä |  | Napa laippalaakereilla +sankakiinnitys runkoon | Laipat akseliin + ruuvilla runkoon | |
| | |  | Laippalaakeriyksiköt | | |
| | Liukumalla | Kourua pitkin | Putken sisällä | Rullia vasten | |
| | Laitteeseen & laitteesta |  | Ohjaustapit & kiinteä asento | Suppilomainen holkki & kääntyvä asento | |
| Vastustaa liikettä (häiriötilanteessa säilyttää vastuksen) | Tarttuu köyteen | | Väkipyörä + pinnoite + painotela | Useampi kierros navan ympäri | Ei tartu (liukumisratkaisu) |
| | Jarruttaa liikettä | | Rumpujarru | Polkupyörän levyjarru | Kiinteä jarrukenkä köyttä vasten |
| | | | Nivelen ympäri siirtyvä kouru köyttä vasten | Vannejarru | Tönkkäjarru (kenkäjarru) |
| | Vastuksen säätö | | Säätöruuvi | Vipu | Poljin |
| Kiinnittyy tukevasti & helposti purettavissa | Puuhun (+lattiaan & penkkiin) | | Kuormaliina + runkoon piikit | Putkisangat | Sirppikoukku + ketju |

Köyden ohjauksen toteuttavista ratkaisuvaihtoehdoista jätettiin pois laakeripesien koneistaminen suoraan runkoon hankalan valmistettavuuden takia. Lisäksi koneistaminen vaatisi paksumman materiaalin käyttöä mikä lisäisi laitteen massaa. Myös kierteellisen akselin käytön sisältävät ratkaisut hylättiin, sillä akselin kierteitys olisi turha ylimääräinen koneistusvaihe. Lisäksi kierrekiristys vaatisi ylimääräisen varmistuksen, ettei se ajan kuluessa pääse löystymään. Akselia ei myöskään haluta hitsata runkoon, sillä se edellyttäisi rakenteen monimutkaistamista huoltotoimenpiteiden mahdollistamiseksi. Navan ja akselin liitokseen ei haluttu tässä vaiheessa ottaa kantaa, minkä takia ahdistusliitos ja navan koneistaminen poistettiin taulukosta. Köyden liukuminen tappeja vasten laitteen sisällä jätettiin pois, sillä

siitä epäiltiin aiheutuvan ylimääräistä melua. Lisäksi jouhevan liikkeen aikaansaamiseksi tappeja tulisi olla riittävän paljon, minkä takia ratkaisu olisi työläs toteuttaa verrattuna saman asian ajavaan kouruvaihtoehtoon. Kourun käyttö köyden ohjaukseen laitteeseen ja laitteesta pois karsittiin pois sillä se muistutti suppiloholkkiratkaisua, mutta ei rajoittanut köyden liikettä yhtä kattavasti.

Liikkeen vastustusratkaisuista karsittiin pois liian kalliina ratkaisuina ilmajarru, nestejarru ja variaattorilaippa, sekä keskipakokytkin. Siirtyvät tapit tai rullat jätettiin pois sillä niiden jarruteho ja toimintaperiaate vaikutti epävarmalta. Hankalan valmistettavuuden takia poistettiin lineaarisesti siirtyvän kourun käyttö jarruna. Kourun lineaarinen siirtyminen vaatisi lineaarijohteiden käyttöä, joka on nivelratkaisuun verrattuna kalliimpi ja epävarmempi. Liian heikoksi epäillyn rakenteen vuoksi jätettiin pois vastuksen säätöratkaisusta polkupyörän vaihteet. Köyteen tarttumiseen ehdotetuista ratkaisuista jätettiin pois piikikkään rullan ja hammaspyörän käytöt, sillä ne saattaisivat vahingoittaa köyttä. Kiilahihnapyörä puolestaan on periaatteeltaan samanlainen väkipyörän kanssa, joten se poistettiin päällekkäisenä ratkaisuna.

Kiinnitysmenetelmistä tolppakenkäkiinnitys ei ole riittävän tukeva mikäli laitetta vedetään eri suuntiin, eikä kiinnitys sopisi kuin tietyn kokoisille puille. Ruuvikiinnitys puolestaan vahingoittaisi puuta ja vaatisi kohtuuttoman paljon vaivaa asennusvaiheessa. Kiinnitysratkaisuista jätettiin pois myös laskettelumonoista tuttu räikkäliuskan ja soljen ratkaisu, vaikka se saikin suunnittelijoilta paljon kannatusta. Syynä oli, että sopivia komponentteja toimittavia yrityksiä ei löytynyt. Liuskojen ja räikkämekanismen valmistaminen olisi puolestaan turhan hankalaa.

Jäljelle jääneistä ratkaisuvaihtoehdoista koottiin kolme erilaista ratkaisumuunnelmaa. Ratkaisumuunnelmia varten muodostettiin pistearviointitaulukko arviointikriteereineen. Arviointikriteerien painotuskertoimet määriteltiin yhdessä työn teettäjän kanssa. Painotuskertoimina käytettiin prosenttiosuuksia painotuksen hahmottamista ja kokonaisratkaisun hyvyden arviointia helpottamaan. Arviointiasteikoksi valittiin yleisesti oppilaitoksissa käytössä olevaa skaalaa 0-5. Koska tarkkaa arviointia ei pystytä luonnosteluvaiheessa tekemään, riittää kapeampi skaala arvosteluun. Arvoa 0, joka vastaa arvosanaa hylätty, ei vertailevassa arvioinnissa käytännössä ollut syytä käyttää. Hylättyä

arvosanaa ei annettu millekään ratkaisulle, sillä hylätyiksi arvioidut ratkaisut karsittiin jo pois ennen pistearviointia.

Ratkaisumuunnelmien pistearviointia varten kerättiin tarvittavaa taustatietoa ennen varsinaista pistearviointia. Tarvittavat taustatietovaatimukset saatiin lähes suoraan pistearviointitaulukon arvostelukriteereistä. Ratkaisumuunnelmien ollessa periaatteellisella tasolla, taustatietojen kerääminen on hankalaa. Ainoat arviointikriteerit joille pystyttiin määrittämään konkreettiset ominaisuudet, olivat ”kevyt rakenne” ja ”edulliset osto-osat”. Näiden kriteerien ominaisuuksiksi tulivat hinta ja massa. Pisteiden jakaminen hinnan ja massan perusteella on esitelty taulukossa 6.

Taulukko 6. Hinnan ja massan pisteytys

| Arvostelu \ Ominaisuus | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| Hinta [€] | >300 | 300 | 220 | 160 | 120 | ≤100 |
| Massa [kg] | >20 | 20 | 17 | 14 | 12 | ≤10 |

Taulukosta nähdään, että sekä hinta että massa on pisteytetty epälineaarisesti. Epälineaarisella pisteytyksellä varmistettiin, että hieman heikommilta vaikuttavia ratkaisuja ei jouduttu hylkäämään heti suunnittelun alkuvaiheessa. Samalla saatiin tehtyä eroa paremmalta vaikuttavien ratkaisujen välille.

Loppujen ominaisuuksien jäätyä konkretisoimatta, koostui taustatietojen kerääminen enimmäkseen osatoimintojen ratkaisuvaihtoehtojen vertailusta keskenään. Vertailu tehtiin pisteyttämällä osatoimintojen ratkaisut varsinaisia ratkaisumuunnelmien pistearviointikriteerejä vastaavien taustatietovaatimusten mukaan. Pisteytys suoritettiin yksi taustatietovaatimus kerrallaan aina yhtä osatoimintoa vastaavien ratkaisuvaihtoehtojen kesken. Lopuksi ratkaisumuunnelmille laskettiin kokonaisratkaisua vastaavat arvot kutakin taustatietovaatimusta kohti. Hinnan ja massan osalta arvot summattiin yhteen, ja muodostettiin alustavat kustannus- ja painoarvioinnit. Muiden taustatietovaatimusten osalta laskettiin ratkaisumuunnelman saama pistekeskisarvo.

Taustatietotaulukon tietoja käytettiin suoraan soveltuvin osin varsinaisen pistearviointitaulukon täyttämiseen. Taustatietotaulukko ja pistearviointitaulukko on esitelty

tarkemmin liitteessä XI. Liitteestä koottiin tärkeimmät tiedot taulukkoon 7, joka sisältää ratkaisumuunnelmien saaneet pisteet eri arviointikriteerien kategorioissa.

Taulukko 7. Pistearvioinnin tulokset eri arviointikriteerien kategorioissa

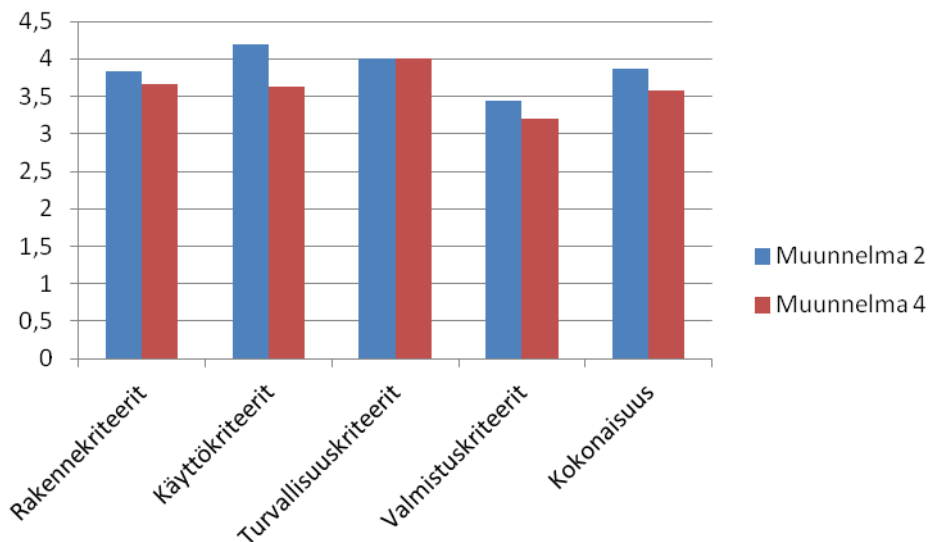
| Ratkaisu- muunnelma | Rakenne- kriteerit | Käyttö- kriteerit | Turvallisuus- kriteerit | Valmistus- kriteerit | Yhteensä |
|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------|----------|
| 1 | 20 % | 27 % | 12 % | 12 % | 71 % |
| 2 | 23 % | 30 % | 12 % | 14 % | 79 % |
| 3 | 20 % | 26 % | 12 % | 12 % | 70 % |
| Ideaalitapaus | 30 % | 35 % | 15 % | 20 % | 100% |

Taulukosta huomataan, että ratkaisumuunnelma 2 sai joka osa-alueella vähintään yhtä paljon pisteitä kuin muut ratkaisumuunnelmat. Muunnelmat 1 ja 3 olivat myös kehityskelpoisia, joten niistä päätettiin yhdistää parhaat puolet kilpailevan muunnelman muodostamiseksi. Parhaat ja heikoimmat puolet saatiin selville tekemällä ratkaisumuunnelmille 1 ja 3 arvoprofiilit, sekä vertailemalla osatoimintojen ratkaisuvaihtoehtoja tarkemmin. Nyt osatoimintojen ratkaisuvaihtoehtojen vertailu suoritettiin vielä muita arviointeja karkeammalla asteikolla. Liitteen XI taulukossa ratkaisuille annetut pisteet muunnettiin arvoasteikolla 0-2, jonka jälkeen kunkin ratkaisun saamat pisteet summattiin yhteen. Näin saatiin eriteltyä kunkin osatoiminnon parhailta vaikuttavat ratkaisut. Ratkaisumuunnelmien 1 ja 3 arvoprofiili ja osatoimintojen vertailutaulukko on esitelty tarkemmin liitteessä XII.

Arvoprofiilista tärkeimmäksi tulokseksi saatiin se, että kumpikaan ratkaisu ei erotu merkittävästi edukseen. Osatoimintojen vertailutaulukko puolestaan osoittaa, että eniten kannatusta saaneet ratkaisut ovat saaneet myös pääosin eniten pisteitä. Koska liitteen XI taustatietotaulukossa arvioitu ratkaisumuunnelmien toimivuus oli parempi ratkaisumuunnelmalla 1, valittiin se paranneltavaksi ratkaisumuunnelmaksi. Arvoprofiilin ja osatoimintojen vertailutaulukon perusteella vaihdettiin köyden ohjaukseen ohjaustapit kiinteällä asennolla suppilomaisen holkin tilalle. Vastuksen säätö päätettiin toteuttaa säätöruuvilla vivun sijaan, ja kiinnitys puuhun kuormaliinalla. Näin yhdistelemällä saatiin kehiteltyä ratkaisumuunnelma 4.

Ratkaisumuunnelmalle 4 tehtiin uusi pistearviointi samoilla kriteereillä ja painotuksilla kuin aikaisemmille muunnelmille. Lopputuloksena saatiin kaksi ratkaisumuunnelmaa, joiden

pistekeskiarvot eri arviointikriteerien kategorioissa on esitelty kuvassa 8. Kuvan 8 tiedot on saatu muunnelmille tehdyistä pistearvioista. Muunnelman 4 pistearviointi, sekä muunnelmien 2 ja 4 taustatietotaulukko ja arvoprofiilit on esitelty tarkemmin liitteessä XIII. Arvoprofiilista nähdään, että muunnelmalla 2 ei ole selkeitä heikkoja kohtia. Toisaalta muunnelman 4 arvoprofiili on lähes yhtä tasainen, eikä kustannuksia lukuun ottamatta varsinaisia heikkouksia löydy.



Kuva 8. Kehiteltävien ratkaisumuunnelmien pistekeskiarvot eri arviointikriteerien kategorioissa.

Kuvasta nähdään, että suuremman painotusarvon kriteerien kategorioissa etenkin muunnelma 2 on saanut hyvät pisteet. Valmistuksen osalta puolestaan molemmissa muunnelmissa on parantamisen varaa.

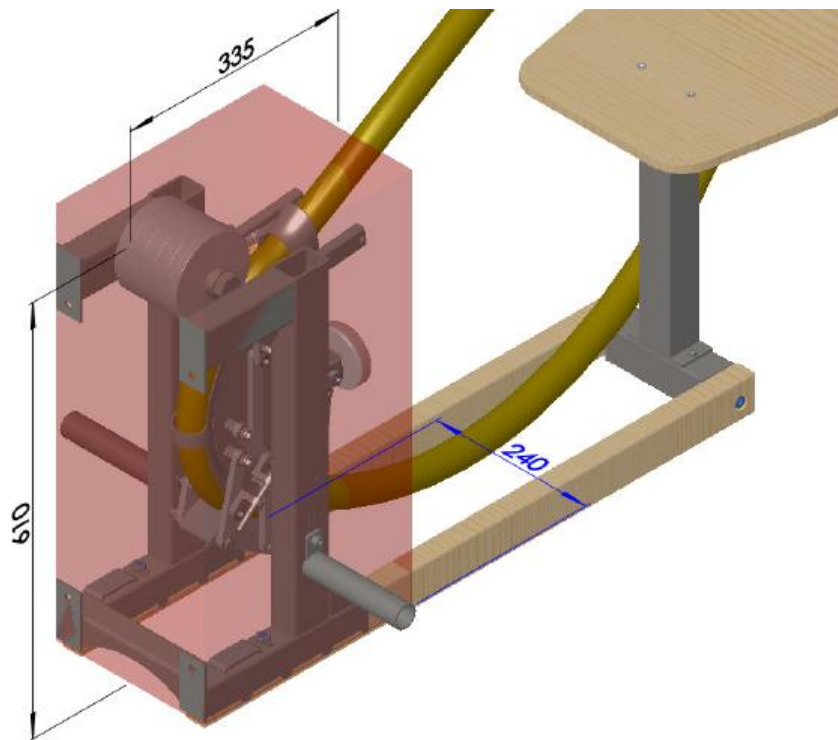
3.2 Ratkaisumuunnelmien kehittäminen

Koska esisuunnitteluvaiheen lopputuloksena saadut ratkaisumuunnelmat 2 ja 4 eivät eroa merkittävästi toisistaan ja molemmat vaikuttavat toteuttamiskelpoisilta, jatketaan niiden kehittelyä edelleen kunnes lopullisen muunnelman valintaan on saatu riittävä määrä konkreettista tietoa. Tämän työn osalta kehittäminen rajoitetaan 3D-mallien ja rakenteiden luomiseen, sekä materiaalien alustavaan valintaan. Kehittämisestä jätetään siis pois viimeistelyvaiheeseen kuuluvat osien valmistuspiirustusten sekä asennusohjeiden laadinta. Tarkempi kustannusarvio, vika- ja vaikutusanalyysi, mekanismin toiminnan kannalta olennaisimpien osien tarkempi mitoitus, sekä valmistusystävällisyystarkastelu tehdään vain

lopulliselle viimeistelyvaiheeseen valitulle ratkaisumuunnelmalle, joka esitellään tarkemmin kappaleessa 3.3.

3.2.1 Muunnelma 2

Ratkaisumuunnelman 2 toiminta perustuu kouruun, jota pitkin köysi liukuu vedettäessä. Laitteen rakennetta on esitelty karkeasti kuvassa 9. Kuvaan on mallinnettu myös kourumekanismin kuljetustilan tarve.

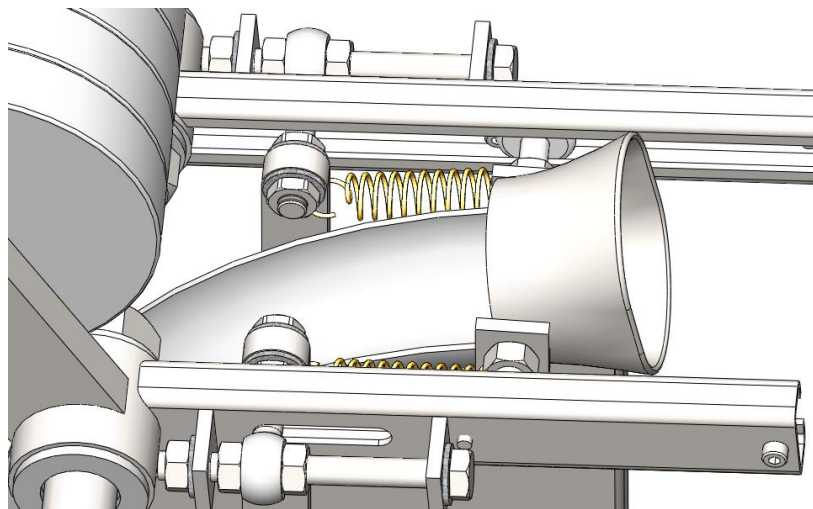


Kuva 9. Ratkaisumuunnelma 2.

Kourun päät on muotoiltu suppilomaisiksi ohjaamaan köysi kouruun sisään ja siitä ulos. Lisäksi kouru on keskeltä putkimainen, jotta köysi ei pääse putoamaan kourusta. Koska tässä ratkaisumuunnelmassa köyden liikkeen vastustaminen tapahtuu painamalla jarrukenkää köyttä vasten, haluttiin jarruun riittävästi säätömahdollisuuksia. Tämä johtuu siitä, että hammputköyden ja jarrupalan materiaalin välisistä kitkaominaisuuksista ei ollut tietoa saatavilla. Jarrupala sijoitettiin siten, että se painaa köyttä samalla myös kourua vasten. Tällöin säästytään yhden erillisen jarrupinnan valmistamiselta. Jarrun ongelmana arvioitiin olevan lepo- ja liikekitka välinen ero. Koska lepokitka on liikekitkaa suurempi, tulisi jarrumekanismin kompensoida liikkeellelähtö jarrutusvoiman kasvamisella. Samalla

tavoitteena oli luoda itsesäätyvä mekanismi, joka jarruttaa liikettä sitä suuremmalla voimalla, mitä suuremmalla voimalla köyttä vedetään. Riskinä tässä puolestaan on se, että köysi jumittuu täysin kun sitä yrittää vetää, mikäli kitkavoima on liian suuri. Myös tämän takia säätöominaisuuksien riittävydestä haluttiin olla varmoja.

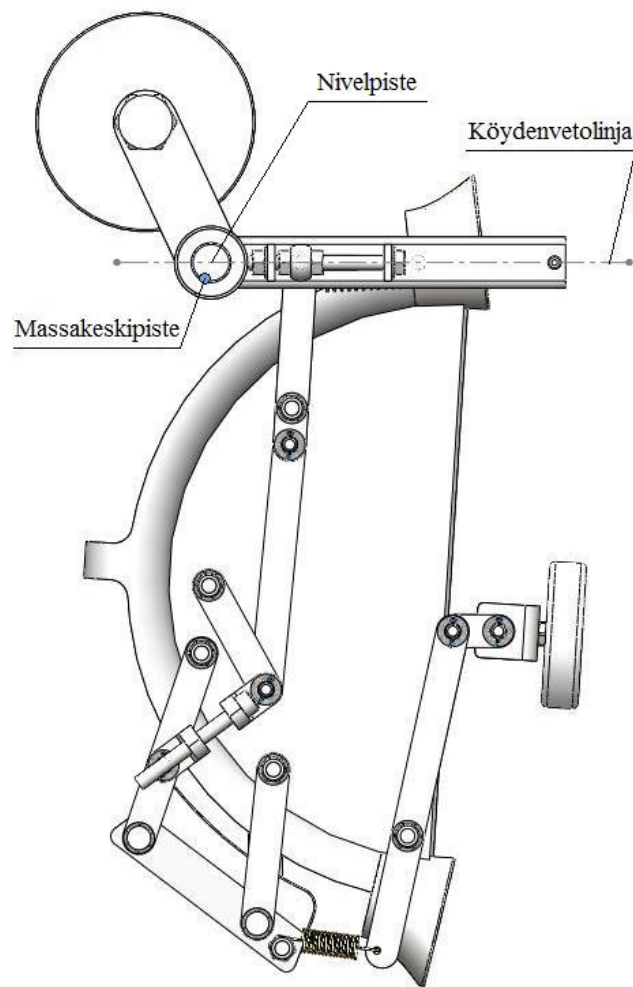
Jarrun toimintaan liittyviä säätöjä suunniteltiin jarrukengän etäisyyden säätämiseksi köydestä, sekä köydenvetovoiman ja jarruvoiman välisen suhteen säätämiseksi. Mekanismin palautumiseen vedon lakatessa suunniteltiin säätömahdollisuus, joka on esitelty kuvassa 10. Kuvasta nähdään kuinka kourumekanismi liikkuu kiskoillaan, ja säädettävissä oleva palautusjousi palauttaa kourun vedon lakattua takaisin vasempaan laitaan. Kiskoon asennettavat ruuvit estävät kourumekanismia tipahtamasta kiskoilta ja määrittelevät sille liikerajat. Sama mekanismi säätelee myös köydenvetovoiman ja jarruvoiman välistä suhdetta, sillä kourumekanismin liike kiskoilla on suunniteltu suoraan verrannolliseksi jarrutuspalan liikkeeseen. Tämä mekanismi ei kuitenkaan takaa, että saavutettava säätöalue on halutulla voimakkuusalueella. Siispä varmuuden vuoksi lisättiin jarrukenkään suoraan vivun kautta vaikuttava portaattomasti säädettävä säätöjousi, jonka avulla jarruvoimaa voidaan säätää.



Kuva 10. Kourumekanismin liikkuminen kiskoilla ja palautusmekanismi.

Mekanismi on nivelöity siten, että köyden ulostuloaukko kääntyy köyden vetosuuntaa kohden. Tämä vaatii nivelen sijoittamista kuvan 11 osoittamalle linjalle, sekä kourumekanismin painopisteen sijaitsemista lähellä nivelpistettä. Massakeskipisteen sijainti linjassa suoraan nivelpisteen alapuolella ei riitä, sillä laite tulee voida kiinnittää myös puuhun siten että veto tapahtuu pystysuunnassa alaspäin. Kuvasta 11 nähdään että massakeskipiste on

saatu riittävän lähelle massakeskipistettä, jotta mekanismin voidaan arvella käyttäytyvän halutulla tavalla. Tämä on kuitenkin vaatinut vastapainojen käyttöä, jotka lisäävät materiaali- ja valmistuskustannuksia. Lisäksi massakeskipisteen saavuttamiseksi ja rakennetta keventämään vivuston materiaalina on käytetty alumiinia. Myös alumiinin käytöstä aiheutuu lisää materiaalikustannuksia rakenteeseen. Kuvasta nähdään myös aiemmin mainittu jarrukengän etäisyyden säätömahdollisuus, joka on toteutettu yhden mekanismin vivun pituuden säätömahdollisuuden avulla. Lisäksi kuvasta on nähtävissä aiemmin mainittu jarrutehon säätömahdollisuus säätöruuvilla.

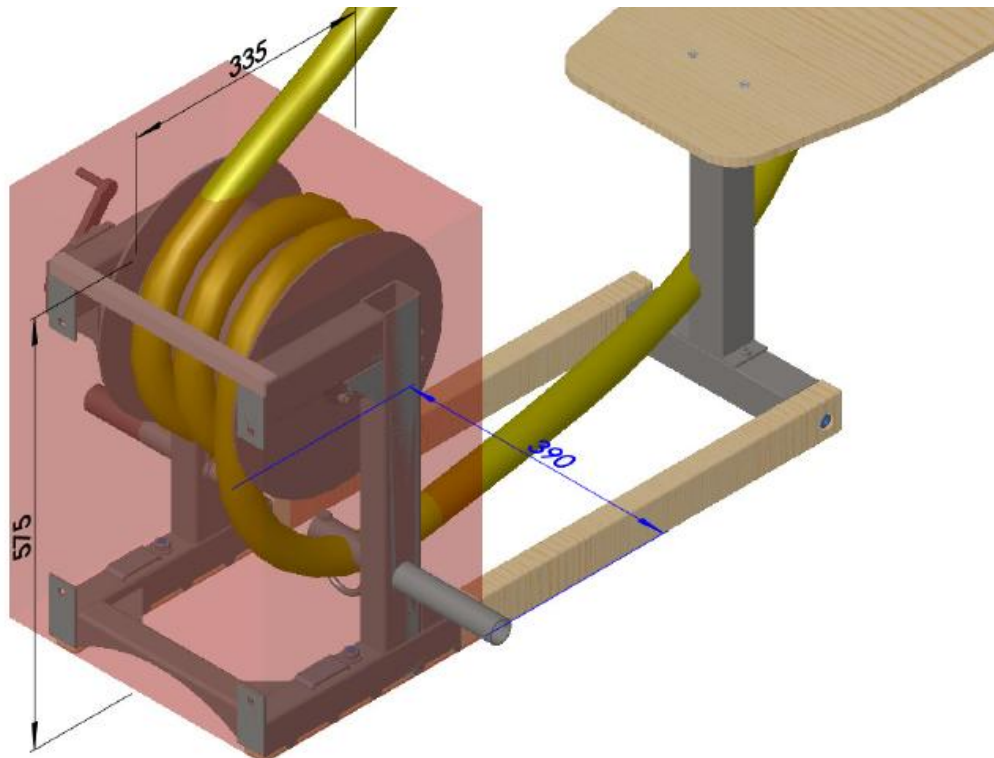


Kuva 11. Kouruun perustuvan köydenohjauksen vaatima linja nivelöinnille, sekä nivelpisteen ja massakeskipisteen sijainti.

3.2.2 Muunnelma 4

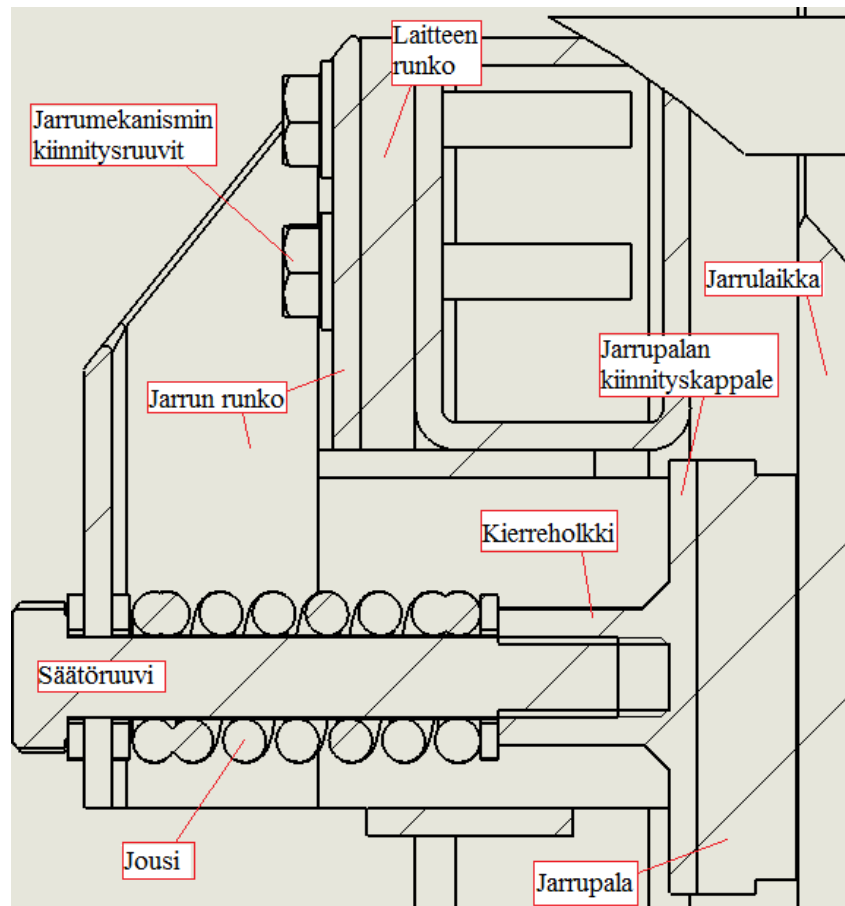
Ratkaisumuunnelman 4 toiminta perustuu pyörivään rumpuun, jonka ympärille köysi on kierretty. Köysi ei luista rumpun ympärillä kitkavoiman ansiosta. Rumpu on laakeroitu

kiinteästi runkoon kiinnitettävälle akselille laippalaakereiden avulla. Kuvassa 12 on esitelty yleiskuva laitteen rakenteesta, sekä mekanismin ja rungon kuljetustilan tarve.



Kuva 12. Ratkaisumuunnelma 4

Köyttä jarruttamaan alun perin suunniteltu polkupyörän levyjarru jätettiin pois kustannussyistä. Sen sijaan rumpuun kiinnitettävä henkilöauton jarrulaikka osoittautui edulliseksi ja saatavuudeltaan varmaksi vaihtoehdoksi. Sopiva henkilöauton jarrupala, jota painetaan jarrulaikkaa vasten, on niin ikään edullinen ja helposti saatavissa. Jarrun säätöön suunniteltiin ruuvattava portaaton säätö. Jarrulaikassa mahdollisesti olevien epätasaisuuksien ja jarrulaikan vinouden vuoksi jarrupalaa painetaan jarrulaikkaa vasten jousen välityksellä. Näin mahdollisesti rummun asennon mukaan vaihtelevaa jarrutusvoimaa saadaan tasattua ja vältetään jarrun äkilliseltä jumiutumiselta. Jarrun ja rummun väliin helposti asennus- ja valmistusvaiheissa syntyviä kulmaeroja voidaan säätää jarrumekanismin kiinnitysruuvien avulla. Yksinkertaisen toimintaperiaatteen vuoksi säätömahdollisuuksia ei tarvita ruuvien lisäksi. Myöskään lepo- ja liikekitkan välistä eroa ei tässä muunnelmassa nähty tarpeelliseksi ryhtyä kompensoimaan mekaanisilla ratkaisuilla, sillä niiden arvioidaan olevan pieniä. Rumpu saatetaan liikkeelle voimakkaammalla vedolla, jonka jälkeen vastus kevenee hieman. Jarrumekanismi on esitetty tarkemmin rakenteesta otetussa leikkauskuvassa 13.



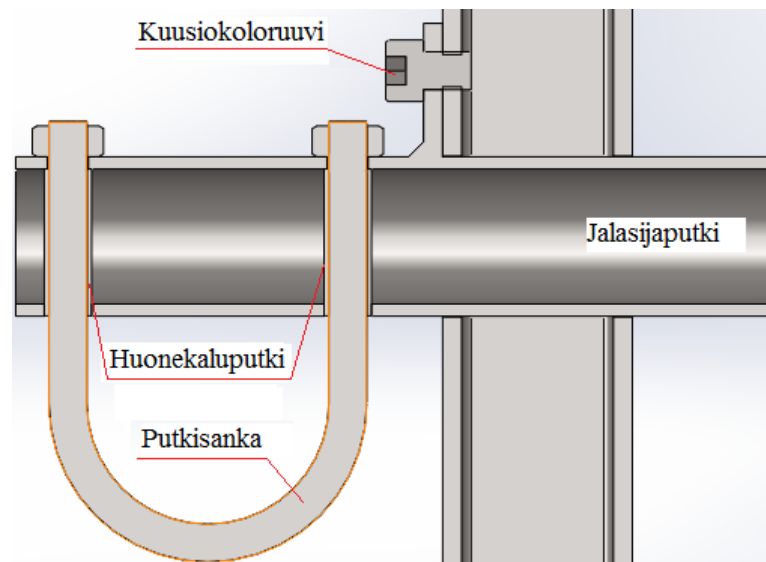
Kuva 13. Ratkaisumuunnelman 4 jarrumekanismit.

Kuvassa esitellyn jarrumekanismin jarrupalan kiinnityskappaleeseen on hitsattu kiinni kierteitetty holkki, johon säätöruuvi kiinnittyy. Jousi on sijoitettu holkin ja jarrun rungon väliin. Laitetta kootessa jarru kootaan ennen rumpua, jonka jälkeen rumpu asetetaan siten että jarrulaikka koskettaa kevyesti jarrupalaa. Jarrua asennettaessa voidaan säätää jousen haluttu maksimivoima jousen puristumaa säätämällä. Tässä tapauksessa jousivoima säädetään kappaleessa 3.3.1.1 määriteltyyn asentoon.

Jarruvoimaa lisättäessä ruuvia ikään kuin avataan, jolloin jarrupala kiristyy jarrulaikkaa vasten. Jousivoima pyrkii avaamaan ruuviliitosta, joten jousi avustaa jarruvoiman lisäämisessä kunnes jousen maksimivoima saavutetaan. Jarruvoiman ollessa jousivoimaa pienempi, suuntautuu ruuvien kierteissä oleva voima jousivoimaa vasten. Kun jarruvoimaa lisätään edelleen, saavuttaa jousi maksimivoimansa. Tällöin syntyy tilanne, jossa jousivoima on yhtä suuri kuin jarruvoima. Tässä tilanteessa ruuvissa ei vaikuta voimaa, joten säätöruuvi pyörii periaatteessa vapaasti. Vastusta säädettyä suuremmalle säätöruuvia siis avataan ja

säätöruuvi tuntuu löystyvän. Suunniteltu maksimijarruteho saavutetaan kun säätöruuvi löystyy vastuksettomaksi. Tästä suuremmalle vastusta ei suunnitella säädettäväksi. Rakennetta ei myöskään suunnitella kestäämään merkittäviä ylikuormituksia.

Jotta rumpuratkaisu toimisi halutulla tavalla, on köysi ohjattava yhdeltä laidalta rummun ympärille ja toiselta pois. Köyden ohjaus rummun ympärille toteutetaan putkeen kiinnitettävällä lenkillä. Köyden ohjaukseen pois rummulta riittäväksi arvioitiin käyttäjän suuntaama vetoliike. Ylimääräinen ohjuri rajoittaisi köydenvetokulmaa ja aiheuttaisi ylimääräisen kitkapinnan, jolloin siitä arvioitiin olevan enemmän haittaa liikkeen jouhevuuteen kuin hyötyä köyden ohjaukseen. Köyttä rummun ympärille ohjaavan ohjurin rakenne on esitelty tarkemmin kuvassa 14.



Kuva 14. Köyttä rummun ympärille ohjaava ohjuri.

Köysi kulkee putkisangan ja putken välistä, jolloin se ei ole kosketuksissa yhdenkään terävän särmän kanssa. Putkisanka on oltava irrotettavissa, jotta jatkuva köysi saadaan ohjuriin. Tämä on toteutettu kiinnittämällä putkisanka mutterien avulla paksumpaan putkeen, joka lävistää laitteen runkopalkin ja toimii samalla jalansijana. Jalansijaputken asema varmistetaan kuusiokoloruuvilla. Putkisangalle on hitsattu pätkät ohutta huonekaluputkea, jotka mahdollistavat sangan kiristämisen mutterien avulla. Jalansijaputkessa on siis alapuolella huonekaluputken kokoiset reiät. Yläpuolella sen sijaan jalansijaputken reiät lävistävät vain putkisangan kierteitettyt päät, huonekaluputkien kiristyessä jalansijaputken sisäpinnalle.

3.3 Lopullinen valinta

Viimeistelyvaiheeseen valitun ratkaisumuunnelman esittelemättä oleva rakenne on esitelty tarkemmin kappaleessa 3.3.1. Lopulliselle rakenteelle tehty valmistusystävällisyyden tarkastelu on puolestaan esitelty kappaleessa 3.3.2, valitut materiaalit kappaleessa 3.3.3, ja vika- ja vaikutusanalyysi kappaleessa 3.3.4. Tämän työn osalta lopullisen ratkaisumuunnelman valitsemiseksi ei tarvittu erillistä pistearviointia, sillä lupaavampi ratkaisumuunnelma selvisi vaihtoehtoja vertailemalla.

Ratkaisumuunnelmaa 2 kehiteltäessä alkoi pikkuhiljaa selvitä, että siihen liittyy monia epävarmuustekijöitä. Suurin epävarmuustekijä on vipumeکانismin toimiminen. Ilman toimivaa simulointimallia on mekanismin toimivuus vain valistuneiden arvailujen varassa. Simulointimallin tekeminen puolestaan vaatisi huomattavan määrän aikaa ja asiaan perehtymistä, joten se ei tule kysymykseen tässä tapauksessa. Vaikka kaikki säätömahdollisuudet olisivat riittäviä laitteen toiminnan kannalta, olisi silti epävarmaa kestääkö köysi jatkuvaa liukumiskosketusta. Kulumisesta mahdollisesti aiheutuva lujisuuden heikkeneminen ja pinnan kitkaominaisuuksien muuttuminen voisivat tehdä laitteesta epämiellyttävän tai jopa vaarallisen käyttää. Lisäksi vipujen suuri määrä, monimutkainen geometria jarrupalassa, ja vastapainot tuottavat huomattavan määrän haasteita valmistusvaiheeseen, ja sitä kautta lisää kustannuksia. Vaikka koururatkaisusta olisi teoriassa mahdollista saada toimiva ja kevytrakenteinen, sulkee pelkät epävarmuustekijät sen pois viimeistelyvaiheesta.

Lopulliseksi valinnaksi päättyi siis ratkaisumuunnelma 4, jonka toimivuudesta ei suurempia epäilyksiä herännyt. Heikkouksina tässäkin rakenteessa ovat kokonaiskustannukset, jonka lisäksi laitteen massa on kehitysvaiheen jälkeen huomattavasti toivottua suurempi. Lisäksi rakenteen lujuudesta ei ole täyttä varmuutta, sillä erillistä lujuustarkastelua ei ole tehty. Lujuustarkasteluun ei kuitenkaan myöskään ole mielekästä perehtyä tässä yhteydessä.

3.3.1 Tärkeimpien komponenttien mitoitukset

Toiminnan ja kustannusten kannalta olennaisimpia mekanismin osia ovat laippalaakerit ja jarrussa käytettävä jousi. Muun rakenteen tulee kestää mekaaniset kuormitukset ja olla valmistettavuudeltaan hyviä ja mahdollisimman edullisia ja kevyitä. Koska lujuustarkasteluja ei rakenteelle erikseen tehdä, tarkastellaan tässä kappaleessa ainoastaan laakerien ja jousen mitoitusta.

3.3.1.1 Jarrun jousi

Jarrun jousen on pystyttävä tuottamaan suurimman halutun jarrutusvoiman suuruinen voima väsymättä. Lisäksi jousen suurimman puristuman ja lepopituuden on oltava sopivia, jotta rakenteen mitat säilyisivät järkevissä rajoissa.

Suurin vaatimuslistassa vaadittu köydenvetovoima oli 100 kg:aa vastaava voima. Laskuissa käytetään maksimivoimana tämän likiarvoa 1000 N. Suurinta köydenvetovastusta vastaava jarrutusvoima saadaan laskettua kitkakertoimen ja rummun mittojen perusteella. Rummun laakereissa pyörimistä vastustava kitka, ja köyden ohjurin aiheuttama kitka ovat vaikeasti määritettävissä, joten niitä ei huomioida suurinta vastusta laskettaessa. Kitkakerrointa alustavasti laitteeseen valittujen jarrupalan ja jarrulaikan välillä on myös mahdotonta tietää tarkkaan ilman testausta. Henkilöautoissa normaalisti käytettävien jarrupalojen kitkakertoimista on vähän tietoa saatavilla. Autourheilussa käytettävien jarrupalojen kitkakertoimiksi ovat eri valmistajat ilmoittaneet arvoja väliltä 0,5–0,7. Orthweinin (2004) teoksen perusteella jarrujen kitkakertoimet vaihtelevat myös tuolla alueella. Ottaen huomioon että valitut jarruosat ovat halpatuotantoa, valitaan kitkakertoimeksi 0,4.

Liitteessä XIV tarkemmin esitelyjen laskentojen perusteella suurin tarvittava jousivoima on 2500 N. Jouseksi valittiin ISO 10243 -standardin mukainen työkalujousi, jonka tärkeimmät tiedot on esitelty taulukossa 8.

Taulukko 8. Valitun puristusjousen tärkeimmät ominaisuudet. (Lesjöfors, 2008, s.59, 64)

| Ominaisuus | Symboli | Lukuarvo | Yksikkö |
|-------------------|------------------|----------|---------|
| Lepopituus | L_0 | 64 | mm |
| Suurin puristuma | ΔL | 23,1 | mm |
| Ulkohalkaisija | D_j | 25 | mm |
| Sisähalkaisija | d_j | 12,5 | mm |
| Jousivakio | k | 123 | N/mm |
| Suurin jousivoima | F_{\max} | 2841 | N |
| Materiaali | EN 10089 51 CrV4 | | |
| Standardi | ISO 10243 | | |
| Muuta | Voimaluokka 3 | | |

Jousen suurin puristuma rajoitetaan 20 mm:iin, jolloin suurin jousivoima rajoittuu arvoon 2460 N. Tätä vastaava köydenvetovoiman F_v vastus on 984 N, mikä vastaa 100,3 kg:n painoa.

3.3.1.2 Laippalaakeriyksiköt

Laakerien valinnan lähtökohtana oli toteuttaa laakerointi mahdollisimman edullisesti, luotettavasti ja helposti valmistettavuuden kannalta. Laakereista haluttiin myös huoltovapaat. Edullisimmat sopivat laakerityypit ovat yksirivisiä urakuulalaakereita, joten laakerin etsintä aloitettiin niistä. Laippalaakeriyksikön valintaa puoltaa se, että erillistä laakeripesää kansineen ei niiden kanssa tarvitse koneistaa, vaan pelkät reiät yksikön kiinnittämiseksi riittää. Samalla säästytään myös laakeripesän kokoon panemiselta.

Koska köyttä vedetään rummun toisesta laidasta laakerien ollessa kiinnitettynä rummun molempiin laitoihin, tulee yhden laakerin kestää köydenvedosta aiheutuva radiaalivoima. Lisäksi laakerien ja niiden kiinnikkeiden tulee kestää jarrutusvoima, joka pyrkii työntämään rumpua akselia pitkin. Aksiaalivoiman ottaa vastaan molemmat laakerit. Rummun pyörimisnopeus on käytössä niin hiljainen, ettei se aseta laakereille rajoituksia.

Laakerointiin valittiin Oy SKF Ab:n PFT 25 TF laippalaakeriyksikkö, jossa on YAR 205-2F -laakeri. Kuva ja tietoja laippalaakeriyksiköstä on esitelty liitteessä XV. Liitteestä nähdään heti, että laakerin radiaalinen kuormankestävyys riittää helposti tähän käyttötarkoitukseen, varmuuskertoimen ollessa noin 14. SKF:n mukaan aksiaalikuormituksen raja arvo taas riippuu lähinnä siitä, miten laakeri kiinnitetään akselille. Yleensä alustavasti valitun ratkaisun kaltaisen laakerin suurin sallittu aksiaalikuormitus on noin 20% dynaamisesta säteittäisvoimasta. Valitussa ratkaisussa käytetään karkaisematonta akselia, ja laakeri kiristetään akselille ruuvien avulla. (SKF, 2012 B.) 20% dynaamisesta radiaalivoimasta on 2800 N, suurimman jarrutusvoiman ollessa rajoitettu 2520 N:in suuruiseksi. Koska jarrutusvoima on lähellä laakerivalmistajan ilmoittamaa aksiaalikuormituksen raja-arvoa, lasketaan kiinnityksen riittävyys varmuuden vuoksi.

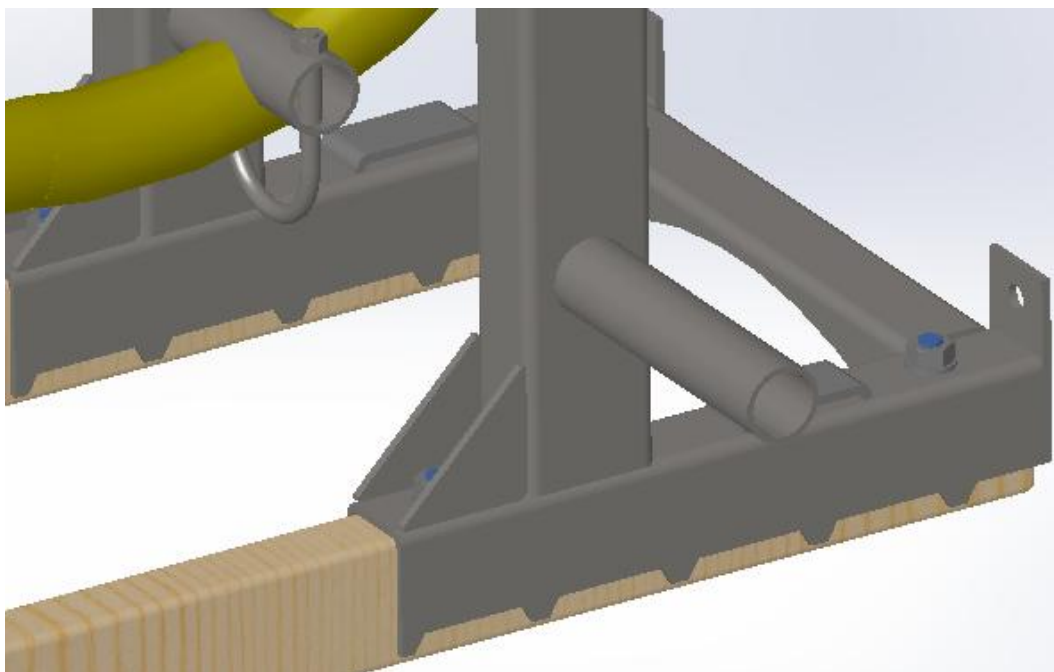
Ruuveja on laakereissa kaksi kummassakin, halkaisijaltaan 6 mm ja nousultaan 0,75 mm. Ruuvien suositeltu kiristysmomentti on 4 Nm. Ruuviliitoksen kierteissä vaikuttava kitkakerroin on tarkasti koneistettujen pintojen takia pienempi kuin ruuvien ja koneistamattoman akselin välinen kitkakerroin. Ruuviliitoksen kitkakertoimen oletetaan olevan noin 0,15, ja akselin ja ruuvien välisen kitkakertoimen noin 0,3. Liitteessä XVI tarkemmin esiteltyjen laskujen perusteella voidaan todeta, että kiristämällä laakerin kiinnitysruuvit ohjeen mukaan saadaan liitos pitämään varmuuskertoimella 2,028. Ruuvien

puristusjännitykseksi tulee ohjeen mukaisella kiinnityksellä 183,5 MPa, mikä on heikoimmallekin 3.6-lujuusluokan ruuville vielä sallituissa rajoissa. Vaikka laakerivalmistajan dokumenteista ei selviä ruuvien lujuusluokkaa, voidaan siis todeta ruuvien lujuuden riittävän.

3.3.1.3 Muu rakenne

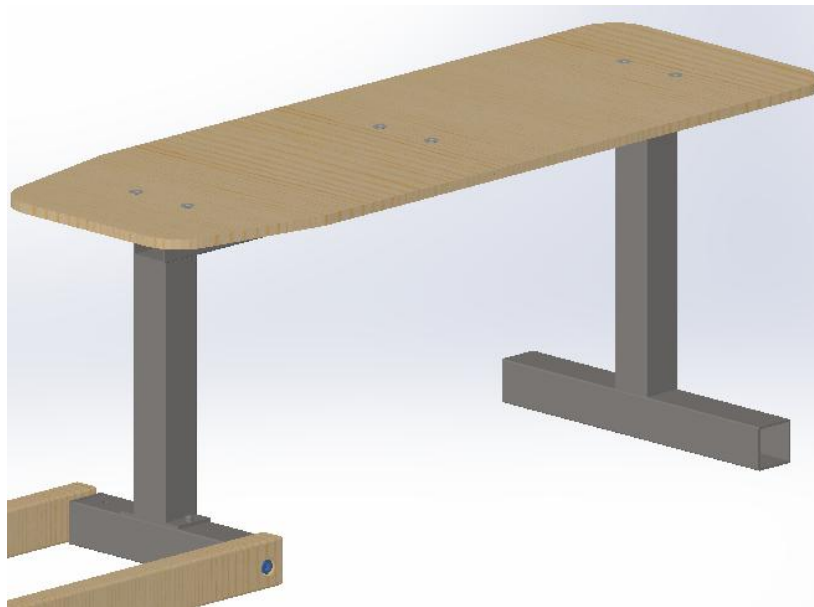
Aiemmin esitelty rumpu kiinnitetään rungon pystypalkkeihin putkisankojen avulla. Putkisankojen kiinnitys on laakerien kiinnitystä vahvempi, kun sangat kiristetään yleisesti suositeltujen kiristysmomenttiohjeiden mukaisesti. Akselin liukumisen mahdollisuutta putkisankojen läpi ei siis tarvitse erikseen tarkastella.

Runko kiinnitetään penkkiin puisten kiinnikkeiden avulla. Rungon päässä penkin kiinnikkeet asetetaan rungon alareunan vaakapalkkien alle, ja kiinnitetään ruuviliitoksilla. Runko voidaan myös kiinnittää suoraan seinään, tai puuhun. Puuhun kiinnitettäessä runko kiristetään puun ympärille kuormaliinojen avulla, mitä varten rungon alareunan palkkeihin on hitsattu kiinni lenkit kuormaliinan paikoittamista varten. Samojen palkkien alareunaan on muotoon leikattu hampaat, joiden avulla runko pureutuu kiinni puun kuoreen. Puuhun kiinnitettäessä laite asennetaan siis 90° kulmaan tavanomaiseen käyttöasentoon nähden, jolloin köyttä vedetään ylhäältä alaspäin. Rungon kiinnitysmahdollisuuksia on esitelty tarkemmin kuvassa 15.



Kuva 15. Rungon kiinnitysmahdollisuuksia.

Laitteen rakenteeseen kuuluu lisäksi penkki, jolla käyttäjä voi istua köyttä vetäessään. Mikäli käyttäjä seisoo köyttä vetäessään, on laite kiinnitettävä runko osastaan lattiaan. Tähän voidaan käyttää samoja kiinnityskohtia kuin penkin kiinnikkeiden kiinnittämiseksi runkoon, ja penkin kiinnikkeet voidaan pitää paikallaan. Toinen vaihtoehto on käyttää esimerkiksi kumista mattoa, joka levitetään kiinnikkeiden päälle. Käyttäjän seisoessa matolla jalat kiinnikkeiden vieressä, pysyy laite paikoillaan. Penkistä suunniteltiin pitkä, jotta köyttä vetäessä pystyy turvallisesti nojaamaan taaksepäin, eikä otteen livetessä tai häiriötilanteessa käyttäjä tipahda lattialle. Tämä tekee penkistä myös monikäyttöisemmän mahdollistaen käytön muuhunkin voimaharjoitteluun. Penkki on mahdollista kiinnittää laitteen puoleisesta jalastaan myös sivuun rungon keskilinjasta. Tällä säädöllä otetaan huomioon, että köysi tulee ulos rummun laidasta, eikä laitteen keskeltä. Laitteeseen suunniteltu penkki on esitelty kuvassa 16.



Kuva 16. Köydenvetolaitteen penkki.

3.3.2 Valitut materiaalit

Materiaalien valinnassa olennaisimmiksi materiaaliominaisuuksiksi nousivat riittävä lujuus, alhainen hinta ja hyvä valmistettavuus. Valmistettavuudella tarkoitettiin tässä tapauksessa koneistettavuutta ja hitsattavuutta. Muita kriteereitä materiaalien valintaan olivat keveys, ympäristöystävällisyys, kierrätettävyys, riittävä käyttöolosuhteiden kestävyys ja akustiset ominaisuudet.

Kaikki rakenteessa käytettävät rakenneteräksiset osat ovat S235-rakenneterästä. Kaikissa rakenteen kiinnitysosissa riittää sinkkipinnoite näissä olosuhteissa lukuun ottamatta osia, jotka liitetään muuhun rakenteeseen hitsaamalla. Näiden osien materiaaliksi valitaan EN 1.4301 ruostumaton teräs tai vastaava (kiinnitystarvikkeissa A2) paremman ja turvallisemman hitsattavuuden vuoksi.

Rungon pääasialliseksi rakennusmateriaaliksi valikoitui rakenneteräksinen putkipalkki. Materiaalin valintaa puolsivat erittäin hyvä lujuus, koneistettavuus, hitsattavuus ja kierrätettävyys. Lisäksi onnistuttiin löytämään yritys, jolta syntyy tuotantojätteenä pisimmillään 0,5 metrin pätkiä käytettävää rakenneteräsputkea. Yritys suostuu luovuttamaan tarvittavat rakenneteräsputket rungon valmistusta varten. Siispä myös alhainen hinta, ja ympäristöystävällisyys toteutuvat tässä materiaalivalinnassa. Materiaalin suurin heikkous on sen paino. Muita heikkouksia ovat kyseenalainen korroosionkesto, rujo ulkonäkö ja heikot akustiset ominaisuudet. Ulkonäköä voidaan parantaa ja korroosionkeston riittävyys varmistaa maalaamalla rakenneteräksiset osat. Akustisia ominaisuuksia voidaan tarvittaessa parantaa täyttämällä rakenteen ontelomaiset osat polyuretaanivaahdolla ennen ulkonäön viimeistelyä ja maalausta.

Myös rummussa käytetään rakennusmateriaalina pääasiassa rakenneterästä. Rummun akseli valikoitui laakerien mittojen perusteella, ja siihen sopii määrämittainen pätkä rakenneteräksistä H9-toleranssiluokan toimitustilan akselia. Laakerin sisähalkaisijan toleranssit huomioiden akselin ja laakerin väliin syntyy välyssovite, jonka väly on +5...+70 µm. Itse rummuksi valittiin SFS-EN 10216 standardin mukaista rakenneteräksistä rakenneputkea, jonka ulkohalkaisija on 193,7 mm ja seinämänvahvuus 4 mm. Pienempikin seinämänvahvuus olisi lujuuden ja hitsattavuuden puolesta riittävä, mutta saatavissa olevilla halkaisijoilla ei sopivaa toimittajaa löydetty. Halkaisija puolestaan on vastuksen suuruuteen olennaisesti vaikuttava mitta, joten sitä ei haluttu lähteä pienentämään. Rummun päädyt valmistetaan 3 mm:n paksuisesta rakenneteräksestä, ja rummun sisään tuleva väliseinä 4 mm:n paksuisesta rakenneteräksestä. Rummun pinnoittamiseen ei valittu vielä materiaalia, sillä sen tarpeellisuudesta ei ole tietoa. Hitsattu rumpu joka tapauksessa maalataan, ja testaamisen perusteella saadaan selville tarvitseeko rumpua pinnoittaa vai riittääkö kitka köyden ja rummun välillä ilman pinnoitusta. Mikäli köysi luistaa rummun päällä, voidaan rummun köyttä vasten tuleva kitkapinta pinnoittaa helposti esimerkiksi pitävällä teipillä.

Penkin taso valmistetaan koivuvanerista, sillä se on halpaa, kevyttä ja helppoa muokata. Lisäksi se on helppo verhoilla halutessaan, ja pelkällä maalaamisellakin tasosta saa kohtuullisen miellyttävän käyttöä ja katsoa. Penkin runko voidaan valmistaa joko ohutseinämäisemmästä rakenneteräksisestä neliöputkesta tai puutavarasta. Puun käyttöä puoltaa halpa hinta, helppo muokattavuus ja ympäristöystävällisyys. Mikäli ensimmäinen versio ei miellytä, säästytään suuremmilta taloudellisilta tappioilta ja penkki voidaan hävittää ympäristöystävällisesti. Metallinen runko puolestaan on kevyempi, lujempi ja maalattuna siistimmän näköinen. Koska suurempia epäilyksiä metallisen rungon toimivuudesta ei ole, valmistetaan penkin runko rakenneteräksisestä ohutseinämäisestä neliöputkesta.

Penkin ja rungon väliset kiinnikkeet valmistetaan puutavarasta, sillä niiden pituus täytyy varmistaa testaamalla. Kiinnikkeisiin ei myöskään synny suurta taivutusmomenttia, joten esimerkiksi männyn lujuus on riittävä. Käyttämällä puuta voidaan kiinnikkeistä valmistaa alustavasti ylipitkät, ja lyhentää testivaiheessa ne sopivan mittaisiksi.

3.3.3 Valmistus ja valmistusystävällisyys

Kuten aiemmin on mainittu, on köydenvetolaite suunniteltu valmistettavaksi tavanomaisilla valmistusmenetelmillä. Levyosien seinämänvahvuudet puolestaan on valittu siten, että levyt voidaan leikata yliopistolla käytössä olevilla lasereilla. Laserilla leikkaamalla levyosista saadaan niin tarkkoja, että erillistä koneistusta ei tarvita ja osat voidaan hitsata sellaisenaan rakenteeseen. Mikäli käytössä ei ole laserleikkausvälineitä, voi leikkaamiseen käyttää jotain muuta automaattista leikkausmenetelmää. Tällöin on kuitenkin huomioitava, että levyosat voivat tarvita viimeistelyvaiheen mikäli vaihtoehtoisen leikkausmenetelmän tarkkuus ei ole riittävä.

Laserleikkausta voidaan käyttää myös rungon alaosan muotoon leikattujen putkipalkkien valmistamiseen, sekä jalansijaputkien reikien leikkaamiseen. Mikäli nykyaikaisia leikkausmenetelmiä ei ole käytettävissä, voidaan muotojen tarkkuudesta tinkiä ja leikata kyseiset kappaleet myös esimerkiksi käsin polttoleikkaamalla. Tässä tapauksessa kappaleet vaativat kuitenkin muotojen viimeistelyä ja terävien särmien ja roiskeiden hiontaa. Jalansijaputkien reikien polttoleikkaaminen käsin ei ole suositeltavaa. Putkipalkkien ja muiden metritavaroiden katkaisemiseen suositellaan käyttämään vannesahaa tai vastaavaa.

Rummun päädyt on lisäksi oikaisukoneistettava esimerkiksi sorvissa rummun keskeisyyden ja laakerien oikeaoppisen asentamisen varmistamiseksi. Läpihitsausta varten viistettävät puoli V-railot voidaan valmistaa kulmahiomakoneella tai muulla teräksen hiontaan soveltumalla hiomakoneella. Teräsosat voidaan liittää yhteen tavanomaisilla hitsausmenetelmillä, kuten puikkohitsauskoneella, MIG/MAG -hitsauskoneella tai TIG-hitsauskoneella. Rungossa käytetään pääasiassa yhtä seinämänpaksuutta ja materiaalia, minkä ansiosta hitsauksessa ei tarvitse säätää hitsausparametreja ja kaikki hitsaukset voidaan tehdä samalla laitteella. Sama pätee myös rummun rakenteeseen. Penkissä käytetään sen sijaan ohutseinäisempää putkipalkkia, mutta senkin hitsaaminen onnistuu samalla laitteella materiaalin ollessa sama. Rakenteessa käytettävä rakenneteräs on erittäin helppoa hitsata.

Rummun pyörähdyssymmetriset osat voidaan hitsata akselinsa suhteen mihin asentoon tahansa, mikä helpottaa osien asemointia. Rummun väliseinään hitsausta varten viistettävä puoli V-railo helpottaa myös väliseinän asettamista rummun sisään. Väliseinä voidaan asemoida helposti rummun syvyysuunnassa jarrulaikan avulla. Tämä kuitenkin vaatii, että rummun jarrulaikan puoleinen pääty on oikaisukoneistettu, jotta jarrulaikka asemoituu suoraan suhteessa rumpuun.

Rakenteessa käytettävät ruuvit on oltava asennettavissa ja purettavissa yleisillä työkaluilla, joten niiden korvaaminen esimerkiksi niittiliitoksilla ei ole mielekästä. Lisäksi useimmat rakenteen ruuvikiinnitykset joutuvat sellaiseen kuormitukseen, mitä painonappikiinnitykset eivät kestäisi. Muotosulkeisten liitosten suunnittelu vaatisi aikaa, ja toteuttaminen olisi hankalaa tavanomaisilla työkaluilla. Ruuviliitoksia ei siis kannata korvata muilla asennusystävällisemmällä liitoksilla. Rakenteessa on käytetty ainoastaan M12, M10 ja M8 kokoisia kuusioruuveja, joiden lisäksi käytetyt kuusiokoloruuvit ovat M10 ja M8 kokoisia. Kierteitetyt reiät ovat kaikki M8-kokoisia, joten kierteitysteriä tarvitaan vain yksi. Kierteettömien ruvinreikien poraukseen tarvitaan siis kolmenlaisia teriä, jonka lisäksi kierrereialle tarvitaan neljäs terä alkureikä varten.

Rakenteen puuosien leikkaamiseen, hiomiseen ja poraamiseen tarvittavat työkonet ja -kalut löytyvät yliopiston puutekniikan laboratorion. Koska rungon ja penkin yhdistävät puuosat käsitellään ympäristöolojen kestävyuden parantamiseksi maalaamalla, tulee niiden valmistuksessa ottaa huomioon puun turpoaminen ja maalikerroksen paksuus. Rungon

teräsosien ja puukiinnikkeiden väliin täytyy siis jättää riittävästi välystä, jotta puuosat saadaan paikalleen pintakäsittelyjen jälkeen.

Jatkuva köysilenkki valmistetaan liittämällä määrämittaan katkaistun köyden päät pleissaamalla. Pleissaus on yleinen nimitys köyteen tehtävien liitosten valmistamiseen punomalla. Tässä tapauksessa katkaistun köyden päitä puretaan sopivalta matkalta, jonka jälkeen päät punotaan yhteen jatkuvan köyden muodostamiseksi. Liitos voidaan varmistaa esimerkiksi ompelemalla. Tarvittaessa purettavia ja uudelleen punottavia köyden osia voidaan ohentaa ennen uuden liitoksen tekemistä, jotta liitoskohdasta ei tule liian paksu muuhun köyteen verrattuna.

Mikäli laitteesta joudutaan irrottamaan runko esimerkiksi siirtämistä varten, hitsattiin runkoon levynpala, joka auttaa akselin paikoittamista uudelleen asennettaessa. Uudelleen asennettaessa rumpu voidaan asettaa takaisin paikalleen putkisankojen varaan jättäen sangat hieman löysälle, jolloin akseli pääsee liukumaan niiden varassa. Seuraavaksi akseli liu'utetaan paikoituslevyä vasten, ja lopuksi putkisangat kiristetään. Paikoituslevy nopeuttaa myös akselin ensiasennuksessa. Toisaalta tässä vaiheessa on huomioitava, että koska levy hitsataan kiinni, ei levyä välttämättä saada täysin tarkasti suunnitellulle paikalle. Rummun paikka akselilla onkin määriteltävä jarrun jousen pituuden perusteella ensiasennuksessa. Ensiasennuksessa siis akseli kiristetään paikalleen ensin, jonka jälkeen rumpu kiristetään akselille jarrun määräämälle paikalle. Lopuksi mahdollinen rummun vinous kompensoidaan säätämällä jarrun kulmaa kiinnitysruuviavulla, mikäli tarpeellista.

3.3.4 Vika- ja vaikutusanalyysi

Vika- ja vaikutusanalyysissä käsitellään vain luotettavuuden, turvallisuuden ja toiminnan kannalta tärkeimmät osat, joiden vikaantumista pidetään jossain määrin todennäköisempänä. Penkkiin kohdistuu lähinnä käyttäjän painosta aiheutuva kuormitus, eikä penkin ja rungon välisiin kiinnikkeisiin kohdistu suurta rasitusta. Siispä analyysi tehdään vain laitteen rungolle, jarrulle ja rumpumekanismille. Viimeistelyvaiheeseen valitulle ratkaisumuunnelmalle tehty vika- ja vaikutusanalyysi, ja toimenpiteet alla esitettyjen vikaantumismekanismien ehkäisemiseksi on esitelty tarkemmin liitteessä XVII.

Rakenteeseen aiheutuvat merkittävät kuormitukset johtuvat köydenvetovoimasta ja jarruvoimasta. Lisäksi kuormitusta voi aiheutua kiinnityksestä puuhun. Rungon osalta kriittisimmät kohdat ovat pikemminkin liitoksia kuin yksittäisiä osia. Suurimmat rasitukset kohdistuvat pystypalkkien juureen. Jarrun puolella pystypalkin juureen syntyy käytössä köydenvetovoimasta taivutusrasitusta yhteen suuntaan, ja jarruvoimasta taivutusrasitusta toiseen suuntaan, sekä vääntörasitusta yhteen suuntaan. Toinen kriittinen liitos on yläosan vaakapalkin ja pystypalkin liitos jarrun puolella. Jarruvoima aiheuttaa liitokseen taivutusrasitusta kahteen suuntaan, sekä vääntörasitusta yhteen suuntaan. Näistä jarrulaikan tangentin suuntainen voima, ja vääntörasitus eivät kuitenkaan ole merkittäviä lyhyehköjen vipuvarsien vuoksi. Puuhun kiinnittämisestä aiheutuvat kuormat rakenteeseen vaikuttavat rungon sivut toisiinsa alaosasta yhdistävään poikkipalkkiin, sekä pystypalkkien juureen. Käytännössä poikkipalkki liitoksineen ei ole yhtä kriittinen kuin pystypalkin juuren liitos, minkä vuoksi poikkipalkin liitosta ei käsitelty analyysissä.

Jarrun toiminnan kannalta suurin riski liittyy jarrupalan paikallaan pysymiseen. Itse rakenteen lujuuden voidaan arvioida kestävän jarruvoimasta aiheutuvat rasitukset, mutta ongelmia voi aiheutua stick-slip-ilmiöstä ja jarrukenkää kannattelevasta kuusioruuvista. Stick-slip-ilmiö aiheutuu lepo- ja liikekitkan välisestä erosta. Tässä tapauksessa rummun liikkeelle lähtemiseksi tarvitaan suurempi voima kuin rummun pitämiseksi liikkeellä. Siispä ennen liikkeellelähtöä ruuvia taivuttaa suurempi voima. Jarrun alkaessa luistaa ruuvia taivuttava voima pienenee, ja ruuvi oikenee. Tämä voi aiheuttaa jarruun tärinää rummun pyöriessä hitaasti, synnyttäen samalla ruuviin tykyttävää taivutusrasitusta. Ruuvien kierteet heikentävät ruuvien väsymiskestävyyttä toimimalla alkusärönä mahdolliselle särönkasvulle ja katkeamiselle.

Rummun suurimmat haasteet liittyvät valmistusvaiheeseen ja rummun keskeiseksi saamiseksi. Varsinaiset vikaantumismahdollisuudet käytön aikana liittyvät laakerin kiinnitykseen akselille ja köyden luistamiseen rummulla. Laakerin kiinnityksen akselilla todettiin riittävän normaaleissa olosuhteissa jousen maksimikuormalla. Mikäli asiakas tekee muutoksia rakenteeseen, tai maksimikuormituksen lisäksi köyttä vedetään hyvin suuressa kulmassa normaaliin vetosuuntaan nähden, voi rumpu kuitenkin liikahda akselilla. Käytännössä tästä ei aiheudu vaaraa käyttäjälle, eikä rumpu pääse liikkumaan kovin pitkää matkaa. Luistamisen seurauksena laite voi kuitenkin lakata toimimasta ja vaatia rummun

siirtämistä takaisin paikoilleen. Kuten aikaisemmin mainittiin, täytyy köyden luistaminen rummulla selvittää testausvaiheessa. Mikäli rumpu pinnoitetaan, täytyy varmistaa, ettei pinnoite kulu käytössä. Jos pinnoite kuitenkin kuluu käytössä, on se uusittava määrääjain ennen vaaratilanteiden syntyä tai vaihdettava toisenlaiseen.

Viimeisimpänä vikaantumismahdollisuutena on köyden katkeaminen. Itse köysi kestää normaaliolosuhteissa käytöstä aiheutuvan vedon helposti, mutta köyden päiden välinen liitos voi olla heikompi. Tutustumalla köyden päiden liittämiseen pleissaamalla, pitäisi liitoksesta kuitenkin olla mahdollista tehdä lähes yhtä vahva kuin muusta köydestä, ellei jopa vahvempi.

3.4 Kustannusarvio

Kuten aikaisemmin mainittiin, valmistetaan prototyyppi itse, minkä vuoksi kustannusarviossa huomioidaan ainoastaan kiinteät materiaalikustannukset. Kustannusarvioon ei myöskään lasketa niiden osien hankintahintaa, jotka saadaan ilmaiseksi tai on jo hankittu. Tällaisia osia ovat runkorakenteessa käytettävä putkipalkki, penkin ja rungon väliset puuosat, puuosien pintakäsittelyaineet sekä itse köysi. Taulukossa 9 on eritelty rakenteen eri alikokoonpanojen materiaalien yhteenlaskettuja massoja ja niiden perusteella arvioituja materiaalien kokonaiskustannuksia. Terästen kilohinnat on arvioitu Valtasen (2007, s. 896) esittämän teräksen kilohinnan perusteella huomioiden, että kyseessä on pieni erä ja materiaalit hankitaan edullisimmasta paikallisesta rakenneteräksiä myyvistä liikkeestä. Kiinnitystarvikkeista osa löytyy jo valmiiksi hankittuna, joten niiden keskimääräinen kilohinta on arvioitu hieman halvemmaksi paikallisten kiinnitystarvikkeita myyvien liikkeiden hintatasoon nähden.

Taulukko 9. Rakenteessa käytettävien rakennusmateriaalien arvioidut kustannukset

| Materiaali | Runko | Rumpu | Penkki | Penkin kiinnikkeet | Yht. paino | Hinta [€/kg] | Hinta [€] |
|---------------------|--------|--------|--------|--------------------|------------|--------------|-----------|
| S235 II-laatu | 3 kg | 6,9 kg | 0,3 kg | - | 10,2 kg | 1,6 | 16,3 |
| S235 I-laatu | - | 1,2 kg | 7,6 kg | - | 8,8 kg | 2,1 | 18,5 |
| Kiinnitystarvikkeet | 0,7 kg | 1,5 kg | 0,2 kg | 0,5 kg | 2,9 kg | 5 | 14,5 |

Rakenneteräksen II-laadulla tarkoitetaan tässä tapauksessa kaikkia muita teräsosia, paitsi penkissä käytettävää ohutseinämäistä neliöputkea ja akselin materiaalina käytettävää H9-toleranssin mukaista vedettyä pyörötankoa. Nämä puolestaan on esitetty taulukossa I-laatuna korkeamman kilohinnan vuoksi.

Taulukossa 6 esiteltyjen materiaalien, ja ilmaiseksi saatavien materiaalien lisäksi laitteen rakenteeseen tarvitaan kaksi laakeria, penkin vaneri, sekä jousi jarrua varten. Laakereiden hinta SKF:n (2012 C) mukaan on 41,84€ kappaleelta. Sodemannin (2012) mukaan jarrun jousi maksaa noin 6€. Sopivaa vaneria puolestaan saa yliopiston puutyökerholaiset ostettua 10€:n arkkihintaan. Lisäksi maalit metalliosien maalaukseen maksavat noin 20 €. Kokonaisuudessaan köydenvetolaitteen arvioiduiksi materiaalikustannuksiksi tulee yllä mainitut kustannukset summattuna noin 170€.

4 TULOSTEN TARKASTELO

Kuten aikaisemmin mainittiin, voidaan valmiin laitteen onnistuneisuutta arvioida vertaamalla sen toimivuutta ja ominaisuuksia suunnitteluvaiheessa tehtyyn vaatimuslistaan. Kappaleissa 4.1–4.4 arvioidaan lopullisen ratkaisumuunnelman 4 viimeisimmän kehitysversion toimivuus vahvuuksineen ja heikkouksineen kappaleessa 3.1.1 esitettyyn vaatimuslistaan verrattuna. Lopulliset arviot laitteen onnistumisesta voidaan tehdä vasta kun laite on valmistettu ja otettu käyttöön. Luotettavuuden ja huollettavuuden suhteen arvion tekeminen vaatii vieläkin enemmän aikaa. Tärkeintä on luonnollisesti asiakkaan, eli tässä tapauksessa työn teettäjän, tyytyväisyys laitteen toimintaan.

Verrattaessa toteutunutta ratkaisua vaatimuslistaan, on otettava huomioon myös vaatimuslistan mahdolliset vahvuudet ja heikkoudet. Osa vaatimuksista voi hyvinkin olla liian tiukkoja ja vaikeita tai jopa mahdottomia toteuttaa. Vaikka vaatimuslistaa kehitetään tuotekehityksen aikana, voi testaus- ja käyttövaiheessa ilmeneviä olennaisia asioita myös jäädä kirjaamatta listaan. Lisäksi on muistettava että vaikka ideoinnissa ja ratkaisuvaihtoehtojen valinnassa pyritään analyyttisiin ja objektiivisiin valintoihin, vaikuttaa suunnittelijan mielipiteet ja kokemukset tehtyihin päätöksiin vähintäänkin alitajunnassa.

Ideointivaiheessa tehdyn aivoriihen työryhmän jäsenet olivat myös samalla alalla toimivia henkilöitä, joten aivoriihessä suositeltava mahdollisimman laaja-alainen näkemys ei siltä osin toteutunut. Vaikka useimmat ryhmän jäsenet ovat työskennelleet useita vuosia keskenään, eikä ryhmässä ollut sisäisiä jännitteitä henkilöiden välillä, syntyi aivoriihessä melko vähän täysin uudenlaisia ideoita osatoimintojen toteuttamiseksi. Ryhmän keskustelu tuotti noin yhden ratkaisumuunnelman verran uusia ideoita, jotka lopulta kuitenkin pääosin jouduttiin

hylkäämään. Delfi-metodin soveltaminen sen sijaan ei tuottanut lisää uusia ideoita. Suurin osa ryhmän jäsenistä kannatti aivoriieessä uudenlaisena ideana syntynyttä ratkaisumallia, vaikka sen toimivuus lopulta osoittautuikin hyvin epävarmaksi. Vaikuttikin siltä että vaikka Delfi-metodissa jokaiselta ryhmän jäseneltä kysyttiin parhaita vaihtoehtoja osatoimintojen toteuttamiseksi henkilökohtaisesti, saattoi aivoriiehen aikana syntynyt ryhmän mielipide vaikuttaa jäsenien tekemiin lopullisiin henkilökohtaisiin valintoihin.

4.1 Rakenne

Rakenteelle asetettiin vaatimuksia mekanismin ja rungon äärimittojen ja enimmäismassan suhteen, sekä säädettävän vastuksen ja vetokulman suhteen. Lisäksi koko rakenteen luotettavuudelle asetettiin toivomus kahden vuoden vikaantumistodennäköisyydelle. Rungon ja mekanismin enimmäismitat ylittyivät syvyyden suhteen 35 mm. Toisaalta leveysmitta on sallituissa rajoissa, ja korkeusmitta yli 20 cm suurinta sallittua pienempi. Enimmäismittavaatimusten voidaankin katsoa toteutuneen varsin hyvin.

Rakenteen enimmäismassan suhteen tavoitteisiin ei aivan päästy. Vaadittu enimmäismassa mekanismille ja rungolle oli 20 kg, kun rungon, rummun ja köyden yhteenlasketuksi massaksi saatiin 33,1 kg. Suurin syy tähän oli kustannusten minimointi, ja toisaalta rakenteen optimoinnin puuttuminen. Osittain tavoitteen saavuttamisen epäonnistuminen johtui myös liian tiukoista tavoitteista. Jo pelkän köyden massa lopullisessa ratkaisussa on yli 6 kg, joten rungon ja rummun yhteismassan tavoitteeksi jäi alle 14 kg. Yhdistettynä lujuus- ja kustannusvaatimuksiin, ei kaikkia vaatimuksia pystytty toteuttamaan. Tarvittaessa rumpu ja köysi voidaan kuitenkin irrottaa rungosta siirrettäessä ongelmitta. Tällöin yksittäisistä siirreltävästä kokonaisuuksista painavimmaksi jää runko, jonka massa on 14,2 kg. Ylimääräisen asennus- ja purkutyön vuoksi rakenteen purkamista siirtämistä varten ei kuitenkaan ole mielekäästä tehdä, ellei osia jouduta kantamaan käsin pitkiä matkoja yksinään.

Säädettävän vastuksen suhteen tavoite saavutettiin, joskin suunnitelmien tarkkuudesta ei voida olla varmoja ennen testausta. Tämä johtuu siitä, että jarrun kitkakertoimen tarkkaa arvoa ei ollut saatavissa. Toisaalta tämä otettiin huomioon laskennoissa muun muassa jättämällä rummun laakerien ja köyden ohjurin aiheuttamat vastukset huomioimatta. Onkin todennäköisempää että suurin laitteeseen säädettävissä oleva vastus on suurempi kuin kappaleessa 3.3.1.1 laskettu arvo. Lisäksi laitteelle laskettu maksimivastus on huomattavasti

suurempi kuin normaalissa käytössä tarvittava vastus. Testausvaiheessa selviää myös, kuinka pienellä liikealueella säätö täytyy tehdä. Todennäköisesti vastuksen säätö osoittautuu hankalaksi tai mahdottomaksi säätövivun asennon perusteella. Säätö tapahtuukin käytännössä säätöruuvien kiristysmomenttia muuttamalla, minkä vuoksi säätöä varten olisi parasta kehittää momenttiavaimen kaltainen säätövipu. Tarkkoja köydenvetovastuksia selvittäessä olisi käytännöllistä luoda taulukko säätöruuvien kiristysmomentin ja köydenvetovastuksen väliselle yhteydelle, jonka avulla vastusta säädetään.

Laitteen vetokulman säädettävyys toteutuu vaatimuslistan asettamissa rajoissa. Vetokulmaa ei tarvitse säätää erikseen, vaan se säätyy automaattisesti vetosuuntaan. Vetokulman säädön tavoite täyttyi siis paremmin kuin mitä oli vaadittu. Luotettavuudelle asetetun toivomuksen toteutumista ei pystytä arvioimaan, sillä tilastomatemattista luotettavuusarviointia ei kuormitustietojen puuttumisen vuoksi pystytty tekemään.

4.2 Turvallisuus

Turvallisuuden osalta laitteelle ei asetettu tarkkoja vaatimuksia, vaan laitteesta haluttiin turvallinen ja ergonominen käyttää. Lisäksi kuluttajasuojalaki haluttiin ottaa huomioon mahdollisten vahinkojen vuoksi. Kuten kappaleessa 2.2.5 mainittiin, ei tämä prototyyppi kuitenkaan kuulu kuluttajasuojalain piiriin, sillä se luovutetaan työn teettäjälle muussa kuin elinkeinotoiminnassa. Toiveena oli myös kuntosalilaitteiden turvallisuusstandardin mukainen toiminta, mutta kyseisiin standardeihin ei päästy tutustumaan, eikä niiden oikeuksiin haluttu investoida.

Kuten vika- ja vaikutusanalyysissä todettiin, on mahdollisia henkilövahingon aiheuttamia vikaantumistapoja kaksi. Näistä molemmat kuitenkin arvioitiin epätodennäköisiksi, joten laitteen voidaan arvioida olevan turvallinen. Toisaalta vika- ja vaikutusanalyysissä on arvioitu vain todennäköisimmät yksittäiset vikaantumismekanismit. Ottaen huomioon että rakenteeseen kohdistuvat voimat eivät ole tarkkaan tiedossa, eikä analyysiä tehty jokaiselle rakenteen osalle, on mahdollista että jokin mahdollinen vikaantumistapa on jäänyt huomioimatta. Lisäksi vika- ja vaikutusanalyysistä tiedetään, että sen avulla ei voida ottaa huomioon useita samaan aikaan tapahtuvia vikaantumisia (Modarres ym. 1999, s. 249).

4.3 Käyttö

Laitteen käyttöön ja toiminnallisiin ominaisuuksiin liittyvistä vaatimuksista toteutuivat sellaisenaan jatkuvatoiminen käyttö, kiinnitysmahdollisuudet ja käyttöolosuhteiden kestävyys. Siirrettävyys ja purettavuus taas liittyvät läheisesti enimmäismittoihin ja -painoihin, joita käsiteltiin kappaleessa 4.1.

Laitteen melutaso selviää prototyypin testausvaiheessa, ja rakenteelle voidaan tehdä muutoksia, mikäli se on tarpeellista. Aikaisemmin mainittiin, että tarvittaessa rakenteen ontelomaisia osia voidaan täyttää esimerkiksi polyuretaanivaahdolla. Siten teräkselle ominaista kirkasta ääntä saadaan matalammaksi, ja onteloiden kaikuefekti poistettua. Mahdollisia melunlähteitä ovat jarrun liukukosketus ja köyden ohjuri ja köyden välinen liukukosketus. Mikäli jarru synnyttää voimakkaan äänen, voi rummun jarrun puoleinen pääty tarvita erillisen suojakotelon ääntä vaimentamaan. Köyden ohjuri voidaan tarvittaessa puolestaan eristää rungosta esimerkiksi kumisella pinnoitteella, joka vaimentaa metallipintojen välisestä kontaktista aiheutuvan äänen.

Huoltovapaan rakenteen toivomuksen toteutumista ei pystytä varmuudella takaamaan. Valitut laakerit eivät vaadi voitelua, ja ovat siis huoltovapaat. Käyttöttestien perusteella taas selviää, tarvitseeko rumpua pinnoittaa, ja kuluuko mahdollinen pinnoite käytössä. Testeissä selviää myös, kuinka nopeasti jarrupala ja -laikka kuluvat, ja kuinka paljon jarrupölyä syntyy. Mahdollinen jarrupölyongelma voidaan myös ratkaista rummun jarrun puoleisen päädyn suojakoteloinnilla. Toivomusta kulutusosien puuttumisesta ei pystytty toteuttamaan. Laakerien kestoikä ylittää kuitenkin laitteen käyttöiän, eikä edullisempia jarruosia tarvitse vaihtaa usein, joten suurempia käyttökustannuksia ei laitteella ole.

4.4 Valmistus

Valmistukseen liittyvistä toivomuksista ja vaatimuksista tärkein, eli kustannukset, pystyttiin pitämään halutulla tasolla hyvin. Lisäksi ideointivaiheessa arvioidut ratkaisumuunnelman kustannukset heittivät vain 15 € lopullisesta kustannusarviosta. Ulkonäkö puolestaan on mielipidekysymys, jonka arviointi vaatisi kyselytutkimuksen. Lisäksi rakenteeseen mahdollisesti tehtävät muutokset voivat vielä vaikuttaa rakenteen ulkonäköön. Koska kyseessä on prototyyppi, ei muotoiluun vielä panostettu, vaan keskityttiin laitteen toiminnalliseen puoleen. Rakenteesta on käytännössä kaikki osat kierrätettävissä tavalla tai

toisella. Laakerien, jousen ja kiinnitystarvikkeiden osalta järkevin kierrätysmuoto on uusiokäyttö. Puuosat voidaan hävittää polttamalla, kun valitaan ympäristöystävälliset pinnoitusaineet. Muut teräsosat voidaan sulattaa uudeksi raaka-aineeksi. Valmistusystävällisyyttä ja -menetelmiä käsiteltiin tarkemmin kappaleessa 3.3.3. Sen perusteella voidaan todeta, että laitteen valmistaminen tavanomaisilla menetelmillä onnistuu hyvin.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä suunniteltiin voimaharjoitteluun tarkoitettua köydenvetolaitteen toimiva prototyyppi käyttäen järjestelmällisen koneensuunnittelun menetelmää. Ideointivaiheessa sovellettiin aivoriittä ja Delfi-metodia, käyttäen ryhmän jäsenenä insinööritoimisto Etteplan Design Centerin Lappeenrannan toimipisteen työntekijöitä. Ideointivaiheen pohjalta valittuja ratkaisuvaihtoehtoja kehiteltiin eteenpäin, joista yksi ratkaisumuunnelma valittiin lopulliseksi kehityskohteeksi. Tätä ratkaisumuunnelmaa kehitettiin edelleen ottamalla huomioon valmistus- ja asennusystävällisyyden, käyttövarmuuden, turvallisuuden ja ympäristöystävällisyyden näkökulmat. Valmistus- ja asennusystävällisyys ja ympäristöystävällisyys otettiin huomioon suunnitteluvaiheessa tehdyillä teknisillä ratkaisuille ja materiaalivalinnoilla. Käyttövarmuus ja turvallisuus puolestaan huomioitiin vika- ja vaikutusanalyysin avulla. Laitteesta mitoitettiin toiminnan kannalta olennaisimmat osat, joita ovat rummun laakerit ja jarrun jousi. Muu rakenne suunniteltiin siten, että laitteen käyttö on turvallista, ja laite on mahdollisimman helppo valmistaa.

Suunnittelun tuloksena valmistui köydenvetolaitteen prototyyppi, jonka valmistuskustannukset ovat alle 200 €, ja joka on valmistettavissa tavanomaisilla konepajatyökaluilla. Laitteen kokonaismassa penkki ja penkin kiinnikkeet mukaan lukien on noin 44 kg, josta liikuteltavien osien - köyden, rungon ja rumpumeکانismin - osuus on noin 33 kg. Suunniteltu prototyyppi toteuttaa pääosin sille asetut vaatimukset hyvin. Rakenteelle alun perin suunniteltu enimmäismassa ylittyi toteutuneessa ratkaisussa, mutta toisaalta alkuperäinen vaatimus oli varsin tiukka suhteessa annettuun budjettiin. Suurin epävarmuustekijä on laitteen jarrun säädön toimivuus. Itse jarrun toiminta vaikuttaa hyvin yksinkertaiselta ja varmalta, mutta vastuksen säätäminen halutulle tasolle voi osoittautua hankalaksi. Pelkän suunnittelun perusteella vaikuttaa siltä, että vastuksen säätö ei onnistu

ilman momenttiavainta, mikä voi tehdä käytöstä hankalaa. Toisaalta tästä ei voida olla varmoja ennen kuin laite on valmistettu ja testattu. Lisäksi mikäli laitetta käyttää yksittäinen henkilö, ei vastusta välttämättä ole tarpeellista säätää kovinkaan usein. Mikäli oletukset säädön hankaluudesta osoittautuvat testatessa paikkaansa pitäviksi, voidaan säätöruuvien kiristysmomentin ja köydenvetovastuksen vastaavuuksista laatia taulukko säätämisen helpottamiseksi. Kokonaisuutena suunniteltu laite vaikuttaa toimivalta ja toteutuskelpoiselta, joten se täyttää tehtävänsä toiminnallisena prototyyppinä. Laitetta testaamalla voidaan selvittää suuremmat viat ja kehityskohteet, ja saada kuormitustietoja jatkokehitystä varten. Ennen prototyyppin valmistamista laitteen rakenteesta on tehtävä vielä osaluettelot, sekä koneistus-, hitsaus-, ja asennuspiirustukset. Myös lyhyet käyttöohjeet on tehtävä, mikäli laite annetaan sellaisen ulkopuolisen käyttäjän käyttöön, joka ei ymmärrä laitteen teknistä käyttäytymistä ja mahdollisia vaaratekijöitä.

5.1 Kehitysehdotukset laitteen tuotteistamiseksi

Mikäli laite haluttaisiin kaupalliseen levitykseen, vaatisi se kohtuullisen määrän tuotekehitystä. Ensimmäisenä olisi syytä tehdä markkinatutkimus kysynnän selvittämiseksi. Markkinatutkimuksen yhteydessä olisi selvitettävä minkä hintaisia laitteita kuluttajat olisivat valmiita ostamaan. Lisäksi olisi selvitettävä laitteen valmistamisen tarkat todelliset kustannukset ja tehtävä arvio siitä, millä keinoilla, ja kuinka paljon laitteen valmistuskustannuksia pystyttäisiin vähentämään. Muiden köydenvetolaitteita valmistavien yritysten patenttioikeudet Suomen ja mahdollisesti Euroopan alueella olisi selvitettävä, jotta tiedettäisiin onko laitetta oikeutta valmistaa. Mahdollisesti myös oman patenttihakemuksen tekeminen voisi tulla kyseeseen, mikäli vastaavasta laitteesta ei voimassaolevia patenteja ole.

Jos taloudellisia edellytyksiä laitteen myyntiin olisi, täytyisi tuotekehityksessä keskittyä ensimmäisenä rakenteen muotoiluun ja lujuustarkasteluun. Rakennetta voitaisiin mahdollisuuksien mukaan keventää ja materiaaleja vaihtaa edullisemmän, käyttövarmemman ja ulkonäöltään houkuttelevamman kokonaisuuden luomiseksi. Prototyyppiä testaamalla saataisiin selville laitteeseen kohdistuvat kuormitukset ja laitteesta mahdollisesti lähtevä melu. Samalla selviäisi muut mahdolliset ongelmat, joita ei vielä ole huomioitu, kuten staattinen sähkö. Myös jarruratkaisua täytyisi kehittää sellaiseksi, että vastuksen säätö onnistuu suuremmalle ja pienemmälle kätevästi, ja aikaisemmin käytetty vastus löytyy helposti.

Kehittelyssä tulisi myös ottaa huomioon, että myytäessä laitetta sitä koskevat kuluttajansuojalain säädökset. Olennaisimpana säädöksenä on tässä tapauksessa voimaharjoittelulaitteita koskevat standardit SFS-EN 957-1 ja SFS-EN 957-2. Näiden standardien lisäksi olisi perehdyttävä siihen, mitkä muut lait ja säädökset koskevat laitetta. Esimerkiksi kuluttajansuojalaki vaatii, että laitteella on CE-merkintä ennen kuin sen voi saattaa markkinoille.

Laitteen turvallisuus tulisi määritellä standardien mukaisten testien lisäksi luotettavuusanalyysin avulla. Vika- ja vaikutusanalyysi voitaisiin tehdä koko rakenteelle, ja sisällyttää siihen todennäköisyysnäkökulma. Vaihtoehtoisesti rakenteelle voitaisiin tehdä vikapuuanalyysi samanaikaisesti mahdollisesti sattuvien vikojen huomioimiseksi. Myös laitteen ergonomisuus olisi syytä tarkastaa. Mahdollisten vaarojen ja väärinkäyttöjen ehkäisemiseksi laitteesta täytyisi tehdä myös käyttöohjeet. Käyttöohjeissa tulisi myös opastaa laitteen kierrätys ja hävitys käytön jälkeen.

Myös laitteen huollettavuuteen olisi syytä paneutua. Laitteesta tulisi selvittää mitkä osat vaativat ajoittaista huoltamista ja tarkastamista. Lisäksi olisi selvitettävä huollettavien osien huoltovälit. Myös mahdollinen laitteen säätämisen tarve tulisi selvittää, ja mielellään poistaa mikäli mahdollista. Huoltoa vaativien osien tulisi olla helposti ja nopeasti käsiteltävissä ja vaihdettavissa. Näiden selvitysten perusteella laitteesta tulisi laatia huolto-ohjeet. Huolto-ohjeisiin voitaisiin sisällyttää korjausohjeita mahdollisia vikatilanteita varten sekä varaosaluettelo. Laitteelle voitaisiin tarjota myös huoltopalvelua.

Laitetta kehiteltäessä tulisi myös ottaa huomioon valmistusystävällisyys. Vaikka prototyypin suunnittelussa on pyritty huomioimaan valmistusystävällisyyden näkökulmat, on siinä pyritty siihen, että laite voidaan valmistaa varsin yksinkertaisilla menetelmillä ja laitteilla. Sen sijaan sarjatuotantotuotteen tapauksessa valmistusmenetelmät määräytyvät sarjakoon ja kannattavuuden mukaan, jolloin myös laitteen rakenne olisi mietittävä osittain uudestaan. Esimerkiksi nyt kierrätystavarana saatava runkopalkki olisi mahdollisesti syytä vaihtaa johonkin toiseen, ja rungon alaosan muotoon leikattu palkki voitaisiin korvata U-profiililla. Osa rungon muodoista voitaisiin mahdollisesti myös valmistaa esimerkiksi pyöreästä putkipalkista taivuttamalla hitsausliitoksen tekemisen välttämiseksi ja materiaalikustannusten pienentämiseksi.

LÄHTEET

Ashby, M. F. 2005. Materials Selection in Mechanical Design. Third edition. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. 603 s.

Billatos, S. B. 2002. Design Methodologies for the Environment. 4. luku teoksessa: Hundal, M. S. (toim.) Mechanical Life Cycle Handbook – Good Environmental Design and Manufacturing. New York: Marcel Dekker. s. 81-98.

Birolini, A. 1999. Reliability Engineering - Theory and Practice. Third Edition. Berlin: Springer-Verlag. 502 s.

Boothroyd, G., Dewhurst, P. & Knight, W. 2002. Product Design for Manufacture and Assembly. Second Edition. Boca Raton: CRC Press. 698 s.

Cross, N. 2008. Engineering Design Methods - Strategies for Product Design. Fourth Edition. Chichester: John Wiley & Sons. 214 s.

Eskelinen, H. & Eskelinen, P. 2003. Microwave Components Mechanics. Norwood: Artech House. 368 s.

HealthStyles Exercise Equipment. Brands. [verkkosivusto]. [Viitattu 6.11.2012]. Saatavissa: <http://www.healthstylesexercise.com/shop/marpo-kinetics/>

Hipeq. Rope Machines. [Hipeq:n www-sivuilla]. [Viitattu 6.11.2012]. Saatavissa: <http://www.hipeq.com/6-rope-climbers>

Hundal, M. S. 2002. Introduction to Design for the Environment and Life Cycle Engineering. 1. luku teoksessa: Hundal, M. S. (toim.) Mechanical Life Cycle Handbook – Good Environmental Design and Manufacturing. New York: Marcel Dekker. s. 1-26.

L 22.07.2011/920. Kuluttajaturvallisuuslaki.

Lesjöfors. 2008. Jousiluettelo #13, Gas & Stock Prings. Tukholma: Brommatryck & Brolins AB, 226 s.

Luttropp, C. 2002. Ecodesign with Focus on Product Structures. 7. luku teoksessa: Hundal, M. S. (toim.) Mechanical Life Cycle Handbook – Good Environmental Design and Manufacturing. New York: Marcel Dekker. s. 145-176.

Marpo Kinetics. Products. [Marpo Kineticsin www-sivuilla]. [Viitattu 6.11.2012]. Saatavissa: <http://www.marpokinetics.com/products.html>

Modarres, M. Kaminskiy, M. & Krivtsov, V. 1999. Reliability Engineering and Risk Analysis - A Practical Guide. New York: Marcel Dekker. 542 s.

Norton, R. 2006. Machine Design - An Integrated Approach, Third Edition. Upper Saddle River: Pearson Education. 984 s.

Norton, R. 2004. Design of Machinery - An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines. Third Edition. New York: McGraw-Hill. 858 s.

Orthwein, W. C. 2004. Clutches and Brakes - Design and Selection. Second Edition. New York: Marcel Dekker. 330 s.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K. H. 2007. Engineering Design - A systematic Approach. Translated from German and edited by Ken Wallace & Lucienne Blessing. Third Edition. London: Springer. 617 s.

Pahl, G. & Beitz, W. 1990. Koneensuunnitteluoppi. Suom. Uolevi Konttinen. Helsinki: Suomen Metalli-, Kone- ja Sähköteknisen Teollisuuden Keskusliitto, MET. 608 s.

SKF. 2012 A. Product data. [Oy SKF Ab:n www-sivuilla]. [Viitattu 16.11.2012]. Saatavissa: <http://www.skf.com/skf/productcatalogue/Forwarder?action=PPP&lang=en&imperial=false&windowName=null&perfid=103002&prodid=103002205>

SKF. 2012 B. Y-bearings. [Oy SKF Ab:n www-sivuilla]. [Viitattu 14.11.2012]. Saatavissa: http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=en&newlink=1_12_17

SKF. 2012 C. Laakerihinnasto. [Oy SKF Ab:n www-sivuilla]. Päivitetty 10.7.2012. [Viitattu 4.12.2012]. Saatavissa: <http://www.skf.com/skf/news/html/popup.jsp?lang=fi&contentId=902762&updateProfile Locale=true>

Sodemann. 2012. ISO Työkalujouset. [Sodemann industrifjerde A/S:n www-sivuilla] [Viitattu 4.12.2012] Saatavissa: http://www.jouset.com/verkkokauppa/tyoekalujouset/vaerktojsfjedre_iso.aspx

Soukka, R. 2011. Advanced Course in Life Cycle Assessment, Luentomateriaali [Luento 20.9.2011] Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 72 s.

Stevens, A., & Boks, C. 2002. Design for End-of-Life Strategies and Their Implementation. 23. luku teoksessa: Hundal, M. S. (toim.) Mechanical Life Cycle Handbook – Good Environmental Design and Manufacturing. New York: Marcel Dekker. s. 555-582.

Vaajoensuu, E., Dammert, T., Kuuva, M. & Airila, M. 2002. DFE Materials and Processes. 18. luku teoksessa: Hundal, M. S. (toim.) Mechanical Life Cycle Handbook – Good Environmental Design and Manufacturing. New York: Marcel Dekker. s. 429-460.

Valtanen, E. 2007. Tekniikan taulukkokirja. 14. painos. Jyväskylä: Gummerus. 1037 s.

Liite I. HiPEQ Ropeflex -köydenvetolaitteet. Hinnat on ilmoitettu verottomina yhdysvaltain dollareissa. (Hipeq, 2012.)



DRAGON - RX1500

\$2,495.00



OX II - RX2100

\$1,395.00



IBEX - RX2300

\$2,295.00



ORYX - RX2400

\$2,495.00



APEX - RX4400

\$5,595.00



OX - RX2000

\$1,595.00



WOLF - RX2200

\$1,595.00



ADDAX - RX3200

\$3,195.00



VORTEX - RX3300

\$4,195.00



ORYX II - RX5500

\$4,895.00

(jatkuu)

Liite I. (jatkoa) Marpo Kinetics -köydenvetolaitteet. Hinnat on ilmoitettu verottomina yhdysvaltain dollareissa. (Marpo Kinetics, 2012; HealthStyles Exercise Equipment, 2012.)



V250 Rope Trainer

\$ 5,295.00



VLT Rope Trainer

\$ 3,495.00



VMX Rope Trainer

\$ 5,095.00



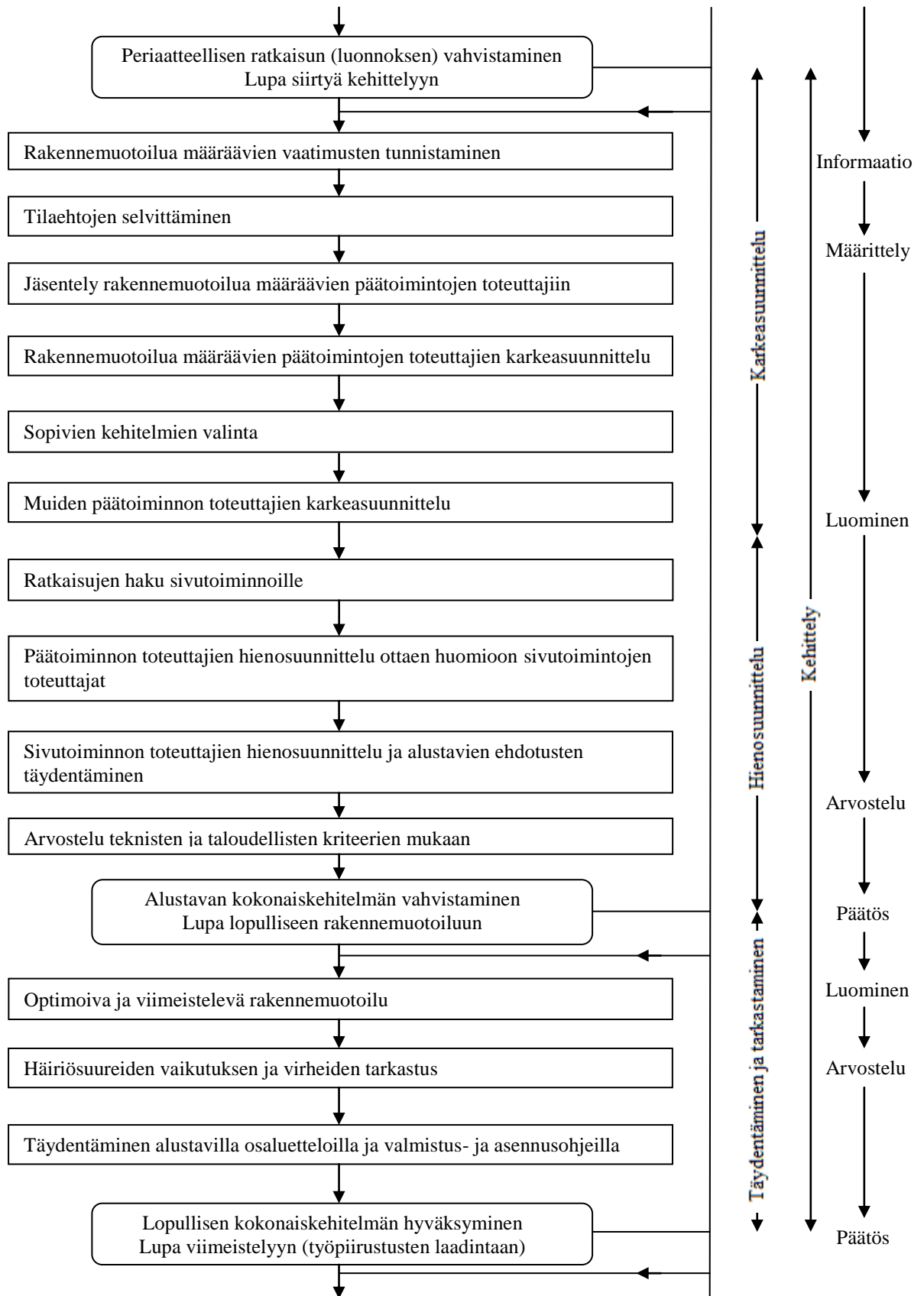
Vector Rope Trainer

\$2,295.00

Liite II. Ohjelista ratkaisumuunnelmien pistearvioinnin arviointikriteerien laatimiseksi (Pahl & Beitz, 1990, s. 157).

| Päätunnus | Esimerkkejä |
|-------------------------|---|
| Toiminto | Valitusta ratkaisuperiaatteesta tai luonnosmuunnelmasta välittömästi seuraavien sivutoimintojen toteuttimien ominaisuudet. |
| Vaikutusperiaate | Valittujen periaatteiden ominaisuudet niiden yksinkertaisen ja yksikäsitteisen toteutuksen, riittävän vaikutuksen ja pienten häiriötekijöiden kannalta. |
| Rakennemuotoilu | Osien pieni lukumäärä, mutkattomuus, pieni tilantarve, ei erityisiä työaines- eikä rakennemuotoiluongelmia. |
| Turvallisuus | Välittömän turvallisuustekniikan suosiminen (luonnostaan turvallinen), lisäsuojatoimet tarpeettomia, työ- ja ympäristöturvallisuus taattu. |
| Ergonomia | Ihminen-kone-suhde kunnollinen, ei liian suuria kuormituksia eikä muita haittoja, hyvä muotoilu. |
| Valmistus | Vähän ja tavanomaisia valmistusmenetelmiä, ei kalliita työlaitteita, vähän ja yksinkertaisia osia. |
| Tarkastus | Vähän tarkastuksia ja testauksia tarpeen, voidaan tehdä yksinkertaisesti ja luotettavasti. |
| Asennus | Helppo, mukava, nopea, ei erityisiä apulaitteita. |
| Kuljetus | Normaalit kuljetusmahdollisuudet, ei riskejä. |
| Käyttö | Yksinkertainen käyttö, pitkä elinikä, vähäinen kuluminen, yksinkertainen ja mielekäs hallinta. |
| Kunnossapito | Vähäinen ja yksinkertainen huolto ja puhdistus, helppo tarkastaa, ongelmaton kunnostus. |
| Kierrätys | Hyvä uusiokäyttöarvo, ongelmaton purkaminen. |
| Kustannukset | Ei erityisiä käyttö- tai muita sivukustannuksia, ei myöhästymisriskejä. |

Liite III. Kehittelyn työaskeleet (Pahl & Beitz, 1990, s. 177–178).



Liite IV. Ohjeita koneistettavan kappaleen valmistusystävälliseen suunnitteluun (Boothroyd ym. 2002, s. 311–313).

Standardointi

- 1) Käytä standardikomponentteja niin paljon kuin mahdollista.
- 2) Esimuokkaa aihio ennen koneistusta, mikäli mahdollista valamalla, takomalla, hitsaamalla jne.
- 3) Käytä standardoituja esimuokattuja aihioita, mikäli mahdollista.
- 4) Suunnittele tavanomaisia koneistamalla syntyviä muotoja aina kun mahdollista.

Raaka-aineet

- 5) Valitse raaka-aineet, jotka johtavat mahdollisimman alhaisiin komponenttikohtaisiin kustannuksiin, tuotannon ja raaka-aineen kustannukset mukaan lukien.
- 6) Käytä standardoituja raaka-aineaihioita (poikkileikkaus, pituus, toimitustila jne.).

Komponenttien suunnittelu

a) Yleistä

- 7) Pyri suunnittelemaan kappale niin, että se voidaan koneistaa yhtä työkalua käyttäen.
- 8) Pyri suunnittelemaan kappale niin, että kaikki tarvittava koneistus on mahdollista yhden kiinnityksen avulla.
- 9) Vältä suunnittelemaista muotoja, joita käytössä olevilla tuotantovälineillä ei pystytä koneistamaan.
- 10) Suunnittele kappale niin, että se kestää kiinnityksestä ja koneistuksesta aiheutuvat voimat.
- 11) Varmista että kappale voidaan työstää ilman että työkalu, työkalun pidike, työkappale ja kappaleen kiinnitin törmäävät toisiinsa.
- 12) Varmista että reikien halkaisija-pituus-suhde on sellainen, että niiden valmistaminen ei vaadi erikoistyökaluja
- 13) Pyri suunnittelemaan koneistettavat reiät samansuuntaisiksi suhteessa työkappaleen referenssipintaan tai -linjaan, tai kohtisuoriksi sitä vasten. Mitoita reikäjako.

(jatkuu)

Liite IV. (jatkoa)

- 14) Suunnittele sisäpuolisten muotojen kulmausten pyöritykset vastaamaan standardityökalujen terien pyörityksiä.
- 15) Varmista että pohjallisten reikien pohjat ovat kartion muotoiset, ja että kierteitetyissä rei'issä kierre ei jatku pohjaan saakka.
- 16) Vältä kaarevien reikien suunnittelua.

b) Pyörähdysymmetriset kappaleet

- 17) Pyri suunnittelemaan sylinterimäiset pinnat samankeskisiksi, ja tasaiset pinnat niitä vastaan kohtisuoriksi.
- 18) Pyri varmistamaan että ulkopuolisten halkaisijoiden koko kasvaa siirryttäessä kappaleen reunalta kohti keskikohtaa.
- 19) Pyri varmistamaan että sisäpuolisten halkaisijoiden koko pienenee siirryttäessä kappaleen reunalta kohti keskikohtaa.
- 20) Vältä suunnittelemaasta pitkiin kappaleisiin sisäpuoleista koneistusta vaativia muotoja.
- 21) Vältä suunnittelemaasta komponentteja, joilla on hyvin suuri, tai hyvin pieni, pituus-halkaisija-suhde.

c) Ei-pyörähdysymmetriset kappaleet

- 22) Muista suunnitella kappaleelle referenssipinta/-pinnat, ja pinnat kiinnitystä varten.
- 23) Pyri suunnittelemaan kappale niin, että sen ulkoiset pinnat muodostuvat toisiaan vastaan kohtisuorista tasoista.
- 24) Suunnittele koneistettavat pinnat ja muodot kappaleen samalle puolelle mikäli mahdollista.
- 25) Vältä sylinterimäisiä avanteita ja reikiä pitkissä kappaleissa.
- 26) Vältä pitkien kappaleiden koneistamista käyttämällä esimuokattuja aihioita.
- 27) Vältä koneistusta vaativien erittäin pitkien tai ohuiden kappaleiden suunnittelua.
- 28) Varmista että littanien ja kuutiomaisten kappaleiden avanteet ovat koneistuspintaa vasten kohtisuorat, ja että avanteiden halkaisijat pienenevät kappaleen keskustaa kohti.

(jatkuu)

Liite IV. (jatkoa)

- 29) Vältä pohjallisia reikiä suurissa kuutiomaisissa kappaleissa.
- 30) Vältä sisäisiä koneistettavia muotoja laatikkomaisissa kappaleissa.

Asennus

- 31) Varmista että asentaminen on mahdollista.
- 32) Varmista että yhteen liitettävien osien koneistetut liitospinnat vastaavat toisiaan.
Muista suunnitella pyöristyksiä vastaavat väisteet.

Tarkkuus ja pinnanlaatu

- 33) Määrittele toleranssit ja pinnanlaatuvaatimukset niin, että kappale kykenee toteuttamaan sille asetetut vaatimukset. Vältä liian tarkkaa tolerointia.
- 34) Varmista, että viimeistelykoneistusta vaativat pinnat ovat koholla, eivätkä muodosta keskenään sisäpuolisia kulmauksia.

Liite V. Suunnitteluohjeita asennusystävällisyyden parantamiseksi (Boothroyd ym. 2002, s. 87–92, 125–128.)

Kappaleen käsittely:

- 1) Suunnittele kappaleet pyörähdyssymmetrisiksi ja päädyiltään symmetrisiksi. Jos tämä ei ole mahdollista, pyri maksimoimaan kappaleiden symmetrisyys.
- 2) Mikäli symmetrisyyttä ei pystytä saavuttamaan, korosta epäsymmetrisyyttä asemoinnin helpottamiseksi.
- 3) Suunnittele kappaleet niin, että ne eivät pääse jumiutumaan sisäkkäin varastoitaessa pinoihin tms.
- 4) Vältä muotoja, jotka saavat kappaleet takertumaan toisiinsa varastoitaessa.
- 5) Vältä kappaleita, jotka liimaantuvat toisiinsa, ovat liukkaita, herkkiä vaurioitumaan, joustavia, erittäin pieniä tai suuria, tai vaarallisia käsittelijälle (mm. teräviä).

Kappaleen kiinnitys:

- 1) Suunnittele liitokset niin, että kappaleet eivät vastusta liittämistä (mm. viisteillä kappaleen reunoissa). Käytä riittäviä välyksiä asennuksen helpottamiseksi.
- 2) Pyri käyttämään samoja osia, prosesseja ja metodeja eri kokoonpanoissa, tuotteissa, ja jopa tuotantolinjoilla. Suuremman volyymin tuotanto mahdollistaa yleensä alemmat tuotantokustannukset.
- 3) Suosi pyramidiasennustapaa, missä edellisen suuremman kappaleen jälkeen asennetaan aina pienempi kappale saman referenssiakselin suhteen. Yleensä on helpointa asentaa kappaleet yläpuolelta.
- 4) Vältä suunnittelemaista laitetta niin, että jotakin osaa tai osia täytyy kannatella kokoonpanoa käsiteltäessä tai muita osia liitettäessä. Jos kannattelu on välttämätöntä, pyri suunnittelemaan laite niin, että kyseinen osa saadaan kiinnitettyä tukevasti mahdollisimman pian osan lisäämisen jälkeen.
- 5) Suunnittele osa niin, että se paikoittuu ennen kuin siitä päästetään irti.
- 6) Suosi yleisesti käytetyissä kiinnitystarvikkeissa seuraavaa järjestystä asennuskustannusten minimoimiseksi: painonappikiinnitys ("klipsi"), muotosulkeinen liitos, niittiliitos, ruuviliitos.
- 7) Vältä tarvetta asemoida uudelleen kiinnittimessä olevaa osittain valmista kokoonpanoa.

(jatkuu)

Liite V. (jatkoa)

Muita yleisiä ohjeita:

- 1) Vältä osia joiden ainoa tehtävä on liittää muita osia toisiinsa. Pyri sen sijaan liittämään osat suoraan toisiinsa ilman erillisiä liitososia.
- 2) Suunnittele kappaleet niin, että asennetut osat eivät estä asennettavan osan liittämistä kokoonpanoon. Pyri siihen, että asennusta ei hankaloita mekaaniset tai visuaaliset esteet.
- 3) Vältä säädettäviä osia. Pyri sen sijaan suunnittelemaan ja toleroimaan osat niin, että säätöä ei tarvita.
- 4) Käytä suunnittelussa kinemaattisten rajoitteiden periaatteita. Suunnittele kokoonpano niin, ettei sillä ole päällekkäisiä kinemaattisia rajoitteita. Mikäli kokoonpanolla on päällekkäisiä kinemaattisia rajoitteita, vaatii se usein säätämistä ja sisältää enemmän osia kuin on tarvetta.

Liite VI. Ympäristöystävällistä tuotesuunnittelua ohjaavia kysymyksiä ja ohjesääntöjä

Ympäristöystävällistä tuotesuunnittelua ohjaavia kysymyksiä Billatosin (2002, s. 86) mukaan:

- Mitkä materiaaliominaisuudet ovat haluttavia? Mitä lujuus- ja toiminnallisia ominaisuuksia käytetyillä materiaaleilla ja valmiilla tuotteella täytyy olla?
- Mitä kierrätettyjä materiaaleja voidaan käyttää kierrättämättömien materiaalien sijasta? Onko näillä kierrätetyillä materiaaleilla samat toiminnalliset ja valmistukselliset ominaisuudet? Jos ei, onko muita korvaavia materiaalivaihtoehtoja?
- Mitä lisäkustannuksia (kiinteitä ja muuttuvia) syntyy, jos materiaalia, ja mahdollisesti myös valmistusmenetelmää, vaihdetaan?
- Onko tuotantoprosessi tutkittu jätteen tuotannon osalta? Käytetäänkö tuotannossa ihmisille tai ympäristölle haitallisia liuottimia tai nesteitä? Onko turvallisempi vaihtoehtoja saatavilla? Voidaanko tuotantoprosessia muuttaa liuottimien ja nesteiden tarpeen eliminoimiseksi? Mitä lisäkustannuksia tästä syntyy?
- Onko tuote suunniteltu ja optimoitu DFMA- ja DFD-ohjeiden mukaisesti? Ovatko yksittäiset osat toleroitu? Jos ovat, täyttääkö kokoonpantu tuote tarvittavat kokonaistoleranssit?
- Onko yksittäiset osat merkitty materiaalimerkinnoilla kierrätyksen helpottamiseksi? Onko osien liitoskohdat merkitty purkamisen helpottamiseksi?
- Onko tuotteelle olemassa standardoitu tietokanta kierrätettyjen materiaalien saatavuuden sekä ja purku- ja kierrätyslaitosten selvittämiseksi?

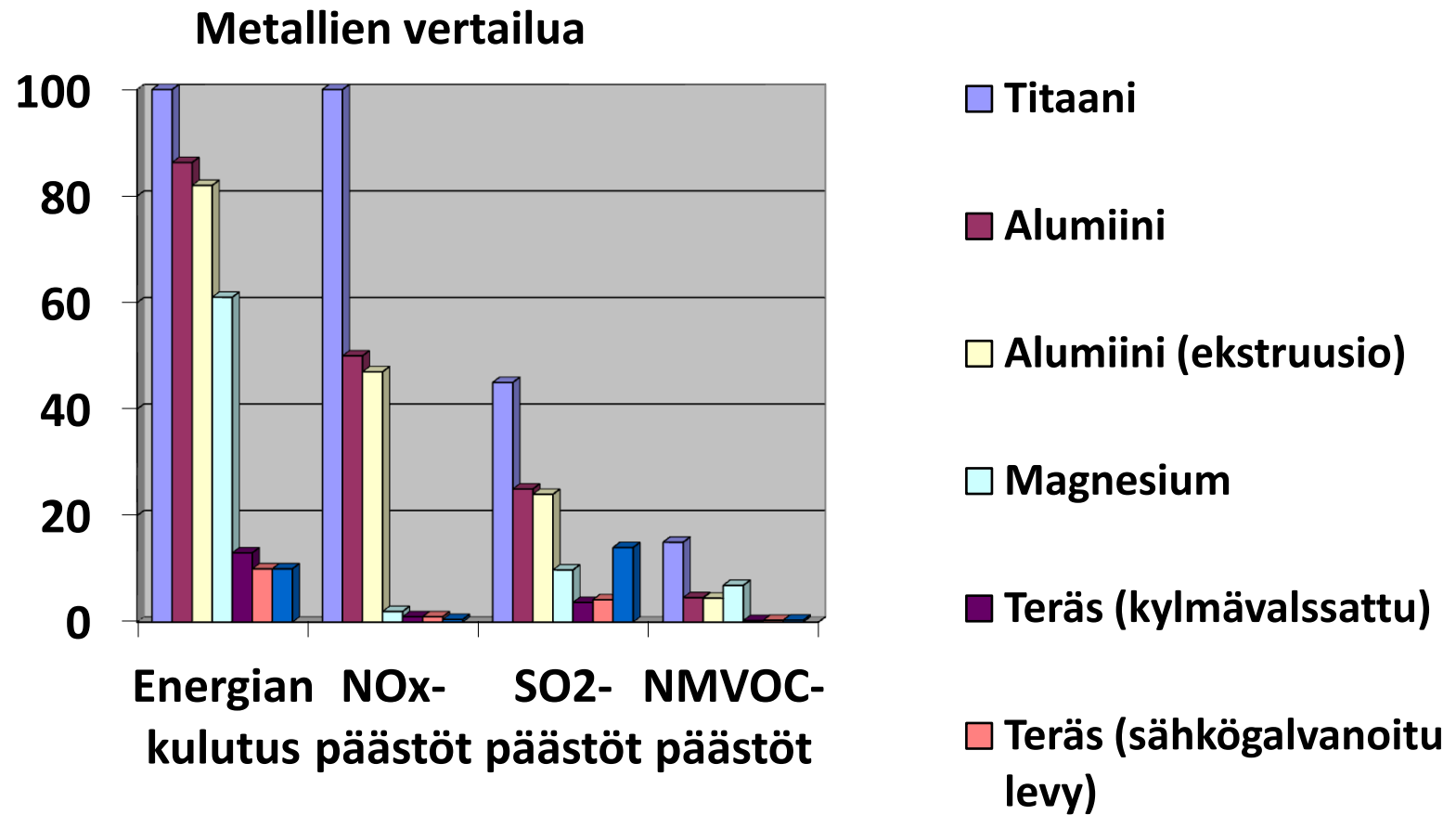
(jatkuu)

Liite VI. (jatkoa)

Ympäristöystävällistä tuotesuunnittelua ohjaavia ohjesääntöjä Billatosin (2002, s. 89–90) mukaan:

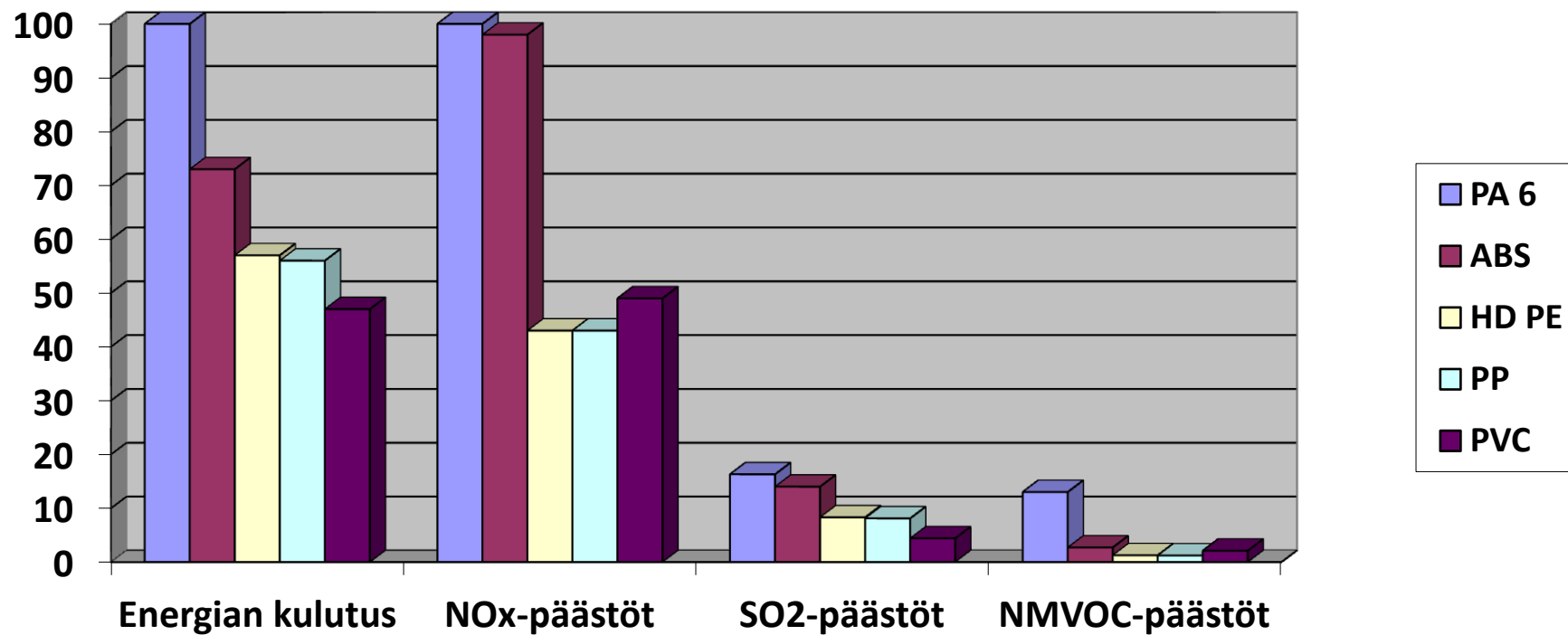
- Pidä rakenne yksinkertaisena käyttämällä mahdollisimman vähän eri materiaaleja. Pyri pitämään materiaalit puhtaina paremman kierrätettävyyden vuoksi välttämällä materiaalien pinnoitusta ja seostusta. Vältä myrkyllisiä materiaaleja kuten raskasmetalleja. Yhdistä mahdollisimman moni toiminto samaan komponenttiin osien lukumäärän vähentämiseksi.
- Kehitä tuotteelle useita uusiokäyttökohteita. Tuotteen hävitys elinkaaren lopussa on helpompaa, jos tuotteelle löytyy helposti uusi käyttötarkoitus.
- Kierrätettävyyden helpottamiseksi käytä kokoonpanoissa materiaaleja, jotka voidaan kierrättää yhdessä. Jos mahdollista, valitse mahdollisimman monelle komponentille sama materiaali. Pyri käyttämään käytettyjä ja kierrätettyjä komponentteja uudelleen mikäli mahdollista.
- Suosi modulaarista tuotesuunnittelua, sillä se helpottaa kokoonpanoa, huoltamista ja purkamista.
- Varmista että tuotetiedot on saatavilla koko elinkaaren ajalta. Varmista että osissa on materiaalimerkinnot kierrätyksen helpottamiseksi.
- Etsi ratkaisuja tuotantojätteen vähentämiseksi. Etsi tuotannossa käytettävien yhdisteiden ja puhdistusaineiden tilalle vaarattomia vaihtoehtoja. Vähennä tuotannon energiantarvetta poistamalla turhia tuotantovaiheita.
- Kiinnitä huomiota tuotteen pakkaukseen ja toimitukseen liittyvän materiaalin kierrätettävyyteen ja pakkauksen uudelleen käytettävyyteen.
- Mikäli mahdollista, yhdistä tuotesuunnitteluun rinnakkaisuunnittelun näkökulmia, kuten DFMA, DFD jne. ympäristöystävällisen suunnittelun tukemiseksi.
- Käytä osille ja sovitteille tarkkoja valmistustoleransseja kiinnitystarvikkeiden vähentämiseksi ja purkamisen helpottamiseksi.

Liite VII. Joidenkin metallien ja muovien valmistukseen tarvittavan energian ja valmistuksessa syntyvien päästöjen vertailua (Gediga, J., Florin, H. & Eyerer, P. 2002. Life Cycle Engineering. 16. luku teoksessa: Hundal, M. S. (toim.) Mechanical Life Cycle Handbook – Good Environmental Design and Manufacturing. New York: Marcel Dekker. s. 379-403).



(jatkuu)

Muovien vertailua



Liite VIII. Vaatimuslistan laatimisen tukena käytetty taulukko (Pahl & Beitz, 1990, s. 68).

| Päättunnus | Esimerkkejä |
|---------------------|--|
| Geometria | Suuruus, korkeus, leveys, pituus, läpimitta, tilantarve, lukumäärä, järjestely, liitántä, lisäys ja laajennus |
| Kinematiikka | Liiketapa, liikesuunta, nopeus, kiihtyvyys |
| Voimat | Voiman suuruus, suunta ja useus, paino, kuorma, muodonmuutos, jäykkyys, jousto-ominaisuudet, vakaus, resonanssitilat |
| Energia | Teho, hyötysuhde, häviö, kitka, ilmanvaihto, olosuureet kuten paine, lämpötila, kosteus, lämmitys, jäähditys, liitántäenergia, varaaminen, työn tarve, energiamuunnos |
| Aines | Tulo- ja lähtötuotteiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet, apuaineet, laatumääräykselliset aineet (elintarvikelaki yms.). Ainesvuo ja materiaalin kuljetus |
| Signaali | Tulo- ja lähtösignaalit, osoitustapa, käyttö- ja valvontalaitteet, signaalin muoto |
| Turvallisuus | Välitön turvallisuustekniikka, suojajärjestelmät, käyttö-, työ- ja ympäristöturvallisuus |
| Ergonomia | Ihminen-kone-suhde: käyttö, käytötapa, havainnollisuus, valaistus, muotoilu |
| Valmistus | Tuotantopaikkojen määräämät rajoitukset, suurin valmistettavissa oleva mitta, suosituin valmistusmenetelmä, valmistusväline, mahdolliset laatu- ja toleranssivaatimukset |
| Tarkastus | Mittaus- ja testausmahdollisuudet, erityiset määräykset ja standardit |
| Asennus | Erityiset asennusohjeet, kokoonpano, lisäasennus, asennus rakennuspaikalla, perustukset |
| Kuljetus | Nosturien aiheuttamat rajoitukset, rataprofiili, koon ja painon mukaiset kuljetustiet, lähetystapa ja -ehdot |
| Käyttö | Meluttomuus, kulumisnopeudet, käyttö- ja markkina-alue, käyttöpaikka (esim. rikkipitoinen ilma, tropiikki...) |
| Kunnossapito | Huollon tarpeettomuus tai huoltojen lukumäärä ja ajan tarve, tarkastus, vaihdot ja kuntoonpano, maalaus, puhdistus |
| Kierrätys | Jälleenkäyttö, jälleenhyödyntäminen, päätevarastointi, poisto |
| Kustannukset | Sallitut maksimivalmistuskustannukset, työkalukustannukset, investoinnit ja kuoletukset |
| Määräajat | Kehitystyön loppu, välivaiheiden toimintaverkko, toimitusaika |

Liite IX. Vaatimuslistan pohjalta tehty abstrahointi oleellisten ongelmien tunnistamiseksi.

1. Askel (Jätetään pois henkilökohtaiset mieltymykset)

- Enimmäismitat: 800 x 400 x 300 mm
- Enimmäispaino 20 kg + irrotettavat osat (penkki ja runko)
- Säädetty vastus enintään 100kg
- Vetokulma -45° ... $+45^{\circ}$
- Turvallinen käyttää
- Jatkuvatoiminen
- Käytöstä aiheutuva melutaso max. 50 dB
- Helposti purettavissa ja siirrettävissä
- Kiinnityksen onnistuttava penkkiin, seinään, lattiaan ja puuhun
- Kestettävä käyttö sisätiloissa ja kuivissa ulkotiloissa
- Mahdollisimman huoltovapaa
- Ulkonäöltään siisti
- Materiaalikustannukset max. 200€
- 100% materiaalista kierrätettävissä

2. Askel (Jätetään pois vaatimukset, jotka eivät ole tärkeitä toiminnallisuuden ja muiden oleellisten ehtojen kannalta)

- Enimmäismitat: 800 x 400 x 300 mm
- Enimmäispaino 20 kg + irrotettavat osat (penkki ja runko)
- Säädetty vastus enintään 100kg
- Vetokulma -45° ... $+45^{\circ}$
- Jatkuvatoiminen
- Turvallinen käyttää
- Käytöstä aiheutuva melutaso max. 50 dB
- Kiinnityksen onnistuttava penkkiin, seinään, lattiaan ja puuhun
- Kestettävä käyttö sisätiloissa ja kuivissa ulkotiloissa
- Mahdollisimman huoltovapaa
- Ulkonäöltään siisti
- Materiaalikustannukset max. 200€

(jatkuu)

Liite IX. (jatkoa)

3. Askel (Muutetaan määrälliset vaatimukset laadullisiksi ja muokataan ne käsittämään vain olennaisimmat asiat)

- Mitoiltaan sisätiloihin soveltuva
- Painoltaan helposti siirrettävissä
- Säädetty vastus
- Vetokulma vapaasti valittavissa
- Jatkuvatoiminen
- Turvallinen käyttää
- Hiljainen käytettäessä
- Kiinnitys onnistuu monella tapaa
- Kestää sisäkäyttöolosuhteet
- Huoltovapaa toiminta
- Ulkonäöltään siisti
- Alhaiset materiaalikustannukset

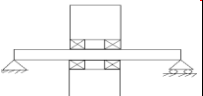
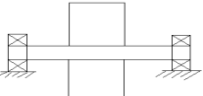


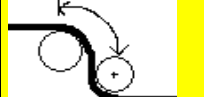
4. Askel (Muokataan jäljellä olevat vaatimukset yleisempään muotoon, mikäli se on tarkoituksen mukaista)

- Sisäkäyttöön soveltuva
- Jatkuvatoiminen
- Säädetty käyttöominaisuudet
- Käyttö ei aiheuta haittaa käyttäjälle tai ympäristölle
- Edullinen

5. Askel (Muotoillaan ongelma ratkaisun kannalta neutraaliksi abstrahointilauseeksi)

Edullinen sisäkäyttöön soveltuva jatkuvatoiminen säädettyvastuksinen kuntoharjoittelulaite, joka ei aiheuta vahinkoa käyttäjälle tai ympäristölle.

Liite X. Ideointivaiheen tuloksena syntynyt morfologinen kaavio ratkaisuvaihtoehdoista.

| | | Ratkaisu | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
|--|-------------------------------|---|---|---|--|---|------------------------------------|---|--|
| Toiminto | | | | | | | | | |
| Ohjaa köyttä (eri vetokulmista) | Laitteen sisällä |  | Hitsataan akseli runkoon | Hitsataan mutteri runkoon + kierteet akseliin | Mutteri akselille + pujotus runkoon | Napa laippalaakereilla + sankakiinnitys runkoon | Laipat akseliin + ruuvilla runkoon | | |
| | |  | Laippalaakeriyksiköt | Koneistetaan laakeripesät runkoon | Ahdistusliitos navan ja akselin väliin | Koneistettu napa akselille | | | |
| | | Liukumalla | Kourua pitkin | Putken sisällä | Tappeja vasten | Rullia vasten | | | |
| | Laitteeseen & laitteesta |  | Ohjaustapit & kiinteä asento |  | Suppilomainen holkki & kääntyvä asento | | | | |
| Vastustaa liikettä (häiriötilanteessa säilyttää vastuksen) | Tarttuu köyteen | | Kiilahihnapyörä | Väkipyörä + pinnoite + painotela | Useampi kierros navan ympäri | Piikikäs rulla + painotela | Hammaspyörä + painotela | Ei tartu (liukumisratkaisu) | |
| | Jarruttaa liikettä | | Rumpujarru | Polkupyörän levyjarru | Variaattori-laippa | Keskipakokytkin | Kiinteä jarrukenkä köyttä vasten | Lineaarisesti siirtyvä kouru köyttä vasten | |
| | | | Nivelen ympäri siirtyvä kouru köyttä vasten | Ilmajarru | Nestejarru | Vannejarru | Tönkkäjarru (kenkäjarru) |  | |
| | Vastuksen säätö | | Säätöruuvi | Polkupyörän vaihteet | Variaattori-laippa | Vipu | Poljin | | |
| Kiinnittyy tukevasti & helposti purettavissa | Puuhun (+lattiaan & penkkiin) | | Kuormaliina + runkoon piikit | "Tolppakenkäkiinnitys" | Putkisangat | Sirppikoukku + ketju | Räikkäliuska + solki | (Puu-) ruuvi kiinnitys | |

Annetut äänet



Liite XI. Osatoimintojen taustatietotaulukko pistearviointia varten.

| | Muunnelma 1 | Muunnelma 2 | Muunnelma 3 | Taustatietovaatimukset | | | | | | | | | | |
|--------------------|--|--|--|------------------------|----------------|-----------------|--------------------------|-----------------------|-----------------|---------------|----------------|----------------------|---------------------------------------|----------|
| | | | | Toimivuus | Saata- vuus | Hinta- arvio | Valmistuksen helppous | Asennusosien määrä | Tilan- tarve | Paino (kg) | Kestä- vyys | Yksin- kertaisuus | Varaosien tarve, hintaa, saatavuus | Ulkonäkö |
| Osa- toiminto 1 | Napa laippa- laakereilla + laipat akseliin & ruuvilla runkoon | | | 5 | 3 | 50 € | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| | | | Laippalaakeri- yksiköt runkoon | 4 | 3 | 50 € | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| | | Kourua pitkin | | 3 | 5 | 30 € | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 3 |
| Osa- toiminto 2 | Suppilomainen holkki & kääntävä asento | Suppilomainen holkki & kääntävä asento | | 5 | 3 | 20 € | 3 | 4 | 4 | 0,5 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| | | | Ohjaustapit & kiinteä asento | 2 | 4 | 10 € | 4 | 2 | 4 | 0,5 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Osa- toiminto 3 | Useampi kierros navan ympäri | | | 5 | 4 | 30 € | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| | | Ei tartu (liuku- misratkaisu) | | 3 | 3 | 0 | 3 | 4 | 4 | 2 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| | | | Väkipyörä + pinnoite + painotela | 3 | 2 | 80 € | 2 | 2 | 3 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Osa- toiminto 4 | Polkupyörän levyjarru | | | 2 | 3 | 80 € | 2 | 2 | 4 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | | Kiinteä jarrukenkä köyttä vasten | | 3 | 2 | 40 € | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| | | | Rumpujarru | 3 | 3 | 50 € | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| Osa- toiminto 5 | Vipu | | | 3 | 3 | 15 € | 2 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| | | Säätöruuvi | Säätöruuvi | 4 | 4 | 10 € | 3 | 3 | 4 | 0,5 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| Osa- toiminto 6 | Putkisangat | | | 3 | 4 | 10 € | 5 | 3 | 3 | 2 | 5 | 3 | 4 | 2 |
| | | Sirppikoukku + ketju | | 4 | 4 | 15 € | 4 | 4 | 3 | 3 | 5 | 4 | 4 | 2 |
| | | | Kuormaliina + piikit | 4 | 5 | 5 € | 4 | 4 | 3 | 1 | 4 | 4 | 4 | 2 |
| | Karkeat arvaukset ja lisäselvitystä vaativat kohdat | Keskiarvot | Muunnelma 1 | 3,83 | 3,33 | 205 € | 3,17 | 3,17 | 3,33 | 13,5 | 3,83 | 3,33 | 3,83 | 3 |
| | | | Muunnelma 2 | 3,67 | 3,5 | 115 € | 3 | 3,67 | 3,67 | 11 | 4 | 3,83 | 4,33 | 3,17 |
| | | | Muunnelma 3 | 3,33 | 3,5 | 195 € | 3 | 2,67 | 3,17 | 14 | 4 | 3,5 | 4,17 | 2,83 |

(jatkuu)

Liite XI. (jatkoa) Ratkaisumuunnelmien 1–3 pisteytystaulukko.

| Arviointikriteerit | | | Ominaisuudet | | Ratkaisumuunnelma 1 | | | Ratkaisumuunnelma 2 | | | Ratkaisumuunnelma 3 | | |
|------------------------------|--|--------------|-----------------------------------|-----------------|---------------------|---------|-----------------|---------------------|---------|-----------------|---------------------|---------|-----------------|
| Kategoria (painotusosuus) | Kriteeri (painotusosuus) | Painotusarvo | Suure | Yksikkö | Ominais-arvo | Pisteet | Painotettu arvo | Ominais-arvo | Pisteet | Painotettu arvo | Ominais-arvo | Pisteet | Painotettu arvo |
| Rakenne (30%) | Pieni tilantarve (20%) | 6 % | Tilavuus | cm ³ | - | 3,33 | 0,03996 | - | 3,67 | 0,04404 | - | 3,17 | 0,03804 |
| | Kevyt rakenne (15%) | 5 % | Massa | kg | 13,5 | 3,25 | 0,02925 | 11 | 4,5 | 0,0405 | 14 | 3 | 0,027 |
| | Kestävä rakenne (25%) | 8 % | - | - | - | 3,83 | 0,05745 | - | 4 | 0,06 | - | 4 | 0,06 |
| | Yksinkertainen rakenne (25%) | 8 % | Osien lukumäärä | - | - | 3,33 | 0,04995 | - | 3,83 | 0,05745 | - | 3,5 | 0,0525 |
| | Siisti ulkonäkö (15%) | 5 % | - | - | - | 3 | 0,027 | - | 3,17 | 0,02853 | - | 2,83 | 0,02547 |
| Rakennekriteerien summa | | 30 % | | | | 16,74 | 20 % | | 19,17 | 23 % | | 16,5 | 20 % |
| Käyttö (35%) | Helppo vetokulman säätö (30%) | 11 % | - | - | - | 5 | 0,105 | - | 5 | 0,105 | - | 4 | 0,084 |
| | Helppo vastuksen säätö (30%) | 11 % | - | - | - | 3 | 0,063 | - | 4 | 0,084 | - | 4 | 0,084 |
| | Hiljainen käyttöäni (20%) | 7 % | Melutaso | dB | - | 4 | 0,056 | - | 4 | 0,056 | - | 3 | 0,042 |
| | Helppo asentaa (10%) | 4 % | Asennusaika | min | - | 3,17 | 0,02219 | - | 3,67 | 0,02569 | - | 2,67 | 0,01869 |
| | Hyvä huollettavuus (10%) | 4 % | Kulutusosien lukumäärä | - | - | 3,83 | 0,02681 | - | 4,33 | 0,03031 | - | 4,17 | 0,02919 |
| Käyttökriteerien summa | | 35 % | | | | 19 | 27 % | | 21 | 30 % | | 17,84 | 26 % |
| Turvallisuus (15%) | Hyvä ergonomisuus (50%) | 8 % | - | - | - | 4 | 0,06 | - | 4 | 0,06 | - | 4 | 0,06 |
| | Turvallinen häiriötilanteissa (50%) | 8 % | - | - | - | 4 | 0,06 | - | 4 | 0,06 | - | 4 | 0,06 |
| Turvallisuuskriteerien summa | | 15 % | | | | 8 | 12 % | | 8 | 12 % | | 8 | 12 % |
| Valmistus (20%) | Edulliset osto-osat (30%) | 6 % | Hinta | € | 205 € | 2,25 | 0,027 | 115 € | 4,25 | 0,051 | 195 € | 2,42 | 0,02904 |
| | Hyvä materiaalien saatavuus (30%) | 6 % | - | - | - | 3,33 | 0,03996 | - | 3,5 | 0,042 | - | 3,5 | 0,042 |
| | Yksinkertaiset valmistaa (30%) | 6 % | Valmistusaika | d | - | 3,17 | 0,03804 | - | 3 | 0,036 | - | 3 | 0,036 |
| | Ympäristöystävälliset raaka-aineet (10%) | 2 % | Valmistuksen ympäristövaikutukset | ? | - | 3 | 0,012 | - | 3 | 0,012 | - | 3 | 0,012 |
| Valmistuskriteerien summa | | 20 % | | | | 11,75 | 12 % | | 13,75 | 14 % | | 11,92 | 12 % |
| Kokonaissumma | | 100 % | | | | 55,49 | 71 % | | 61,92 | 79 % | | 54,26 | 70 % |

Liite XII. (jatkoa) Ratkaisumuunnelmien 1–3 osatoimintojen vertailutaulukko

| Muunnelma 1 | Muunnelma 2 | Muunnelma 3 | Toimivuus | Saatavuus | Hinta-arvio | Valmistuksen helppous | Asennusosien määrä | Tilantarve | Massa (kg) | Kestävyys | Yksinkertaisuus | Varaosien tarve, hinta, saatavuus | Ulkonäkö | Summa |
|---|--|----------------------------------|-----------|-----------|-------------|-----------------------|--------------------|------------|------------|-----------|-----------------|-----------------------------------|----------|-------|
| Napa laippalaakereilla + laipat akseliin & ruuvilla runkoon | | | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 |
| | | Laippalaakeriyksiköt runkoon | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| | Kourua pitkin | | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 10 |
| Suppilomainen holkki & kääntyvä asento | Suppilomainen holkki & kääntyvä asento | | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 |
| | | Ohjaustapit & kiinteä asento | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 6 |
| Useampi kierros navan ympäri | | | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 11 |
| | Ei tartu (liukumisratkaisu) | | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 10 |
| | | Väkipyörä + pinnoite + painotela | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Polkupyörän levyjarru | | | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 5 |
| | Kiinteä jarrukenkä köyttä vasten | | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 8 |
| | | Rumpujarru | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 6 |
| Vipu | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Säätöruuvi | Säätöruuvi | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 10 |
| Putkisangat | | | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| | Sirppikoukku + ketju | | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 6 |
| | | Kuormaliina + piikit | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 6 |

Osatoimintojen vertailu asteikolla 0-2

Liite XIII. Jatkokehitykseen valittujen ratkaisumuunnelmien pistearviointitaulukko.

| Kategoria (painotusosuus) | Arviointikriteerit | | Ominaisuuksuudet | | Ratkaisumuunnelma 2 | | | Ratkaisumuunnelma 4 | | |
|------------------------------|---|--------------|---|-----------------|---------------------|---------|--------------------|---------------------|---------|--------------------|
| | Kriteeri (painotusosuus) | Painotusarvo | Suure | Yksikkö | Ominais- arvo | Pisteet | Painotettu arvo | Ominais- arvo | Pisteet | Painotettu arvo |
| Rakenne (30%) | Pieni tilantarve (20%) | 6 % | Tilavuus | cm ³ | - | 3,67 | 0,04404 | - | 3,5 | 0,042 |
| | Kevyt rakenne (15%) | 5 % | Massa | kg | 11 | 4,5 | 0,0405 | 12 | 4 | 0,036 |
| | Kestävä rakenne (25%) | 8 % | - | - | - | 4 | 0,06 | - | 4 | 0,06 |
| | Yksinkertainen rakenne (25%) | 8 % | Osien lukumäärä | - | - | 3,83 | 0,05745 | - | 3,83 | 0,05745 |
| | Siisti ulkonäkö (15%) | 5 % | - | - | - | 3,17 | 0,02853 | - | 3 | 0,027 |
| Rakennekriteerien summa | | 30 % | | | | 19,17 | 23 % | | 18,33 | 22 % |
| Käyttö (35%) | Helppo vetokulman säätö (30%) | 11 % | - | - | - | 5 | 0,105 | - | 4 | 0,084 |
| | Helppo vastuksen säätö (30%) | 11 % | - | - | - | 4 | 0,084 | - | 4 | 0,084 |
| | Hiljainen käyttöäänäni (20%) | 7 % | Melutaso | dB | - | 4 | 0,056 | - | 3 | 0,042 |
| | Helppo asentaa (10%) | 4 % | Asennusaika | min | - | 3,67 | 0,02569 | - | 3 | 0,021 |
| | Hyvä huollettavuus (10%) | 4 % | Kulutusosien lukumäärä | - | - | 4,33 | 0,03031 | - | 4,17 | 0,02919 |
| Käyttökriteerien summa | | 35 % | | | | 21 | 30 % | | 18,17 | 26 % |
| Turvallisuus (15%) | Hyvä ergonomisuus (50%) | 8 % | - | - | - | 4 | 0,06 | - | 4 | 0,06 |
| | Turvallinen häiriö- tilanteissa (50%) | 8 % | - | - | - | 4 | 0,06 | - | 4 | 0,06 |
| Turvallisuuskriteerien summa | | 15 % | | | | 8 | 12 % | | 8 | 12 % |
| Valmistus (20%) | Edulliset osto-osat (30%) | 6 % | Hinta | € | 115 | 4,25 | 0,051 | 185 | 2,62 | 0,03144 |
| | Hyvä materiaalien saatavuus (30%) | 6 % | - | - | - | 3,5 | 0,042 | - | 3,83 | 0,04596 |
| | Yksinkertaiset valmistaa (30%) | 6 % | Valmistus- aika | d | - | 3 | 0,036 | - | 3,33 | 0,03996 |
| | Ympäristö- ystävälliset raaka- aineet (10%) | 2 % | Valmistuksen ympäristö- vaikutukset | ? | - | 3 | 0,012 | - | 3 | 0,012 |
| Valmistuskriteerien summa | | 20 % | | | | 13,75 | 14 % | | 12,78 | 13 % |
| Kokonaissumma | | 100 % | | | | 61,92 | 79 % | | 57,28 | 73 % |

(jatkuu)

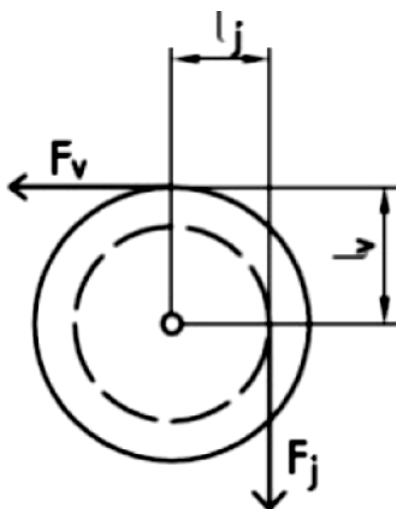
Liite XIII. (jatkoa) Jatkokehitykseen valittujen ratkaisumuunnelmien taustatietotaulukko.

| Muunnelma 2 | Muunnelma 4 | Toimivuus | Saatavuus | Hinta-arvio | Valmistuksen helppous | Asennusosien määrä | Tilantarve | Massa (kg) | Kestävyys | Yksinkertaisuus | Varaosien tarve, hinta, saatavuus | Ulkonäkö |
|---|--|-----------|-----------|-------------|-----------------------|--------------------|------------|------------|-----------|-----------------|-----------------------------------|----------|
| | Napa laippalaakereilla akseliin + ruuvilla runkoon | 5 | 3 | 50 € | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| Kourua pitkin | | 3 | 5 | 30 € | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 3 |
| Suppilomainen holkki & kääntyvä asento | | 5 | 3 | 20 € | 3 | 4 | 4 | 0,5 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| | Ohjaustapit & kiinteä asento | 2 | 4 | 10 € | 4 | 2 | 4 | 0,5 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| | Useampi kierros navan ympäri | 5 | 4 | 30 € | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| Ei tartu (liukumisratkaisu) | | 3 | 3 | 0 | 3 | 4 | 4 | 2 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| | Polkupyörän levyjarru | 2 | 3 | 80 € | 2 | 2 | 4 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Kiinteä jarrukenkä köyttä vasten | | 3 | 2 | 40 € | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| Säätöruuvi | Säätöruuvi | 4 | 4 | 10 € | 3 | 3 | 4 | 0,5 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| Sirppikoukku + ketju | | 4 | 4 | 15 € | 4 | 4 | 3 | 3 | 5 | 4 | 4 | 2 |
| | Kuormaliina + piikit | 4 | 5 | 5 € | 4 | 4 | 3 | 1 | 4 | 4 | 4 | 2 |
| Karkeat arvaukset ja lisäselvitystä vaativat kohdat | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------------|------|------|-------|------|------|------|----|------|------|------|------|
| Keskiarvot | Muunnelma 2 | 3,67 | 3,50 | 115 € | 3,00 | 3,67 | 3,67 | 11 | 4,00 | 3,83 | 4,33 | 3,17 |
| | Muunnelma 4 | 3,67 | 3,83 | 185 € | 3,33 | 3,00 | 3,50 | 12 | 4,00 | 3,83 | 4,17 | 3,00 |

(jatkuu)

Liite XIV. Jousenmitoituslaskut



Köydenvetolinjan etäisyys rummun keskiliinjasta

$$l_v := 100 \text{ mm}$$

Jarrupalan kontaktipinnan etäisyys rummun keskiliinjasta

$$l_j := 100 \text{ mm}$$

Köydenvetovoima

$$F_v := 1000 \text{ N}$$

Jarrupalan ja -laikan
välinen kitkakerroin

$$\mu := 0.4$$

Tarvittava jarrutusvoima saadaan kaavasta:

$$F_j := \frac{l_v \cdot F_v}{l_j} \quad F_j = 1 \times 10^3 \text{ N}$$

Ottaen huomioon jarrun kitkan, saadaan suurin tarvittava jousivoima kaavasta:

$$F_n := \frac{F_j}{\mu}$$

Suurin tarvittava jousivoima on siis: $F_n = 2.5 \times 10^3 \text{ N}$

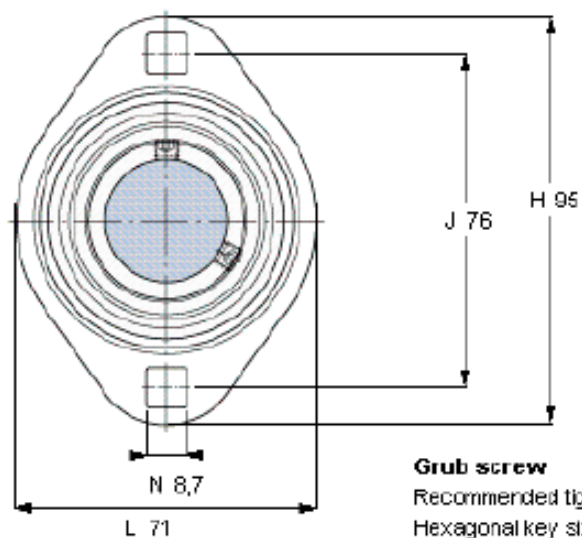
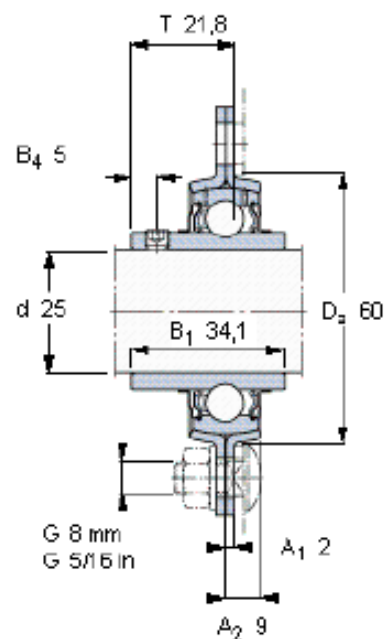
Liite XV. Laippalaakeriyksikön tiedot (SKF, 2012 A).

Y-bearing flanged units, pressed steel housing, grub screw locking, with oval flange, metric bearings



Product information

| Dimensions | | | | | Basic load ratings | | Permissible housing load radial | Mass Bearing unit | Bearing unit No order designation | Order designations | |
|------------|----------------|----|----|------|--------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------|------------|
| d | D _a | H | J | T | dynamic C | static C ₀ | | | | Housing | Bearing |
| mm | | | | | kN | | kN | kg | - | | |
| 25 | 60 | 95 | 76 | 21,8 | 14 | 7,8 | 3,6 | 0,28 | PFT 25 TF | PFT 52 | YAR 205-2F |

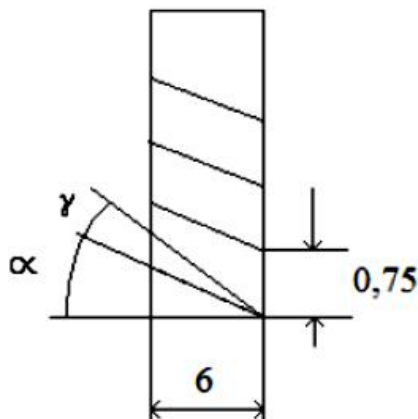


Grub screw

Recommended tightening torque [Nm]
Hexagonal key size [mm]

M 6×0.75
4
3

Liite XVI. Laakerien kiinnitysten lujuuslaskenta (Karhula, J. 2007. Koneenosien suunnittelun peruskurssi, Luentomateriaali.)



Laskuissa käytettävä kylkihalkaisija voidaan laskea kierteen nousun ja nimellisen halkaisijan avulla:

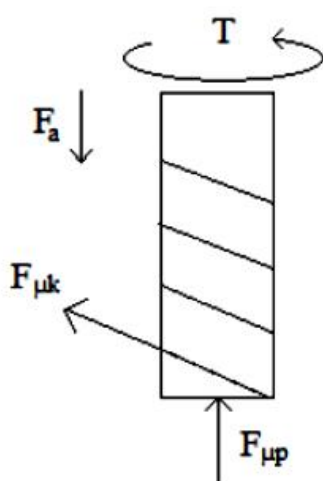
$$D_k := 6 - \frac{3}{4} \cdot 0.75 \quad D_k = 5.438$$

$$\alpha := \tan\left(\frac{0.75}{D_k \cdot \pi}\right) \quad \alpha = 0.044 \cdot \text{rad}$$

Kiristysmomentti $T := 4000$ $\mu_k := 0.15$ $\mu_p := 0.3$

Kiristystä vastustaa ruuvin kierteissä kitkavoima, jonka kitkakerroin on μ_k , ja akselin ja ruuvin pään välillä kitkavoima, jonka kitkakerroin on μ_p . Kierteissä vaikuttava kitkakerroin voidaan muuntaa aksiaalisuuntaista liikettä vastustavaksi kitkakulmaksi kaavalla:

$$\gamma := \text{atan}(\mu_k) \quad \gamma = 0.149$$



Oheiseen kuvaan on merkitty kaikki ruuviin kiristysvaiheessa vaikuttavat voimat. Ruuvin pään ja akselin välissä vaikuttava kitkavoima aiheuttaa kiristystä vastustavan momentin $T_{\mu p}$. Koska laakerinvalmistajan internetisivuilla ohjeistetaan käyttämään laakerin kanssa karkaisematonta akselia, voidaan olettaa että ruuvin pää pureutuu akseliin, jolloin koko pädyn pinta-ala koskettaa akselia. Tällöin pädyn kitkapinnan momenttivarsi on pinnan keskimääräinen halkaisija, joka on neljäsosa kylkihalkaisijasta.

Ruuvin kiristymiselle 4000 Nmm:n momenttiin voidaan statiikan perussääntöjä noudattaen asettaa ehto: $\Sigma T = 0$, mistä seuraa:

$$T = F_a \cdot \tan(\alpha + \gamma) \cdot D_k / 2 + \mu_p \cdot F_a \cdot D_k / 4$$

Yhtälön oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa kierteiden nousun ja kitkan yhteisvaikutuksena syntyvää momenttia, ja jälkimmäinen termi ruuvin pään ja akselin välisen kontaktin synnyttämää momenttia.

Näistä molemmat termit ovat suoraan verrannollisia kiristyksessä syntyvään aksiaalivoimaan, joka on myös ruuvin puristusvoima. Yhtälöstä voidaan nyt siis ratkaista ruuvin puristusvoima F_a :

$$F_a := \frac{T}{\tan(\alpha + \gamma) \cdot \frac{D_k}{2} + 0.3 \cdot \frac{D_k}{4}}$$

$$F_a = 4.261 \times 10^3$$

Neljä ruuvia kiinnitettäessä rumpu lähtee siis liikkeelle työntövoimalla:

$$4 \cdot F_a \cdot \mu_p = 5.114 \times 10^3$$

Puristusjännitys ruuvissa:

$$\delta := \frac{F_a}{\pi \cdot \left(\frac{D_k^2}{4}\right)}$$

$$\delta = 183.514$$

Ei pal mittään,
Liitos ok!

Varmuuskertoimeksi luistamisen suhteen tulee siis

$$n := 4 \cdot \frac{F_a \cdot \mu_p}{2521.5}$$

$$n = 2.028$$

Liite XVII. Köydenvetolaitteen vika- ja vaikutusanalyysi. Taulukon rakenne on koostettu muokkaamalla Birolinin (1999, s. 76-77) ja Modarresin ym. (1999, s. 253, 258) esittelemiä vika- ja vaikutusanalyysitaulukoita.

| Nro | Osa | Oletettu vika | Vikaantumisen syyt | Oireet, paikalliset seuraukset | Vaikutus osatoimintoon, päätoimintoon | Korjausehdotus | Vakavuus | Vian todennäköisyys | Huomioitavaa |
|-----|---------------------|--------------------------|--|--|---|--|--|---------------------|--|
| 1 | Pystypalkki | Liitoksen pettäminen | Hitsausvirhe, Liian heikko sauma, liian suuri kuormitus | Liitoksen rakoilu, rakenteen deformaatio | Laite ei toimi | Läpihitsi liitoksen ympäri, jäykisterivat puristuksen puolelle | Erittäin vakava, henkilövahingot mahdollisia | Pieni | Liitoksen hitsaus tehtävä huolella |
| 2 | Vaakapalkki | Liitoksen pettäminen | Hitsausvirhe, Liian heikko sauma, liian suuri kuormitus | Liitoksen rakoilu, deformaatio, jarruvastuksen heikkeneminen | Laite ei toimi | Läpihitsi liitokseen, vaakapalkit yhdistävä tanko, joka jakaa osan kuormasta toiselle puolelle | Vakava, henkilövahingot ei mahdollisia | Pieni | Liitoksen hitsaus tehtävä huolella |
| 3 | Jarru | Säätöruuvien katkeaminen | Väsyttävä tykyttävä taivutuskuormitus | Jarrun tärinä rummun pyöriessä hitaasti, jarrupalan kolina runkoa vasten | Jarru ei toimi | Tuetaan jarrupalaa siltä sivulta, mihin suuntaan rumpu pyrkii sitä siirtämään | Melko vakava, henkilövahingot ei mahdollisia | Melko pieni | Jarrupalan tuenta varmistettava asennusvaiheessa |
| 4 | Laakeriakseliliitos | Rumpu siirtyy akselilla | Muutokset rakenteessa jarruvoiman kasvattamiseksi, laitteen väärinkäyttö | Rummun siirtyminen akselilla | Rumpu ei pyöri tai ei vaikutusta (pieni liike vain pienentää suurinta jarrutusvoimaa) | Ei vaadi korjausta, käyttäjän ohjeistaminen laitteen käyttöön ja rakenteen muutoksiin | Ei vakava, henkilövahingot ei mahdollisia | Melko pieni | |
| 5 | Rummun pinnoite | Köysi luistaa rummulla | Rummun pinnoite kuluu tai köysi likainen | Pinnoitteen hilseily/lohkeilu, köyden likaantuminen | Vetovastus heikenee, köyden ja rummun kuluminen nopeutuu | Tarvittaessa pinnoite uusitaan määräajoin, pinnoitemateriaalin vaihto parempaan | Mitätön, henkilövahingot ei mahdollisia | Mahdollinen | |
| 6 | Köysi | Köysi katkeaa | Köyden liitos pettä, köysi rispaantuu | Liitoksen aukeaminen tai purkautuminen | Laite ei toimi | Varmistetaan, että liitos on luja, seurataan kuntoa käytön aikana | Hyvin vakava, henkilövahingot mahdollisia | Hyvin pieni | Ennen köyden liittämistä on perehdyttävä pleissaukseen |